

USMOS 2011
DÖRDÜNCÜ ULUSAL
SAVUNMA UYGULAMALARI
MODELLEME VE SİMÜLASYON
KONFERANSI

BİLDİRİ KİTABI

EDİTÖRLER

Veysi İŞLER
Halit OĞUZTÜRK
Nur Evin ÖZDEMİR
Bilge Kaan GÖRÜR

14-15 HAZİRAN 2011
ODTÜ KÜLTÜR VE KONGRE MERKEZİ
ANKARA

ISBN: 978-605-88041-0-4

Kapak Tasarım

Aslı YILMAZ

Basım Yeri

X Matbaacılık, Ankara

Telefon

ÖNSÖZ

2005 yılında birincisi yapılan Ulusal Savunma Uygulamaları Modelleme ve Simülasyon (USMOS) Konferansı 2011 yılında dördüncü kez gerçekleştiriliyor. Bu yıl konferans ODTÜ-TSK Modelleme ve Simülasyon Araştırma ve Uygulama Merkezi tarafından Genelkurmay Başkanlığı, Milli Savunma Bakanlığı, Savunma Sanayii Müsteşarlığı, Kara Harp Okulu Savunma Bilimleri Enstitüsü, Deniz Harp Okulu Deniz Bilimleri ve Mühendisliği Enstitüsü ve Hava Harp Okulu Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü desteği ile düzenlenmiştir.

Bu yıl USMOS 2011 konferansına 110 adet bildiri özetini gelmiş, bir sonraki aşamada bunların 89'unun tam metni değerlendirilmek üzere alınmıştır. Değerlendirilen bildiri sayısında önceki yıllarda gerçekleştirilen USMOS konferanslarındanakine oranla önemli bir artış olmuştur. Gonderilen bildiriler toplam 84 program kurulu üyesi arasında paylaştırılmıştır. Her bildiri en az 2 hakem tarafından değerlendirilmiş ve toplam 289 bildiri değerlendirmesi gerçekleştirılmıştır. Bu yıl yapılan iki aşamalı değerlendirme sonucunda 89 bildirinin 70'i kabul edilmiştir. Teması "Ulusal Kritik Teknoloji Olarak Modelleme ve Simülasyon" olan konferansta, kabul edilenler arasında en çok bildirinin yer aldığı konunun 20 bildiriyle "mühendislik uygulamalarında simülasyon" olduğu, buna 15 bildiriyle "karar destek amaçlı modelleme ve simülasyon" ve 8 bildiriyle "dağıtık simülasyon ve birlikte çalışabilirlik" konularının izlediği görülmüştür.

Kabul edilen bildiriler arasında 23 adet bildiri sanayiden, 16 adet bildiri üniversitelerden, 10 adet bildiri Türk Silahlı Kuvvetleri'nden, 3 adet bildiri ise kamu kurumlarından gelmiştir. Kalan bildirilerden 13 adet bildirinin sanayi-üniversite işbirliği kapsamında, 4 adet bildirinin kamu-üniversite işbirliği kapsamında, 1 adet bildirinin ise kamu-üniversite-TSK işbirliği kapsamında hazırlandığı görülmüştür.

Daha önceki konferanslarda olduğu gibi bu yıl düzenlenen konferansa da ilgi oldukça artmış görülmektedir. Hem kayıt olan katılımcı sayısı hem de bildiri sayısında bariz artış bulunmaktadır. Değerlendirmeye alınan bildiri sayısındaki önemli artış Modelleme ve Simülasyon alanında ülkemizde üretilen ve paylaşılan bilginin arttığı anlamına gelmektedir. Milli savunma sanayinde son yillardaki gelişmeler bu tür konferanslara yansımakta, üretilen bilginin bu konferanslarda paylaşımı yoluyla bilginin artışı ve sanayiye dönüşünün hızlanması beklenmektedir.

Bu yıl sergi alanında 24 kurum yer almaktadır. Ayrıca, konferansın son oturumunda "Ulusal Kritik Teknoloji Olarak Modelleme ve Simülasyon" başlıklı bir panel düzenlenmiştir. Bu panelde farklı paydaşların temsilcileri Modelleme ve Simülasyonun ülkemizde kritik bir teknoloji olarak daha etkin üretilmesi ve kullanılması için görüşlerini paylaşacaklardır.

USMOS 2011 ODTÜ, Ankara

Bu konferansın düzenlenmesine katkıda bulunan Genelkurmay Başkanlığı, Milli Savunma Bakanlığı, Savunma Sanayii Müsteşarlığı, Kara Harp Okulu Savunma Bilimleri Enstitüsü, Deniz Harp Okulu Deniz Bilimleri ve Mühendisliği Enstitüsü ve Hava Harp Okulu Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü'ne; ODTÜ Rektörlüğü'ne; Savunma Sanayii İmalatçılar Derneği'ne; konferansın koordinasyon ve yürütme kurullarının üyelerine; konferansın davetli konuşmacısı Erdal Çayırcı'ya; bildirileri değerlendiren hakemlere; deneyim ve birikimlerini paylaşan panel konuşmacılarına; konferansa bildiri gönderen ve sunan yazarlara; oturumları yöneten oturum başkanlarına; sergi alanında yer alan kurumlara; sponsor olan sanayi kuruluşlarına ve tüm katılımcılara teşekkür ederiz.

EDİTÖRLER

Veysi İŞLER

Halit OĞUZTÜRKÜN

Nur Evin ÖZDEMİR

Bilge Kaan GÖRÜR

DÜZENLEYEN KURULUŞLAR



ODTÜ-TSK MODSİM MER



ODTÜ



Genelkurmay Başkanlığı



Milli Savunma Bakanlığı



Savunma Sanayii Müsteşarlığı



Kara Harp Okulu



Deniz Harp Okulu



Hava Harp Okulu

KONFERANS KURULLARI

Koordinasyon Kurulu

Veysi İŞLER (Konferans Başkanı, ODTÜ-TSK MODSİMMER)

Zübeyde ÇAĞLAYAN (SSM)

Mahmut BAYRAK (MSB)

Kadir TEMİZ (Gnkur. Bşk.lığı)

Berna DENGİZ (Başkent Univ.)

Ali IŞIK (Kara Harp Okulu)

İhsan SABUNCUOĞLU (Bilkent Univ.)

Mustafa İhsan KIZILTAŞ (Ortadoğu Teknopark A.Ş.)

Kemal SALAR (Dz. K.K.lığı)

Faruk A. YARMAN (SASAD)

Yürütmeye Kurulu

Veysi İŞLER (Konferans Başkanı, ODTÜ-TSK MODSİMMER)
Halit OĞUZTÜZÜN (Program Kurulu Eşbaşkanı, ODTÜ)
Nur Evin ÖZDEMİREL (Program Kurulu Eşbaşkanı, ODTÜ)
Altan ÖZKİL (Atılım Univ.)
Levent KANDİLLER (Çankaya Univ.)
M. Paşa UYSAL (Kara Harp Okulu)
Nebi GÜL (MSB)
Semra GÜLEÇ (ODTÜ-TSK MODSİMMER)
Bilge Kaan GÖRÜR (ODTÜ-TSK MODSİMMER)
Abdullah Murat ŞENYİĞİT (ODTÜ-TSK MODSİMMER)
Ömer ARSLAN(Gnkur. Bşk.lığı)
Erkan KÖSE (Kara Harp Okulu)
Ekrem Oğuz ÜLKER (SSM)
Elif YAZAR (Ortadoğu Teknopark A.Ş.)
Adnan SUSOY(SSM)
Ahmet DİNÇ(SSM)
Akay ÇAĞLAYAN (Dz. K.K.lığı)
Anıl Bozcuk ŞENGEZER (ODTÜ-TSK MODSİMMER)
Fatih TÜRKSOYU (Gnkur. Bşk.lığı)
Hakan Soner APLAK (Kara Harp Okulu)
Halil Turan KASAPÇOPUR (Kara Harp Okulu)
 İlker AKGÜN (Gnkur. Bşk.lığı)
Kayhan İMRE (Hacettepe Univ.)
Ömer ÇETİN (Hv. Kuv. K.)
Taner ALTUNOK (Çankaya Univ.)

Program Kurulu

M. Ali AKÇAYOL	Sinan KAYALIGİL
İbrahim AKGÜN	Şevki KAYIR
A. Ziya AKTAŞ	Yiğit KAZANÇOĞLU
A. Oğuz AKYÜZ	Saadettin Erhan KESEN
Nafiz ALEMDAROĞLU	Ömer KIRCA
Nedim ALPDEMİR	Erkan KÖSE
Fulya ALTIPARMAK	Funda KURTULUŞ
Taner ALTUNOK	M. Kemal LEBLEBİCİOĞLU
H.Soner APLAK	Halit OĞUZTÜRKÜ
İbrahim ARAS	Aydın OKUTANOĞLU
Haluk AYGÜNEŞ	Bülent ÖRENCİK
Selim Saffet BALCISOY	N. Evin ÖZDEMİREL
Özkan BALİ	Bülent ÖZKAN
Yahya BAYKAL	Yakup ÖZKAZANÇ
Semih BİLGEN	Altan ÖZKİL
Müslüm BOZYİĞİT	Özgür ÖZPEYNİRCİ
Serhat BURMAOĞLU	Tayfur ÖZTÜRK
Aysu Betin CAN	Faruk POLAT
Tolga CAN	Şeref SAĞIROĞLU
Kürşat ÇAĞILTAY	Ümit Sami SAKALLI
Hakan ÇAĞLAR	Osman SAN
Celal Zaim ÇİL	Ece Güran SCHMIDT
Oğuz DİKENELLİ	Canan SEPİL
Ali DOĞRU	Fatih Erdoğan SEVİLGEN
Umut DURAK	Cevat ŞENER
Şebnem DÜZGÜN	Ozan TEKİNALP
Serpil EROL	Tuğba TEMİZEL
Filiz ERSÖZ	M. Caner TESTİK
Uğur GÜDÜKBAY	Hatice Sancar TOKMAK
Serkan GÜMÜŞ	Okan TOPÇU
Murat GÜNAL	İsmail Hakkı TOROSLU
Ziya GÜVENÇ	Ufuk TÜREN
Hüseyin HACIHABİBOĞLU	Y. Ziya UMUL
Mehmet F. HOCAOĞLU	Murat Paşa UYSAL
Kayhan İMRE	Samim ÜNLÜSOY
Veysi İŞLER	Fatoş Yarman VURAL
Mehmet KABAK	İlkay YAVRUCUK
Bilgin KAFTANOĞLU	Adnan YAZICI
Levent KANDİLLER	Ali YAZICI
Kasım Murat KARAKAYA	Orhan YILDIRIM
Ercüment KARAPINAR	Erdal YILMAZ
Orhan KARASAKAL	Orkun ZORBA

USMOS 2011 ODTÜ, Ankara

Koray BAŞBİLEN
Abdulkadir CAN
İsmail KARAOĞLAN
Serkan ÖZKAYMAK
Caner ŞİMŞİR
Çiğdem Alabaş USLU'ya

Bildiri değerlendirmelerine yapmış oldukları katkılarından dolayı teşekkür ederiz.

SPONSORLAR

ANA SPONSOR



RESMİ SPONSORLAR



MEDYA SPONSRLARI



DESTEK VEREN KURULUŞ



EMEĞİ GEÇENLERE TEŞEKKÜR

ODTÜ-TSK MODSİM MER çalışanları

Elmas BAYBÖRÜ

Esma İPEKOĞLU

S. Vedat KARAARSLAN

Burhan KARABİBER

Nurcan ÖZER

Hülya YASAK

Aslı YILMAZ

Konferansın organizasyonunda gösterdiğiniz özverili çalışmalarınız için teşekkür ederim.

Veysi İŞLER
ODTÜ-TSK MODSİM MER Başkanı
USMOS 2011 Konferans Başkanı

İÇİNDEKİLER

Önsöz	III
Düzenleyen kuruluşlar	V
Konferans kurulları.....	VII
Sponsorlar	XIII
Emeği geçenlere teşekkür	XIV
İçindekiler	XIII
Bildiriler	1
Kavramsal modelleme.....	3
Fatih Küçükyavuz, N. Alpay Karagöz, Onur Demirörs. Görev uzayındaki kavramsal modellerin simülasyon uzayındaki modellere dönüşümü.....	3
Ömer Ünal, Okan Topçu. İnsansız suüstü aracı karakol görevinin NATO veri modeli (JC3IEDM) ile modellenmesi	14
Emre Özktük. SMAA – Stokastik çok kriterli kabul edilebilirlik analizi	26
MODSİM sistemleri yönetimi.....	38
Ayçin Gürdamar, Çağatay Ündeğer, Tayfun Cumhur. Hava aracı parametrelerinin optimizasyonu için simülasyon tabanlı tedarik yaklaşımı	38
Oray Kulaç. Modelleme ve simülasyon projelerinde proje yönetim modelleri üzerine bir inceleme	50
Zuhal Kale Demirkiran, Taner Altunok, Altan Özkil. Sistem tedarik sürecinde teknoloji değerlendirmesi için simülasyon kullanımı	59
Mühendislik uygulamaları: Sensörler I.....	67
Nebi Gül, İlker İçen, Ceyda Berk Karakulak. Elektro-optik sistemlerde performansı önceden tanımlayacak bir matematiksel model geliştirilmesinin görüntü yoğunlaştırıcı tüp(GYT)'e uygulaması	67
Kadir Eraltay, Yakup Özkazanç. FMCW radarlarda çoklu hedef çözümleme yeteneğinin modellenmesi ve simülasyonu.....	79
Muhammed Duman, Ali Cafer Gürbüz. Yere işleyen radarda veri benzetimi ve görüntüleme yöntemlerinin geliştirilmesi	90

Eğitim amaçlı MODSİM I	101
Yasin Kaygusuz, Koray Özel, Tolga İnal. Dağınık aviyonik mimariler için küçük ölçekli bir uçuş gösterge simülatörü tasarım ve uygulaması.....	101
Ertan Çınar, Fulya Aybek, Cem Çetek, Aydan Cavcar. Radar simülöründe yeni teknolojilerin kullanımı ve hava trafik kontrol eğitimi'ne katkıları	113
Fulya Aybek, Ertan Çınar, Cem Çetek, Aydan Cavcar. Hava trafik kontrol eğitimi ve meydan kapasitesi geliştirilmesinde meydan kontrol simülörü uygulamaları.....	123
Karar destek amaçlı MODSİM I	134
Ahmet Kabarcık, Levent Kandiller, Haluk Aygüneş. Ağların hareketli yol-kesici tarafından en kısa güzergâh kullanılarak kesilmesi.....	134
Murat Karakaya. Yollardan geçiş güvenliğini sağlayacak bir sensör ağının modellenmesi ve uygulanabilirliğinin benzetimle denenmesi	146
Mehmet Özer Metin, Mert Karadağlı, Onur Ak. Güvenlik zafiyet analizi ve risk değerlendirme sistemi	158
Kerem Kaynar, Mehmet Özer Metin. Siber güvenlik ve trafik analiz simülasyon ortamı	170
Mühendislik uygulamaları: Sensörler II	182
Koray Başbilen, Murat Efe, Murat Atun, Orkun Zorba. Radar benzetiminde oluk etkisinin modellenmesi	182
Ozan Doğan, Tayfun Aykırı, Abdullah Kurtoğlu. SAR sistem tasarımı amacıyla bir mühendislik aracı	193
Caner Özdemir, Betül Yılmaz, Feyza Toktaş. Yüksek freksnlarda büyük ve karmaşık hedeflerin radar kesit alanı benzetimi yazılımının geliştirilmesi	202
Halil Uysal, Ali Rıza Bozbulut, Mete Sevencan. Geniş bantlı elektronik karıştırıcı etkinliğinin uzay – zaman uyarlamalı radar sistemlerinde bastırılmasının modellenmesi	212
Dağıtık simülasyon ve birlikte çalışabilirlik I	223
Kerem Kaynar, Mehmet Özer Metin. Büyük ölçekli ağlar için sanal sınama ortamı	223
Hüseyin Kutluca, Turgay Çelik, Günay Özkan. Füze sistemleri için geliştirilecek benzetimlerinde taktik çevre benzetimi kullanımı	235

USMOS 2011 ODTÜ, Ankara

Ahmet Turan Değerli, Remzi Akdağ. Üç boyutlu ve dağıtık mimarili bir ateş destek benzetimi	242
Cemil Akdemir, Cüneyt Ay, Hüsnü Karaküçük, Yasemin Timar. Dağıtık simülasyon sistemlerinde performans analiz altyapısı	253
Karar destek amaçlı MODSİM II.....	265
Koray Başbilen, Serdar Çetinkaya, Levent Kandiller. Bir harp oyunu simülasyonunda amfibi harekât uygulaması	265
İpek Seyran Topan, Levent Kandiller, Haluk Aygüneş. Amfibi harekâttâ yükleme bindirmenin optimizasyonu	276
Ömer Arslan, Ernur Kemik. Simkit kütüphanesi kullanılarak geliştirilmiş örnek bir ayrık olay simülasyonu	288
Halil Cicibaş, Kadir Alpaslan Demir, Nafiz Arica. İnsansız hava araçları için çok kriterli güzergah planlama modeli	297
Fizik tabanlı MODSİM	309
Hasan Korucu, Polat Gülkan. Yüksek hızlı mermi darbesine maruz bırakılan donatılı ve çelik tel kataklı beton plakların deneysel ve nümerik sonuçları: Modelleme, simülasyon ve doğrulama	309
Bora Kalpaklı, Hakan I. Tarmal, Yusuf Özyörük. Patlama ve şok dalgalarının benzetimi için güçlü ve pratik bir sayısal benzetim yöntemi	320
Mehmet Burak Özakın, Serkan Aksoy. Kuvazi-statik zaman uzayı sonlu farklar yöntemi ile dalga denklemi tabanlı iki boyutlu kartezyen koordinatlarda düşük frekanslı metal detektörü benzetimi	332
Tolga Sönmez, H. Burak Kaygısız, Bekir Şen, Nail Çadallı. Düşük maliyetli ataletsel ölçerlerle yönelim tespit sistemi algoritmasının simülasyonu ve Iphone 4 ölçerlerine uygulanması	342
Simülasyon altyapıları I	353
Aslı Yılmaz, Deniz Yılmaz, Abdullah Murat Şenyiğit, Bilge Kaan Görür, Veysi İşler. Genel amaçlı araştırma simülatörü : Donanım ve yazılım altyapısının tasarılanması ve geliştirilmesi	353
Olgun Karademirci, Altan Özkil. Web tabanlı sistemler için simülasyon model önerisi	365
Fatih Çelik, Ahmet Zengin. İnternet sistemlerinin analizi için ayrık olaylı bir simülasyon çerçevesi	374

Temsili ortamlar ve görselleştirme I	386
Ahmet Erdem, Serhat Turhan, Şenol Lokman Aldanmaz, Serap Erkorkmaz, Başar Kasım, Mesut Gözütok. Simülasyon sistemlerinde varlık modelleri oluşturma	386
Mesut Gözütok, Başar Kasım, Burak İlter, Anıl Yiğit Filiz, Mehmet Ömer Özek. Etmen tabanlı simülasyon uygulamalarında merkezi işlem birimi ve grafik işlem birimi kullanarak dağıtık optik algı hesaplaması	394
Serdar Sultanoğlu, Özgür Balcı, Serkan Gazel. Karar destek ve modelleme ortamı olarak 3 boyutlu sanal küre yazılımı	404
Mühendislik uygulamaları: Platformlar I	414
Engin Fırat, Vahap Oğuz Tokmak, Veysi İşler. Araç dinamiği modellenmesi, simülasyonu ve görselleştirilmesi	414
Anıl Yılmaz, Hasan Günal, Namık Kılıç, Y. Samim Ünlüsoy. Paletli araç dinamiğinin sayısal benzetimlerle incelenmesi	426
Onur Çulha, Vedat Ekütekin. Ataletsel seyrüsefer sistemi (ASS) hata analizi için geliştirilen simülasyon aracı	435
Eğitim amaçlı MODSİM II	443
Hakan İşçi, Sema Şimşek. İnsan hatası analizi için hata simülasyonu	443
Yasin Kaygusuz, Soner Uyar, Çağrı İlçe. Uçak uyarı sistemlerinin, eğitimlerde kullanım ve analiz amaçlarıyla hazırlanmış bir bilgisayar simülasyonu tasarım örneği	452
Engin Kurşun, Türkan Karakuş, Aslı Yılmaz, Kürşat Çağıltay, Veysi İşler, Ümit Tezcan, Serkan Gürdal. Eğitmen konsol yazılımları için kullanıcı arayüzü kılavuzu geliştirilmesi ve geçerleme süreci	464
Karar destek amaçlı MODSİM III	474
H. Umut Akın, Altan Özkil. Sağlık sektöründe modelleme ve simülasyon: Hastane röntgen servisi uygulaması	474
Yunus Emre Karamanoğlu, Coşkun Karaca. Lojistik dağıtım sistemi için simülasyon optimizasyon uygulaması	484

Mühendislik uygulamaları: silah ve mühimmat.....	496
H. Kemal Şenyılmaz, Birsel Dedehayır. Seramik yüzey geometrisinin, balistik darbe sonrasında destek plakasında meydana gelen deformasyon miktarına etkisinin sayısal olarak incelemesi	496
Namık Kılıç, Yılmaz Erbil, Atıl Erdik, Bülent Ekici, Abdulkadir Ekşi. 7,62 mm zırh delici mühimata karşı perfore zırh plakalarının balistik davranışları505	
Bülent Özkan, M. Kemal Özgören, Gökmen Mahmetyazıcıoğlu. Tek ve iki parçalı füzelerin hareketli ve manevra yapan yer hedeflerine karşı başarımlarının karşılaştırılması	514
Simülasyon altyapıları II	524
Aylin Hatip, Serkan Başaran, Birkan Kurşun. Döngüde donanım sistemi simülasyonu	524
Deniz Karakaş, Mehmet Karakaş, Hakan Tiftikçi, Özkan Karagöz. Türk insansız hava aracı ANKA'nın uçuş simülasyon ortamı	535
Hüseyin Bacanak, Hatice Güder, Uğur Arıkan, Umut Durak. Çoklu insansız hava aracı simülasyonları için altyapı çözümü	547
Temsili ortamlar ve görselleştirme II	555
Erhan Tercan, Bahtiyar Ünver, Mehmet Ali Hindistan. Üç boyutlu cevher yatağı modelleme ve maden ocağı tasarlama	555
Hacer İlhan, Zümra Kavafoğlu, Haşmet Gürçay. Poligonlar için farklı kesintisiz dönüşüm yöntemlerinin karşılaştırılması	565
Anıl Yiğit Filiz, Başar Kasım, Burak İlter, Mehmet Ömer Özak, Mesut Gözütok, Şafak Tulumoğlu. Etmen tabanlı simülasyonlarda fiziksel çarışma testleri	575
Mühendislik uygulamaları: Platformlar II	587
İbrahim Gökhan Gökçeli, Yakup Özkazanç. İnsansız bir helikopterin yanal uçuş kontrol sistemlerinin modellenmesi ve simülasyonu	587
Eren Kahraman, Uğur Zengin, Volkan Nalbantoğlu, Nafiz Alemdaroğlu. İnsansız bir hava aracı için yönetim çözümü algoritması ve otomatik pilot uygulaması	597
Emre Güleç, Semih Tekelioğlu, Mehmet Burak Solmaz, Nilay Sezer-Uzol, Ünver Kaynak. Yakıt pilli insansız hava aracı tasarım ve benzetimi	608

Dağıtık simülasyon ve birlikte çalışabilirlik II	620
Serkan Özkaymak, Aziz Bekkine, Serdar Tuğçaç, Orkun Zorba. Simülasyon sistemleri için milli bir birlikte çalışabilirlik altyapısı: SimBA	620
Mehmet F. Hocaoğlu. ETSİS: Etmen tabanlı simülasyon sistemi	632
Mert Tuğcu, Oral Gürel. Taktik data link teknolojilerinde birlikte çalışabilirlik ve kritik simülasyon bileşenleri	644
Turgay Çelik, Hüseyin Kutluca, Günay Özkan. Yüksek seviye mimari uyumluluğu dağıtık benzetimlerin kolay birlikte çalışabilirlik ve tekrar kullanılabilirliği için yeterli midir?	655
Karar destek amaçlı MODSIM IV.....	667
Ferhat Uçan, D. Turgay Altılar. Gerçek zaman kısıtları altında seyrüsefer planlamaya yeni bir yaklaşım	667
Serkan Gazel, Serdar Ak. Koridor analizi ile optimum güzergah probleminin çözümü	679
Çağlar Seylan, Özgür Saygin Bican, Fatih Semiz. İnsansız araçlarla düzlemsel olmayan alanların taraması	688
Hakki Murat Genç, Cevdet Okutan. Torpido güdüm metodlarının karşılaştırılması ve durağan / hareketli engellere karşı yörunge planında değişiklikler	699
Mühendislik uygulamaları: Platformlar III	710
Fatih Geridönmez, Nafiz Alemdaroğlu. Bir sualtı aracı için gürbüz kontrolcü tasarımı	710
Umut Özen. Bir denizaltı matematiksel model uygulaması.....	720
Fatih Altunel, Halil Bil, Murat Aykan. Çekili dizinlerin akışkan-kinematik etkileşimli olarak modellenmesi	730
Melek Ertogan, Şeniz Ertuğrul, Metin Taylan. Gemilerde yalpa sönmleyici aktif fin sistemi benzetimi ve deneysel uygulaması.....	741
Yazar Dizini	753

BİLDİRİLER

GÖREV UZAYINDAKİ KAVRAMSAL MODELLERİN SİMLASYON UZAYINDAKİ MODELLERE DÖNÜŞÜMÜ

Fatih Küçükyavuz ^(a), N. Alpay Karagöz ^(b), Onur Demirörs ^(c)

^(a) Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Enformatik Enstitüsü, 06531, ANKARA
e159696@metu.edu.tr

^(b) Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Enformatik Enstitüsü, 06531, ANKARA
alpay@ii.metu.edu.tr

^(c) Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Enformatik Enstitüsü, 06531, ANKARA
demirors@metu.edu.tr

ÖZ

Kavramsal model, gerçek sistemden doğrulanmış bir model oluşturmayı sağlamasıyla benzetim geliştirme yaşam döngüsünün vazgeçilmez bir parçası olmuştur. KAMA aracı da görev uzayı kavramsal model geliştirme sürecine yeni bir metodoloji sunmuştur. Grafiksel olarak temsil ettiği metamodel elemanları sayesinde KAMA, kavramsal modelin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. SISO ise benzetim uzayında kavramsal modelleme yapabilmek için BOM adında yeni bir konsept ortaya koymuştur.

KAMA gereksinim analiz ve geliştirme aşamalarındaki modellerin oluşturulmasını amaçlarken, BOM benzetimin tasarım ve geliştirme aşamalarındaki modeller için kullanılmaktadır. Dolayısıyla benzetimin geliştirme yaşam döngüsü boyunca, gereksinim analiz aşamasındaki elde edilen bilginin benzetimin tasarlanması ve geliştirilmesi aşamalarına aktarılma gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Biz de bu çalışma kapsamında KAMA ile geliştirilmiş görev uzayı kavramsal modellerinin BOM benzetim uzayına dönüştürülmesi için bir yöntem önermekteyiz. Çözüm önerimiz de KAMA modellerini BOM modelleri ile eşleyerek KAMA'dan BOM'a dönüşüm yapmak olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Benzetim Uzayı, BOM, Görev Uzayı, KAMA, Kavramsal Model

TRANSFORMING CONCEPTUAL MODELS OF THE MISSION SPACE INTO SIMULATION SPACE MODELS

ABSTRACT

Helping to abstract a valid model from real system, conceptual modeling is an essential phase in simulation development lifecycle. With the development of the KAMA framework, a new methodology was presented to develop mission space conceptual model for simulation systems. It provides metamodel elements represented by graphical diagrams to develop conceptual models of mission space. BOM, developed by SISO, is another conceptual modeling concept serving for simulation space.

KAMA models are very close to problem domain and intend to model real world concepts in requirement analysis and development phase. Whereas, being vital inputs for the simulation design phase, BOM models are closer to solution domain. Hence there is no defined way of using the captured mission space knowledge in simulation space, problem arises when moving from requirement analysis to design phase. In this study, to solve this problem, we propose a method for transforming mission space conceptual models in simulation space. Our solution approach will be mapping the KAMA mission space models with BOM simulation space models for automatically transport real world analysis results to simulation designers.

Keywords: BOM, Conceptual Modeling, KAMA, Mission Space, Simulation Space

1. GİRİŞ

Kavramsal model; benzetimlerin amaçlarını, girdi ve çıktılarını, içeriğini ve ilgili varsayımları içermesiyile, benzetim geliştirme yaşam döngüsünün vazgeçilmez bir parçası olmuştur [1].

Kavramsal model kendi içerisinde, soruna yönelik görev uzayı ve çözüme yönelik benzetim uzayı kavramsal modelleri olarak ikiye ayrılmaktadır.

Biz de bu çalışma ile gereksinim analiz aşamasında alan uzmanlarının KAMA aracı ile geliştirdiği görev uzayı kavramsal modellerini, yazılımın tasarım ve geliştirim aşamalarında kullanılabilmesi için BOM benzetim uzayı modellerine dönüşümü için bir yöntem önermekteyiz. Çalışmanın kapsamı da, doğrudan ya da dolaylı olarak model eşlemelerinin yapılması ve bu eşlemelere dayanarak görev uzayından benzetim uzayına dönüşümün yapılması olmaktadır.

2. KAMA

KAMA (Kavramsal Modelleme Aracı) üç temel bileşen üzerine kurulmuştur. Bu üç bileşen sırasıyla; UML tabanlı modelleme notasyonu, kavramsal modelleme süreci ve modelleme işini kolaylaştırma amacıyla geliştirilen modelleme yazılımıdır [2].

UML tabanlı KAMA notasyonu da üç ana paketten oluşmaktadır:

- Görev uzayı paketinde benzettimin üst seviye gereksinim ve amaçları ile bu görevleri gerçekleştiren iş akış detayları gösterilmektedir. Bu pakette görev uzayı ve iş akış diyagramları kullanılmaktadır.
- Yapısal pakette ise varlık-ontoloji, varlık-iliski, komuta hiyerarşi ve organizasyon yapı diyagramları kullanılarak gerçek hayatıki varlıkların modellenmesi yapılmaktadır.
- Son paket olan dinamik davranış paketinde ise varlıkların gerçek hayatı bulduğu durumları, bu durumlar arasındaki geçişleri göstermek için durum çizenekleri kullanılmaktadır.

3. BOM (Base Object Model)

SISO (Simulation Interoperability Standards Organization), benzettimlerin birlikte çalışabilirliği ve yeniden kullanılabilirliğini artırmak için BOM'u geliştirmiştir [3].

BOM temel olarak; Model Kimliklendirme Bilgileri (Model Identification), Kavramsal Model Tanımları (Conceptual Model Definition), Model Eşlemeleri (Model Mapping) ve Nesne Modeli Tanımları (Object Model Definition) bölümlerinden oluşmaktadır. Bu çalışmanın ilgili alanına giren Kavramsal Model Tanımları bölümünde benzettim uzayı kavramsal modellemenin yapılabilmesi için Etkileşim Örütüleri (Pattern of Interplay), Durum Çizenekleri (State Machine), Varlık (Entity Type) ve Olay Tanım (Event Type) modelleri geliştirilmektedir.

BOM, FEDEP (Federation Development and Execution Process) 1. ve 2. adımlarla da uyumlu olacak şekilde, benzettim gereksinimlerini yerine getirmek amacıyla, benzettimin hedeflerini, kısıtlarını ve yapılan varsayımları tanımlar [4].

4. SORUN ve KAPSAM

4.1. Görev ve Benzettim Uzayı Kavramsal Modelleri

Kavramsal modelleme kullanım amacına göre görev ve benzettim uzayı olarak iki farklı bölüme ayrılmaktadır. Görev ve benzettim uzayında yapılan kavramsal modellemeler,

benzetim çalışmalarında farklı amaçlara hizmet etseler de, birçok ortak özellikle sahiptirler.

Pace, görev uzayı kavramsal modellemeyi benzetimin uygulama alanındaki amacı olarak tanımlar. Görev uzayında, önemli varlıkların durumları, davranışları ve diğer varlıklarla ilişkilerinin tanımlandığını belirtir. Benzer şekilde, benzetim uzayı kavramsal modellemeyi de benzetimin tasarılanmasını ve geliştirilmesini destekleyen bir ileri seviye soyutlama olarak açıklar [5].

Pace'e ilave olarak Aysolmaz da görev ve benzetim uzayındaki farka vurgu yapmıştır. Aysolmaz'a göre görev uzayı yapısı gereği gereksinim analiz aşamasında kullanılırken, benzetim uzayı daha çok benzetimin amaçlarını ve kısıtlarını göztererek benzetimin yeteneklerini tanımlamak için tercih edilmektedir [6].

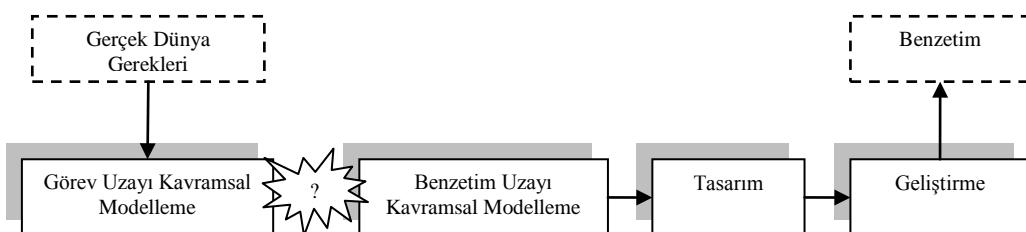
Özet olarak görev ve benzetim uzayı kavramsal modelleri arasındaki farklar Çizelge 1'de gösterildiği gibidir.

Çizelge 1: Görev ve benzetim uzayı karşılaştırması

Görev Uzayı	Benzetim Uzayı
Benzetimin temsili ile ilişkilidir	Benzetimin kontrolü ile ilişkilidir
Gerçek hayat varlık ve süreçleriyle ilgilenir	Benzetim yazılımının yetenekleri ile ilgilenir
Sorunu tanımlamak için kullanılır	Çözümü tanımlamak için kullanılır
Benzetim alan uzmanları tarafından kullanılır	Benzetim yazılımının tasarımcı ve geliştiricileri tarafından kullanılır
Gereksinimi analiz ve geliştirme aşamalarında kullanılır	Benzetimin tasarılanması ve geliştirilmesi aşamalarında kullanılır

4.2. Sorun

Bu çalışma ile çözülmek istenen sorun Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1: Görev ve benzetim uzayı kavramsal modelleme arasındaki dönüşüm eksikliği

Tipik bir benzetim geliştirme süreci, benzetim alan uzmanlarının benzetimde kullanılacak olan gerçek hayat varlıklarını analiz etme işi ile başlar. Alan uzmanları

gerçek hayatı varlıkların kabiliyet ve niteliklerini belirlemenin yanında benzetimin hedeflerini ve kullanıcı gereksinimlerini nasıl karşılayacağını da tanımlar.

Görev uzayındaki bu kavramsal modelleme aşamasından sonra benzetim yazılım tasarımcıları benzetimde geliştirilecek olan varlıkları ve bu varlıklar arasındaki ilişkileri modeller. Ancak bu defa yapılan modelleme gerçek hayatı ilişkileri tanımlamak yerine, benzetim içerisinde gerçekleştirimin nasıl yapılacağı yönündedir.

Her ne kadar geliştirilen modellerin amaçları farklı olsa da, görev ve benzetim uzayında geliştirilen modeller ortak bilgiler içermektedir. Her iki modelleme aşamasında da varlıklar ve durumları, amaçları gerçekleştirmek için gereken iş akışları modellenmektedir. Bu ortak özelliklere rağmen günümüzde, görev uzayında elde edilen analiz bilgilerinin benzetim uzayına nasıl aktarılması yönünde tanımlı bir çalışma bulunmamaktadır. Sonuç olarak görev uzayında harcanan eforun hemen hemen aynısı benzetim uzayında da harcanmaktadır. Ayrıca görev ve benzetim uzayı arasındaki eşgüdümleme işleri hataya açık bir şekilde manuel olarak yapılmaktadır.

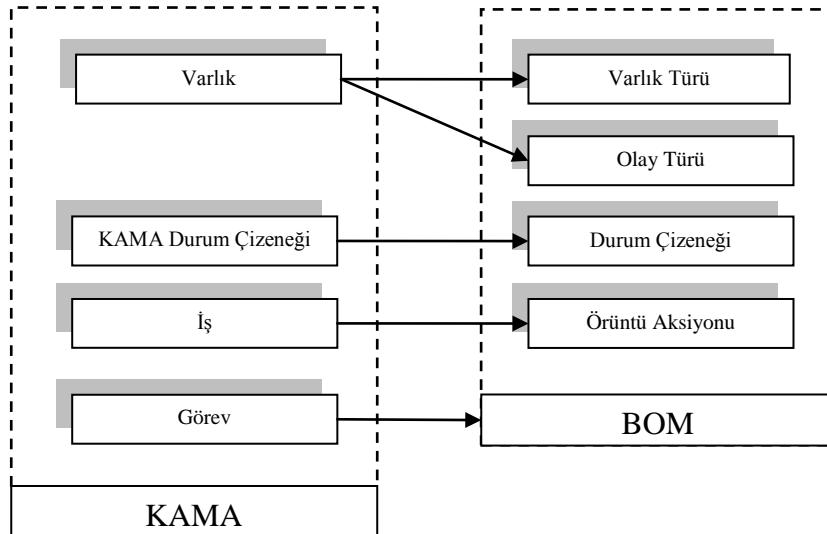
Özetlemek gerekirse bu çalışmada çözmeye çalıştığımız sorunları aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- Görev ve benzetim uzayı arasındaki iletişim köprüsünün olmaması
- Görev ve benzetim uzayı arasındaki manuel eşgüdümün zor olması nedeniyle kavramsal modelleme yaklaşımından kaçınılması, kullanımın azalması
- Benzer bilgileri modellemek için aynı işin iki kez yapılması
- Benzetim alan uzmanları ve benzetim yazılım tasarımcıları arasındaki iletişim yolu eksikliği

7. ÖNERİLEN ÇÖZÜM

Bu bölümde, bir önceki bölümde belirtilen sorunları çözmek için görev uzayı modellerini, benzetim uzayı modellerine dönüştürme önerimizi tanımlıyoruz. Bu dönüşümde KAMA modellerini dönüşümün kaynağı olarak seçerken BOM modellerini de dönüşümün hedefi olarak belirledik.

Dönüşüm için ilk önce model bazında analiz yapıp eşlenen modelleri belirledik. Analiz sonucunda belirlediğimiz eşleşmeler Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2: Üst seviye KAMA-BOM eşleşmeleri

7.1. Eşleme Detayları

Üst seviye model eşlemelerini yaptıktan sonra, model nitelikleri üzerinden analizler yapıp doğrudan veya dolaylı yoldan eşleşebilecek olanları belirledik.

Görsel açıdan eşlemeleri daha iyi ifade edebilmek için çizelge notasyonunu kullanıp, eşleme sonuçlarını değişik renk kodları ile gösterme yolunu seçtik. Bu gösterim yönteminde çizelgelerdeki yeşil satırlar doğrudan eşlenen nitelikleri, sarı satırlar dolaylı olarak başka bir model niteliği ile eşlenenleri son olarak da kırmızı satırlar eşleme yapılamayan nitelikleri gösterir.

Her KAMA ve BOM modeli *İsim* niteliğine sahiptir, dolayısıyla eşlemeler anlatırken bu eşleme tekrar tekrar anlatılmayacaktır.

KAMA Varlık ve BOM Varlık Türü eşlemeleri Çizelge 2'de gösterilmektedir. Bu çizelgede tüm *KAMANiteliklerinin* ve *Varlık İlişkilerinin* BOM *Karakteristikleri* ile eşleştiği görülebilir.

Çizelge 2: KAMA Varlık-BOM Varlık Türü eşlemeleri

KAMA Varlık	BOM Varlık Türü
İsim	İsim
KAMANitelikleri	Karakteristikler
İsim	İsim
KAMAKabiliyetleri	
İsim	
İlişkiler	Karakteristikler
İsim	İsim

Çizelge 2'de belirtilen eşlemede doğrudan kullanılamayan *KAMAKabiliyetleri* Çizelge 3'de görüleceği üzere BOM Olay Türü ile eşleşmektedir. BOM'daki tüm Olay Türleri *KAMAKabiliyetleri* ile oluşturulabilmektedir. Kabiliyetlerin işlemesi/kullanılması kaynak varlık tarafından tetiklendiği için Olay Türünün *Kaynak Karakteristiği* alanı Varlığın *İsmi* ile eşleşmektedir. Bu tür doğrudan eşlemelerin yanında, KAMA İş Akış diyagramlarının yardımıyla dolaylı eşlemeler de yapılmaktadır. Buna göre *Hedef Karakteristiği* alanı İş Akış diyagramında belirtilmiş olan bir sonraki İşin ilişkili olduğu varlığını *İsmi* ile eşlenir. Benzer şekilde İşlerin *Girdileri* ve *Cıktıları* BOM Olay Türünün *İçerik Karakteristiğini* oluşturmak için kullanılır. Son olarak İş Akış diyagramındaki koşullar Olay Türünün *Tetikleme Koşulunu* belirtir.

Çizelge 3: KAMA Varlık-BOM Olay Türü eşlemeleri

KAMA Varlık	BOM Olay Türü
İsim	Kaynak Karakteristiği
KAMANitelikleri	
İsim	
KAMAKabiliyetleri	
İsim	İsim
	Hedef Karakteristiği
	İçerik Karakteristiği
	Tetikleme Koşulu
İlişkiler	

KAMA Durum Çizeneği ile BOM Durum Çizeneği arasındaki eşlemelerin hemen hemen hepsi doğrudan eşlemedir. Bu durum Çizelge 4'te gösterilmektedir. Durum eşlemelerinde, *KAMADurumları* BOM *Durumlarına* dönüşürken *KAMAİlkDurum* ve *KAMASonDurum* nitelikleri BOM'daki ilk ve son *Durumları* göstermektedir. Ayrıca *Çıkış Koşulu* *KAMAGeçişi* ile eşlenmekte ve bu eşleme esnasında *Tetikleme Olayı*, *Koşul* ve *Aksiyon* BOM *Çıkış Aksiyonunu* oluşturmak için kullanılmaktadır. Son olarak da *Hedef Durum* BOM Durum Çizeneğindeki *Sonraki Durum* ile doğrudan eşlenmektedir.

Çizelge 4: KAMA Durum Çizeneği-BOM Durum Çizeneği eşlemeleri

KAMA Durum Çizeneği	BOM Durum Çizeneği
İsim	İsim
KAMADurum	Durum
İsim	İsim
KAMAİlkDurum	- ilk durum ile eşlenir
KAMASonDurum	- son durum ile eşlenir
KAMAGeçiş	Çıkış Koşulu
Tetikleme Olayı	Çıkış Aksiyonu
Koşul	- Çıkış Aksiyonunun bir parçasıdır
Aksiyon	- Çıkış Aksiyonunun bir parçasıdır
Görev Bağlamı	
Hedef Durum	Sonraki Durum

Dönüşüm sırasında KAMA'da tanımlı her Görev, benzetim uzayında yeni bir BOM'a karşılık gelir. Çizelge 5'de görüleceği üzere bu dönüşümde, Görevler yeni oluşturulan BOM'u tanımlayan Model Kimliklendirme Bilgileri bileşeni ile eşleşirler. Bu bileşenin *Amaç* alanı doğrudan Görevin *Amaçlar* alanı ile eşlenmektedir.

Çizelge 5: KAMA Görev-BOM Model Kimliklendirme Bilgileri eşlemeleri

KAMA Görev	BOM Model Kimliklendirme Bilgileri
İsim	İsim
Girdiler	
Cıktılar	
Önkoşullar	
Sonkoşullar	
Amaçlar	Amaç
Roller	
İşler	
İlk İş	
Son İş	

Çizelge 6'da görüldüğü üzere KAMA İş-BOM Örüntü Aksiyonu dönüşümünde, *İsim*, *İlk İş*, *Son İş* ve *Sıra* doğrudan eşlemelerinin yanında birçok dolaylı eşleme de yapılmaktadır. Bu dolaylı eşlemelerde en çok faydalanan diyagram, KAMA İş Akış diyagramı olmaktadır. KAMA İş Akış diyagramında İşlerden sorumlu olan *Roller* BOM Örüntü Aksiyonlarının *Gönderen* ve *Alan* varlık alanlarını belirlemenin yanında *KAMAKabiliyetleri* ile eşlenmiş olan *Olay* alanlarının da oluşturulmasını sağlamaktadır. Bunun yanında Örüntü Aksiyonunun *BOM* alanı da eşlenen İş'in atası olan Görevin *İsmi* ile belirlenmektedir.

Etkileşim Örüntülerinin normal akışı dışındaki akışları olan *Aykırı Durum* ve *Varyasyon* akışları da KAMA İş Akış diyagramlarındaki karar noktaları (decision point) ile belirlenir. Bu karar noktalarında ayrılan kollardan *Son İşte* sonlananlar *Aykırı Durumlar* ile eşlenirken karar koşul sonucu “*Hayır*” olanlar *Varyasyonları* oluşturmaktadır. Bunlara ek olarak *Aykırı Durum Koşulu* ve *Varyasyon Koşulu* alanlarının her ikisi de İş Akış diyagramının karar koşulu ile eşlenirler.

Bahsedilen bu doğrudan ve dolaylı eşlemelerin yanında eşlenmeyen alanlar da vardır. Bu alanlar kırmızı arkaplan ile renklendirilmiştir.

Çizelge 6: KAMA İş-BOM Örütü Aksiyonu eşlemeleri

KAMA İş	BOM Örütü Aksiyonu
İsim	İsim
- İş çalışma sırası ile eşlenir	Sıra
	Gönderen
	Alan
	Olay
	BOM
	Aykırı Durum
	İsim
	Gönderen
	Alan
	Olay
	BOM
	Koşul
	Varyasyon
	İsim
	Gönderen
	Alan
	Olay
	BOM
	Koşul
Girdiler	
Cıktılar	
Önkoşullar	
Sonkoşullar	
Amaçlar	
Roller	
Genişleme Noktası mı	
Genişleme Noktası Kimliği	
İlk İş	- ilk aksiyon ile eşlenir
Son İş	- son aksiyon ile eşlenir

8. SONUÇ

Birçok benzetim geliştirme sürecinde alan uzmaları kavramsal konseptleri analiz etmek için görev uzayında kavramsal modelleme yaparlar. Daha sonraki aşamada ise benzetim yazılım tasarımcıları, benzetimin geliştirilmesini desteklemek amacıyla benzetim uzayında kavramsal modeller geliştirirler. Ancak günümüzde alan uzmanlarının oluşturduğu bu kavramsal model çalışma sonuçlarını benzetimin yazılım tasarım aşamasına taşıyacak bir yöntem olmadığı için yapılan çalışmaların tekrarı/benzeri benzetim uzayında da yapılmakta ve görev uzayı ile benzetim uzayı arasında eşgüdümleme sorunları ortaya çıkmaktadır.

Biz de bu sorunları ortadan kaldırmak için, KAMA görev uzayı modelleri ile BOM benzetim modelleri arasında önce geçerli eşlemeleri bulup, daha sonra bu eşlemeleri kullanarak KAMA'dan BOM'a sistematik dönüşüm kuralları belirledik.

Dönüşüm kurallarımızın uygulanabilirliğini bir adet örnek-olay ile test ettik. Bu örnek-olayda; üzerinde RWR sistemi bulunan bir helikopterin kendisine yönelik olan RF

güdümlü füzelere karşı tedbir uygulamasını modelledik. Önerilen çözüm bölümünde belirttiğimiz gibi önce KAMA ile görev uzayı kavramsal modellerimizi oluşturup, dönüşüm kurallarımızı uygulayarak BOM'a dönüşümü sağladık [7].

Kurallarımızı belirledikten sonra gördük ki, bir çok alan doğrudan ya da dolaylı olarak dönüştürülebilmekte fakat bazı alanlar ise eşleme yapılamadığı için dönüştürülememektedir. Bu sonuç bizim öngörülerimize uygundu çünkü biliyoruz ki KAMA ve BOM her ne kadar ortak bilgiler içерse de, kullanım alanlarının farklı olmasından dolayı bir uzayda geçerli olan bilgi diğer uzayda geçerli olamayacaktı.

Sonuç olarak bu çalışmanın benzetim dünyasına aşağıdaki faydaları sağlayacağını düşünmekteyiz:

- Gerçek hayat analiz bilgilerinin, benzetimin tasarımları ve gerçekleştirilmesi aşamalarına sistematik bir şekilde iletilebilmesi.
- Benzer, bazen da aynı bilgileri modellemek için harcanan toplam zamanın kısalması. Aynı işin tekrar tekrar hem görev hem de benzetim uzayında yapılmasının önlenmesi.
- Görev ve benzetim uzayı arasındaki eşgündümün daha kolay yapılabilmesi sonucunda her iki alanda da kavramsal model kullanım oranının artırılması.
- Benzetim alan uzmanları ile yazılım tasarımcıları arasında iletişim köprüsünün kurulması.
- Görev uzayındaki her Görevin benzetim uzayında yeni bir BOM'a karşılık gelmesi ile benzetimlerin birlikte çalışabilirliği ve yeniden kullanılabilirliğinin artırılması.

Sonuç olarak inanıyoruz ki önerdiğimiz bu yöntem benzetimin gereksinim analiz aşamasından gerçekleştirm aşamasına olası bir geçişte önemli bir alt adımı oluşturacaktır. Bizim çalışmamız bu geçişte benzetim yazılımının tasarlanması aşamasında bitmektedir ancak BOM'un bize sağladıkları düşünüldüğünde ve ilerde yapılacak olan çalışmalar sonucunda görev uzayı modellerinden benzetimin gerçekleştirilmesi aşamasına geçişin olabileceğini ve bu geçişin otomatik bir şekilde gerçekleşebileceğini düşünüyoruz.

9. KAYNAKÇA

- [1] Robinson S, Brooks R, Kotiadis K, Van der Zee D-J. Conceptual Modeling for Discrete-Event Simulation, 2010.
- [2] Karagöz NA. A Framework for Developing Conceptual Models of the Mission Space for Simulation Systems. Department of Information Systems, vol. PhD. Ankara: Middle East Technical University, 2008.

- [3] SISO (Simulation Interoperability Standards Organization). Base Object Model (BOM) Template Specification. 2006.
- [4] IEEE Computer Society. Recommended Practice for High Level Architecture (HLA) Federation Development and Execution Process (FEDEP). 2003.
- [5] Pace DK. Conceptual Model Descriptions. 1998.
- [6] Aysolmaz B. A Study on Conceptual Modeling in Simulation Systems: An Extended Methodology for KAMA. Department of Information Systems, vol. MSc. Ankara: Middle East Technical University, 2007.
- [7] Küçükyavuz F, Karagöz NA, Demirörs O. Constructing Bridges Between Mission Space Conceptual Models and BOM. Proceedings of the Spring Simulation Interoperability Workshop. Boston, USA, 2011.

İNSANSIZ SUÜSTÜ ARACI KARAKOL GÖREVİNİN NATO VERİ MODELİ (JC3IEDM) İLE MODELLENMESİ

Ömer Ünal ^(a), Okan Topçu ^(b)

^(a) Deniz Bilimleri ve Mühendisliği Enstitüsü, Tuzla/İstanbul, ounal@dho.edu.tr

^(b) Deniz Harp Okulu Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Tuzla/İstanbul, otopcu@dho.edu.tr

ÖZ

NATO'nun Müşterek Komuta Kontrol ve Konsültasyon Bilgi Değişim Veri Modeli (JC3IEDM), askerî bilginin ortak kullanılabılır bir yapıda tanımlanmasını sağlayan bilgi değişim tokusu modelidir. Harekât sahasında cereyan eden/edecek askerî bilgilerin bu dille ifade edilebilmesi bu modelin oluşturulmasının hareket noktalarından birisidir. Bu çalışmada, askerî alanda insansız araçların daha çok kullanılmaya başlandığı göz önüne alınarak, bir insansız suüstü aracına verilebilecek en temel görevlerden birisi olan karakol görevinin NATO JC3IEDM yapısı ile nasıl ve ne kadarının modellenebildiği incelenmiş ve bu kapsamda mevcut veri modeline uygulanabilecek eklentiler ortaya koyulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Alana Özel Modelleme, İnsansız Suüstü Aracı, JC3IEDM

MODELING UNMANNED SURFACE VEHICLE PATROL TASK WITH NATO DATA MODEL (JC3IEDM)

ABSTRACT

NATO JC3IEDM is an information exchange model, which enables the military information to be defined in a common structure. Defining the objects and the events occurring in the operational field is a major goal of this model. In this study, considering the increase in the use of Unmanned Surface Vehicles (USV) for military purposes, we examined that how and how much of a patrol mission given to an USV can be modeled with NATO JC3IEDM structure and we proposed some extension points for the model.

Keywords: Domain Specific Modeling, Unmanned Surface Vehicle, JC3IEDM

1. GİRİŞ

İnsansız suüstü araçları (İSÜA) deniz harekât sahasında, genellikle uzun süren, yorucu ve tehlikeli bazı deniz operasyonlarında kullanım alanı bulmaktadır. Bu araçlar genellikle sahilde bulunan kontrol istasyonları ile yönlendirilerek, üzerinde taşıdıkları radar, sensör ve silahları sayesinde, muharip bir suüstü platformunun icra edeceği temel fonksiyonları yerine getirebilmektedir. Bu çalışmada, bir İSÜA'ya verilebilecek en temel görevlerden birisi olan karakol görevi ele alınarak JC3IEDM [1] ile modellenmesi yapılmıştır.

Multilateral Interoperability Programme (MIP)¹ tarafından geliştirilen bir metamodel olan JC3IEDM, harekât tasarılayan ve icra eden askerî karargâh tarafından, diğer karargâhlarla iletişimde bulunulmak istenen askerî öneme haiz bilginin tanımlandığı bir dildir. Komuta Kontrol ve Bilgi Sistemleri (C2IS) veritabanları arasında bilginin otomatik olarak transfer edilmesini sağlar. Temel NATO askerî dokümanları referans alınarak hazırlanan bu veri modelinin temel tasarım hedefi, müttefik veya çok uluslu operasyonlarda transfer edilebilecek minimum veri setinin ifade edilebilmesidir [1]. JC3IEDM, hâlihazırda harekât planı, emir ve raporların C4ISR sistemleri tarafından otomatik olarak işlenebilmesine olanak sağlayacak alana özel bir dil olan Koalisyon Harp Yönetim Dili (C-BML) [2] tarafından temel veri modeli olarak da kullanılmaktadır. C-BML halen taslak bir standart olup SISO² tarafından standartlaştırma çalışmaları devam etmektedir.

Her ülke veya kullanıcı topluluğunun, JC3IEDM veri transfer gereksinimlerini ve veri sözlüğünü kendi ihtiyaçlarına göre genişletmesi mümkündür [1]. JC3IEDM gereksinimleri incelendiğinde, İSÜA ile ilgili operasyonların ele alınmadığı tespit edilmiştir. İSÜA kullanımının henüz yaygınlaşmaya başladığı göz önüne alınarak, İSÜA kullanım konseptleri doğrultusunda bilgi transfer gereksinimlerinin tespit edilerek bu model içerisinde yer olması gerektiği düşünülmektedir. Bu çalışmanın amacı, bu model kullanılarak bir İSÜA'ya verilebilecek bir karakol görevinin modellenmesinin nasıl ve ne seviyede yapılabileceğinin incelenmesi, bu doğrultuda JC3IEDM'nin yeterliliğinin ortaya konulması ve mevcut veri modeline uygulanabilecek eklentilerin çıkarılmasıdır. Diğer bir yorden; bu çalışmanın, daha geniş bir kapsamda, C-BML üzerinde yapılmasına devam edilmektedir. JC3IEDM, C-BML'in bir alt modeli olduğu için bu çalışma bir nevi ön çalışma olarak konumlandırılabilir ve kıyaslama imkânı sunması beklenmektedir.

¹ <http://www.mip-site.org/>

² Simulation Interoperability Standards Organization, <http://sisostds.org/>

1.1 Genel Çözüm ve Metodoloji

Metamodel, modellenmek istenen bir alanla ilgili iskelet yapının, kuralların ve kısıtların analizi sonucu oluşturulan bir modelleme dilidir. Metamodel kullanılarak modeller oluşturulur ki bunlar metamodel kurallarına, yani alanla ilgili kurallara doğal olarak uygun hazırlanmış olurlar. Bu çalışmada, JC3IEDM metamodel olarak alınmış ve karakol görevi modellenmiştir. Öncelikle, İSÜA ve karakol görevi hakkında alan analizi yapılarak kavramsal model yani yazılı bir (hayali) karakol emri oluşturulmuştur. Sonrasında kavramsal model JC3IEDM kullanılarak modellenmiştir.

JC3IEDM modeli üzerinde CA ERwin Data Modeler [3] yazılımı kullanılarak çalışıldıktan sonra model ileri mühendislik yapılarak Microsoft Access ortamına aktarılmış ve JC3IEDM yapısındaki her varlığa (entity) karşılık gelen veritabanı tablolarına modellenecek olan karakol görevine ilişkin veri girişleri yapılarak çalışma gerçekleştirilmiştir.

Bildirinin bu bölümünü takip eden yapısı şu şekildedir: İlkinci bölümde NATO JC3IEDM tanıtılmış, üçüncü bölümde İSÜA ve karakol görevi analiz edilmiş, dördüncü bölümde karakol görevinin JC3IEDM'deki ifadesi incelenmiş, beşinci bölümde mevcut veri modeline yapılması gereken eklentiler belirtilmiş, altıncı bölümde ilgili çalışmalar, yedinci bölümde sonuç ve yorumlar, sekizinci bölümde ise sonraki çalışmalar sunulmuştur.

2. JC3IEDM VERİ MODELİ

JC3IEDM³, harekât planlama ve icra faaliyeti yürüten askerî veya sivil bir karargâh veya komuta merkezi tarafından, diğer karargâhlarla transfer edilme ihtiyacı duyulan askerî öneme haiz bilginin tanımlanabilmesine olanak tanıyan bir dildir. Temel amaç harekât sahasının tanımlanması ve C2IS veritabanları arasında bağlantı yaratmaktadır [1]. Komuta kontrol sistemleri arasında transfer edilmek üzere ihtiyaç duyulan operasyonel ve teknik bilginin asgari seviyede tanımlanabilmesi hedeftir [1]. JC3IEDM, temel olarak varlık (entity), varlıkların öznitelikleri (attribute) ve varlıkların birbiriyile olan ilişkilerinin (relationship) tanımlandığı bir metamodel ve bu metamodel kullanılarak oluşturulan bir model'den oluşmaktadır. Her varlık bir veritabanı tablosuna karşılık gelmektedir. Modeldeki her tabloya veri girişleri yapılarak modellenecek bilginin sunumu mümkündür.

³ Bu çalışmada JC3IEDM 20090514 Edition 3.0.2 versiyonu kullanılmıştır.

3. ALAN ANALİZİ

Bir İSÜA sahilde, limanda, gemide vb. bulunan bir kontrol istasyonu tarafından yönlendirilen küçük deniz aracıdır. Bu araçlar otonom, manüel kumandalı veya yarı otonom olabilirler. İSÜA'ların birçok görev için kullanılabileceği düşünülmektedir: keşif-gözleme ve karakol, kuvvet koruma, anti-terör, elektronik harp, mayın harbi başlıca görevler olarak belirtilebilir.

3.1. Karakol Görevi için İSÜA

Karakol görevi verilecek olan İSÜA'nın bazı özelliklere sahip olduğu varsayılmıştır. İSÜA üzerinde suüstü radarı, seyrüsefer cihazları ve görüntü/fotoğraf çekme maksatlı dijital bir kamera mevcuttur. İSÜA Denizde Çatışmayı Önleme Tüzüğüne (DÇÖT) uygun seyredebilmekte, ayrıca herhangi bir suüstü temasının şüpheli hareketini tespit edebilmektedir. Hem gece hem gündüz çalışabilen İSÜA, kontrol istasyonuna tüm temas ve diğer bilgileri gerçeğe yakın zamanlı göndermekte, bu bilgiler kontrol istasyonunda bir ekranda sergilenebilmektedir.

3.2. İSÜA için Oluşturulmuş Örnek Bir (Hayali) Karakol Görevi

Farazi olarak, denize kıyısı olan ve korunması gereklili bir tesisin etrafında İSÜA tarafından icra edilmek üzere bir karakol görev emri tasarlanmıştır. Tesiste konuşlu olduğu varsayılan 3 adet Devriye1, Devriye2 ve Devriye3 isimli İSÜA ve bunların komuta ve kontrolünün yürütüldüğü sahilde konuşlu olduğu varsayılan kontrol istasyonu (control station) tarafından görev icra edilmektedir. Bu emrin herhangi resmi bir formatla ilgisi olmayıp, karakol görevinde bulunması gereken hususlar göz önüne alınarak senaryo tabanlı hazırlanmıştır. Hazırlanan emir sayfa kısıtı nedeniyle bütün olarak makaleye konmamış, sadece önemli hususlar belirtilmiştir. Genel olarak görevin senaryosu aşağıda olduğu gibidir.

Karakol görevinde, 4-10 Ocak 2010 tarihleri arasında, her gün, belirtilen saat aralıklarında, belirtilen sahalarda, belirtilen İSÜA'nın, belirtilen karakol paternini uygulaması emredilmektedir. İSÜA karakol süresince 10 mil içerisindeki tüm temasları (gerçek zamanlı olarak) rapor etmekte ve 5 mil içerisinde giren tüm temasların azami yaklaşma noktası (AYN) zamanında resim ve görüntü kaydını alarak kontrol istasyonuna göndermektedir. Eğer bilinmeyen bir temasın rotası yasaklı sahaya doğruysa ve yasaklı sahaya olan mesafesi 5 milden azsa, o temas İSÜA tarafından VHF kanal 16'dan uyarılmakta, temas rotasını değiştirmezse rotasından saptırmak için İSÜA manevra yapmakta ve kontrol istasyonuna alarm sinyali göndermektedir. Karakol sürati 10 mildir.

4. İSÜA KARAKOL GÖREVİ İÇİN JC3IEDM MODELİ

Bu bölümde, üçüncü bölümde anlatılan karakol emrinin analizi yapılarak, NATO JC3IEDM veri modelinde nasıl ifade edildiği gösterilmiştir. JC3IEDM incelendiğinde, en temel yapılarından olan nesne (object) ve faaliyet (action) yapılarıyla genel olarak emrin modelleneceği anlaşılmıştır.

4.1. Emirdeki nesneler (Objects)

Emirde bulunan ve JC3IEDM'de tanımlanan nesneler şunlardır: İSÜA'lar (Devriye1, Devriye2, Devriye3), sahalar (Restricted Area, Area Alpha, Area Bravo, Area Charlie) ve diğer unsurlar (Berthing Place No.1, Berthing Place No.2, Control Station, Any Surface Contact, Unknown Surface Contact).

4.1.1. Nesnelerin JC3IEDM'de İfadesi

Bu nesneler JC3IEDM'de bulunan object-item ve object-type varlıklarından (entity) biriyle ifade edilmiştir (bkz. Tablo 1 ve 2). Tekil olarak ifade ettiğimiz ve özel isim alan nesneler (ör. A Limanı, B Birliği) JC3IEDM'de object-item tablosu ile; tip (sınıf) olarak ifade ettiğimiz nesneler (ör. liman, birek) ise object-type tablosu ile tanımlanmaktadır. Bu bağlamda, herhangi bir suüstü teması ve bilinmeyen herhangi bir suüstü teması nesneleri object-type tablosunda, bunların haricinde kalan ve bölüm 4.1'de sıralanan diğer nesneler object-item tablosunda yer almıştır. Object-item tablosunda her nesnenin ismi ve nesnenin tipini gösteren kategori kodu (category-code) belirtilmektedir. Veri modelinin yapısı incelenerek İSÜA'ların material tipinde, sahaların feature tipinde, bağlama yerlerinin facility tipinde, kontrol istasyonunun ise organisation tipinde tanımlanması yapılmıştır.

Tablo 1. Object-Item tablosu

object-item-id	object-item-category-code	object-item-name-text
1001	MATERIEL	Devriye1
1005	FEATURE	Area Alpha
1009	FACILITY	Berthing Place No.1
1010	ORGANISATION	Control Station

Tablo 2. Object-Type tablosu

object-type-id	object-type-category-code	object-type-name-text
1011	MATERIEL-TYPE	Any Surface Contact
1012	MATERIEL-TYPE	Unknown Surface Contact

4.2. Emirdeki Faaliyetler (Actions)

Faaliyetler JC3IEDM'de action yapısında belirtilmektedir. Modellemeye yardımcı olmak üzere Tablo 3 oluşturularak emirdeki her bir faaliyeti icra eden (resource) ve faaliyetin

hedefi olan (objective) nesneler belirtilmiştir. Bu tablo, emirdeki karakol detayları, saha tahsisleri ve karakol süresince icra edilen tüm faaliyetler çıkarılarak oluşturulmuştur.

Tablo 3. Faaliyetler tablosu

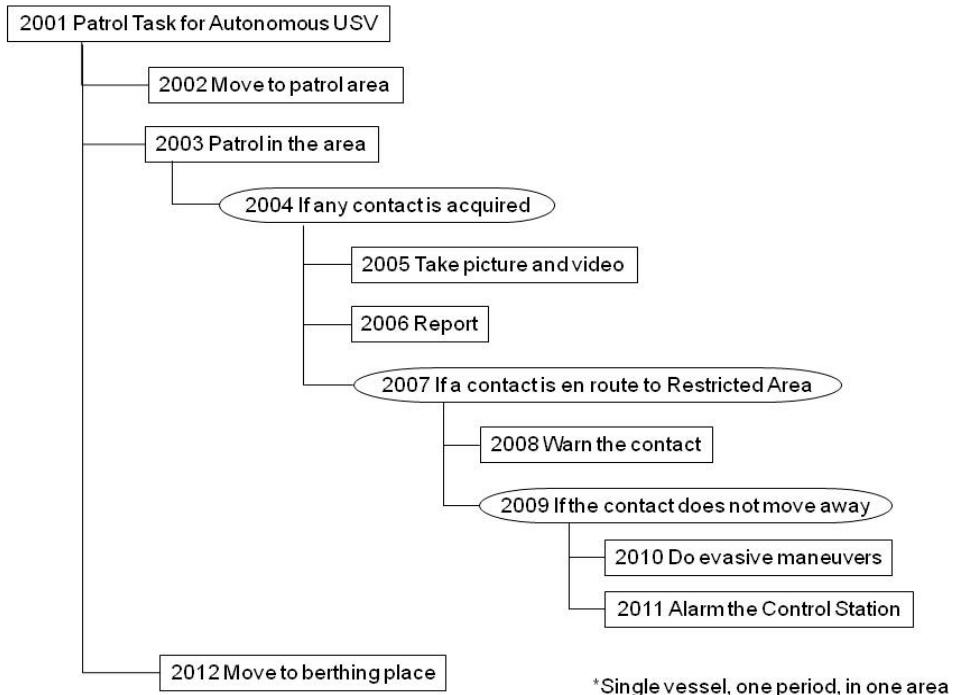
Identifier	Resource	Activity	Objective
2001	Auto USV ⁴	Patrol Operation	Area Alpha
2002	Auto USV	Move to	Area Alpha
2003	Auto USV	Patrol in	Area Alpha
2004	Auto USV	Acquire	Any Surface Contact
2005	Auto USV	Take pictures and video of	Any Surface Contact
2006	Auto USV	Report	Any Surface Contact
2007	Unknown Surface Contact	Is en route to	Restricted Area
2008	Auto USV	Warn via Ch.16	Unknown Surface Contact
2009	Unknown Surface Contact	Does not move away from	Restricted Area
2010	Auto USV	Do evasive maneuvers against	Unknown Surface Contact
2011	Auto USV	Alarm	Control Station
2012	Auto USV	Move to	Berthing Place

4.2.1 Faaliyetlerin Fonksiyonel İlişkisi

Faaliyetlerin JC3IEDM'de tanımlanmasına yardımcı olması maksadıyla oluşturulan, emirdeki faaliyetlerin birbirleriyle olan fonksiyonel ilişkisi Şekil 1'de sunulmuştur. Dikdörtgenler görevin alt faaliyetlerini, ellipsler ise koşulları ifade etmektedir. Temel faaliyet 2001 kodlu karakol görevidir. Diğer görevler bunun alt faaliyetleri olarak tanımlanmıştır. Karakol görevi sahaya intikal, sahada karakol icrası ve limana dönüş alt faaliyetlerinden oluşmaktadır. Sahada karakol icrası faaliyeti ise tabloda görülen koşul faaliyetleri ve koşulun olması durumda yapılacak alt faaliyetleri içermektedir. Faaliyet akışı su şekildedir: Sahada karakol icra edilirken herhangi bir suüstü teması sağlanırsa temasın fotoğraf ve videosu çekilecek, kontrol istasyonuna rapor edilecektir. Eğer bilinmeyen bir temasın rotası yasaklı sahaya doğruysa temas İSÜA tarafından uyarılacak, temas rotasını değiştirmezse, teması rotasından saptırıcı manevra yapılacak ve kontrol istasyonu alarma geçirilecektir. Dikkat edilirse faaliyetlerin ayrıntıları (örneğin, emirde

⁴Auto USV, otonom kontrollü USV anlamına gelmektedir.

temasın fotoğraf çekimi AYN zamanında ve 10 sn. süresince çekileceği belirtilmiştir) Tablo 3'te belirtilmemiş durumdadır. Bunlar ileride açıklanacak tablolarda yer alacaktır.



Şekil 1. Faaliyetlerin fonksiyonel ilişkisi

4.2.2. Temel Faaliyet (Action) Yapısı

JC3IEDM'de faaliyetlerin ifadesinde kullanılan action yapısı ve ilişkide bulunduğu varlıklar şöyledir: Her faaliyet bir action-event ya da bir action-task olmalıdır. Action-event, meydana plan dışı gelmiş ve askerî öneme haiz olan bir faaliyeti; action-task, görev olarak icra edilecek bir faaliyeti tanımlamada kullanılır. Action-resource faaliyetin öznesini, action-objective faaliyetin hedefini tanımlar. Action-functional-association tablosu ile faaliyetlerin birbirleriyle olan fonksiyonel ilişkileri tanımlanır: alt görev, bir görevin gerçekleşmesi için önce diğerinin gerçekleşmesi gerekliliği gibi. Action-temporal-association tablosu ile faaliyetlerin zamansal olarak gerçekleşme sırası belirtilir. Faaliyetler, özne ve hedeflerinin belirlenmesinde nesnelerle (object-item, object-type) ilişkilidir.

4.2.3. Faaliyetlerin JC3IEDM'de İfadesi

JC3IEDM'de her faaliyet action tablosunda, bunlardan görev olarak nitelendirilenler action-task tablosunda (bkz.Tablo 4), koşullar ise action-event tablosunda (bkz.Tablo 5) oluşturulmuştur. Faaliyetlerin detayları action-task ve action-event-detail (bkz.Tablo 6) tablolarında ayrıntılı olarak ifade edilebilmiştir.

Tüm faaliyetlerin öznelerinin ifadesi için action-resource tablosu ve bu tabloya ilaveten, öznisi object-item olanlar için action-resource-item, öznisi object-type olanlar içinse action-resource-type tabloları kullanılmıştır. Aynı şekilde action-objective, action-objective-item ve action-objective-type tabloları oluşturulmuştur.

Tablo 4. Action-Task tablosu

action-task-id	action-task-activity-code	action-task-planned-start-datetime	action-task-start-qualifier-code	action-task-planned-end-datetime	action-task-end-qualifier-code	action-task-detail-text
2001	Patrol Operation	20100104 0001	At	20100104 0200	At	Patrol Operation with speed of 10 knots using a BUTTERFLY pattern. All reports, picture and video transfer will be real-time.
2005	Take pictures and video of	20100104 0001	--	20100104 0200	--	Take pictures and 10 seconds of video at CPA time of all contacts in 5 miles.

Tablo 5. Action-Event tablosu

action-event-id	action-event-category-code
2007	Suspicious Movement

Tablo 6. Action-Event-Detail tablosu

action-event-id	action-event-detail-index	action-event-detail-classification-code	action-event-detail-text
2007	1	Military	Is en route to
2007	2	Military	Is in 5 miles of

Faaliyetlerin fonksiyonel ve zamansal ilişkileri Tablo 7 ve Tablo 8'de tanımlanmıştır. Bu tablolar Şekil 1 esas alınarak doldurulmuştur. Yani anılan ilişkilerin JC3IEDM'deki karşılığı bu tablolardır. Örneğin, has as a sub-action, bir faaliyet diğerinin alt faaliyetidir anlamında; in response to, bir faaliyetin diğerine karşılık olarak icra edildiği anlamında; in order that, bir faaliyetin diğerinin gerçekleşmesi maksadıyla yapıldığı anlamında kullanılmıştır.

Tablo 7. Action-Functional-Association tablosu

action-functional-association-subject-action-id	action-functional-association-object-action-id	action-functional-association-index	action-functional-association-category-code
2001	2002	1	Has as a sub-ACTION
2005	2004	1	In response to
2004	2007	1	In order that

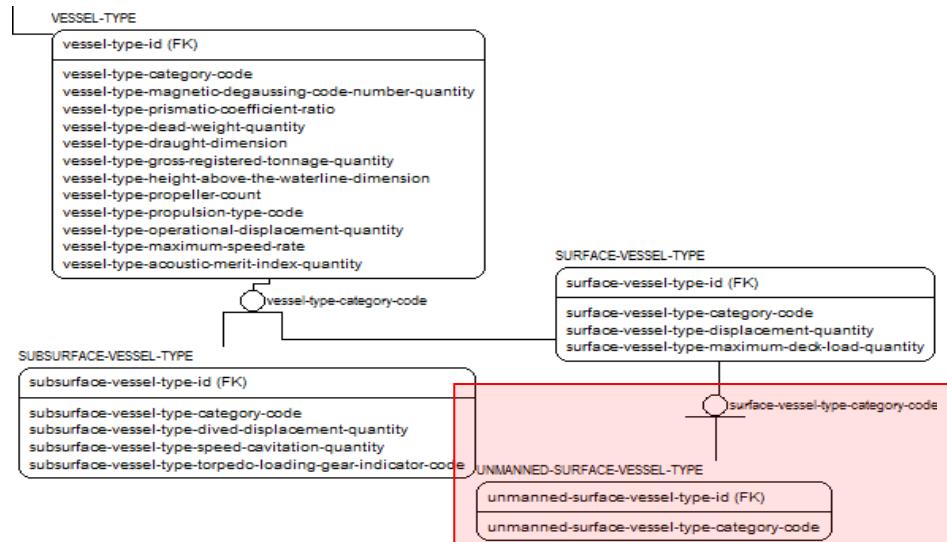
Tablo 8. Action-Temporal-Association tablosu

action-temporal-association-subject-action-id	action-temporal-association-object-action-id	action-temporal-association-index	action-temporal-association-category-code
2003	2002	1	Starts after end of
2010	2009	1	Starts after start of

5. EKLENTİ NOKTALARI

5.1. İnsansız Suüstü Aracı Eklentisi

İSÜA’yı bir robotik sistem olarak değerlendirdiğimizde JC3IEDM modelinde bulunan suüstü aracı varlığının İSÜA özelliklerini tanımlamada yetersiz kaldığı değerlendirilmiştir. Çünkü otonomi seviyesi (otonom, manuel gibi), kullanım menzili, maksimum kullanım süresi, haftalık (veya aylık) toplam kullanım süresi, ana görev fonksiyonu gibi özellikler suüstü aracı varlığı kullanılarak belirtilemez. İnsansız Suüstü Aracının ayrı bir sınıf olarak tanımlanabilmesi maksadıyla unmanned-surface-vessel-type varlığı, surface-vessel-type varlığının alt kategorisi (subcategory) olarak oluşturulmuştur. İnsansız suüstü araçlarına ait başka özellikler de attribute olarak bu tabloda belirtilebilecektir.

**Şekil 2.** İnsansız suüstü aracı eklentisi

Karakol görevi açısından baktığımızda İSÜA’ları modellemek için, suüstü aracı varlığı genel olarak yeterli olmakla birlikte, yeni ve kullanım konseptleri henüz geliştirilme aşamasında olan İSÜA’larla (ya da insansız araçlarla) ilgili yukarıda bahsedilen özellikler ve ilave olarak akıllı etmen etkileşimleri için gereken bazı özelliklerin (bir karakol emrinin

akıllı etmenin değerlendirip gerekli görevleri çıkarması gibi) insansız araç kullanımı yaygınlaşıkça JC3IEDM'de yer almasının (minimum veri seti içinde) kaçınılmaz olacağı düşünülmektedir. Bu eklenti sayesinde veri modelinde sorgulama yapılarak insansız suüstü araçları, bunlara verilen görevler, vs. kolaylıkla sergilenebilecektir. Şekil 2'de bu varlığın JC3IEDM metamodelinde eklendiği yer kırmızı alan içerisinde belirtilmektedir.

5.2. Periyotlar

Dördüncü bölümde anlatılan nesne ve faaliyet ilişkileri emirdeki sadece tek bir periyot için (4 Jan 2010, 0001B-0200B) oluşturulmuştur. Action-task tablosunda bir faaliyetin sadece bir başlama ve bir bitiş zamanı belirtilebilmektedir. Ancak, bizim örneğimizde 2001 kodlu karakol görevinin birden fazla zaman dilimlerinde yapılması gerekmektedir: 0001B-0200B, 0400B-0700B, 1100B-1330B gibi. Yani bir faaliyetin birden fazla başlama ve bitiş zamanı, yani periyotları mevcuttur. Oluşturulacak periyot tabloları sayesinde her faaliyet için dördüncü bölümdeki işlemleri ayrı ayrı yapmak yerine, her faaliyeti periyot tablolarıyla ilişkilendirerek bu işlem daha pratik hale gelmektedir. Bu maksatla period ve action-task-period isimli iki varlık oluşturulmuştur. Period tablosu (bkz. Tablo 9) her bir periyodun başlama ve bitiş zamanını belirtmede kullanılırken, action-task-period tablosu (bkz. Tablo 10) ise periyotlarla faaliyetleri ilişkilendirmekte, bir faaliyetin hangi periyotlarda icra edileceğini belirtmektedir. Action-task tablosuna action-task-period tablosu ilişkilendirilerek bu gerçekleştirilebilir.

Tablo 9. Period tablosu

period_id	period_start_time	period_end_time
1	0001B	0200B
2	0400B	0700B
3	1100B	1330B

Tablo 10. Action-Task-Period tablosu

action-task-id	period_id	action-task-period-index	action_task_period_repetition_code	action-task-period-start-datetime	action-task-period-end-datetime
2001	1	1	Every Day	4 JAN 2010	10 JAN 2010
2001	2	1	Every Day	4 JAN 2010	10 JAN 2010
2001	3	1	Every Day	4 JAN 2010	10 JAN 2010

6. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Modellemede mantıksal ifadelerin tanımlanmasında yaşadığımız zorluk, JC3IEDM'nin genel olarak durumlar hakkındaki gerçeklerin ifadesi için kullanıldığı, mantıksal yapıların ifadesi için zengin yapılara sahip olmaması [4] ile açıklanabilir.

Ulicny [5] vazife, düşman, arazi ve hava durumu, askerî birlikler, zaman ve sivil mülahazalar faktörlerinin JC3IEDM'de temsil edilebilirliğini incelemiştir. JC3IEDM'de

görevlerin (task) tanımlanmasında, gruplandırılmış bir görev kümesine vazife niyetinin verilememesi bir eksiklik olarak belirtilmiştir. Ayrıca angajman kurallarının özelliklerinin tanımlanamadığı, düşman doktrininin ve düşmanın muhtemel hareket tarzlarının tanımlanamadığı, action-event varlığının tekrarlayan olayları tanımlamada yetersiz kaldığı, insan yapımı tesislerin gereken ayrıntıda tanımlanamadığı ifade edilmiştir.

Matheus [6] JC3IEDM’nin asimetrik harple ilgili faaliyetlerde yetersiz kaldığını, miktar belirtmenin JC3IEDM’de mümkün olmadığını ve şimdi veya gelecekte gerçekleşmesi gerekip gerçekleşmeyen olayların tanımlanamadığını tespit etmiştir.

7. SONUÇ VE YORUMLAR

Bu çalışmada insansız bir suüstü aracına verilecek bir karakol görevinin NATO JC3IEDM veri modeli ile modellenmesi yapılmıştır. Bu sayede JC3IEDM ile ileride yapılabilecek modelleme çalışmaları için bir örnek uygulama oluşturulması hedeflenmiştir. Aynı zamanda, İSÜA tam olarak harekât konseptlerine girmediği için bunun JC3IEDM ile bildiğimiz bir uygulaması yoktur.

Yapılan modelleme ve analiz çalışmaları neticesinde veri modelinin yetersiz kaldığı noktalar tespit edilmeye çalışılmıştır. Emrin modellenmesinde, sebep-sonuç ilişkisine dayalı mantıksal ifadelerin tanımlanmasında zorluk yaşandığı tespit edilmiştir. Başka bir faaliyetin oluşmasını tetikleyen koşulların ifadesi için action-event ve action-functional-association yapıları ile yetinilmiştir.

Genel olarak karakol görevi açısından baktığımızda JC3IEDM’nin bir İSÜA karakol görevi modellenmesi için yeterli olduğunu söyleyebiliriz, ancak yeni ve kullanım konseptleri henüz geliştirilme aşamasında olan insansız suüstü araçlarının, özellikle robotik sistem olarak düşündüğümüzde ayrı bir tip olarak JC3IEDM’de yer olması gerekiği değerlendirilmiştir. Bu nedenle unmanned-surface-vessel-type eklentisi yapılmıştır. Aynı şekilde karakol görevlerinin doğasında olan bir periyot boyunca görev tekrarlılığının ifadesi için sadeleştirme maksadıyla periyot eklentisi önerilmiştir. JC3IEDM tasarımda çok uluslu operasyonlarda kullanılacak minimum veri setinin oluşturulması hedeflenmesine rağmen, ülke veya toplulukların kendi kullanım ihtiyaçlarına göre eklentiler yapılabilmesi mümkündür [1]. Bu bakımdan, anılan eklentilerin zaruri olmadığı not edilmelidir. Bunun sebebi de bu modellemenin normal bir suüstü aracına verilecek olan karakol emrinden pek farkının olmaması olduğu düşünülmektedir. Yine de, insansız araç kullanımı yaygınlaşıkça bu ve benzer eklentilerin JC3IEDM’de yer almasının (minimum veri seti içinde) kaçınılmaz

olacağı düşünülmektedir. Ayrıca, insansız araç için mantıksal karar gerektiren koşulların iyice ve açık olarak tanımlanması gerektiği açıklır.

8. SONRAKİ ÇALIŞMALAR

Yaratılmış olan model ile veritabanı programının veya farklı bir ortamın (Ör. Eclipse) araçları kullanılarak yazılacak bir yorumlayıcı (interpreter) sayesinde otomatik üretim yapılması (örneğin görev emrinin üretilmesi) ya da model üzerinde çeşitli analizlerin yapılması sağlanabilir. Örneğin, İSÜA'lar, bunlara verilen görev raporları, görev periyot ve süreleri göz önüne alınarak kullanım oranları sorgulamaları yapılabilir. Çalışmanın tamamlılık kazanması için oluşturulacak bir “İnsansız Araç Kullanım Konsepti” referans alınarak diğer görevler için de modelleme çalışması yapılması gerekmektedir.

Ayrıca aynı çalışmanın daha kapsamlı olarak C-BML ile yapılması devam etmektedir. Bu sayede C-BML'in insansız araçlara ilişkin görevlerinin modellenmesindeki yeterliliğinin analizi ve C-BML'in bu alanda JC3IEDM ile kıyaslanması yapılabilecektir.

9. KAYNAKÇA

- [1] Multilateral Interoperability Programme (MIP). (2009), *The Joint Command, Control and Consultation Information Exchange Data Model, JC3IEDM MAIN-DMWG Edition 3.0.2*, Greding, Almanya.
- [2] Simulation Interoperability Standards Organization. (2008), *Phase 1 Specification for Coalition Battle Management Language Draft v0.12*. Orlando, Florida, ABD.
- [3] Computer Associates. (2009), Product Brief: CA ERwin® Data Modeler R7.3.
- [4] Demers, H., Duquet, J.R., Lockheed Martin Canada. (2008), *SATAK Knowledge Representation and Automated Reasoning with JC3IEDM, Task 4—Knowledge Representation Capabilities and Limitations of JC3IEDM and P-JC3IEDM, Contractor Report*, Defence R&D Canada: Valcartier, Quebec, Kanada.
- [5] Ulicny, B., Matheus, C., Powell, G., Dionne, R. ve Kokar, M. (2007), Representability of METT-TC Factors in JC3IEDM, *12th International Command and Control Research and Technology Symposium*.
- [6] Matheus, C., Ulicny, B., Powell, G. ve Kokar, M. (2009), On the Formal Representation of Enemy Courses of Action, *14th International Command and Control Research and Technology Symposium*.

SMAA-STOKASTİK ÇOK KRİTERLİ KABUL EDİLEBİLİRLİK ANALİZİ

Emre ÖZKÜTÜK^(a)

^(a) MSB ARGE ve Teknj.D.Bşk.lığı / KHO SAVBEN, emre.ozkutuk@msb.gov.tr

ÖZ

Stokastik çok kriterli kabul edilebilirlik analizi (SMAA) metodları kriter ölçütlerinin belirsiz ya da hatalı olduğu ve karar vericilerden bazı nedenlerden dolayı tercih bilgisini temin etmenin zor olduğu kesikli Çok Kriterli Karar Verme problemleri için geliştirilmiştir. SMAA çoklu karar vericiler için ağırlık uzayının araştırılmasına dayanan bir çok kriterli karar destek tekniğidir. SMAA için çok boyutlu integraller içeren formülasyon, belirsiz kriter değerleri ve eksik tercih bilgisinin esnek ve ayrıntılı bir şekilde modellenmesine izin verir. Çok boyutlu integraller genellikle sayısal teknikler kullanılarak hesaplanır. SMAA metodunda bu maksatla Monte Carlo simülasyonu kullanılmıştır.

Bu çalışmada, SMAA'nın tanımı yapılmış, farklı versiyonları anlatılmış ve SMAA sonuçlarını bulabilmek için Tommi TERVONEN tarafından Java tabanlı olarak geliştirilmiş JSMAA programı hakkında bilgi verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: SMAA, Çok Kriterli Kabul Edilebilirlik Analizi, Çok Kriterli Karar Verme

SMAA-STOCHASTIC MULTICRITERIA ACCEPTABILITY ANALYSIS

ABSTRACT

SMAA methods have been developed for discrete multicriteria decision-making problems, where criteria measurements are uncertain or inaccurate and where it is for some reason difficult to obtain accurate or any preference information from the DMs. Stochastic multicriteria acceptability analysis (SMAA) is a multicriteria decision support technique for multiple decision makers based on exploring the weight space. The formulation of SMAA containing multidimensional integrals allows flexible and detailed modelling of the uncertain criteria measurements and preference information.

Multidimensional integrals can be computed by using numerical techniques. For this purpose, SMAA methods use Monte-Carlo simulation.

In this paper the SMAA has been defined, the versions of the SMAA have been explained and the information about the JSMAA which developed by Tommi TERVONEN in order to calculate the SMAA conclusions has been given.

Keywords : SMAA, Stochastic multiobjective acceptability analysis, multicriteria decision-making problems

1. GİRİŞ

Literatürde genellikle karar destek işlemi karar vericilerden elde edilen tercih bilgisine dayanır. Gerçek hayatta bazı durumlarda karar vericiler tarafından bu tür bilgilerin sağlanması çok güç ya da imkânsız olabilir. Stokastik çok kriterli kabul edilebilirlik analiz (SMAA) metodları kriter ölçütlerinin belirsiz ya da hatalı olduğu ve karar vericilerden bazı nedenlerden dolayı tercih bilgisini temin etmenin zor olduğu kesikli Çok Kriterli Karar Verme (MCDA) problemleri için geliştirilmiştir.(1) SMAA çoklu karar vericiler için ağırlık uzayının araştırılmasına dayanan bir çok kriterli karar destek tekniğidir.

2. SMAA-STOKASTİK ÇOK KRİTERLİ KABUL EDİLEBİLİRLİK ANALİZİ

MCDA metodlarının ortak bileşeni, alternatiflerin değerlendirilmesinde kriter ölçütleriyle karar vericilerin tercihlerini birleştiren karar modelidir. Birçok farklı metot değer/fayda fonksiyonları, üstlük ilişkileri yada referans noktası modelleri gibi farklı karar modelleri kullanmışlardır. SMAA birçok karar modeline uygulanabilir ve en iyi ya da en iyi birkaç alternatif seçme, alternatifleri sıralama ve alternatifleri farklı kategorilerde sınıflandırma gibi farklı problem yapılarında kullanılabilir.

SMAA başlangıçta ağırlık bilgilerinin çok sayıda politik karar vericiden elde edilemediği kamu problemleri için geliştirilmiştir. Ağırlık bilgilerinin olmaması nedeniyle kriter ölçütlerine ve karar vericilerin tercihlerine bağlı olarak en iyi alternatifin belirlendiği klasik MCDA yaklaşımı uygulanamaz. Bu nedenle SMAA yönteminde ters ağırlık uzayı yaklaşımı ortaya atılmıştır. Klasik yaklaşımın yerine her alternatif çözümü hangi ağırlık değerlerinin en çok tercih edilen yapacağını ortaya çıkarmak için rassal üretilen ağırlıklarla simülasyon uygulanmıştır. (2)

SMAA metodları her alternatifin en çok tercih edilen yapan ya da belirli bir alternatif için kesin bir sıralama belirleyen tercihleri tanımlamak için ağırlık uzayını araştırmaya dayanır. Analizin temel sonuçları “kabul edilebilirlik indeksi”, “merkezi ağırlık

vektörleri” ve farklı alternatifler için “güvenilirlik faktörleri”dir. Kabul edilebilirlik indeksi bir alternatifin belirli bir sırada sonuçlanması sağlayan farklı tercihlerin çeşitliliğini tanımlar, merkezi ağırlık vektörleri her alternatif için o alternatifin destekleyen tercihleri temsil eder ve güvenilirlik faktörleri de karar vermek için kriter değerlerinin doğru olup olmadığını ölçer. (1)

MCDA literatüründe SMAA dışında belirsiz ya da eksik bilgi ile karar vermeye yardımcı olan birçok metot çalışılmıştır. Bu alanda uzun yillardır çalışılmışmasına rağmen hem tercih bilgisinin hem de kriter ölçütlerinin keyfi dağılımlı stokastik değişkenler olarak kullanıldığı ilk metot SMAA metodudur.(1) SMAA aynı zamanda diğer MCDA metotları üzerinde uygulanarak kesin olmayan bilginin kullanılabilmesine olanak da sağlayabilmüştür .

SMAA metotları çeşitli nedenlerden dolayı birçok gerçek hayat problemine uygundur. İlk olarak ters ağırlık uzayı yaklaşımı karar vericilerin tercih bilgisi sağlamak istemediği ya da sağlayamadığı ya da tercihler üzerinde uzlaşmaya varılamadığı birçok grup karar verme problemi için uygundur. Bu gibi durumlarda tercih bilgisi bütün karar vericilerin tercihlerini kapsayan bir ağırlık aralığı olarak ya da bütün karar vericilerin kabul ettiği bir ağırlık dağılımı olarak ifade edilebilir. Daha sonra SMAA farklı alternatiflerin kabul edilebilirliği ile ilgili tanımlayıcı bilgileri hesaplamak için kullanılabilir ve bu da karar vericilere genellikle kabul edilebilir uzlaşma çözümleri tanımlamakta yardımcı olur. İkinci olarak SMAA stokastik dağılımlar vasıtasyyla çeşitli türde belirsiz ya da eksik tercih bilgisini modelleyebilecek çok genel ve esnek bir yolu destekler. Üçüncü olarak SMAA hesaplamaları sayısal yöntemler vasıtasyyla çok verimli olarak uygulanabilmektedir. (1)

3. SMAA METOTLARI

Literatürde çeşitli SMAA metotları bulunmaktadır. Lahdelma ve diğerleri tarafından 1998 yılında geliştirilmiş orijinal SMAA metodunda her bir alternatifin en çok tercih edilen yapan ağırlıkları tanımlamak için ilave fayda veya değer fonksiyonu ve stokastik kriter verilerine dayanarak çalışan ters ağırlık uzayı analizi yapılmıştır. SMAA-2 genel fayda veya değer fonksiyonunu uygulamak, çeşitli tercih bilgilerini içermek için analizi genelleştirmiştir. SMAA-3 ELECTRE III’dekine benzer şekilde sahte kriterlere dayanır. SMAA-D değer fonksiyonu yerine Veri Zarflama Analizi(Data Envelopment Analysis-DEA)’nin verimlilik skorunu kullanmaktadır. SMAA-O metodu SMAA-2’nin bir uzantısıdır. (2)

3.1.SMAA

Karar vericilerin tercih yapısı w^j olan bir ağırlık vektörünü kullanan fayda değerleri için farklı alternatiflere yön veren gerçek değerli fayda fonksiyonuyla $u(x_i, w)$

gösterilebilir. Karar vericilerin çoğunluğunun kabul ettiği bir fayda fonksiyonu tipi SMAA'da kullanılabilir. Ancak genel tercih toplamsal fayda formu olan ve toplam faydanın, kriter değerlerini 0 ile 1 arasında değer aldığı kısmi fayda fonksiyonları $u(x_i, w)$ 'nin konveks kombinasyonu olarak ifade edildiği :

$$u(x_i, w) = \sum_j w_j u_j(x_{ij})$$

dir. (3)

SMAA kriter değerlerinin ve ağırlıkların kesin olarak bilinmediği durumlar için geliştirilmiştir. Kesin olarak bilinmeyen kriter değerleri birleşik olasılık dağılımıyla tahmin edilen ve kriter uzayında $f(\xi)$ yoğunluk fonksiyonuna sahip ξ_{ij} stokastik değişkenlerle belirlenir. Kriterlerin birleşik yoğunluk fonksiyonu $f(\xi)$ şöyle tanımlanmıştır:

$$f(\xi) = \prod_{i,j} f_{ij}(\xi_{ij})$$

Benzer şekilde karar vericilerin kesin olarak bilinmeyen tercihleri elverişli ağırlıklar W kümesinde $f(w)$ yoğunluk fonksiyonuna sahip bir ağırlık dağılımıyla tanımlanır. Fayda fonksiyonu da stokastik kriter ve ağırlık dağılımlarıyla oluşan $u(\xi, w)$ fayda dağılımıyla tanımlanır. SMAA metodu her alternatif için $W_i(\xi)$ uygun ağırlıklar kümesini şöyle tanımlar:

$$W_i(\xi) = \{w \in W : u(\xi_i, w) \geq u(\xi_k, w), k = 1, \dots, m\}$$

Herhangi bir ağırlık $w \in W_i(\xi)$ x_i 'nin faydasını herhangi bir başka alternatiften büyük yada eşit yapar.

SMAA analizin temel sonuçları “kabul edilebilirlik indeksi”, “merkezi ağırlık vektörleri” ve farklı alternatifler için “güvenilirlik faktörleri”dir.

Kabul edilebilirlik indeksi a_i elverişli ağırlıkların beklenen $(n-1)$ boyutlu hacmi olarak ifade edilir. Kabul edilebilirlik indeksi, çalışılan alternatifin tercih edilen olmasını sağlayan farklı değerlerin çeşitliliğinin bir ölçümüdür. ξ kriter dağılımları ve elverişli ağırlık uzayı üzerinde çok boyutlu integrallerle hesaplanır:

$$a_i = \int_x f(\xi) \int_{W_i(\xi)} f(w) dw d\xi$$

Kabul edilebilirlik indeksi, alternatiflerin aşağı yukarı kabul edilebilir olanlar ($a > 0$) ve kabul edilemez olanlar ($a = 0$ veya 0 'a çok yakın olanlar) olarak sınıflandırılmasında kullanılabilir. Sıfır kabul edilebilirlik indeksi, alternatifin fayda fonksiyonuna göre yetersiz olduğunu belirtir.

Merkezi ağırlık vektörü, w_i^c , elverişli ağırlık uzayının beklenen ağırlık merkezi ile tanımlanır. Merkezi ağırlık vektörü kriter ve ağırlık dağılımları üzerinde ağırlık vektörünün integrali ile aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$w_i^c = \int_x f(\xi) \int_{W_i(\xi)} f(w) w dwd\xi / a_i$$

Güvenilirlik faktörü, p_i^c , merkezi ağırlık vektörünün seçilmesi durumunda alternatifin, tercih edilen olasılığı olarak tanımlanır ve kriter dağılımları üzerinde aşağıdaki gibi integral hesabı ile hesaplanır.

$$p_i^c = \int_{\xi: u(\xi_i, w_i^c) \geq u(\xi_k, w_i^c)} f(\xi) d\xi$$

Güvenilirlik faktörü, merkezi ağırlık vektörü kullanıldığında kriter değerlerinin alternatifleri ayırt edebilecek kadar sağlıklı olup olmadığını ölçer. Benzer şekilde güvenilirlik faktörü, herhangi bir ağırlık vektörü ve alternatif için hesaplanabilir. Güvenilirlik faktörü, verilen ağırlık vektörü ile alternatif en iyi yapan stokastik kriter uzayı oranı olarak tanımlanabilir.

SMAA için yukarıda anlatılan formülasyon, belirsiz kriter değerleri ve eksik tercih bilgisinin esnek ve ayrıntılı bir şekilde modellenmesine izin verir. Çok boyutlu integraller genellikle sayısal teknikler kullanılarak hesaplanır. SMAA metodunda bu maksatla Monte Carlo simülasyonu kullanılmıştır. (2)

SMAA metodunu sayısal bir örnekle biraz daha açık bir şekilde anlayabiliriz. Örnek m=6 alternatif ve n=4 kriteri içermektedir. Çizelge 1 kesin olmayan kriter değerlerini göstermektedir. Kriterler için değerlerin $[g_{ij} - \Delta_{ij}, g_{ij} + \Delta_{ij}]$ aralığında uniform dağılıma sahip olduğu varsayılmıştır.

Bu örnekte, her kriterin en iyi ve en kötü değerlerinin aralığını ölçmek için doğrusal kısmi fayda fonksiyonları seçilmiştir. SMAA analizinin sonuçları Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Alternatiflerin kriter değerleri ve belirsizlikleri

Alternatif	g ₁	g ₂	g ₃	g ₄
I	5	-1,5	15	4,0
II	2,5	-3,8	25	2,5
III	3	-2,8	10	2,8
IV	3	-3,2	16	3,2
V	2	-6,7	0	1,0
VI	4	-3,4	30	3,5
A	0,5	10%	10	0,5

Sadece alternatif I, II ve VI için sıfırdan farklı kabul edilebilirlik indeksi elde edilmiştir. Alternatif V için herhangi bir elverişli ağırlık kümesi oluşmamıştır. Alternatif III ve IV için sıfır ve sıfıra yakın kabul edilebilirlik indeksine ulaşılmıştır. Bu nedenle bu alternatifler kabul edilmezler ve elenirler. Kalan alternatifler I, II ve VI karar vericiler tarafından değerlendirilebilir. Büyük bir ihtimalle alternatif II karar vericiler tarafından elenirler, çünkü kabul edilebilirlik indeksi çok küçüktür. Kalan iki alternatif olan I ve VI'dan hangisinin seçileceği karar vericilerin tercihlerine bağlıdır. Eğer g_3 kriteri karar vericiler için daha önemliyse VI'ncı alternatif seçilir çünkü VI'ncı alternatifin merkezi ağırlığı I'inkinden daha yüksektir. (4)

Çizelge 2. SMAA analizi sonuçları

Alternatif	a_1	p_i^c	w_1	w_2	w_3	w_4
I	74	99	w^c	28	28	17
			w^{\min}	0	0	0
			w^{\max}	97	96	97
II	1	12	w^c	9	15	65
			w^{\min}	0	0	35
			w^{\max}	48	58	53
III	0	0	w^c	2	51	35
			w^{\min}	0	34	34
			w^{\max}	4	65	28
IV	0	1	w^c	6	15	55
			w^{\min}	0	0	17
			w^{\max}	26	56	79
V	0		w^c			
			w^{\min}			
			w^{\max}			
VI	25	71	w^c	17	16	46
			w^{\min}	0	0	0
			w^{\max}	84	72	95

3.2.SMAA-2

SMAA-2 metodu SMAA'nın bir uzantısı olarak 2001 yılında Lahdelma ve Salminen tarafından geliştirilmiştir. SMAA-2 analizinin temel sonuçları her alternatif için “sıralama kabul edilebilirlik indeksleri”, “merkezi ağırlık vektörleri” ve “güvenlik faktörleridir”. SMAA-2 ile, SMAA metodundaki kabul edilebilirlik analizleri her alternatifte göre iyiden kötüye her sıralama için ağırlık vektörü kümelerine genişletilmiştir. Elde edilen sıralama kabul edilebilirlik indeksleri, orijinal kabul edilebilirlik indekslerinin problemi çözmede yetersiz kaldığı durumlarda potansiyel uyuşan alternatiflerin belirlenmesinde kullanılabilir. Sıralama kabul edilebilirlik

indeksleri, meta ağırlıkların kullanılmasıyla her alternatif için genel kabul edilebilirliğini tanımlayan tümleşik kabul edilebilirlik indeksleri haline getirilebilirler.

SMAA-2 analizinde fayda dağılımına bağlı olarak, her alternatifin sıralaması en iyi sıradan (=1) en kötü sıraya(=m) tam sayı olarak tanımlanır ve aşağıdaki sıralama fonksiyonunun ortalamasıyla belirlenir:

$$rank(i, \xi, w) = 1 + \sum_{k=1}^m \rho(u(\xi_k, w) > u(\xi_i, w))$$

Bu fonksiyonda $p(true) = 1$ ve $p(false) = 0$ geçerlidir.

SMAA-2 metodu, stokastik elverişli sıralama ağırlıkları kümelerinin analizini temel alır:

$$W_i^r(\xi) = \{w \in W \mid rank(i, \xi, w) = r\}$$

Herhangi bir ağırlık vektörü $w \in W_i^r(\xi)$, farklı alternatifler için öyle değerler belirler ki x_i alternatif, r sırasını alır.

SMAA-2 analizinin belirlenen ilk ölçütı olan sıralama kabul edilebilirlik indeksi, x_i alternatif için r sırasını sağlayan farklı tercihlerin çeşitliliğinin ölçümüdür ve aşağıdaki çok boyutlu integral ile hesaplanır. (5)

$$b_i^r = \int_x f(\xi) \int_{w_i^r(\xi)} f(w) dw d\xi$$

En çok kabul edilebilir(en iyi) alternatif en iyi sıralar için en yüksek kabul edilebilirliği olandır. Açıkça görülüyor ki sıralama kabul edilebilirlik indeksi $[0,1]$ aralığındadır ve indeksi 0 olan alternatif herhangi bir sıra elde edemezken indeksi 1 olan alternatif ağırlıkların seçimine göre bir sıra elde edecektir.

İlk sıralama kabul edilebilirlik indeksi a_i kabul edilebilirlik indeksi olarak isimlendirilir. Kabul edilebilirlik indeksi sadece verimli alternatifleri tanımlamaz, ayrıca verimin derecesini de ölçer. Kabul edilebilirlik indeksi alternatifleri verimli, verimsiz veya az verimli olarak sınıflandırır.

$$a_i^k = \sum_{r=1}^k b_i^r$$

SMAA-2 alternatifin toplam kabul edilebilirliğini ölçmek için her alternatif için ayrıca tümleşik kabul edilebilirlik indeksi belirler. Tümleşik kabul edilebilirlik indeksi her alternatif için sıralama kabul edilebilirlikleri birleştirilerek aşağıdaki gibi elde edilir:

$$a_i^h = \sum_{r=1}^m \alpha^r b_i^r$$

Burada α^r meta ağırlıklar olarak tanımlanır ve $1 = \alpha_1 \geq \alpha_2 \geq \dots \geq \alpha_m = 0$ 'dır. Bütünleşik kabul edilebilirlik indeksi $[0,1]$ arasında değer alır ve her zaman kabul edilebilirlik indeksinden büyüktür yada eşittir. (6)

SMAA-2 metodu için aşağıdaki algoritmayı kullanabiliriz:

ADIM-1: Alternatifler ve kriterler bazında problemi tanımla.

ADIM-2: Karar vericilerin ortaklaşa kabul ettikleri bir fayda fonksiyonu şekli ve skalası belirle.

ADIM-3: Analizi elde edilebilen herhangi bir ağırlık bilgisi ilave et.

ADIM-4: Her alternatif ve her sıra için sıralama kabul edilebilirlik indekslerini hesapla (b_i^r)

ADIM-5: Kabul edilebilirlik indekslerini, merkezi ağırlıkları ve güvenilirlik faktörlerini hesapla (a_i^k, w_i^k, p_i^k).

ADIM-6: Her alternatif için tümleşik kabul edilebilirlik indislerini hesapla (a_i^h).

ADIM-7: Dört, beş ve altıncı adımların sonuçlarını karar vericiye sun. Hangi ölçümleri daha faydalı bulduklarını belirtebilirler.

ADIM-8: Prosesin tamamlandığına ya da devam etmesi gerektiğine karar verici karar vermelidir.

Karar vericiler ağırlık bilgisi temin edebiliyorlarsa üçüncü adıma dönülür ya da alternatif olarak ikinci ya da birinci adımdan itibaren tekrar edilir. (7)

3.3.SMAA-3

SMAA-3 metodu orijinal SMAA'nın farklı bir versiyonudur. SMAA metodunda kullanılan fayda fonksiyonu yerine SMAA-3'de ELECTRE'de kullanılan sahte kriter ve maksı-min seçim prosedürü kullanılmıştır. Bu prosedüre göre aşağıdaki kısıtlar sağlanırsa bir alternatif tercih edilen alternatif olur:

$$\min_{l=1,\dots,m,l \neq i} c(x_i, x_l) \geq \min_{l=1,\dots,m,l \neq k} c(x_k, x_l) \\ k = 1, \dots, m, k \neq i$$

Buna göre bir alternatifin elverişli ağırlık kümesi:

$$W_i = \left\{ w \in W : \min_{l=1,\dots,m,l \neq i} \sum_{j=1}^n w_j c_j(x_i, x_l) \geq \min_{l=1,\dots,m,l \neq k} \sum_{j=1}^n w_j c_j(x_k, x_l) \right\} \\ k = 1, \dots, m, k \neq i$$

Analizin geri kalan kısmı kriter ölçütlerinin deterministik olması haricinde SMAA'da olduğu gibidir ve güvenilirlik faktörü hesaplanmaz.

Literatürde SMAA'yla SMAA-3'ü karşılaştırılan çeşitli simülasyon testleri mevcuttur. Bu testlerde SMAA-3'ün sonuçlarının birbirinden alakasız başlangıç noktaları için oldukça tutarsız olduğu ortaya konmuştur. Bu nedenle SMAA-3 pratik uygulamalarda kullanıldığında başlangıç noktalarının seçiminde çok dikkatli olunmalıdır. (8)

3.4.SMAA-TRI

SMAA-TRI, Electre-tri metodunun parametre denge analizi için geliştirilmiştir ve rastgele dağılmış parametre değerlerinin sonlu uzay analizini içerir. Her alternatif için farklı kategorilere atayan parametre değerlerinin payını tanımlar. Ağırlıkların, profillerin ve kesme seviyesinin dengesini analiz eder.

SMAA-TRI her alternatif ve kategori çifti için kategori kabul edilebilirlik indeksleri üretir. Kategori kabul edilebilirlik indeksi, π_i^h , Ch kategorisine atanmış alternatif xi'leri sağlayan olası parametre değerlerinin payını tanımlar. xi alternatifinin Electre-tri tarafından kategori indeksi h'ye atanmasını hesaplayan kategorileme fonksiyonu söylenir:

$$h = K(i, \Lambda, \phi, w, T)$$

ve kategori üyeliği fonksiyonu :

$$m_i^h(\Lambda, \phi, w, T) = \begin{cases} 1 & \text{if } K(i, \Lambda, \phi, w, T) = h \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Kategori kabul edilebilirlik indeksinin sonlu parametre uzayında çok boyutlu integral olarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\pi_i^h = \int_{0.5}^1 f_L(\Lambda) \int_{\phi} f_\phi(\phi) \int_w f_w(w) m_i^h(\Lambda, \phi, w, T) dw d\phi d\Lambda$$

Kategori kabul edilebilirlik indeksi, atamaların dengesini ölçer ve bulanık ölçüyü ya da kategorideki üyeliğin olasılığı olarak tanımlanabilir. Eğer parametreler durağansa, her alternatifin bir kategori için kategori kabul edilebilirlik indisi 1, diğerleri için 0'dır.(8)

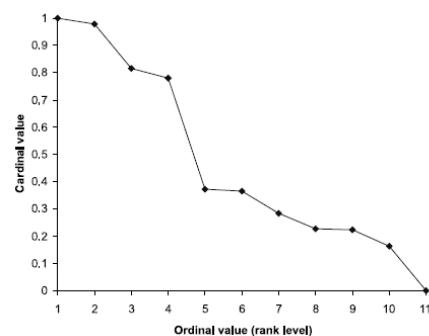
3.5.SMAA-O

SMAA-O metodu ağırlıkların kesin olarak bilinmediği ve kriter bilgilerinin tamamının ya da bir kısmının sıralı olduğu problemler için geliştirilmiştir. Sıralama kriteri her alternatifte bir sıralama seviye numarası atanır. Bu numara $r_j=1, \dots, j^{\max}$ arasındadır ve 1 en iyi değer olurken, j^{\max} en kötü değer olur. Eşit derecede olduğu düşünülen alternatiflere aynı sıralama seviyesi verilir.

Sıralama kriteri direkt olarak çok kriterli değer fonksiyonu olarak kullanılamaz çünkü ölçegin keyfi bir dönüşümü değer fonksiyonunu ve alternatiflerin tercih ilişkilerini etkiler. Sıralama kriterinin doğru bir şekilde modellenebilmesi için sıralama ve esas ölçütlerin arasındaki bütün eşlemelerin düşünülmesi gereklidir. Ortaya atılan fikir bilinen sıralama ölçütlerine uygun rassal esas değerler üretmek için bir simülasyon yapmaktadır. Şekil 1'de bu yolla üretilmiş basit bir örnek grafiği bulunmaktadır. (9)

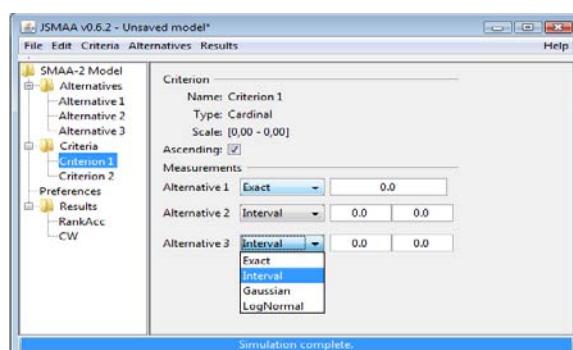
3.6. JSMAA

SMAA metotları ters ağırlık uzayı analizine ve simülasyonlara dayalı olarak çalıştığından SMAA analizini elle yapmak çok zordur. Bu zorluğu gidermek için JSMAA yazılımı yaratılmıştır. (11) JSMAA, Java platformunda yaratılmış olup açık kaynak kodlu bir programdır.

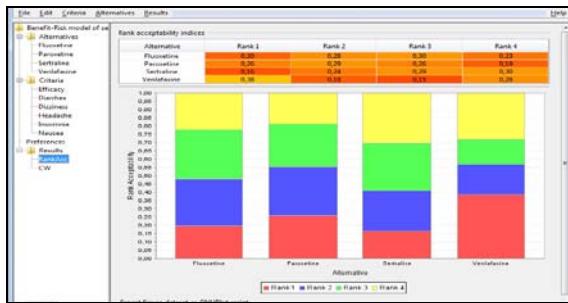


Şekil 1. Sıralama ve esas ölçüt eşlemesi , $j^{\max} = 11$

JSMAA, SMAA-TRI uygulaması ile ELECTRETRI kullanarak stokastik sınıflandırma ve SMAA-2 uygulaması ile sıralama yapabilmektedir. (11) Kriter değerleri gerçek sayı olarak ya da belirsizlik olarak programa tanımlanabilir. Belirsizlik aralık, sıralama bilgisi ve normal ya da log-normal dağılım olarak programa tanımlanabilir. Ağırlık tanımı olarak da gerçek sayı, aralık ya da sıralama bilgisi kullanılabilir. SMAA-TRI uygulamasında da tercih bilgisi ve kriter eşik değerleri gerçek sayı ya da aralık olarak tanımlanabilir. Şekil 2 ve Şekil 3'de programın veri giriş arayüzü ve sonuç arayüzünden örnekler verilmiştir. (7)



Şekil 2. JSMAA veri giriş arayüzü



Şekil 3. JSMAA sonuç arayüzü

4. SMAA UYGULAMALARI

SMAA metodu ilk defa bir gerçek durum probleminin çözümü için geliştirilmiştir ve gelişiminden günümüze birçok gerçek durum probleminin çözümünde kullanılmıştır. Literatürde göze çarpan bazı SMAA uygulamaları Çizelge 3'de sunulmuştur. (7)

Çizelge 3. SMAA uygulamaları

UYGULAMA	METOT	YAYIN
Liman yer seçimi	SMAA	Hokkanen ve diğ.(1999)
Atık değerlendirme tesisi yer seçimi	SMAA-2	Lahdelma ve diğ. (2002)
Genel plan için planlama	SMAA-3	Hokkanen ve diğ. (1998)
Atıklı toprağın temizlenmesi için aday sıralama	SMAA-2	Hokkanen ve diğ. (2000)
Arazi doldurma onarım metodu seçimi	SMAA-2	Lahdelma ve diğ. (2001)
Ekosistem yönetim planlama	SMAA-2	Kangas ve diğ.(2003)
Orman planlama	SMAA-2	Kangas ve Kangas (2003)
Sosyoekolojik arazi planlaması	SMAA-2	Kangas ve diğ.(2005)
Asansör planlama	SMAA-2	Tervonen ve diğ. (2008)
Elektrik dağıticısı için stratejik karar verme	SMAA-2	Lahdelma ve diğ. (2009)
Risk değerlendirme	SMAA-TRI	Tervonen ve diğ. (2009a)
Nanomalzemelerin sınıflandırılması	SMAA-TRI	Tervonen ve diğ. (2009b)
Hava kargo sisteminin merkezileştirilmesi	SMAA	Menou ve diğ. (2010)

5. SONUÇ

Karar vericilerden kesin tercih bilgilerinin alınmadığı gerçek yaşam problemlerinde SMAA metodu sayesinde tercihler kolaylıkla sıralanabilir ve karar vericilerin doğru kararı vermeleri sağlanabilir. Ayrıca internetten açık kaynak olarak sunulan JSMAA

programı ile karar vericilerin karışık hesaplamalar yapmadan uygun karar vermesine yardımcı olunmaktadır.

6. KAYNAKÇA

- [1] Tervonen,T. ve Lahdelma,R.(2007), Implementing stochastic multicriteria acceptability analysis, *European Journal of Operational Research*, 178, 500-513
- [2] Lahdelma R. ve Salminen P.(2010), *Trends in Multiple Criteria Decision Analysis*, Springer
- [3] Lahdelma R. ve Salminen P.(2002), Pseudo-criteria versus linear utility function in stochastic multi-criteria acceptability analysis, *European Journal of Operational Research*, 14, 454-469
- [4] Lahdelma R., Hokkanen J. ve Salminen P.(1998),SMAA-stochastic multiobjective acceptability analysis, *European Journal of Operational Research*, 106, 137-143
- [5] Lahdelma R. ve Salminen P.(2006), Stochastic multi-criteria acceptability analysis using the data envelopment model, *European Journal of Operational Research*, 170, 241-252
- [6] Kangas A.S., Kangas J.,Lahdelma R. ve Salminen P.(2006), Using SMAA-2 method with dependent uncertainties for strategic forest planning, *Forest Policy and Economics*, 9 , 113-125
- [7] Özkaya B.(2010),*Üniversite sıralamaları ve bir stokastik çok kriterli kabul edilebilirlik analizi uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi
- [8] Tervonen T. Ve Figueira J.R.(2008), A survey on stochastic multicriteria acceptability analysis methods, *Journal of Multi-criteria Decision Analysis*, 15, 1-14
- [9] Lahdelma R, Miettinen K, Salminen P.(2003), Ordinal criteria in stochastic multicriteria acceptability analysis(SMAA), *European Journal of Operational Research*, 147, 117-127.
- [10] Lahdelma R, Salminen P, Hokkanen J.(2002), Locating a waste treatment facility by using stochastic multicriteria acceptability analysis with ordinal criteria, *European Journal of Operational Research*, 142, 345–356.
- [11] Tervonen, T.(2010), JSMAA: an open source software for SMAA computations, *Proceedings of the 25th Mini EURO Conference on Uncertainty and Robustness in Planning and Decision Making (URPDM2010)*, Coimbra, Portekiz.

HAVA ARACI PARAMETRELERİNİN OPTİMİZASYONU İÇİN SİMULASYON TABANLI TEDARIK YAKLAŞIMI

Ayçin GÜRDAMAR ^(a), Çağatay ÜNDEĞER ^(b), Tayfun CUMHUR ^(c)

^(a) TUSAŞ Türk Havacılık ve Uzay San. A.Ş., ODTÜ Teknokent Nuri Demirağ Binası,
adeniz@tai.com.tr

^(b) ODTÜ Enformatik Enstitüsü Yarı Zamanlı Öğretim Üyesi,
cundeger@undeger.com.tr

^(c) TUSAŞ Türk Havacılık ve Uzay San. A.Ş., ODTÜ Teknokent Nuri Demirağ Binası,
tcumhur@tai.com.tr

ÖZ

Bu makalede hava aracı tasarımına yön vermek amacıyla kullanılması planlanan simulasyon tabanlı tedarik yaklaşımı anlatılmaktadır. Söz konusu yaklaşım ile geliştirilmesi planlanan hava aracına dair optimal tasarım parametrelerinin, operasyonel senaryoların simulasyon ortamında koşturularak belirlenmesine ilişkin bir kavramsal çalışma ortaya konulacaktır.

Anılan yaklaşım, hava aracının teknolojiler, bileşenler ve alt sistemlerden oluşan bir sistem olarak modellenmesi, operasyonel senaryolar oluşturulması, bu senaryolara hava aracı parametrelerinin ve operasyona yönelik faydalı yüklerin atanması ile ortaya çıkacak matrislerin belirlenmesi ve söz konusu matrisler kapsamında simulasyonlar icra edilerek tasarım parametrelerinin optimize edilmesi çalışmalarını içerecek şekilde planlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Hava aracı tasarım, modelleme, operasyonel gereksinim, operasyonel konsept, operasyonel senaryo, simulasyon tabanlı tedarik, sistem tasarım.

A SIMULATION BASED ACQUSITION APPROACH FOR OPTIMIZATION OF AIRVEHICLE DESIGN PARAMETERS

ABSTRACT

This paper concerns about the simulation based acquisition approach which will be developed to be used to design an airvehicle. With this approach, optimal design parameters of the airvehicle will be determined by the simulation of the operational scenarios in a simulation environment.

The approach will contain the modeling of the airvehicle systems including subsystems, technologies and system components, forming operational scenarios, allocating airvehicle design parameters and payload parameters to those scenarios and optimising those parameters by simulating the scenarios.

Keywords: Airvehicle design, modeling, operational requirement, operational concept, operational scenario, simulation based acquisition, system design.

1. GİRİŞ

Savunma sistemleri, 21. nci Yüzyılda daha karmaşık bir yapıya dönüşmüş, özellikle silah sistemlerini geliştirmek için öngörülen risk, maliyet ve süre artmış, birçok büyük çaplı silah platformu ve sistemi, performans veya fonksiyonellik açısından eksikliklerle dolu olarak üretilmiştir. İhtiyaç makamları, 10-15 yıl süren başarılı silah tedarik programlarında bile çoğu zaman güncelliğini yitirmiş teknoloji ürünü silah sistemleri ile karşılaşmışlardır.

Yeni geliştirilecek savunma sistemlerinde hedeflenen performans artışları, tedarik programlarının başarı şanslarını azaltmaktadır. Bu performans artışının getirdiği riskler ise, “Simülasyon Tabanlı Tedarik (STT)” sürecinde modelleme ve simülasyon sistemlerinin ve teknolojilerinin kullanılması ile asgariye indirilebilmektedir. Bu kullanımlardan birincisinde, kullanıcı, tasarım timinin bir personeli olarak çalışmakta ve tasarımını, prototip geliştirme ve seri üretim aşamasına gelmeden çok önce yönlendirebilmektedir. Bu uygulamada, simülasyon sistemleri veya sanal prototipler vasıtasıyla kullanıcının, ihtiyaç duyduğu silah sistemi ile etkileşmesi ve bu sistemi görsel olarak algılayabilmesi sağlanmaktadır. Tasarım timi, alan uzmanının girdilerini de anında tasarıma yansıtılmekte ve sonuç olarak daha kaliteli/performanslı ürün, daha az maliyet ve daha kısa sürede geliştirilebilmektedir. İkinci uygulamada; STT süreci, tasarım timine, modellenen sistemin yüzlerce değişik alternatif ile sınırsız deneme yapma fırsatını vermektedir. Bu uygulama ile bir alternatif test etmek için gerçek bir prototip üretmek yerine, yapılacak sanal bir prototip üzerinde yüzlerce

değişik tasarım alternatifinin analiz edilmesi mümkün olmaktadır. Üçüncü uygulama olarak STT yöntemi, kavramsal tasarım sürecinde yapılan varsayımların doğruluğunu test etmemizi sağlayarak en uygun çözümlere ulaşmamızı mümkün kılmaktadır.

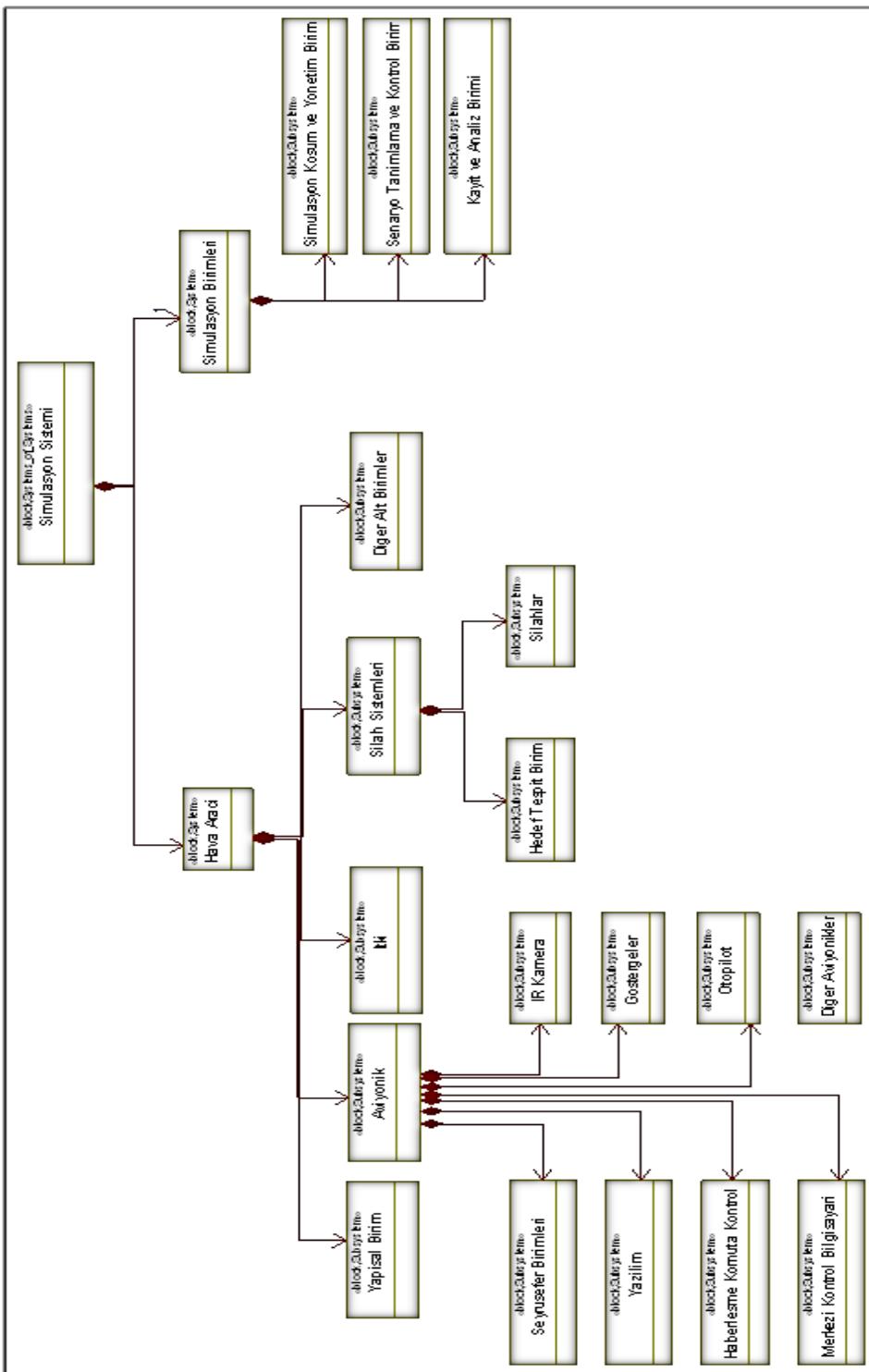
Bu çalışmada yukarıda belirtilen üç uygulamayı da kapsayacak şekilde, hava platform ve sistemleri ile ilgili alt sistem ve bileşen düzeyinde parametrik ve mühendislik analizlerinin yapılabacağı simülasyon sisteminin geliştirilmesine ve kullanılmasına ilişkin özgün bir yaklaşım anlatılmakta ve kavramsal bir tasarım önerilmektedir.

2. HAVA ARACI VE SİMÜLASYON SİSTEMİ MODELLEME

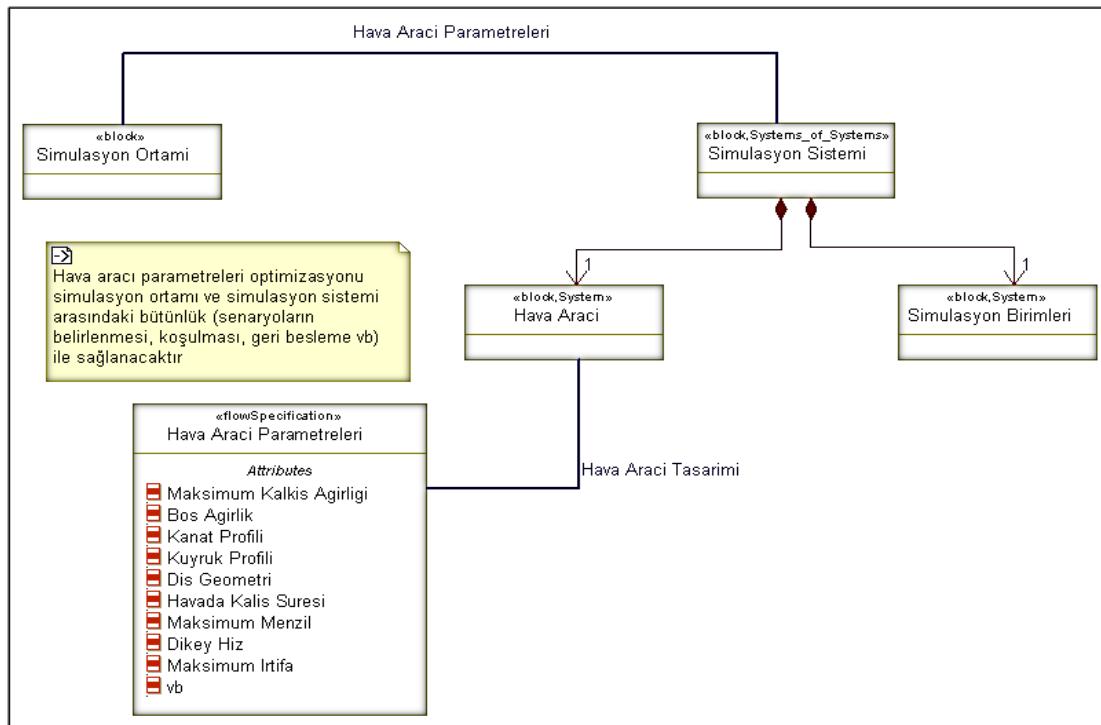
2.1. Hava Aracı Sistemi Modelleme

Hava aracı sisteminin, tanımlanacak operasyonel konsepte uygun olarak simülasyon sisteminin içinde bir alt sistem olarak System Modeling Language (SysML) dilinde modellenmesi öngörmektedir. [1], [2], [3].

(Bknz 2.2.2 Fiziksel Yapı Modelleme. Bknz Şekil 1, Simülasyon Sistemi Fiziksel Blok Tanımlama Diyagramı) Optimize edilecek tasarım parametrelerinin, simülasyon sistemi ve simülasyon ortamı detayı ile ilişkili olarak modellenmesi önemlidir. (Bknz Şekil 2, Hava Aracı Tasarım Parametrelerinin Modellenmesi) Simüle edilerek denenecek ve değiştirilecek tasarım parametreleri operasyonel konsepte uyan benzer hava aracı verilerine dayandırılarak tasarım isterleri oluşturulacaktır.



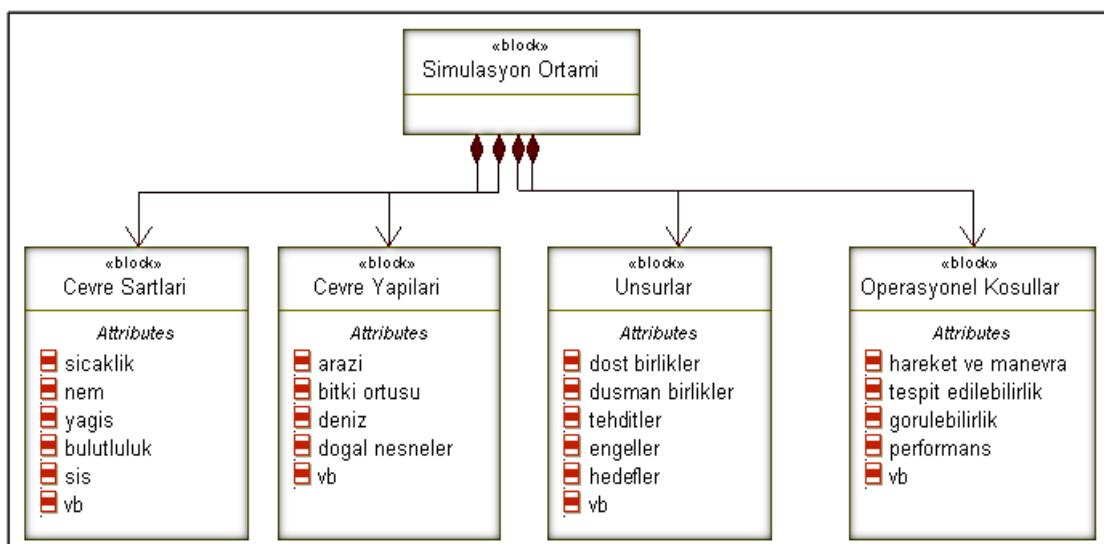
Şekil 1. Simülasyon Sistemi Fiziksel Blok Tanımlama Diyagramı



Şekil 2. Hava Aracı Tasarım Parametrelerinin Modellemesi

2.2. Simülasyon Ortamı

Önerilen simülasyon ortamı; arazi, deniz, yapay ve doğal nesneler ile atmosfer modellerinden oluşan çevre, döş platformlar/sistemler, tehdit platformları/sistemleri ve hedefleri içerecektir. (Bknz Şekil 3, Simülasyon Ortamı Fiziksel Blok Tanımlama Diyagramı)



Şekil 3. Simülasyon Ortamı Fiziksel Blok Tanımlama Diyagramı

Şekil-3'de bileşenleri tanımlanan sanal ortamda; hava aracının hareket ve manevra (kalkış-iniş ve düz uçuş), tespit edilebilirlik (ses azaltımı), silah sistemi (tüfek) ve algılama (göz) yetenekleri ile ilgili teknik konsept ve parametre analiz ve gösteriminin yapılabileceği simülasyon detayı hedeflenmiştir. Sistem modelleme ve sistem davranışları modelleme safhalarını içerecek olan sanal analiz ortamının tasarımları ve geliştirilmesi sonucunda, simülasyon koşum ve yönetim birimleri, senaryo tanımlama ve kontrol birimleri, kayıt ve analiz birimlerinin geliştirilmesine yönelik alt yapı elde edilmiş olacaktır.

2.2.1. Çevre Modelleme

Arazi, atmosfer, doğa ve insan yapısı detaylar ile astronomi modellerinden oluşması tasarlanan çevre ile ilgili olarak öncelikle sayısal yükseklik haritası ile yüzey-bitki örtüsü haritalarından topografyanın modellenmesi, raster ekran görüntüsü ile hava fotoğrafı/uydu görüntülerinden ortam görünümünün tanımlanması gereklidir. [4] Bu kapsamda, arazi verilerinin, raster veya vektör haritalardan yüklenmesi önemlidir. [5], [6].

Çevre, aynı zamanda, sıcaklık, basınç, nem, sis, bulutluluk, rüzgar ve yağış ile ilgili atmosfer, nokta, çizgi ve alan detay kapsamındaki doğal ve insan yapısı nesnelerin modellerini de içermelidir.[7] Analiz detayı ile uyumlantırıldığında, anılan detayların statik olarak modellenmesinin hasar alma gibi olaylar hariç durum değişimlerini içermemesinin yeterli olacağı düşünülmüştür.

2.2.2. Fiziksel Yapı Modelleme

Fiziksel yapı modelleme çalışmaları kapsamında; varlık tanımlama alt yapısı tasarımları yapılacak ve geliştirilecek; seçilen bir hava aracı konfigurasyonu modellenecektir. Varlıklar temsil etmek için bileşen tabanlı, eklenti (plug-in) destekli bir veri yapısı geliştirilecektir. Anılan eklentiler vasıtasiyla, çok çeşitli nitelikte varlık oluşturulması, oluşturulan varlıklara üç boyutlu model, öznitelik ve metod gibi özellikler atanabilmesi davranışsal, fiziksel verilerin saklanabilmesi mümkün olacaktır.

2.2.3. Hareket / Manevra Kabiliyeti Modelleme

Döner kanatlı platformlar ile ilgili uçuş koşullarının modellenmesi; azami uçuş hızı ve tırmanma hızı, servis tabanı ve azami yuvarlanma açısı parametreleri temelinde yapılacaktır. Tasarım isterleri/tasarım sonucunda çıkan uçuş karakteristikleri, hareket/manevra kabiliyeti modellemesinde kullanılacaktır.

2.2.4. Algılama Sistemi Modelleme

Bu çalışma kapsamında, insan algısı (göz ve işitme), elektro-optik cihazlar ve radar modellenecektir. Algı cihazları için, fizik veya parametrik tabanlı, gerçekciliği yüksek, yeniden kullanılabilir yazılım modellerinin ve algoritmalarının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Ses izi azaltma analizine yönelik olarak hava aracı (Döner kanatlı İHA)

tarafından üretilen sesin (gürültü) atmosfer ile etkileşimi (azalımı) ve insanın ses ile algılaması modellenecektir.

2.2.4.1. Göz ve Gündüz Görüş Cihazı Modelleme

Göz ve gündüz görüş cihazı (gündüz kamera), hedef özelliklerini, meteoroloji ve astronomi modelleri tarafından hesaplanan hedef ve kamera üzerindeki ışık dağılımını ve kamera parametrelerini dikkate alarak olasılık tabanlı modellenecektir. Tespit, teşhis ve tanıma aşamaları olasılık modelinde dikkate alınacaktır.

2.2.4.2. Termal Kamera Modelleme

Termal kamera, hedef özelliklerini, meteoroloji ve astronomi modelleri tarafından hesaplanan hedef üzerindeki ısı toplanmasını, hedefin iç ısısını ve kamera parametrelerini dikkate alarak olasılık tabanlı modellenecektir. Tespit, teşhis ve tanıma aşamaları olasılık modelinde dikkate alınacaktır. Termal kamerada ihtiyaç duyulan cihaza özel ısı algılama eşik değerleri kullanılacaktır.

2.2.4.3. Radar Modelleme

Radar modeli, hedef radar kesit alanı, rüzgar miktarı, yağış miktarı ve radar parametreleri dikkate alınarak olasılık tabanlı modellenecektir.

2.2.5. Silah/Mühimmat Sistemi Modelleme

Görerek (makinalı tüfek ve uçaksavar) ve görmeyerek (havan ve top) atış yapan silah sistemlerinin sanal ortam ile etkileşimi modellenecektir.

2.2.6. Kullanıcı Arayüzleri Geliştirme

Kullanıcı arayüzleri; senaryo hazırlama, senaryo koşum, senaryo analiz ve faaliyet sonu inceleme ara yüzlerini içerecektir.

2.2.7. Senaryo Hazırlama Arayüzleri

Senaryo tanımlama mimarisi ve arayüzlerine yönelik yazılım alt yapısı geliştirilecek ve senaryo bileşenlerinin (arazi, atmosfer, doğal ve insan yapısı detaylar, insan, kara araçları ve döner kanatlı İHA, görme ve işitme parametreleri, makinalı tüfek, uçaksavar, havan ve top) tanımlamalarını gerçekleştirecek kullanıcı arayüzleri tamamlanacaktır.

2.2.8. Senaryo Koşum Arayüzleri

Senaryo koşum motoru ve arayüzlerine yönelik yazılım alt yapısı geliştirilecek ve çalışmalar kapsamındaki senaryoların koşturulabileceği düzeyde senaryo koşum yetenekleri ve kullanıcı arayüzleri gerçekleştirilecektir.

2.2.9. Analiz ve Faaliyet Sonu İnceleme Arayüzleri

Senaryo analizi ve faaliyet sonu incelemeye yönelik yazılım alt yapısı geliştirilecek ve çalışmalar kapsamındaki senaryoların sonuçlarının raporlanması ve yeniden gösterimine ilişkin temel yetenekler ve kullanıcı arayüzleri gerçekleştirilecektir.

2.2.10. Teknik Konsept Gösterimi ve Performans Analizi

Bu kapsamda, döner kanatlı İHA'nın hareket ve manevra (kalkış-iniş ve düz uçuş), tespit edilebilirlik (ses azaltımı) ve algılama (göz, işitme, elektro optik cihazlar ve radar) parametreleri/yetenekleri, muhtemel hedefler (tank, köprü, mühimmat deposu, vb.) ve silah sistemi (tüfek) ile etkileşimli olarak analiz edilebilecek, bu yetenekler ile ilgili teknik konsept gösterimi yapılacaktır.

2.2.11. Sistem Davranışları Modelleme

Harekat alanındaki dinamik varlıklar, simülasyon içinde birer aktör olarak ele alınmaktadır. Aktörler, fizik kurallarına bağlı ve/veya otonom/yarı-otonom zeki davranışları ile simülasyon ortamında değişikliklere neden olabilmektedir. Dolayısıyla, varlıkların temsili ortamda nasıl davranışlar sergilediklerine yönelik; fiziksel, bireysel, grupsal, görev ve doktrin tabanlı davranış verilerinin elde edilerek formal yöntemlerle dokümantة edilmesine ve simülasyon sistemleri tarafından kullanılabilir hale getirilmeleri için yapay zeka algoritmalarının geliştirilmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Bu kapsamında, anılan verilerin toplanmasına ve ilgili algoritmalarının geliştirilmesine yönelik bir çalışma yapılacak ve algılama, durum farkındalığı oluşturma, davranış planlama ile davranış icra etme modellerini içeren bir yapay zeka motoru geliştirilecektir. Geliştirilmiş olan yapay zeka motoru kullanılarak taarruz ve savunma davranışları modellenecektir.

2.2.12. İntikal ve Keşif Gözetleme Modelleme

Bu kapsamında, geliştirilmiş olan yapay zeka motoru kullanılarak Keşif ve Gözetleme ile İntikal (Güzergah) davranışları modellenecektir.

2.2.13. Komuta-Kontrol ve Haberleşme Sistemi Modelleme

Bu kapsamında, muhabere, role ve yer kontrol istasyonu modelleme ve kodlama faaliyetleri yapılacaktır.

2.2.14. Görsel, Termal, Radar İzi Azaltma Modelleme

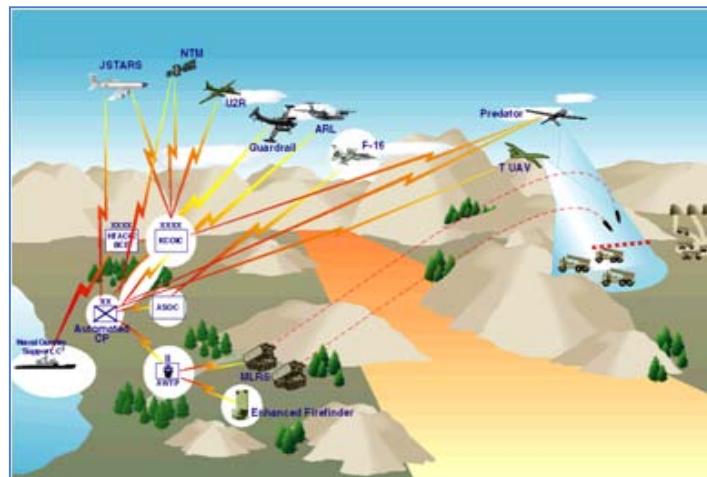
Bu kapsamında, harekat alanı unsurlarının görsel, termal ve radar 3 boyutlu kesit alanları hesaplanacak ve insan gözü ile algı cihazlarının modellenmesinde kullanılacaktır.

2.2.15. Fiziksel Etkileşim Modelleme

Bu kapsamında, harekat alanı unsurları ile mühimmatlar arasındaki fiziksel etkileşim (vuruş, çarpma etkisi ile imha) modellenecektir.

3. OPERASYONEL SENARYOLAR

Çalışma kapsamında tedarik edilmek istenen hava aracının icra etmesi beklenen görevler kapsamında sayısız senaryo oluşturulabilecek ve simüle edilebilecektir.[8] (Bknz Şekil 4) Yaklaşımı ortaya koymak amacı ile 2 adet örnek senaryo verilmiştir.



Şekil 4. Göreve Yönelik Senaryo Simülasyonu [8]

- **Örnek Senaryo 1:**

Örnek senaryo 1'de 3 saat alçak irtifa uçuşu ve keşif/gözleme görevi icra edilecektir. Senaryo 1'de koşulacak operasyon özellikleri aşağıda verilmiştir.

Operasyon Bölgesi: +100 feet radar irtifa

Operasyon: Keşif/Gözetleme

Operasyon Koşulu: Visual Flight Rules (VFR), yağmurlu hava koşulu, 22C hava sıcaklığı

Görev Profili: Kalkış, 100km ileri uçuş, 40. dakikada bekleme paternine geçiş, 45. dakikada hover, Kızıl Ötesi/Elektrö Optik (IR/EO) kamera açı değişimi

- **Örnek Senaryo 2:**

Örnek senaryo 2'de 2 saat yüksek irtifa uçuşu icra edilecektir. Senaryo 2'de koşulacak operasyon özellikleri aşağıda verilmiştir.

Operasyon Bölgesi: +500 feet radar irtifa

Operasyon: Savunma/Taarruz

Operasyon Koşulu: VFR, yağmurlu hava, 22C hava sıcaklığı

Görev Profili: Kalkış, 55 nm ileri uçuş, hover, target designator ile işaretleme yaparak roket atışı.

4. PARAMETRE OPTİMİZASYONU

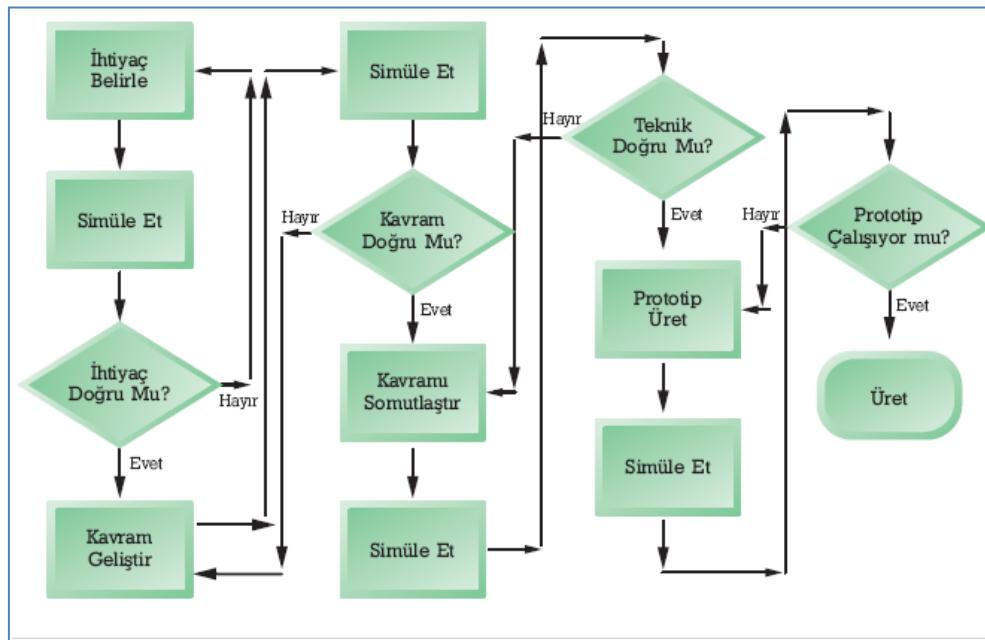
Hava aracı sistemi alt sistem/sistem bileşenleri/parametreleri koşulacak senaryolar ile eşleştirilerek “Parametre Belirleme Matrisleri” oluşturulacaktır. (Bknz Tablo 1)

Tablo 1’de gözlemlenecek hava aracı parametrelerine ve faydalı yük kabiliyetlerine, operasyonel senaryo 1 ve 2 için örnekler verilmiştir.

Tablo 1. Parametre Belirleme Matrisleri

	Gözlemlenecek Hava Aracı Parametreleri	Gözlemlenecek Faydalı Yük Kabiliyetleri
Operasyonel Senaryo 1	Kontrol/stabilite parametreleri	IR/EO kamera çözünürlüğü IR/EO kamera entegrasyonu
Operasyonel Senaryo 2	Kontrol/stabilite parametreleri	Hedef İşaretleyici hassasiyeti, otopilot hover performansı
...		

Her bir senaryo ile eşleştirilen alt sistem/sistem bileşenleri/parametreleri, senaryo koşumunda rastlanılan istenmeyen/beklenmeyen duruma karşılık geliştirilen yeni kavram ve senaryonun görevye yönelik başarı kriterilerini sağlaması yönünde değiştirilecektir. [9] (Bkz Şekil 5)



Şekil 5. Simülasyon Tabanlı Tedarik Süreci [9]

Değiştirilen parametreler ile senaryo tekrar koşularak alt sistem/sistem bileşenleri/parametreleri tekrar denenecektir. Birden fazla senaryo ile eşleştirilen alt sistem/sistem bileşenleri/parametreleri, farklı senaryo koşumlarında yakınsak değerlere ulaşmıyorsa, ilgili senaryolar birleştirilerek denenecektir. Değiştirilen sistem parametrelerinin senaryonun simülasyonu sonucunda değişimi ve tekrar simüle edilmesi döngüsü, tüm senaryoların simüle edilerek görevde yönelik başarıyı elde edecek şekilde koşulması aşamasına kadar devam edecektir.

Hava aracına ait sistem tasarımının sonlandırılması, sistemin modellenmesi ve görevlerini icra edecek şekilde simule edilerek tasarım gereksinimlerinin gerçeklige dönüştürülmesi ile sağlanır. [10] Böylece hava aracı tasarım sürecini takip eden geçerleme/gerçekleme fazları tasarımını etkilediği/değiştirdiği için tasarım ve kalifikasyon süreci bir döngü oluşturmaktadır.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, tedarik edilmesi hedeflenen hava aracının istenen operasyon ortamında simüle edilerek ihtiyacı karşılayacak şekilde tasarlanıp üretilmesi amacını güden bir "Simülasyon tabanlı tedarik" uygulaması planı anlatılmıştır. Sistemin bir bütün olarak modellenmesi, sistem parametreleri ve özelliklerinin koşulacak senaryolara atanması, atanın parametre ve özelliklerin değiştirilerek senaryo koşumu ile denenmesi aşamaları, sistemi, bir bütün olarak optimize ederek tedarik etmeyi amaçlamıştır.

Bu yaklaşımla gereksinimlerin doğru olup olmadığı tasarım esnasında simulasyon yardımı ile test edilebilir olduğundan ürün doğrulanmış gereksinimlerle tasarlanmaya devam edilecektir. Tasarlanan ürüne ait simulasyon modelinin belirlenen parametrelerle

birbirini besleyerek nihai halini alması, prototipleme fazını başlatacaktır. Üretilen prototipten alınan gerçek değerler ile koşulan senaryoların görevde yönelik başarısı elde etmesi ile üretim süreci başlayacaktır.

6. TEŞEKKÜR

Makalenin oluşturulmasında desteğini esirgemeyen TUSAŞ Türk Havacılık ve Uzay San. A.Ş Entegre Helikopter Grubu Başkanı Emre YAZICI'ya ve Sistem Mühendisliği Şefi Ömer Faruk KIRCALI'ya teşekkür ederiz.

7. KAYNAKÇA

- [1] Richard Ivanetich, "Simulation Based Acquisition", Institut for Defense Analyses.
- [2] Andrew P. Sage and Stephen R. Olson, "Modeling and Simulation in Systems Engineering : Whither Simulation Based Acquisition" , George Mason University.
- [3] Michael V R Johnson, Mark F McKeon, Terence Szanto,Michael V. R. Johnson,Mark F. McKeon,Terence Szanto (1998), "Simulation based acquisition a new approach", *Report of the Military Research Fellows 1997-1998DCMC*.
- [4] Cagatay Undeğer, *Modeling Daytime and Night Illumination, International Simulation Multi-conference, ISMc'09*, Istanbul, 2009.
- [5] Defense Mapping Agency (DMA), (1996), Performance Specification Digital Terrain Elevation Model (DTED), MIL-PRF-89020.
- [6] United States Geological Survey (USGS), (2004), Standards for Digital Elevation Model (DEM).
- [7] Ç.Undeğer, A.Yavaş, M.Ocak, U.Akin & Z.İpekkan, MÜHATEM: Müşterek Harekat Alanı Simülasyon Sistemi: Temsili Ortam Standart ve Uygulamaları, *USMOS 2007*, ODTÜ, Ankara, Türkiye, 2007.
- [8] Dennis J. Anderson, James E. Campbell, Leon D. Chapman, *National Defense Industrial Association Systems Engineering Conference San Diego*, California October 20-23, 2003.
- [9] Kiper, T. (2005), "Simülasyon Tabanlı Tedarik Yöntemi", *USMOS 2005*, pp. 167.
- [10] Conwin, K., Thomen, D. (2000), "Simulation Based Acquisition: An Overarching View", *Simulation Interoperability Workshop*.

MODELLEME VE SİMÜLASYON PROJELERİNDE PROJE YÖNETİM MODELLERİ ÜZERİNE BİR İNCELEME

Oray Kulaç

Dz.K.K.lığı BİLKARDES D.Bşk.lığı, Bakanlıklar Ankara, oraykulac@yahoo.com

ÖZ

Modelleme ve Simülasyon (MODSİM) projeleri teknoloji yoğun, karmaşıklığı yüksek projelerdir. Teknoloji projelerinin büyük bir oranının başarısız olduğu ya da proje başlangıcındaki hedeflerinden saplığını gösterir örnekler literatürde mevcuttur. Ülkemizde de teknoloji içeren projelerin bütçe ve planlı sürelerini aşmaları kamuda ve özel sektörde sık karşılaşılan durumlardandır. Doğrusal bir yapıya sahip temellerini Newton paradigmاسından alan şelale, spiral gibi klasik proje yönetim modelleri, teknoloji yoğun, karmaşıklığı yüksek MODSİM projelerinin yönetiminde yetersiz kalmaktadır. Bu çalışmada, temellerini Karmaşıklık Paradigmاسından alan Çevik Proje Yönetim Modelleri üzerinde bir inceleme yapılmıştır. Bu modellerin prensipleri ve ana karakteristikleri çerçevesinde yapılan değerlendirme ile MODSİM proje yönetiminde sık karşılaşılan ve proje sürecine olumsuz etkileri olan problemlerin aşılması, Çevik Proje Yönetim Modellerinden faydalanaileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: modelleme ve simülasyon, proje yönetim modelleri, çevik proje yönetimi, klasik proje yönetimi, Newton paradigması, karmaşıklık paradigması.

A STUDY ON PROJECT MANAGEMENT METHODS FOR MODELLING AND SIMULATION PROJECTS

ABSTRACT

Modeling and Simulation (M&S) projects are technology intensive and complex projects. Literature survey shows us a large proportion of the high technology and complex projects have failed to comply with their budget and schedule goals. This situation is also common both in public and private sectors of our country. Traditional Project management models like Waterfall, Spiral models which have linear nature and get their roots from Newtonian paradigm, are failed to meet the challenges of M&S Projects. In this study a research conducted on Agile Project Management Models which get their roots from Complexity Paradigm. Analysis on principles and main characteristics of Agile Project Management models show that these models can be

used as project management framework in order to meet the challenges of M&S projects.

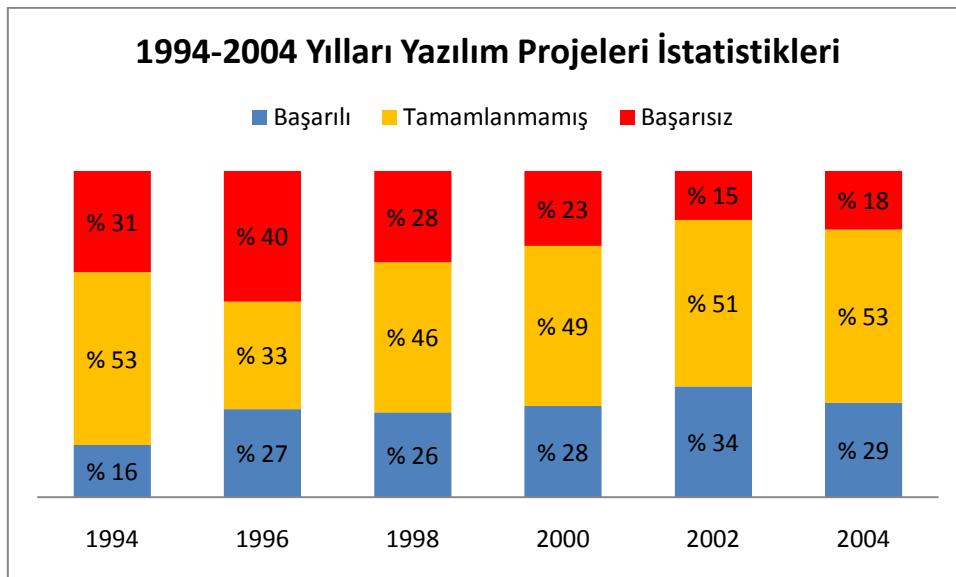
Keywords: Modeling and Simulation, project management, agile project management, newtonian paradigm, complexity paradigm.

1. GİRİŞ

Proje, en genel ifadeyle bir problem çözme süreci olarak tanımlanabilir. Bu süreç genellikle bir başlangıç ve bitiş zamanına sahip olur ve kendi içinde kaynak kısıtlarını barındırır. Proje yönetimi bir problem tanımıyla başlayan bu sürecin hedeflenen çözüme ulaşılması yönündeki gayretlerin bütünüdür. Bir projenin başarılı bir biçimde sonlanması ise tanımlı problemin zamanında, eldeki kaynaklar aşılmadan beklenileri karşılayacak şekilde çözümlenmesidir. Bu durumda, bir projenin başarılı yönetiminin ölçümünde kullanılabilecek temel performans kriterleri, projenin zamanında bitirilmesi (zaman), proje için ayrılan bütçenin aşılmaması (maliyet), ortaya çıkarılan çözümün problem sahiplerinin beklenileri karşılaması (kalite), olarak sıralanabilir. Bu kriterlere ilave olarak proje personelinin iş tatmini, proje grubunun elde ettiği bilgi ve tecrübe seviyesi, problem sahibinin (müşteri) proje grubularındaki memnuniyeti gibi proje yönetiminin başarısının ölçülmesinde kullanılabilecek insan faktörleri temelli diğer performans kriterleri oluşturulabilir. Ancak, bu çalışmada proje yönetiminin başarısı değerlendirilirken insan faktörlerine dayalı bu kriterler dikkate alınmamıştır.

Teknoloji içeren projelerin bütçe ve planlı sürelerini aşmaları kamuda ve özel sektörde sık karşılaşılan durumlardır. Yukarıda tanımlanan temel performans kriterleri kullanılarak yapılan yazılım projelerinin yönetim değerlendirmeleri incelendiğinde ortaya çıkan durumun parlak bir görüntüye sahip olmadığı görülmektedir. Teknoloji projelerinin büyük bir oranının başarısız olduğu ya da proje başlangıcındaki hedeflerinden saptığını gösterir örnekler literatürde mevcuttur [1]. Boston merkezli bir Bilişim Teknolojileri Araştırma Grubu olan Standish Group tarafından hazırlanan CHAOS araştırmasında 1994 ve 2004 yılları arasında ABD'de yürütülen yazılım projelerin durumları incelenmiştir [1][2]. Çizelge 1'de bu araştırmanın sonuçları gösterilmiştir.

Çizelge 1. CHAOS Raporunda Sunulan ABD'de Yürüttülen Yazılım Projeleri İstatistikleri



Çizelge 1'de görüldüğü üzere, başarılı proje olarak adlandırılabilceğimiz, zamanında, bütçesinde ve müşteri bekłentilerini karşılayacak şekilde tamamlanan projelerin 1994-2004 yılları arasındaki toplam projelere oranı % 16 ile % 34 arasında değişmektedir. 2004 yılı için bu oran % 29 olarak ortaya çıkmıştır. Tamamlanmamış projeler olarak adlandırılabilceğimiz, zamanını veya bütçesini aşan, müşteri bekłentilerini tam karşılamayan projelerin oranı % 33 ile % 53 arasında değişmektedir. 2004 yılı için bu oran % 53'tür. Başarısız proje olarak adlandırılabilceğimiz, tamamlanmadan iptal edilen projelerin oranı ise % 15-% 40 arasındadır. 2004 yılı için ise bu oran % 18 olarak ortaya çıkmıştır. Ülkemizde yürütülen yazılım projelerine ilişkin bu kapsamda bir veri elde edilememiştir. Ancak yazılım projelerinin karakteristikleri, proje yönetimi ve yazılım alanında uluslararası kuralların projelerimizde kullanılması, ülkemizde benzer bir durumun ortaya çıkacağı bekłentisine neden olmaktadır. Modelleme ve simülasyon (MODSİM) projeleri yazılım tabanlı projelerdir. Yazılım projelerinin proje sürecindeki zorluklarına ilave olarak MODSİM projelerinde aşılmazı gereken çeşitli süreçler (engeller) mevcuttur. Öncelikle modellenecek ortam ve sistemler incelenerek bir kavramsal model ortaya çıkarılacak ve gereksinimler tanımlanacaktır. Bu günümüz sistemlerinin karmaşıklığı düşünündüğünde oldukça zor bir görevdir. Daha sonra bu kavramsal modelin ve gereksinimlerin gerçekleştirilmesine geçilecektir. Birlikte çalışabilirlik ve tekrar kullanılabılırlik prensipleri bu gerçekleştirme sürecinin karmaşıklığını artıran faktörlerdir. Modellerde parametre olarak kullanılacak verilerin toplanması, modellerin doğrulanması ve geçerlemesi ise diğer bir önemli ve karmaşık süreçtir. Özette MODSİM projeleri teknoloji yoğun, karmaşıklığı yüksek yazılım

projeleridir. Bu kapsamında, MODSİM projelerinin Çizelge 1'de görülen istatistiklere benzer veya daha kötü sonuçlara sahip olması beklenmektedir.

Bu durum, MODSİM projelerinin yönetim süreci üzerinde bir incelemeyi zorunlu kılmıştır. Bu kapsamında, müteakip bölümde öncelikle proje yönetim yaklaşımıları üzerinde genel bir inceleme yapılmıştır.

2. PROJE YÖNETİM MODELLERİ

Proje Yönetimi Bilgi Birikimi (Project Management Body of Knowledge (PMBOK) dokümanına göre projenin yönetilmesi için gerekli süreçler beş grup altında toplanmaktadır [3]. Bu gruplar aşağıda listelenmiştir.

- Başlangıç Süreci – Projenin başlamasına yönelik izin ve onaylama,
- Planlama Süreci – Proje hedeflerinin belirlenmesi, hedeflere ulaşmada alternatif yolların oluşturulması ve en uygunun seçilmesi,
- Uygulama Süreci – insan ve diğer kaynakları koordine ederek planın hayatı geçirilmesi,
- Kontrol Süreci – Yürüyen faaliyetleri düzenli olarak takip etme ve planlarla karşılaştırma, hedeflerden sapmayı önlemek için düzeltici faaliyetleri uygulama,
- Kapanış Süreci – Proje kabulünün resmileştirilmesi.

Proje yönetimindeki süreçleri en genel haliyle barındıran bu gruplar yazılım projelerinde ve MODSİM projelerine de uygulanabilmektedir. Ancak yazılım projelerinin ayırcı özellikleri ayrı bir proje yönetim modelinin gelişmesine neden olmuştur. Sistem/Yazılım Geliştirme Yaşam Döngüsü (Systems/Software Development Life Cycle, SDCL) olarak adlandırılan bu kavram aşağıdaki genel basamaklardan oluşmaktadır [4].

- Planlama
- Analiz
- Dizayn
- Gerçekleştirme
- Bakım, geliştirme.

Yazılım geliştirme projeleri için bir çerçeve oluşturan SDCL altında çeşitli yazılım geliştirme süreçleri ortaya çıkmıştır. Bu süreçlerin en popülerleri, Selale, Spiral,

Artırımsal, Hızlı Prototip Geliştirme, RUP(Rational Unified Process), Çevik Yöntemler (Scrum, XP) olarak sıralanabilir.

Proje takviminin oluşturulması, projenin gidişatına ilişkin kontrol noktalarının belirlenmesi, sistem testleri, maliyet tahminleri gibi proje yönetimini etkileyen ana hususlar, sistem geliştirme yaşam döngüsü kapsamındaki yazılım geliştirme modellerine göre şekillenmektedir. Bu kapsamında, çalışmada proje yönetim modelleri yazılım geliştirme süreçleri üzerinden incelenmiştir.

Düger alanlarda olduğu gibi yönetim bilimlerinde iki yaygın paradigmadan söz etmek mümkündür. Bunlar Newton yaklaşımı (mekanik paradigma) ve karmaşıklık yaklaşımıdır (kuantum paradigma) [5][6]. Newton yaklaşımında, dünyadaki ve evrendeki her şey bir mekanik sistem olarak kabul edilir. Bu mekanik sistemi anlamak, sistemi oluşturan parçaların her birini anlamaktan geçmektedir. Böylece, bir sistemin yeterli seviyede parçalara ayrılp bu parçalar üzerinde çalışılması gerçeğe ulaşmak için yeterlidir. Diğer bir deyişle şeytan ayrıntıda gizlidir. Doğrusal bir yapıya sahip bu paradigma, determinizmin getirdiği belirlilik ve mutlaklıklık ilkesine sahiptir. Ancak, bu yaklaşım karmaşık yapıda, hızla değişen, birbirleriyle etkileşen dinamik sistemleri anlamakta yetersiz kalmıştır. Bu boşluğu doldurmak üzere temellerini kuantum fiziği, teorik kimya ve biyolojiye dayandıran Karmaşıklık paradigma ortaya çıkmıştır. Doğrusal olmayan yapıya sahip karmaşıklık yaklaşımı, belirsizliği, interaktif etkileşimden oluşan sistem bütünü ve etkileşim sisteminin oluşturduğu yapılanmayı içerir.

Dünyada ve ülkemizde yazılım ve MODSİM projelerinde sık olarak kullanılan Şelale, Spiral, Artırımsal gibi proje yönetim modelleri Newton yaklaşımının desteklediği modellerdir. Şelale modeli bu anlamda geliştirilen ilk proje yönetim modelidir. Spiral model, Şelale modelinde karşılaşılan problemleri, Artırımsal model Spiral modelde karşılaşılan problemleri ortadan kaldırmak üzere geliştirilmiştir. Bu modelleri genel yapıları itibariyle incelediğimizde proje modelinin, basamaklandırılmış geliştirme süreçlerinden, resmi proje planlarından, dokümante edilmiş proje isterlerinden, detaylı dizayn ve teknik dokümanlardan ve detaylı bir test sürecinden oluştuğunu görürüz. Bu çerçevede, her biri doğrusal bir yapıya sahiptir. Projede, tanımlı bir safha tamamlanmadan diğer safhaya geçiş yapılamaz. Herhangi bir safhada, daha önceki safhalarla ilgili olarak ortaya çıkan beklenmedik gelişmelere karşı nasıl hareket edileceği, önceki safhanın tam ve doğru olarak tamamlandığı kabullenildiğinden, tanımlı değildir. Bu proje yönetim modelleri, tüm geliştirme sürecinin tanımlı ve tahmin edilebilir bir süreç olduğu kabullenmesine sahiptir. Böylece, bu proje yönetim modellerinde proje başlangıcında tüm gereksinimlerin tam ve eksiksiz olacak şekilde detaylandırılarak belirlenebildiği ve geleceğin proje başında doğru olarak tahmin edilebileceği düşünülmektedir [5].

Projelerin karmaşıklığı arttıkça proje sürecindeki tahmin edilebilirlik azalmaktadır. Böylece proje sürecinde tahmin edilemeyen gelişmeler yaşanmakta, proje yönetim sürecinin önemli bir kısmı bu gelişmelerin yarattığı problemlerin çözümüne harcanmaktadır. Karmaşık ortam ve belirsizlikler yeni bir proje yönetim modeline olan ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. Böylece, temellerini Karmaşıklık paradigmasından alan Çevik Proje Yönetim modelleri ortaya çıkmıştır. Çevik proje modelleri dört ana faktör üzerine kuruludur: iterasyona dayalı geliştirme, müşteri geri bildirimleri, esneklik, iyi oluşturulmuş proje grupları [2]. 2001 yılında 17 yazılım geliştirici tarafından oluşturulan Çevik Yazılım Geliştirme Manifestosunda: süreçler ve araçlar yerine bireyler ve etkileşime; detaylı bir dokümantasyon yerine çalışan bir yazılıma; sözleşme ve müzakereler yerine müşteri ile işbirliğine; bir planı takip etmek yerine değişime cevap verebilmeye, daha fazla değer verdiklerini belirtmektedirler [7]. Çevik proje modellerini genel anlamda incelediğimizde aşağıdaki karakteristiklerin ön plana çıktığı görülmektedir:

- Uzun dönemli planlama yerine görevler daha kısa, artımlı saflaraya ayrıılır.
- İletişimin yazılı dokümanlar yerine yüz yüze görüşmelerle yapılması tercih edilir.
- Projedeki ilerlemenin en önemli ölçüsü çalışan bir yazılımdır.
- Organizasyonun hiyerarşik yapısını dikkate almadan oluşturulan, kendi kendini organize eden, çok fonksiyonlu bir proje grubunu gerektirir.
- Müşteri tarafından yapılan geç değişiklik talepleri memnuniyetle karşılanır.
- Sürekli ve kısa sürelerde yararlı yazılım teslimatı ile müşteri memnuniyetinin sağlanması en yüksek öncelikli faaliyettir.

Müteakip bölümde MODSİM projelerinde sık karşılaşılan problemler tecrübeler ışığında ortaya konmuş, bu problemlerin, yukarıda ortaya konan proje yönetim modellerinin karakteristikleri ile ilişkisi değerlendirilmiştir.

3. PROJELERDE KARŞILAŞILAN SORUNLAR VE PROJE YÖNETİM MODELLERİ

Her tip projede ikinci bölümde bahsedilen proje yönetim süreçleri çerçevesinde çeşitli sorunlarla/zorluklarla karşılaşılmaktadır. Projelerin başarıya ulaşabilmesi için bu sorunların ve zorlukların başarıyla geçilmesi gereklidir. Bu durum MODSİM projeleri içinde geçerlidir. MODSİM proje yöneticileri, mutlu sona ulaşabilmek için; projelerinin bütçe, takvim ve kaynağını doğru planlamalı, doğru proje ekibini oluşturmalı, proje ekibini motive ederek maksimum verim ile çalışmalarını sağlamalı, proje isterlerini firmalarının ve müşterilerinin çıkarları arasında bir denge sağlayacak şekilde

oluşturmalı, riskleri iyi analiz ederek ortaya çıkan risklere karşı projeye uygun risk yönetim tekniklerini uygulamadırlar [8]. Bu bölümde tüm projelerde görülebilecek genel problemler yerine MODSİM projelerine özgü sorunlar ortaya konacaktır.

MODSİM projelerinin yönetiminde karşılaşılan en önemli problemlerden biri projenin ilerleyen safhalarında ortaya çıkan değişiklik ihtiyaçlarıdır. Bu değişiklik ihtiyaçları, isterlerin proje başında doğru tanımlanmaması, tanımlanan isterlerin proje grubunda doğru anlaşılmaması, proje tamamlanmadan modellenen sistemlere ilişkin yöntemsel veya yapısal değişiklıkların olması gibi sebeplerle ortaya çıkabilir. Şelale modeli ve diğer klasik proje yönetim modellerinin en önemli kabullenmesi proje gereksinimlerinin ve geliştirme sürecinin proje başında çok iyi seviyede tanımlandığı ve belli bir safhadan itibaren bu gereksinimlere göre hazırlanan tasarımın dondurulabileceğiidir. Bu kabullenme geleceğin de doğrulukla tahmin edilebilir olduğu kabullenmesini de beraberinde getirmektedir. İnşa projelerinde bu geçerli bir yaklaşım olabilecektir ancak bir MODSİM projesi için aynı durum söz konusu değildir. Bir MODSİM projesi ile ilgili yapabileceğimiz saptamalardan biri, projenin başında proje ile ilgili yapacağımız değerlendirmelerin doğruluk seviyesinin, projenin ilerleyen safhalarında yapacağımız değerlendirmelerdeki doğruluk seviyesinden düşük olacağdır. Klasik proje yönetim modellerinde yapılan bu kabullenme, değişime ve yeniliğe açık bir yapı yerine değişiklik karşıtı bir yapıyı ortaya çıkarmaktadır. Projenin başlangıcında tüm proje taraflarının gözünden kaçan bir hatanın yapıldığını kabul edelim. Projenin ilerleyen safhalarında bu hata ortaya çıktığında, hata kabul edilse dahi gerekli değişikliklerin yapılmasıından tasarımın daha önceden dondurulması nedeniyle kaçınılmaktadır. Bu durum proje yönetim modeli kapsamında doğru bir işlem olsa da gerçekte hatalı bir ürünün ortaya çıkması gibi projenin ana hedefi ile çelişen bir durumdur. Çevik proje yönetim modellerinde bu durum, kısa süreli iteratif planlama dönemleri, bu dönemler sonunda ortaya çıkarılan çalışır ürünlerin kullanıcıya sunulması, kullanımının geliştirme sürecine, ürün ortaya çıktığında yapılan değerlendirmelere katılması vb. önlemler ile ortadan kaldırılmaya çalışılmaktadır. Ayrıca, çevik yöntemlerin ana prensipleri esneklik, değişime açık olmak ve müşteri memnuniyeti sağlamaktır. Bu prensiplerin benimsenmesi problemin temelde çözümünde önemli bir adımdır.

MODSİM projelerinde karşılaşılan diğer bir husus, proje sürecinde, özellikle başlangıç döneminde, önemli bir zamanın dokümantasyon hazırlamak üzere harcanmasına rağmen hazırlanan bu dokümanların bir kısmının proje süresince kullanım oranının ve nihai ürüne katkısının düşük olmasıdır. Klasik proje yönetim modelinde, dokümanlar üzerinde harcanan bu süre, karmaşık ve tahmin edilebilirliği düşük bir ortamda proje yönetimi açısından başlangıçta bir güven ortamı oluşturmaktadır. Bu güven ortamının sanal olduğu, projenin kullanılabilir ürün olarak ortaya çıkması ile kullanıcı tarafından yapılan geri bildirimler sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu durumun çeşitli sebepleri vardır. Bir sebeplerden biri, dokümantasyon çalışmalarının, geleceğin tahmin

edilebilirliği ve MODSİM projelerinin karmaşıklığının kontrol edilebilirliği gibi doğruluğu tartışılar kabullenmeler üzerine kurulu olmasıdır. Diğer bir sebep ise son kullanıcıların projelarındaki en iyi girdilerini karşılarında çalışır bir yazılım gördükten sonra yapabildikleridir. Bir MODSİM projesinde dokümantasyon önemlidir. Ancak dokümantasyonun projenin önüne geçmemesi gereklidir. Bu kapsamda, proje doküman sayılarının tekrar gözden geçirilmesi bu problemi çözmek üzere iyi bir başlangıçtır. Çevik proje yönetiminde dokümantasyon yerine çalışır bir yazılıma daha fazla değer verilmiştir. Yazılı dokümanlar üzerinden yapılan uzun tartışmalar yerine sık yapılan yüz yüze görüşmelere değer atfedilmektedir. Bu yaklaşımın proje ilerleyişindeki etkinliği önemli ölçüde artıracığı değerlendirilmektedir.

MODSİM projelerinde bir diğer önemli konu proje ilerleyişini ölçmek üzere kullanılan sistemdir. Klasik proje yönetim modelleri kapsamında proje ilerleyisi, geliştirilmesi tamamlanan proje paket miktarı, bütçeden harcanan para miktarı, proje takvimindeki durum gibi kriterlerle yerine getirilmektedir. Projenin ana hedefi kullanıcı memnuniyetidir. Bu kapsamında, proje ilerleyişini gösterecek müşteri memnuniyetinin ölçülebildiği bir metriğin proje yönetim sürecinde kullanılması gereklidir. Çevik proje yönetim modellerinin en yüksek öncelikli hedefi müşteri memnuniyetidir. Böylece, proje yönetim sürecindeki bu hedefi ölçülecek metrikler çevik yaklaşımla daha kolaylıkla oluşturulabilecektir.

Proje yönetimindeki en önemli girdi insan faktöridür. Ancak bu çalışmada, müşteri bakış açısından bir değerlendirme yapıldığından bu alana girilmemiştir. Literatürde, çevik proje yönetim modellerinin proje grubunda görev alan personele pozitif katkılarına ilişkin veriler mevcuttur. Çevik proje modellerinin insan faktörü açısından değerlendirilmesi bu veriler ışığında yapılabilecektir.

4. SONUÇ

MODSİM projeleri teknoloji yoğun, karmaşıklığı yüksek projelerdir. Teknoloji projelerinin büyük bir oranının başarısız olduğu ya da proje başlangıcındaki hedeflerinden saptığını gösterir örnekler literatürde mevcuttur. Ülkemizde teknoloji içeren projelerin bütçe ve planlı sürelerini aşmaları kamuda ve özel sektörde sık karşılaşılan durumlardandır.

MODSİM projelerinde meydana gelen başarısız sonuçlar tüm proje taraflarını olumsuz yönde etkilemektedir. Müşteri, artan proje bütçesi, revize edilen teslim takvimi ve bekłentisinin altındaki ürün nedeniyle hayal kırıklığına uğramakta, proje grubu, uzun mesailer harcamalarına rağmen ortaya çıkan ürünün ihtiyaçları karşılamamasından ve eleştirilmesinden dolayı cesaretini ve motivasyonunu kaybetmektedir.

Doğrusal bir yapıya sahip şelale, spiral gibi klasik proje yönetim modelleri, teknoloji yoğun, karmaşıklığı yüksek MODSİM projelerinin yönetiminde yetersiz kalmaktadır. MODSİM proje yönetiminde sık karşılaşılan ve proje sürecine olumsuz etkileri olan problemlerin aşılması, karmaşıklık paradigmاسının desteklediği Çevik Proje Yönetim Modellerinden faydalılabileceği değerlendirilmektedir. Bu değerlendirmeye, Çevik Proje Yönetim Modellerinin genel esasları üzerinde yapılan inceleme ile ulaşılmıştır. Farklı yaklaşılara sahip çeşitli çevik proje yönetim modelleri mevcuttur. Bu modellerden hangilerinin, ne tip MODSİM projelerinde kullanılacağına ilişkin müteakip bir çalışmanın yapılması gerekliliği değerlendirilmektedir. Klasik proje yönetim modelleri geçmişte bazı projelerde başarılı sonuçlar verdiği gibi, gelecekte de belli şartları taşıyan projelerde kullanılabilecektir. Yapılacak müteakip çalışmalarında bu hususun da dikkate alınması gereklidir.

5. KAYNAKÇA

- [1] Camcı A. & Kotnour T. (2006), Technology Complexity in Projects: Does Classical Project Management Work , PICMET 2006 Proceedings.
- [2] Sone Poyu, S. (2008), Mapping Agile Project Management Practices To Project Management Challenges For Software Development, Dissertation Presented to the Faculty of Argosy University/ Washington DC.
- [3] PMBOK. (2008). A Guide to Project Management Body of Knowledge (4th Edition ed.). Newtown Square, PA: Project Management Institute.
- [4] Fuller, M. A., Valacich, J. S., & George, J. E. (2008). Information Systems Project Management : A Process and Team Approach. New Jersey: Prentice Hall.
- [5] Landaeta R., Tolk A. (2010), Project Management Challenges for Agile Federation Development: A Paradigm Shift, Proceedings of the 2010 Fall Simulation Interoperability Workshop, 10F-SIW-77.
- [6] Langton, C.G. (1992), Life At The Edge of Chaos, SFI Studies of Complexity pp.41-91
- [7] Manifesto for Agile Software Development(2001), <http://agilemanifesto.org/>
- [8] Kotikalpudi P. (2010) How to Improve Project Management for Agile Federation Development, Master of Science Thesis in Engineering Management and Systems Engineering. Old Dominion University, Norfolk, Virginia.

SİSTEM TEDARİK SÜRECİNDE TEKNOLOJİ DEĞERLENDİRMESİ İÇİN SİMÜLASYON KULLANIMI

Zuhal Kale Demirkiran ^(a), Taner Altunok ^(b), Altan Özkil ^(c)

^(a) Meteksan Savunma, Bilkent/Ankara, zkale@meteksansavunma.com.tr

^(b) Çankaya Üniversitesi, Çankaya/Ankara, taltunok@cankaya.edu.tr

^(c) Atılım Üniversitesi, İncek/Ankara, aozkil@atilim.edu.tr

ÖZ

Günümüzün hızla gelişen ve değişen teknoloji koşullarında, yeni bir sistem tedariki çok boyutlu bir değerlendirme sürecini gerekli kılmaktadır. Bu çalışmada morfolojik analiz ve simülasyon metodolojisi kullanılarak bir teknoloji değerlendirme modeli kurgulanmıştır. Model, yüksek irtifada röle görevi yapan bir İnsansız Hava Platformu durumu için uygulanmış ve veri linki sistemi alternatif anten teknolojilerinin değerlendirilmesi için kullanılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmaları ile morfolojik matriste yer alan her bir alternatifte ilişkin değerlendirme parametreleri ve bu parametrelere karşılık gelen performans değerlendirmeleri STK simülasyon aracı kullanılarak analiz edilmekte ve kullanıcıya uygun bir alternatif sunulması sureti ile karar desteği sağlanmaktadır. Uygulamada, seçilen arazi ve değerlendirme parametrelerine atanın önem dereceleri çerçevesinde en uygun çözümün anahtarlamalı çoklu-hüzme anten olacağı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Morfolojik Analiz, Sistem Tedarik Süreci, Simülasyon, Simülasyon Tabanlı Tedarik, Teknoloji Değerlendirme

USING SIMULATION FOR TECHNOLOGY ASSESSMENT IN THE SYSTEM ACQUISITION PROCESS

ABSTRACT

A new system acquisition process necessitates a multi-dimensioned assessment process especially in our recently changing and developing technology conditions. This study presents a technology assessment model developed using morphological analysis and simulation methodologies. The model is applied to a case of high altitude Unmanned Airborne Platform to be utilized as a relay in emergency situations and the model is used to assess alternative antenna technologies for the platform data link system.

Evaluation parameters for each alternative in the morphological matrix are assessed using STK simulation tool and decision support is provided to the user by suggesting an appropriate alternative compliant to the needs. In the application, multiple-beam switched antennas are chosen as the best solution for the selected terrain and the weights given to evaluation parameters.

Keywords: Morphological Analysis, System Acquisition Process, Simulation, Simulation Based Acquisition, Technology Assessment

1. GİRİŞ

Sistem tedariki ve yeni bir ürün geliştirme sürecinde dikkate alınan önemli kriterlerden biri de aday sistemlerin teknoloji hazırlık düzeylerinin tespit edilmesidir. Sisteme ilişkin ürün kırılımı oluşturulduktan sonra kırılımda yer alan her bir alt sistem teknoloji hazırlık düzeyi açısından değerlendirilerek sistemin yapılabilitlik analizi gerçekleştirilebilir. Ne var ki, sisteme ilişkin teknolojilerin sadece teknoloji hazırlık düzeyleri ile değerlendirilmesinde birçok kriter etkileşimi göz ardı edildiğinden değerlendirme yetersiz kalmaktadır. Örneğin teknoloji hazırlık düzeylerinin tek başına ilgili teknolojinin söz konusu ihtiyacıa uygun performans sağlayıp sağlamayacağını gösteremeyeceği aşikardır. Ayrıca hedeflenen sistem içerisinde ilgili teknolojilerin birbirleri ile etkileşimleri de göz ardı edilmektedir. Yani teknolojilerin birlikte kullanılıp kullanılamayacakları, birlikte kullanıldıklarında sistem performansını nasıl etkileyebileceklerine ilişkin değerlendirme niteliksel olarak yapılmaktadır.

Bu çalışmada, yüksek irtifada röle görevi yapan bir İnsansız Hava Platformu veri linki için morfolojik analiz yöntemi ve simülasyon metodolojisinin kullanımı ile sistem tedarik sürecinde gerekli olan anten teknolojileri sistematik ve birbirleriyle entegre bir bakış açısıyla değerlendirilecektir.

2. YÖNTEM

2.1. Morfolojik Analiz

Morfolojik Analiz veya diğer adıyla Alternatifler Analizi, İsveçli bir astronom olan Fritz Zwicky tarafından geliştirilmiştir. Bir problemi veya problem alanını çözümleyebilmek için daha küçük parçalara ayırmak genel olarak kabul görmüş bir yöntemdir. Morfolojik Matris veya diğer adıyla Alternatifler Matrisi de, problemi işlevsel birimlere kırarak çözmeye yarayan bir araçtır. Morfolojik Matris'te dikey kolonda sistem fonksiyonları veya anahtar parametreler, yatayda ise bunları karşılayan alternatif yöntemler yer alır [1]. Matris, olası alternatifleri göz ardı etmeden tüm

çözümleri görebilmeyi sağlar. Dolayısıyla, Morfolojik Matris işlevsel özellikleri karşılaşacak çözüm uzayını ortaya çıkarır.

Morfolojik Analiz yöntemi kullanılarak geliştirilen uygulamalardan biri Etkileşimli Yeniden Konfigüre Edilebilir Alternatifler Matrisi (Interactive Reconfigurable Matrix of Alternatives -IRMA)'dır [2]. IRMA'da her bir işlevsel alternatif için Teknoloji Hazırlık Düzeyi (Technology Readiness Level - TRL), maliyet, performans parametresi, sürdürülebilirlik gibi belirlenen metrikler için değer atanır. Daha sonra TRL veya diğer metrikler kullanılarak birbirleriyle uyumlu olmayan alternatifler elenerek, tasarım çözüm uzayı daraltılır.

Benzer şekilde tedarik sürecinde de yeni geliştirilecek sistem işlevsel olarak alt birimlere kırıldıktan sonra her bir birim için alternatifler belirlenerek morfolojik matris oluşturulabilir. Alternatiflerin belirlenmesinde pazar araştırması yönteminden faydalанılır. Belirlenen alternatifler nicel olarak değerlendirmeye tabi tutulmadan önce maliyet veya TRL değerine göre elenir. TRL değeri 6'dan az olan alternatifler henüz uygulama açısından yeterli teknolojik olgunluğa erişmediğinden değerlendirmeye alınmaz [1].

2.2. Alternatiflerin Değerlendirilmesi

Alternatif teknolojileri değerlendirebilmek için öncelikle performans değerlendirme parametreleri belirlenir. Performans değerlendirme parametreleri ilgili alanda uzman kişi veya gruplar tarafından belirlenir. İncelenenek sisteme göre değişkenlik gösterir. Performans değerlendirme parametrelerinin ölçülebilir bir kriter olması gereklidir.

Her bir performans değerlendirme parametresi uzman ekipler tarafından önem açısından 0-10 gibi bir ölçekte ağırlıklarıdır. Önem dereceleri uygulamada, Analitik Hiyerarşî Süreci kullanılarak hesaplanacaktır [6]. Böylece öznel etkinin azaltılması hedeflenmiştir. Belirlenen alternatif teknolojiler [1] ve [2]'de belirtildiği gibi teknik tecrübeye dayalı olarak değerlendirilebilir. Fakat teknoloji değerlendirme sürecinde uzman görüşlerine dayalı bir değerlendirme bazı belirsizlik ve eksiklikleri de beraberinde getirmektedir. Değerlendirme kalitesi uzman grubunun konuyu ne kadar iyi anladığı ve sahip olduğu tecrübenin sınırları ile orantılıdır. Dolayısıyla hem nicel değerlendirme yapabilmek hem de maliyet ve doğruluktan feragat etmemek için modelleme ve simülasyon yönteminden faydalılmaktadır.

Teknoloji Alternatiflerini ihtiyaça yönelik olarak karşılaştırılabilir ölçütlerle değerlendirebilmek için değerlendirme parametrelerinin modellenerek ölçülebileceği bir simülasyon ortamına ihtiyaç bulunmaktadır. Belli alanlarda uzmanlaşmış kurumların geliştirdikleri sistemler için çeşitli aşamalarda kullandıkları çokluwendunga kendilerinin geliştirdiği simülasyon araçları vardır. Değerlendirme aracı bu araçlar içerisinde

seçilebilir. Fakat seçilen aracın detaylı tasarım gereksinimlerine ihtiyaç duymaması gereklidir.

Her bir alternatif için simülasyon ortamında ölçülebilecek parametreler modellenerek analiz edilir. Analiz sonuçları Çizelge 1'de gösterildiği gibi morfolojik matrisin geliştirilmesiyle oluşturulan Alternatif Değerlendirme Matrisi üzerinde gösterilir.

Çizelge 1. Alternatif Değerlendirme Matrisi Örneği

		Alternatifler			
	Ağırlık (W_m)	A_1	A_2	...	A_n
Parametre 1	W_1	Δ_{11}	Δ_{12}	...	Δ_{1n}
Parametre 2	W_2	Δ_{21}	Δ_{22}	...	Δ_{2n}
...
Parametre m	W_m	Δ_{m1}	Δ_{22}	...	Δ_{mn}
	Toplam Değer	S_1	S_2	...	S_n

n: Alternatif sayısı,

m: Değerlendirme Parametresi sayısı,

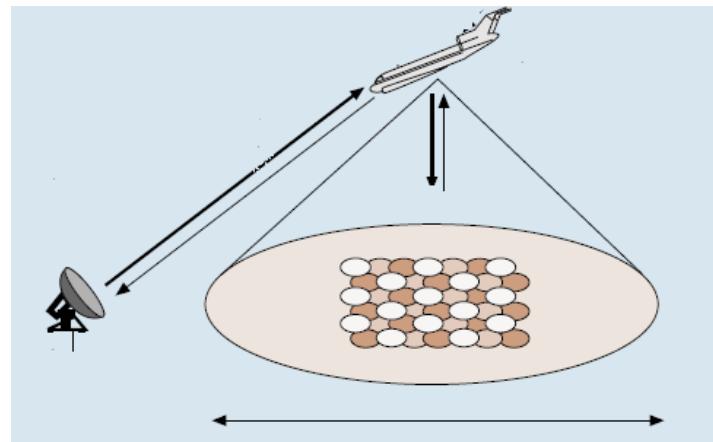
Δ_{mn} : Alternatif Performans Sonucu,

W_m : Ağırlık

Ağırlıklar, performans sonuçları ile çarpılır ve her bir alternatif için bu sonuçlar toplanarak toplam değer hesaplanır. Alternatifler içerisinde maksimum toplam değere sahip olan alternatif en uygun çözüm olarak seçilir.

3. UYGULAMA

Örnek bir durum olarak yüksek irtifada röle olarak görev yapan bir insansız hava platformu ele alınmıştır. Platformun deprem gibi mevcut haberleşme sistemlerinin kullanılamadığı bir acil durum senaryosunda belirlenen arazi üzerinde 20 km irtifada konuşlandırılarak, yerden aldığı kullanıcı verisini uzaktaki bir istasyona aktararak haberleşmeyi sağlaması beklenmektedir. Platformun en yüksek kapsama alanını sağlama için kullanılacak veri linki sisteminde hangi tip anten teknolojisinin tedarik edileceğinin belirlenmesi gerekmektedir. Örnek durum senaryosu STK simülasyon yazılımı kullanılarak Şekil 1'de gösterilen arazi ve platform ile modellenmiştir.

**Şekil 1.** Kullanım Konsepti

Simülasyonda platform üzerindeki veri linki sistemi almaç, göndermeç ve anten olarak modellenmiştir. Yerdeki kullanıcılar 2 GHz'de 12.2 kb/s ses aktarımı yapan terminallere sahiptir. Mevcut Senaryoya DTED-1 seviyesinde yükseklik verisi eklenmiştir. Yağmur nedeniyle oluşacak kayıplar ITU-R P.618 standardına uygun olarak bir eklenti ile modellenecektir fakat 2 GHz frekansında ihmal edilebilir bir yağmur kaybı bulunmaktadır. Veri linkinin modellenmesinde kullanılan simülasyon girdileri Çizelge 2'de verilmektedir.

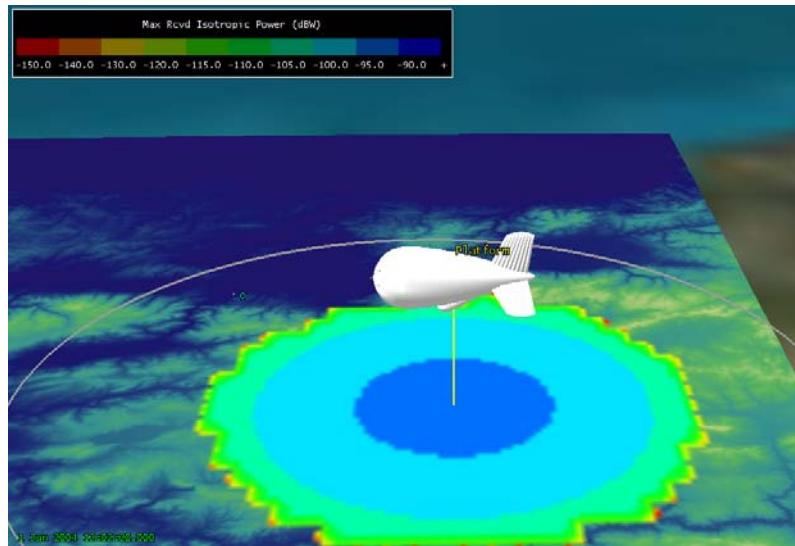
Çizelge 2. Simülasyon Girdi Parametreleri

Platform Yüksekliği	20 km
Frekans	2 GHz
Veri Hızı (Platformdan- Yere)	4 Mb/s
Anten Kazancı	30 dB
Gürültü Sıcaklığı (Yüksek İrtifa Platform)	223 K

Tanımlanan haberleşme ihtiyacı doğrultusunda hücresel bir yapı oluşturabilecek ve platform üzerinde kullanılabilen olası anten teknolojileri Faz Dizili Anten, Anahtarlamalı Çoklu-Hüzme Anten ve Mekanik Yönlendirmeli Anten olarak sınıflandırılabilir [3], [4], [5]. Tüm anten tipleri de mevcut uygulamalara sahip olduğundan teknoloji hazırlık düzeyleri istenen düzeydedir.

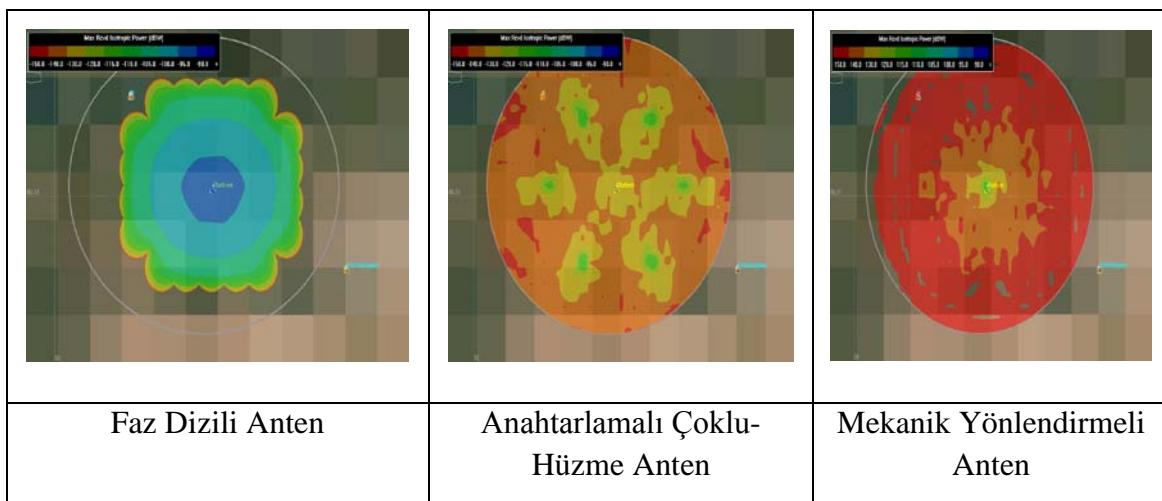
Anten teknolojilerini değerlendirmek için seçilen performans parametreleri ve alternatifler için atanmış değerler Çizelge 3'de verilmektedir. Performans parametreleri önem dereceleri Analitik Hiyerarşî Süreci uygulanarak ağırlıklandırılmış ve 0-1 arasında önem dereceleri hesaplanmıştır. Performans parametreleri için atanmış değerler alternatiflerin aldığı en yüksek değer 100 olacak şekilde ölçeklendirilerek belirlenmiştir.

En önemli değerlendirme parametrelerinden kapsama alanı için antenler farklı paternler ile modellenmiştir. Kapsama Parametresi STK simülasyon aracında ölçüm kriteri olarak tanımlanmış ve kapsama modülü kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 2'de faz dizili anten örneği için üç boyutlu kapsama alanı grafiği yer almaktadır.



Şekil 2. Faz Dizili Anten Kapsama Alanı (3 Boyutlu Grafik)

Yerdeki kullanıcılarla ilişkin almaç eşik değeri -110 dBm olarak seçildiğinde tanımlanan arazide bu değeri sağlayan alanların yüzdesi ölçülmüştür. Farklı anten tiplerine göre kapsama alanları Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 3. Anten Kapsama Alanları (2 Boyutlu Grafikler)

Karmaşıklık faz dizili antenlerde anten için gerekli mikrodalga kontrol elemanı sayısı, çoklu hüzme antenlerde ise kapsamak istenen alan için gerekli hüzme sayısı esas alınarak değerlendirilebilir. Örnek senaryoda 60° lik bir tarama açısı ve 30 dBlik bir kazanç için faz dizili antenlerde eleman sayısı yaklaşık 1000, çoklu hüzme antenlerde

ise 100 civarındadır [3]. Çeviklik parametresi anten hüzmesinin yönlendirilmesi için gerekli zaman olarak tanımlanabilir. Faz dizili ve çoklu-hüzme antenler için bu süre mikrosaniyeler mertebesindeyken, mekanik yönlendirmeli antenler için saniye ölçüsündedir [3]. Tarama kayıpları mekanik yönlendirmeli antenlerde önemsiz boyutlardayken, faz dizili ve anahtarlamalı antenlerde yüksektir [4].

Çizelge 4. Anten Sistemi Alternatif Değerlendirme Matrisi

	Ağırlık	Faz Dizili Anten	Anahtarlamalı Çoklu-Hüzme Anten	Mekanik Yönlendirmeli Anten	Alternatifler
Kapsama Alanı (%)	0,55	32	80	17	
Karmaşıklık	0,26	-100	-10	-1	
Çeviklik	0,05	100	100	1	
Tarama Kayıpları	0,14	-100	-80	0	
	Sonuç	-17,4	35,2	9,14	

4. SONUÇ

Çalışmada, değerlendirme aşamasında simülasyon kullanımı ihtiyacın platforma ve araziye yönelik değerlendirilmesini de mümkün kılmıştır. Çizelge 3'de elde edilen sonuçlar ışığında, ihtiyaç ve tanımlanan önem derecelerine göre anahtarlamalı çoklu-hüzme bir anten kullanmak en uygun çözüm olarak görülmektedir. Karmaşıklık parametresi maliyet ile ilişkilendirilerek, tanımlı bir bütçe varsa, bütçe açısından da değerlendirilebilir. Simülasyon fiziksel seviyeye indirgenerek gerçekleştirilmiştir. Kullanıcı sayısına dayanan çeşitli senaryolar geliştirilebilir. Bu yaklaşımla çalışma, ihtiyaç konseptini geliştirmek açısından da faydalı olabilecektir. Genel olarak uygulanan yöntem, seçim aşamasında nicel bazda karşılaştırmalar sunduğu ve bu karşılaştırmaları gerçeğe yakın bir simülasyon ortamında modelleyerek gerçekleştirdiğinden sağlıklı bir karar verme olanağı sağlamaktadır.

5. KAYNAKÇA

- [1] Ender, T. R., McDermott, T., ve Mavris, D. (2009), Development and Application of Systems Engineering Methods for Identification of Critical Technology Elements During System Acquisition, *7th Annual Conference on Systems Engineering Research 2009*, Loughborough University, 2-5.
- [2] Engler, W., Biltgen, P., ve Mavris, D. (2007), Concept Selection Using an Interactive Reconfigurable Matrix of Alternatives (IRMA), *Proceedings of the 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno.
- [3] Williams, W. L. (2003), Advanced Lightweight Electronically Steered Antennas for Responsive Space Payloads, *1st Responsive Space Conference*, Redondo Beach, CA, 5-7.
- [4] White, G., Falletti, E., Xu, Z., Borio, D., Sellone, F., Zakharov, Y., Lo Presti, L., Daneshgaran, F. (2006), Report on adaptive beamforming algorithms for advanced antenna types for aerial platform and ground terminals, *Capanina*.
- [5] Zavala, A. A., Cuevas, J. L. ve Delgado, J. A. (2008), High Altitude Platforms for Wireless Communications, *Wiley*, 108-116.
- [6] SAATY, T. (1980), The Analytic Hierarchy Process: Planning Setting Priorities, Resource Allocation, *Mcgraw-Hill*.

**ELEKTRO-OPTİK SİSTEMLERDE PERFORMANSI ÖNCEDEN
TANIMLAYACAK BİR MATEMATİKSEL MODEL
GELİŞTİRİLMESİİN GÖRÜNTÜ YOĞUNLAŞTIRICI
TÜP(GYT)'E UYGULAMASI**

Dr.Nebi GÜL⁽¹⁾, İlker İÇEN⁽¹⁾, Fizik Y.Müh.Ceyda BERK KARAKULAK⁽¹⁾

¹ MSB ARGE ve Teknj.D.Bşk.lığı, Ankara, Türkiye
{nebigul, ilkerphase, ceyoberk}@yahoo.com

ÖZ

Bilimsel çalışmalar ağırlıklı olarak deneysel olmakla birlikte teorik araştırma sonuçlarının laboratuar ortamında doğrulanması bilim adamlarının endişelerinin giderilmesi bakımından önem arz etmektedir. Bununla beraber, deneysel çalışmalarındaki süreçlerin uzunluğu hem iş gücü hem de süre bakımından önemli maliyetler getirmektedir. Askerî ve sivil alanda yaygın olarak kullanılan elektro-optik sistemlerin üretim süreçlerinin uzaması bu maliyetleri artırmaktadır. Bu sebeple birçok disiplinde olduğu gibi elektro-optik sistem tasarımda da modelleme yaklaşımı süre ve maliyet açısından önem kazanmaktadır. Elektro-optik sistemlerin envantere girdiği 1970-1980 döneminde önce sistem üretilip performansı görüldükten sonra modeli kurgulanmakta iken; günümüzde üretim öncesi modellenen sistemler üzerinde tasarım yapılması yaygındır. Böylece sistemin fonksiyonelliği simülasyon yolu ile de görülerek yapılacak sistemin muhtemel performansı test edilebilmektedir. Bu çalışmada; elektro-optik sistemlerin matematiksel modellemesine örnek olarak Gece Görüş Cihazları (GGC)'nın en önemli parçası olan Görüntü Yoğunlaştırıcı Tüp (GYT)'ün Modulasyon Transfer Fonksiyonu (MTF) için Gaussian eğrisi ve logaritmik regülasyon yöntemi ile bir modelleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Anılan çalışma ile yaygın olarak bilinen Gaussian MTF [1] modeline logaritmik bir regülasyon geliştirilerek öngörülen performans değerlerinin %70'lerden yaklaşık %95 oranına yükselmesi sağlanmıştır. Böylece; GGC için tartışılan gelecek nesil performansı ile ilgili olarak mevcut nesil teknolojilerini de açıklayan bir modelleme ile GYT teknolojisindeki gelecek 20 yılda ulaşılabilecek performans değerleri öngörebilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektro-optik, gece görüş cihazları (GGC), görüntü yoğunlaştırıcı tüp, modulasyon transfer fonksiyonu (MTF), modelleme, simülasyon, regülasyon.

**DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL PRE-
DEFINED ELECTRO-OPTICAL SYSTEM PERFORMANCE
APPLIED TO IMAGE INTENSİFİER TUBE**

ABSTRACT

Although scientific studies are mainly experimental, a verification of the theoretical research results in the lab environment is a great importance in terms eliminating concerns of scientists. However, long time of experimental studies bring a significant cost of the time and labor. An extension of production process of electro-optical systems that, widely used in military and civilian areas, increases these costs. For this reason, as in many disciplines, a modeling approach in design of electro-optical system gains important in terms of time and cost. At the period of 1970-1980, when electro-optical systems taken into inventory, at first the system was produced and observed its performance and then it's model was formed, nowadays it is generally used to design a model of a system before production. Thus, the functionality of the system by means of simulation will be seen and possible performance of system can be tested. In this study, as examples of Modulation Transfer Function (MTF), mathematical modeling of electro-optical systems modeling study with method of Gaussian curve [1] and logarithmic regulation to Image Intensifier Tube (IIT), which is a very critical part of the Night Vision System, was developed. At the end of this study, a logarithmic regulation was improved to Gaussian Model and this yields predicted performances values from %70 to approximately %95. Thus, the question of the how can be predict the performance of the next generation IIT was answered based on the current generation technologies and the new modeling approach we can foresee next two decays performance of the IIT.

Keywords: Electro-optic, night vision devices (NVD), image intensifier tube (IIT), modulation transfer function (MTF), modeling, simulation, regulation.

1. GİRİŞ

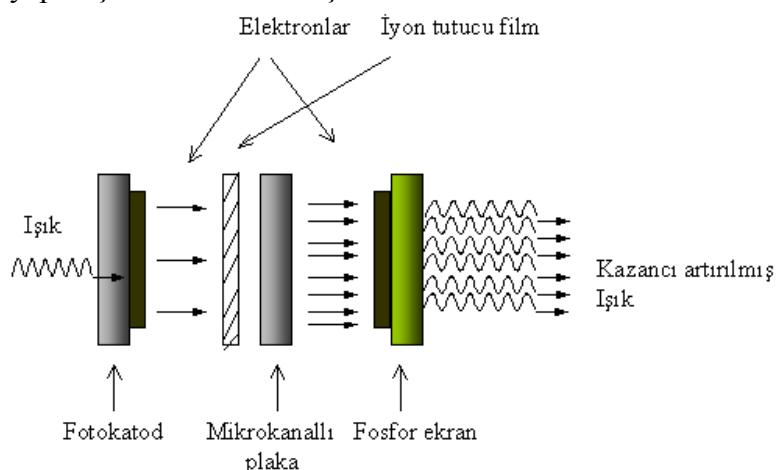
Askeri birliklerin her koşulda en az risk ile operasyon yapabilmelerini imkan sağlayacak bir teknolojinin geliştirilmesi amacıyla bilim insanları özellikle İkinci Dünya Savaşı döneminde gece görüş teknolojileri üzerinde çalışmaya başladılar. Işığın az olduğu çevre koşullarında görüş kabiliyeti geliştirilmesinin ilk örnekleri 1940'lı yillardan itibaren görülmeye başlamaktadır. Günümüzde yüksek kazançlı sistemler sayesinde ilk örneklerine göre performansları oldukça artmış olan Gece Görüş Cihazları (GGC), askeri uygulamanın yanı sıra sivil alanlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır.

Gece görüş teknolojileri genelde iki ana gruba ayırmaktadır. Birincisi; arka ve ön plandaki nesneler arasındaki sıcaklık farkının algılanması prensibine dayanan Termal Görüntüleme, ikincisi ise düşük seviyeli yıldız ya da ay ışığı gibi doğal kaynaklardan alınan fotonların şiddetinin arttırılması prensibiyle çalışan pasif gece görüş sistemleridir.

Pasif gece görüş sistemlerinin en önemli unsuru Görüntü Yoğunlaştırıcı Tüp (GYT)'lerdir. GYT gece koşulu gibi düşük ışık şartları altında optik sisteme mevcut ancak çiplak gözle nesnelerin görülmeyenini sağlamaya yetersiz olan ışığın artırılmasını sağlayan vakum tüp aygıtlardır. GYT ile elde edilen görüntünün kaliteli olması kullanıcı açısından oldukça önemlidir. Bir tüpün performansı askeri standartlarda yaygın olarak belirtilen parametrelerle (genellikle kazanç, çözünürlük, gürültü ve Modülasyon Transfer Fonksiyonu (MTF) gibi) belirlenir. GYT'ün en belirgin ve baskın performans göstergesi MTF değeridir. Bir GYT'ün performans modellemesi MTF değerine bağlı olarak yapılmaktadır. Böylece genel olarak MTF değeri ne kadar yüksekse elde edilen görüntü kalitesi de o kadar yüksek olur denilebilmektedir. [2]

1.1. Görüntü yoğunlaştırıcı cihazların yapısı ve çalışması

GYT'ün genel yapısı Şekil 1'de verilmiştir.

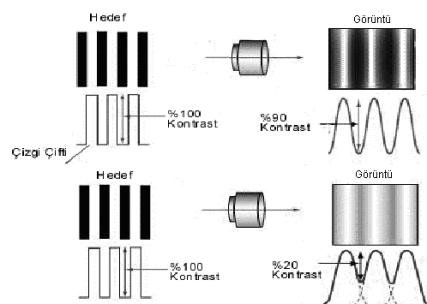


Şekil 1. GYT'lerin genel yapısı

Şekil 1'de görüldüğü gibi fotokatod; optik görüntüye ulaşan düşük şiddetteki fotonları elektronlara dönüştürür ve mikrokanallı plakaya aktarır. Mikrokanallı plaka gelen foto-elektronları 10 binler mertebesinde yükseltir. Mikrokanal plakada yükseltilen elektronlar fosfor ekran ile tekrar fotona dönüştürülürler. Böylece her bir kanala giren ışığın anlık seviyesine bağlı olarak oluşan foto-elektronlar geometrik oranda artırarak çıkışta yükseltilmiş ışığı sağlayacak elektron demetini oluştururlar.

1.2. Modulasyon transfer fonksiyonu (MTF)

Optik bir sistemin performansı genelde en uzak mesafede ayırt edebildiği en küçük nesne ile belirlenmektedir. Diğer taraftan bu parametreler elde edilirken yararlanılan ana performans ölçüm bilgisi, sistemin uzaysal frekans tepkisini çizgi çifti/mm veya devir/mm birimi ile gösteren MTF'dur. Optik/elektrö-optik sistemin MTF; o sistemin giriş nesnesinin kontrastının, sisteme özgü bir çözünürlük seviyesinde çıkışa, yani faydalanan görüntüye aktarma yeteneğidir. Başka bir ifadeyle MTF, çözünürlüğü ve kontrast aktarımını tek bir özellik olarak birleştirmenin yoludur. Bu görüntü alma kalitesi sistemin uzaysal frekans tepkisine bağlıdır. MTF açıklamanın bir şekli de yüzde yüz kontrastı gösteren siyah ve beyaz çizgilerden oluşan bir hedefi düşünmektedir. Böylece sistemin yüzde yüz performansını gösteren tam kontrastlı üçlü bar hedefi fotokatodun girişine verilmiş, fosfor ekrandan ayırt edilebilen çıkış görüntüsüne bakarak denk gelen üçlü bar hedefini; yani çıkış MTF'nu tespit etmek olarak görülmekte ve 1970'den beri kullanılmaktadır [3]. Bu yöntemde sistemin Fourier tepkisinin ölçüsü, uzaysal frekans girdilerine, yani mm başına düşen çizgi çifti cinsinden hedef test nesnesine optik/elektrö-optik sistemin verdiği tepki, ilgili çizgisel hedef nesnesinin algılanma derecesi ile ölçülür. Bu uzaysal frekans kontrast aktarma ilişkisi Şekil 2'de görülmektedir. Şekil 2'den görüldüğü gibi; frekans yükseldikçe görüntünün kontrasti düşer ve ayrıntıların algılanması zorlaşır.



Şekil 2. Sistemin MTF değeri azaldıkça ayırt edilen kontrastın azalması.

MTF bir mercek veya optik sisteme, kontrasta bağlı olarak, çıkış modülasyonunun giriş modülasyonuna oranı olması sebebiyle MTF hedefin sistem tarafından görüntüye çevrilme performansını gösteren objektif bir ölçümür [4].

Bu sebeple deneylerle elde edilen MTF değeriyle daha uyumlu bir analitik ifadenin varlığı, araştırmacıların/üreticilerin optik sistemin görüntü kalitesini daha iyi tespit etmelerinde tasarım aşamasında yardımcı olacaktır. Analitik ifadeler, sistemlerin modelleme aşamasında kullanıldığından ve tüm sistemin gerçekleşmesine gerek olmadan, başlangıçta sistemden beklenen performansın görülmesinde güçlü bir araç olması açısından daha önemlidir. Böylece, matematiksel olarak doğru kurgulanmış bir model, öngörülen sistem performans beklentilerinin gerçek modele daha yakın olarak simule edilmesine yardımcı olacaktır.

1.3 Görüntü yoğunlaştırıcı tüplerin MTF modeli

GYT'ün MTF performanslarının gösterilmesinde farklı MTF yaklaşımıları ve parametreler vardır. Bu MTF'lerin çoğu genellikle üretim süreçlerine yönelik olup, gece görüş cihazının; parlak-karanlık nokta sınırı, sabit görüntü gürültüsü, vakum kaçağı ve çıkış parlaklık tekdüzeliği, parlak ışık koruması, faydalı katod çapı vb. alt parametrelerini de kapsayacak getir-götür analizlerine olanak sağlayacak bir Gaussian MTF çalışması şeklinde yaygındır [5]. Bunlar içerisinde askeri standarlarda [6] verilen ölçüm sonuçlarına en yakın değerleri veren ve karmaşık girdi içermeyen Eşitlik 1'de, $MTF_{g.yo\check{g}.}$ olarak ifade edilen, MTF formülü modelleme açısından tercih edilmiştir.

$$MTF_{g.yo\check{g}.}(f_x) = e^{-2\pi^2\sigma_{MT}^2 f_x^2} \quad (1)$$

Burada;

f_x : Yatay eksen uzaysal frekans (çizgi çifti/mm)

σ_{MT} : görüntü yoğunlaştırıcı tüpün 1/e spot genişliğini (mm) göstermektedir.

Spot genişliği σ_{MT} üretilen tüpün duyarlılığına ve kullanılan malzemeye (mikrokanal genişliğine, fosfor ekran malzemesine ve kalınlığına, kazanç voltajına vb.) bağlıdır. İyi görüntü alınabilmesi için spot genişliğinin minimum olması beklenir [1].

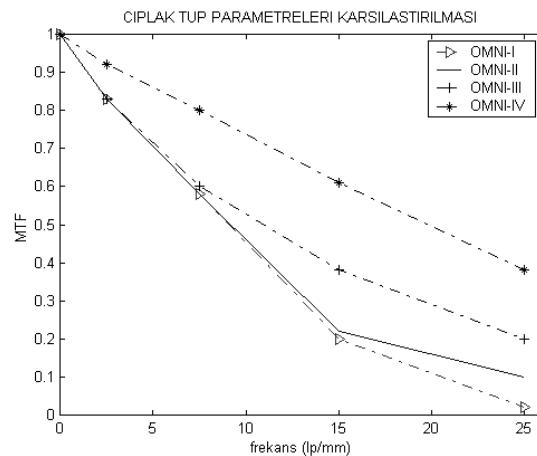
2. BİRİNCİ, İKİNCİ, ÜÇÜNCÜ VE DÖRDÜNCÜ NESİL GGC İÇİN MTF'LER

Askeri standarlarda yer alan ve çizgiçifti/mm olarak verilen uzaysal frekans değerlerinden 0, 2.5, 7.5, 15, 25 çizgiçifti/mm için MTF değerleri Çizelge 1'de sunulmaktadır. Buradan da görüleceği üzere; 1. Nesil ve 2. Nesil GTY'ler arasında MTF açısından düşük frekanslarda (0, 2.5, 7.5 çizgiçifti/mm) çok belirgin bir fark olmamakla beraber; özellikle kesim frekansını ifade eden 25 çizgiçifti/mm için MTF değerinin değişmesi alan uygulaması açısından farkındalık yaratmaktadır. Diğer 3. Nesil ve 4. Nesil geçişlerde her frekans için belirgin bir MTF iyileşmesinin görülmesi açıkları. Bu sebeple GGC'nın MTF açısından önemli bir ilerlemenin ise 3. ve 4. Nesil'de

ortaya çıktıgı görülmektedir. Şekil 3'de Çizelge 1'den derlenen, gerçek ölçüm MTF değerleri görülmektedir.

Çizelge 1. 1.-4.Nesil GYT için ölçülen MTF'ler [7]

Frekans Çizgiçifti/mm	I.Nesil OMNI.-I (%)	II.Nesil OMNI.-II (%)	III.Nesil OMNI.-III (%)	IV.Nesil OMNI.-IV (%)
0	100	100	100	100
2,5	83	83	83	92
7,5	58	58	60	60
15	20	20	38	61
25	3	10	20	38



Şekil 3. GYT nesilleri arasındaki farklılığın MTF gösterimi.

2.1. 3. Nesil OMNI-III için MTF

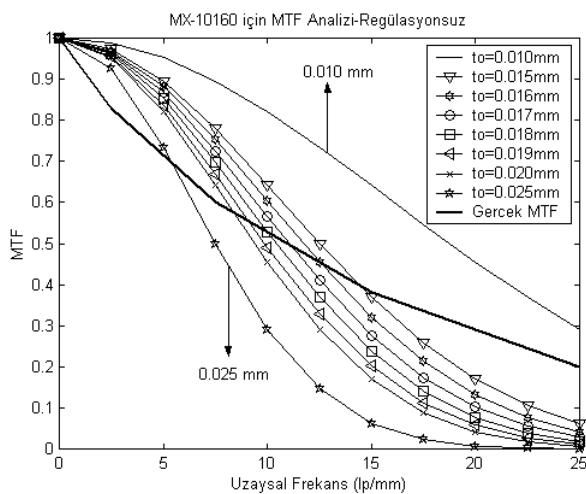
Gerçek bir MTF iyileşmesi ilk defa 3. Nesil GYT'lerde görüldüğünden Eşitlik 1 kullanılarak 3. Nesil bir GYT için matematiksel modelleme yaptığımızda değişik spot genişliğine bağlı elde ettiğimiz değerler (Çizelge 2'de sunulmuştur) gerçek ölçüme en yakın MTF değerinin spot genişliğinin 0,015 mm (15 μm) olduğunu göstermektedir.

Çizelge 2. 3. Nesil.GYT için MTF analizi-regülasyonsuz (Eşitlik 1.'e göre)

$\sigma(\mu\text{m})$	10	15	16	17	18	19	20	25
$f_x=0$	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
$f_x=2,5$	0.9877	0.9726	0.9689	0.9650	0.9608	0.9564	0.9518	0.9258
$f_x=7,5$	0.8949	0.7789	0.7526	0.7255	0.6979	0.6698	0.6414	0.4996
$f_x=15$	0.6414	0.3681	0.3208	0.2771	0.2372	0.2012	0.1692	0.0623
$f_x=25$	0.2912	0.0623	0.0425	0.0283	0.0184	0.0116	0.0072	0.0004

Bu değer her ne kadar gerçek ölçüm değeri ile tam olarak örtüşmese de ölçüme en yakın değer olduğu ve oluşturulacak matematiksel model için referans olabileceğini göstermesi açısından dikkat çekmektedir.

Bu yaklaşım Şekil 4'den de anlaşılabilirilmektedir.



Şekil 4. 3. Nesil GYT için spot genişliğine bağlı MTF değerleri.

Şekil 4'deki Gaussian eğriler Eşitlik 1'den elde edildiğinden, bu çalışmada gerçek bir GYT için oluşturulacak matematiksel modelin sonuçlarının ölçülen değerlere daha yakın olması beklenmektedir. Bu sebeple Şekil 4'den 15 mikronluk spot genişliğine denk gelen analitik MTF ile gerçek MTF arasında geçiş görüldüğünden bu ortak uzaysal frekans baz alınarak Eşitlik 2'de verilen bir logaritmik regülasyon katsayısı geliştirilmiştir.

$$K_3(f_x) = \begin{cases} \pi \cdot f_x \cdot \ln\left(\frac{f_x}{f_{co}}\right) \cdot 0,01 & f_x \leq f_{com} \\ f_x \cdot \ln\left(\frac{f_x}{f_{co}}\right) \cdot 0,01 & f_{com} < f_x \leq 25 \end{cases} \quad (2)$$

Bu katsayı Eşitlik 1'de yerine konursa Eşitlik 3 elde edilir. [8]

$$MTF_{g.yo\check{g}3}(f_x) = \begin{cases} e^{-2\pi^2\sigma_{HT}^2 f_x^2} + \pi \cdot f_x \cdot \ln\left(\frac{f_x}{f_{co}}\right) \cdot 0,01 & f_x \leq f_{com} \\ e^{-2\pi^2\sigma_{HT}^2 f_x^2} + f_x \cdot \ln\left(\frac{f_x}{f_{co}}\right) \cdot 0,01 & f_{com} < f_x \leq 25 \end{cases} \quad (3)$$

Eşitlik 3 ile oluşturulan matematiksel MTF modeli ile 3. Nesil GYT için MTF analizi yapılacak olursa; Çizelge 3'deki değerler elde edilir.

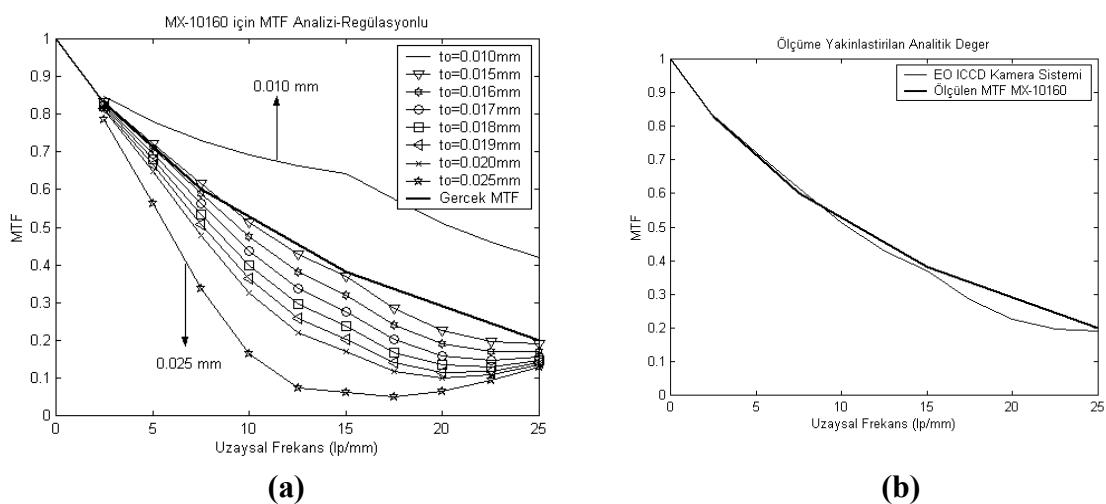
Çizelge 3 MX-10160 için MTF analizi-regülasyonlu (Eşitlik 3'e göre)

$\sigma(\text{mm})$	0,010	0,015	0,016	0,017	0,018	0,019	0,020	0,025
$f_x=0$	1	1	1	1	1	1	1	1
$f_x=2,5$	0.8470	0.8319	0.8282	0.8242	0.8201	0.8157	0.8111	0.7851
$f_x=7,5$	0.7316	0.6156	0.5893	0.5622	0.5345	0.5064	0.4781	0.3363
$f_x=15$	0.6414	0.3681	0.3208	0.2771	0.2372	0.2012	0.1692	0.0623
$f_x=25$	0.4189	0.1900	0.1702	0.1560	0.1461	0.1393	0.1349	0.1282

Elimizde hem ölçüm hem de regülasyonlu ve regülasyonsuz analitik MTF değerleri olduğundan bunları tek bir çizelgede değerlendirebiliriz. Çizelge 4'de bu değerler ve farklar görülmektedir.

Çizelge 4. GYT için regüleli ve regülasyonsuz MTF değerleri ve farkı

f_x (çizgiçifti/mm)	0	2,5	7,5	15	25
MTF (Ölçülen)	1.0000	0.83	0.60	0.38	0.20
MTF(Regülasyonsuz)	1.0000	0.97	0.78	0.37	0.06
MTF(Regülasyonlu)	1.0000	0.83	0.61	0.37	0.19
Fark (Ölç. - Regülasyonlu)	0	0	0.01	0.01	0.01



Şekil 5. (a) Ölçülen MTF değeri ve regüleli MTF'in spot genişliğine bağlı MTF modeli.

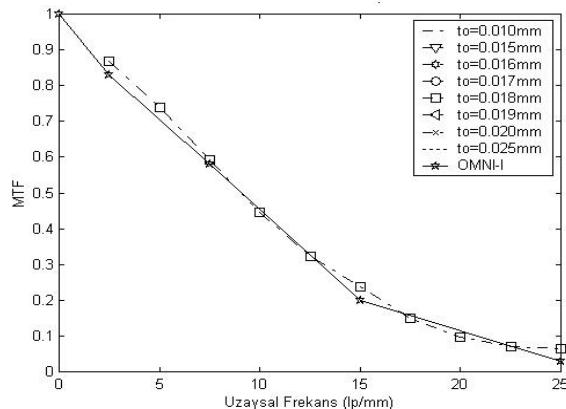
(b) Ölçülen ile en yakın modelin farkının gösterimi.

3. Nesil için geliştirilen Eşitlik 3'deki matematik modelde gerekli katsayı değişikliği ile diğer nesil GYT MTF'leri için de matematiksel model geliştirilmektedir.

1. Nesil için geliştirilecek regülasyon katsayısına K_1 dersek; 1. Nesil GGC için Eşitlik 1'deki MTF, Eşitlik 4'deki K_1 değerine bağlı olarak elde ederiz. Böylece 1. Nesil GGC için MTF değeri Eşitlik 5 yardımcı ile Şekil 6'daki gibi çizilebilir.

$$K_1(f_x) = \begin{cases} 0.0065\pi \cdot f_x \cdot \ln\left(\frac{f_x}{15}\right) & f_x \leq 15 \\ 0.0035 \cdot f_x \cdot \ln\left(\frac{f_x}{15}\right) & 15 < f_x < 25 \\ 0 & f_x > 25 \end{cases} \quad (4)$$

$$MTF_{GYOG-OMNI-I} = \left[e^{-2\pi^2\sigma^2 f_x^2} + K_1(f_x) \right] \quad (5)$$



Şekil 6. 1. Nesil GGC için ölçülen MTF değeri ile 18 mikrona denk gelen spot genişliğine göre regüle edilmiş analitik MTF.

2.2. 2.Nesil GYT için MTF

2. Nesil için geliştireceğimiz regülasyon katsayısı K_2 dersek ve K_1 'dekine benzer olarak geliştirildiğinde Eşitlik 5'deki MTF'i, Eşitlik 6.'daki K_2 değerine bağlı olarak elde ederiz.

$$K_2(f_x) = \begin{cases} 0.006\pi \cdot f_x \cdot \ln(\frac{f_x}{15}) & f_x \leq 15 \\ 0.01 \cdot f_x \cdot \ln(\frac{f_x}{15}) & 15 < f_x < 25 \\ 0 & f_x > 25 \end{cases} \quad (6)$$

2.3. 4. Nesil GYT için MTF

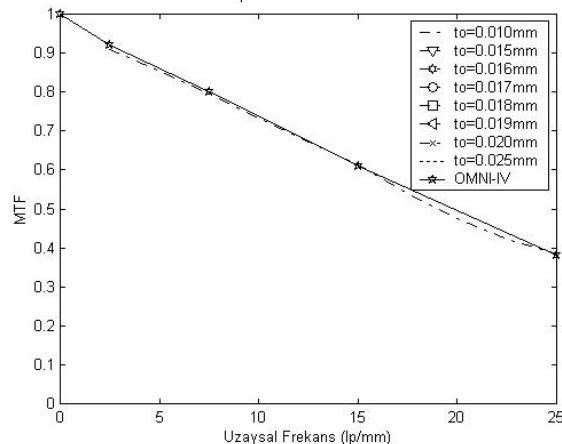
Benzer olarak 4. Nesil GYT regülasyon katsayısına K_4 dersek; 4. Nesil GGC için Eşitlik 7'deki MTF'i, Eşitlik 8'deki K_4 değerine bağlı olarak elde ederiz. Böylece 4. Nesil GGC için MTF değeri Eşitlik 7. yardım ile Şekil 7'deki gibi çizilebilir.

$$MTF_{GYOG-OMNI-IV} = \left[e^{-2\pi^2\sigma^2 f_x^2} + K_4(f_x) \right] \quad (7)$$

Burada $K_4(f_x)$:

$$K_4(f_x) = \begin{cases} 0.055\pi \cdot f_x \cdot \ln(\frac{f_x}{15}) & f_x \leq 15 \\ 0.01 \cdot f_x \cdot \ln(\frac{f_x}{15}) & 15 < f_x < 25 \\ 0 & f_x > 25 \end{cases} \quad (8)$$

olarak bulunur.



Şekil 7. 4. Nesil GGC için ölçülen MTF değeri ile 10 mikrona denk gelen spot genişliğine göre Regüle edilmiş analitik MTF

3. GELİŞTİRİLEN MODELİN SONUÇLARININ YORUMLANMASI

GYT için geliştirilecek benzetim simülasyonlarında kullanılabilecek MTF formülünün, sadece Gaussian bir formül değil, "Gaussian + logaritmik" bir regülatyon formülü ile ifade edilmesinin daha doğru bir sonuç verdiği yukarıda gösterilmiştir. Literaturde yaygın kullanılan MTF formülüne ilave edilen regülatyonun doğruluğu Boreman'a [2] göre de Fourier Transformu (FT) sayılan MTF'in genlik ve faz olarak ters FT'sine bakılarak da kontrol edilmiştir [8]. Burada her bir nesil gece görüş için elde edilen MTF değerleri ile Eşitlik 1'in regule edilmek suretiyle GYT'lerin performansını hesaplamak için kullanılabileceği gösterilmiş olmaktadır. Buradan yola çıkarak; ölçüm sonuçları ile ilişki kurarak ve Eşitlik 1'in yardımı ile geleceğe yönelik bir çıkarım yapılabileceği sonucuna varılabilir. Bu amaçla Çizelge 5'de düşük uzaysal frekans ve yüksek uzaysal frekanslara denk gelen MTF değerleri arasındaki farkları bulup çizelge haline getirirsek Çizelge 5'deki değerler elde edilir. Özellikle 3. nesilden 4. nesile geçişteki MTF farkları yeni nesile geçiş için de ipuçlarını vermektedir.

Çizelge 5. Nesiller arası düşük ve yüksek frekans MTF farkları

Frekans Ç.çifti/mm	1.Nesil OMNI.-I (%)	2.Nesil OMNI.-II (%)	3.Nesil OMNI-III (%)	4.Nesil OMNI.-IV (%)	Gelecek * Nesil %
(A) 2,5	83	83	83	92	99
(B) 25	3	10	20	38	55
A-B	80	73	63	54	44

Çizelge 5 ile gelecek nesile ilişkin MTF değeri öngörebilmekle birlikte; bunun hangi fiziksel etki ile olduğu hala belirsizliğini korumaktadır. Çizelge 6'da Eşitlik 1, spot genişliğinin 10 mikronun altına ineceğim Varsayımlı ile 1-9 mikron arasında spot genişlikleri için hesaplanmıştır. Geliştirilen model ile spot genişliğinin 7 mikrona denk gelebileceği çizelgeden görülebilmektedir.

Çizelge 6. Spot genişliğine bağlı MTF sonuçları

$\sigma(\mu\text{m})$	1 μm	3 μm	5 μm	7 μm	9 μm
MTF (2,5)	0,9998	0,9989	0,9969	0,9939	0,9900
MTF (7,5)	0,9988	0,9901	0,9726	0,9470	0,9139
MTF (15)	0,9956	0,9608	0,8949	0,8044	0,6978
MTF (25)	0,9877	0,8949	0,7346	0,5463	0,3681

4. SONUÇ

Gelecek nesil GYT MTF değerinin öngörülmesi için mevcut veriler kullanılarak matematiksel modeli kurgulanmış ve böylece ölçüme yakın MTF değerleri öngörülebilmiştir. Bu MTF değerleri Eşitlik 1'den görüleceği üzere nesil arttıkça spot genişliğinin gittikçe küçülmesine ve bunun da GYT'ün görüntü kalitesini artttığını göstermektedir. Gelecek nesil spot genişliğinin yaklaşık 7 mikronluk bir spot genişliğine denk geldiği görülmektedir. 4. nesil GYT MTF'ini sağlayan spot genişliğinin 10 mikron olarak bulunduğu göz önünde tutulursa 7 μm spot genişliğine denk gelen MTF değerlerinin gelecek 20 yılda gerçekleştirilebilir olduğu ve bu matematiksel model ile GYT teknolojisinde gelinen aşama itibariyle düşük frekanslarda yaklaşık %10-20 civarında, yüksek frekanslarda ise yaklaşık %30-40 civarında bir iyileşme sağlanarak GYT'nin GGC için görüntüyü zayıflatıcı etken olma dezavantajının ortadan kalkacağı öngörmektedir.

5. KAYNAKÇA

- [1] Holts G.C, 1996 “System MTF, CCD Array, Camera and Display” ICO Publishing, 2932 Cove Trail Winter Park, FL 32789, pp: 269
- [2] Boreman G.D, 2001 “Modulation Transfer Function in Optical and Electro Optical Systems” SPIE Pres ISBN : 0819441430 PP : 17
- [3] Biberman, L.M. (Editor) and Hall J.A 2000. “Ch.6: Calibration and Characterization of Image Intensifiers” and “Ch.5: Present Image Intensifier Tube Structures” Electro-Optical Imaging : Systems Performance and Modeling SPIE Pres, ISBN 0-8194-3999-1.
- [4] Wolfe L.W.1996. “Introduction to Infrared System Design” SPIE Optical Eng. Volume TT24
- [5] Bosch, L.A, 2000 “Image intensifier tube performance is what matters”, SPIE, Vol.4128, pp:65-78
- [6] ABD Standardı MIL-I-49453 (CR) 06 November 1989
- [7] Anonim 2002 Üretici Firmaların GGC Hakkında Seminer Notları
- [8] Gül N., 2010 “Kızılötesi Esaslı Aktif Algılama Kullanılarak Işık Olmayan Ortamlarda ICCD ile Görüntü Alınması ve ICCD Analitik MTF'in Çıkarılması” Doktora Tezi Nisan 2010 Ankara Üniversitesi

FMCW RADARLarda ÇOKLU HEDEF ÇÖZÜMLEME YETENEĞİNİN MODELLENMESİ VE SİMULASYONU

Kadir ERALTAY ^(a), Yakup ÖZKAZANÇ ^(b)

^(a) ASELSAN-REHİS, Yenimahalle, 06370, Ankara, keraltay@aselsan.com.tr

^(b) Hacettepe Üniversitesi, Beytepe, 06800, Ankara, yakup@ee.hacettepe.edu.tr

ÖZ

Bu çalışmada FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) radarlarda birden fazla hedefin bulunduğu ortam ve radar sinyal işleme modellemesi oluşturulmuştur. FMCW radar huzmesi içinde birden fazla hedefin bulunduğu ortamlarda, çoklu hedefleri ayırtılabilen bir algoritma önerilmektedir. Önerilen algoritma açıklanmış ve bu algoritma temelli çalışan bir radarın çoklu hedef içeren ortamlardaki çalışması modellenmiş ve simule edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Radar, FMCW Radar, Radar Modelleme, Üçgen Dalga Formu, Çoklu Hedef Çözümleme.

MODELLING AND SIMULATION OF MULTI-TARGET RESOLUTION CAPABILITY IN FMCW RADARS

ABSTRACT

In this study, a radar simulation model is proposed for FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) radars operating in multi-target environments. A radar signal and data processing algorithm is proposed for the resolution of simultaneous multiple targets appearing in the FMCW radar beam. The proposed signal processing framework is presented together with a simulation model depicting the FMCW multi-target resolution capability.

Keywords: Radar, FMCW Radar, Radar Modelling, Triangular Waveform, Resolving Multiple Targets,

1. GİRİŞ

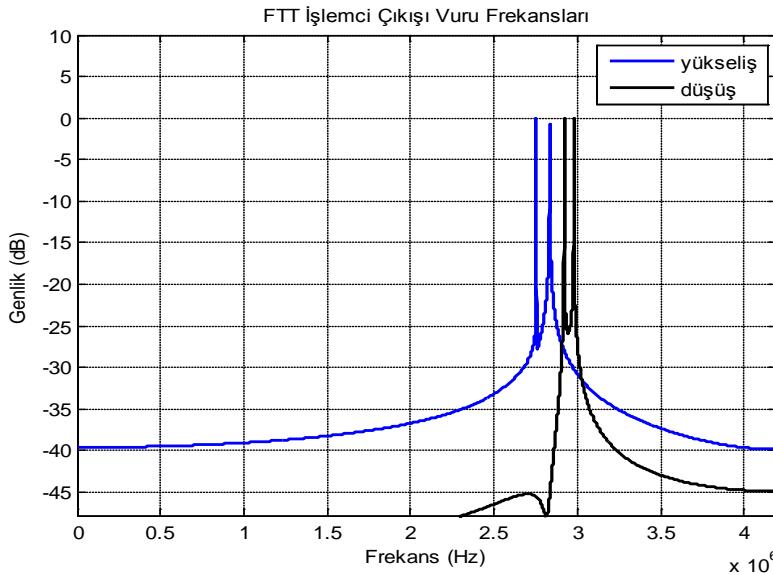
FMCW radarlar frekans modülasyonu kullanarak hedeflerin eşanlı olarak hem menzil hem de hız verilerini belirleyebilen sistemlerdir [1,2]. FMCW radarlar hedeften geri yansıyan FMCW sinyalinin yaratığı vuru frekanslarını işleyerek hedeflerin menzil-hız verilerini ölçmektedir. Radar hızmesi içinde birden fazla hedefin bulunduğu durumlarda; almaçta oluşan vuru frekansları da çoklu olacaktır. Bu hususta çoklu hedef ortamında hedeflerin menzil-hız verilerini belirleyemek için özel bir algoritmaya ihtiyaç duymaktadır [3,4]. Üçgen frekans taraması yapan FMCW radarda alınan sinyallerin alçalan-yükselen vuru frekanslarını birbirleriyle eşleştirmek gerekmektedir. Genelde FMCW radarlarda frekans kiplemesi testere dışı tarama yapılp iki boyutta Hızlı Fouier Dönüşümü ile çoklu hedefler analiz ortamı içerisinde ayırt edilmektedir[9]. Bu çalışmada birden fazla hedefin var olduğu ortamda vuru frekans bileşenlerini kendi aralarında eşleştirilebilmek için önerdiğimiz bir yöntem detayları ile analiz edilerek çoklu hedef ortamında çözümleme yapabileceği gösterilmiştir.

2. FMCW RADARLARDA ÇOKLU HEDEF ÇÖZÜMLEMESİ

İdeal durumda frekans ekseninde her hedef için bir vuru frekans çifti olacağından; FFT'si alınmış yansıtma sinyallerinin tepe sayısı hedef sayısının 2 katıdır. MATLAB üzerinde oluşturulmuş bir radar benzetim çalışması, aşağıda hedef hız-mesafe bilgileri verilmiş durumlar için çalışılmıştır . Ortamda mesafe-hız bilgileri sırası ile 2865 m, 365 m/s ve 2796 m, 421 m/s olan iki hedef varsayılmıştır. Şekil 1'de bu hedeflerin yarattığı iki çift alt ve üst vuru frekans bileşenleri gösterilmektedir. Tekli hedef ortamında hedefin menzili ve hızı

$$\begin{aligned} R_{target} &= \frac{T_m \cdot c}{4\Delta F} \left[f_{beat_{up}}(t) + f_{beat_{down}}(t) \right] \\ V_{target} &= \frac{c}{4f_o} \left[f_{beat_{down}}(t) - f_{beat_{up}}(t) \right] \end{aligned} \quad (2.1)$$

eşitlikleri ile belirlenir [7]. Ancak, bu eşitliklerden yararlanmak için vuru frekansları ile hedeflerin doğru eşleştirilmesi gerekmektedir. Yanlış bir eşleştirme ise sanal hedeflerin tespit edilmesi anlamına gelecektir. İki hedefin varlığında; bir üst vuru frekansına karşılık, iki olası alt vuru olduğu için toplamda 4 tane olası mesafe-hız veri çifti oluşacaktır. Bu dört olası hedefin hangilerinin gerçek hangilerinin sanal olduğunu



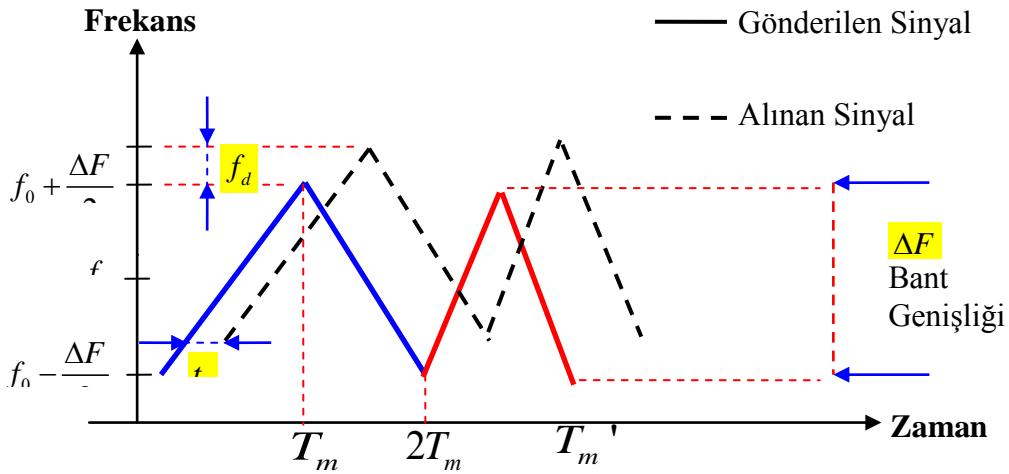
Şekil 1 İki hedef için toplam yansımaya sinyallerinin frekans eksenindeki görüntüsü
 $(f_{up_1} = 2.7538MHz, f_{up_2} = 2.8344MHz, f_{down_1} = 2.9205MHz, f_{down_2} = 2.979MHz)$

belirlenmesi hususu ‘çoklu hedef çözümleme’ kavramı ile ifade edilmektedir. Eşitlik (2.1)’e geri dönüldüğünde; denklemde radar çalışma frekansı (f_o), gönderilen sinyal kipleme zamanı (T_m), radar çalışma bant genişliği (ΔF) gibi parametreler yer almaktadır. Bu parametrelerden kipleme zaman periyodu (T_m) küçük değerler çerçevesinde irrasyonel katsayılı bir parametre ile çarparak Şekil 2’de verilmiş dalga formunda değiştirmeyi ve yeni mesafe ile hız eşitlikleri elde etmeyi önermektedir.

T_m kipleme periyodu k gibi irrasyonel sabit bir sayı ile çarpılsın;

$$T_m' = k \cdot T_m , \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} f_{beat_{up}}' &= \frac{2\Delta F}{k \cdot c T_m} R_t' - \frac{2V_t'}{c} f_o \\ f_{beat_{down}}' &= \frac{2\Delta F}{k \cdot c T_m} R_t' + \frac{2V_t'}{c} f_o \end{aligned} \quad (2.3)$$



Şekil 2 İki farklı kipleme periyodunda tarama yapılması durumunda gönderme tarama sinyallerin zaman-frekans eksenindeki görüntüsü

Eşitlik (2.4)'de belirtildiği gibi hedef menzil bilgisinin yer aldığı vuru frekans değeri hedef hız değeri yanında oldukça büyük olacaktır.

$$\frac{2\Delta F}{k.cT_m} R_t \ll \frac{2V_t}{c} f_o \quad (2.4)$$

Buna göre eşitlik (2.3)'ü tekrar yazarsak;

$$\begin{aligned} f_{beat_{up}} &\equiv \frac{2\Delta F}{k.cT_m} R_t \equiv \frac{1}{k} \cdot f_{beat_{up}} \\ f_{beat_{down}} &\equiv \frac{2\Delta F}{k.cT_m} R_t \equiv \frac{1}{k} \cdot f_{beat_{down}} \end{aligned} \quad (2.5)$$

olacaktır. Son olarak hedef mesafe bilgisini verecek eşitlik (2.1) elde edilir:

$$\begin{aligned} R_t &\equiv \frac{k.T_m c}{4\Delta F} \left(\frac{1}{k} \cdot f_{beat_{up}} + \frac{1}{k} \cdot f_{beat_{down}} \right) \equiv \frac{k.T_m c}{4\Delta F} \frac{1}{k} (f_{beat_{up}} + f_{beat_{down}}) \\ R_t &\equiv \frac{T_m c}{4\Delta F} (f_{beat_{up}} + f_{beat_{down}}) \equiv R_t \end{aligned} \quad (2.6)$$

Eğer radar kipleme frekans periyodu T_m , “ k ” gibi irrasyonel bir parametre ile değiştirilirse, yaklaşık olarak eşitlik (2.6)'da verilen sonuç elde edilecektir. Bu sonuca göre T_m kipleme frekans periyodundaki değişim, hedefler için tanımlanacak *mesafe bilgisi hesaplarındaki etkisi yok sayılabilir*. O halde, şimdi de kipleme frekans

periyodundaki değişimin hedeflerin hız denklemlerini nasıl etkileyeceğini gözlemleyelim. Hedef hız analitik denklemi tekrar yazarsak;

$$V_t = \frac{c}{4f_o} (f_{beat_{down}} - f_{beat_{up}}) \quad (2.7)$$

yeni vuru frekansları eşitlik (2.5)'de daha önce elde edilmişti:

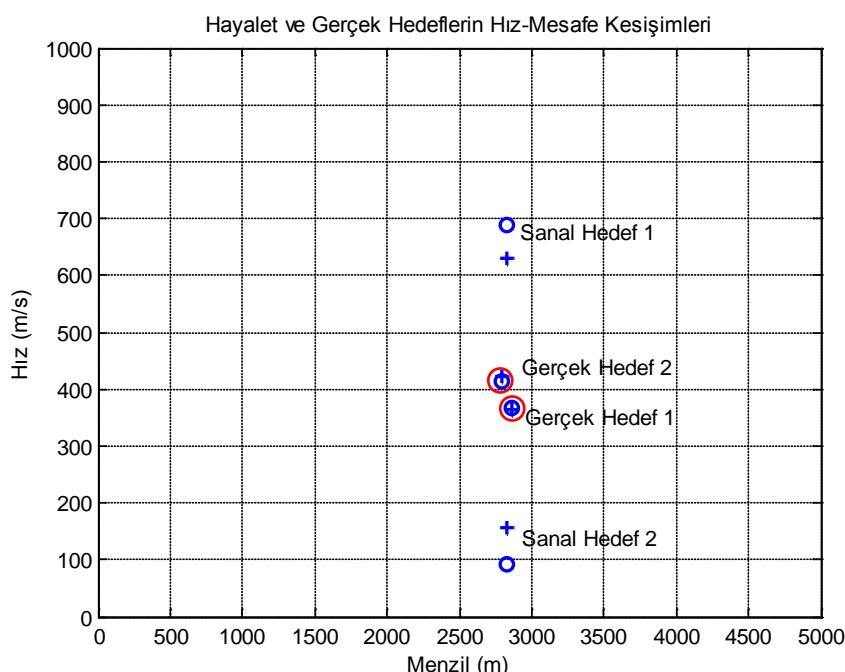
$$f_{beat_{up}}' = \frac{1}{k} \cdot f_{beat_{up}}, \quad f_{beat_{down}}' = \frac{1}{k} \cdot f_{beat_{down}} \quad (2.8)$$

Eşitlik (2.8) sonuçları, eşitlik (2.7)'de yerine yazılırsa, elde edilen hız denklemi şu şekilde oluşur:

$$\begin{aligned} V_t' &= \frac{c}{4f_o} \left(\frac{1}{k} \cdot f_{beat_{up}} + \frac{1}{k} \cdot f_{beat_{down}} \right) = \frac{c}{4f_o} \cdot \frac{1}{k} (f_{beat_{up}} + f_{beat_{down}}) \\ V_t' &= \frac{c}{4k \cdot f_o} (f_{beat_{up}} + f_{beat_{down}}) \neq V_t \end{aligned} \quad (2.9)$$

Göründüğü gibi radar gönderme frekans dalga formunda kipleme zamanı (T_m) parametresinin değişimi, hedef mesafe eşitliğini değiştirmezken; hedef hız denklemlerini doğrudan " k " değerinin büyüğüğe göre etkileyecektir. Bu etki radar sinyal işleme birimi içerisinde oluşturulacak bir değerlendirme algoritması ile kolaylıkla sezilip, hız değişimi ile oluşacak sahte hedef farklarının ortaya çıkışını sağlayacaktır. Burada hedef sayısına göre hesaplanacak olan olası hedef mesafe-hız değerleri farklı kipleme zamanları için saklanmalıdır. Hedef sayısına bağlı olarak olası hedef bilgilerinin hesaplanması artacaktır. Bu artış hedef sayısı n olmak üzere, $n!$ ile orantılıdır. Hız ve mesafe bilgilerinin birbirleri arasındaki tüm olasılıklarını hesaplamak yerine her hedef üst vuru frekansının sahip olacağı alt vuru frekansına göre hesaplama yapılabilir. Bir üst vuru frekansına ait alt vuru eşleşme frekansları oluşturulacak matrisin kolonlarına doldurulur. Her yeni üst vuru için yeni bir satırda diğer kolon değerleri hesaplanıp doldurulur. Bunların kendi aralarında oluşturacağı tüm olasılık değerlerini gözlemlerek yerine, hız-mesafe bilgileri matris elemanları karşılıklı olarak değerlendirilir. Bu sayede farklı hız ve farklı mesafe bilgilerinin oluşturabileceği sayısal değerler n boyutlu karesel matrislerden oluşacaktır. Bu matris elemanlarında hedeflerin mesafe bilgileri yaklaşık olarak aynı kalacakken, hız bilgileri çok farklı olarak değişecektir ve bu değişime maruz kalmayacak gerçek hedef hız değerleri kendi mesafesine karşılık gelen matris elemanı üzerinde kısmen kesişecék ya da oldukça yaklaşacaktır. Eğer hedefler aynı mesafede ise bir birleri ile kesişemeyecektir ancak iki noktanın birbirlerine olan mesafeleri diğer olası mesafelere göre oldukça düşük olacaktır. Bu sayede en düşük mesafe farkına eşit olacak mesafe-hız matrisi karşılık

elemanı bize hedefin bilgilerini verecektir. Bu düşünceleri gözlemlemek üzere; iki farklı kipleme frekans periyodu kullanıldığında hedeflere ait mesafe-hız bilgi girişleri sırasıyla $R_1 = 2865m$, $R_2 = 2796m$ ve $V_1 = 365m/s$, $V_2 = 421m/s$ olarak seçilmiş ve bir benzetim modeli kurulmuştur. Benzetim çalışması bu bilgiler girdi alınarak çalıştırıldığında; Şekil 3'de görüldüğü gibi iki farklı kipleme periyodu kullanıp ölçülen hedef mesafe hız bilgilerini karşılıklı olarak her bir tarama için eşleştirdiğimizde sahte hedefler birbirleri ile eşleşmeyecektir.



Şekil 3 İki farklı kipleme periyodunda tarama yapılması durumunda gerçek ve sahte hedeflerin mesafe-hız grafiğindeki yerleşimleri ($T_m = 2.13ms$, $T_m = 3.49ms$)

$$\text{Mesafe Matrisi}_1 = \begin{bmatrix} 2796.0 & 2832.4 \\ 2828.0 & 2864.5 \end{bmatrix}, \quad \text{Mesafe Matrisi}_2 = \begin{bmatrix} 2796.0 & 2831.2 \\ 2829.8 & 2865.0 \end{bmatrix}$$

$$\text{Hız Matrisi}_1 = \begin{bmatrix} 413.60 & 689.34 \\ 91.912 & 367.65 \end{bmatrix}, \quad \text{Hız Matrisi}_2 = \begin{bmatrix} 422.64 & 630.4 \\ 157.59 & 365.33 \end{bmatrix}$$

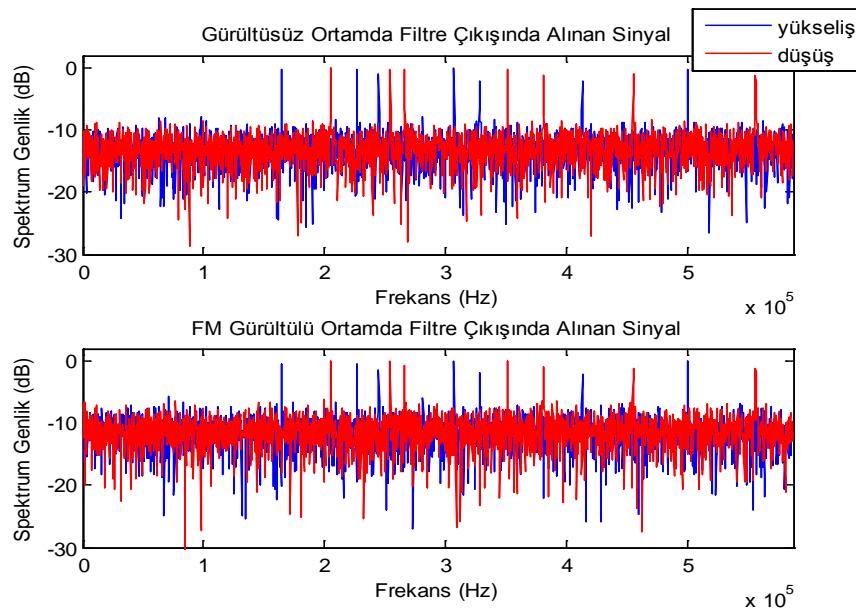
- 1. Hedef
- 2. Hedef

Şekil-3'de elde edilmiş hedef tespit görüntüsü oluşumunda belirlenmiş iki farklı kipleme zamanı periyodu ile edilmiş mesafe ve hız matrisleri yukarıdaki gibi olacaktır. Farklı kipleme zamanlarında elde edilen mesafe-hız matrisleri dikkatlice incelendiğinde birbirleri ile eşleştikleri gözlemlenebilir. Hedefin mesafe ve hız bilgileri karşılıkları, matris elemanlarında aynı indislerde yerleşecektir. Örneğin, ilk taramada hedefe ait hız değeri hız matrisinin birinci elamanında; mesafe değeri ise mesafe matrisinin de birinci elamanında olacaktır. Algoritma öncelikle birinci taramada belli bir eşik seviyesi üzerinde güce sahip sinyallerin var olduğunu algılar. Tepe değerlerine karşılık gelecek frekans bileşenlerini sıfırı kesme noktasını bulma yöntemi ile tespit eder. Buradan yükselen ve alçalan kenar frekans taramasına karşılık gelecek vuru frekans çiftleri elde tespit edilen hedef sayısı kadar oluşturulmuş karesel matrise yerleştirilir. Algoritmada işlem yükünü azaltmak için taramalarda elde edilecek çok büyük ya da çok küçük değerler, radarın maksimum ölçüleceği mesafe-hız değerine göre elenir. Yeni elde edilmiş mesafe ve hız matris çiftleri, önceden belirlenmiş hedefler arası mesafe ve hız eşik değerlerine göre değerlendirilir. İki farklı tarama da daha çok hız matrisleri değişkenlik göstereceği için matris elemanları arasında minimum uzaklık hız değerlerine göre belirlenir. Ayrıca, algoritmada olusabilecek olası sanal hedefler ayıklanır. Son olarak eşleşme gösteren hedefler Şekil-4'de gözlemlendiği gibi kırmızı ile işaretlenir.

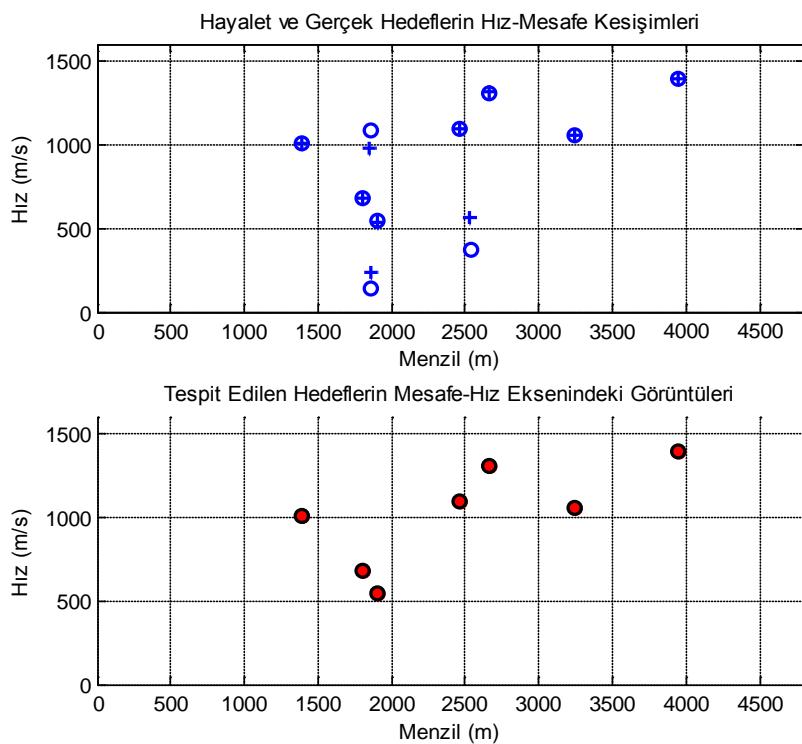
Sadece hedef sayısını artırarak aşağıdaki hedef bilgilerini benzetim çalışmasına girdi olarak aldığımızda; ölçümüleri yineleyip, elde edilecek sonuçları tekrar gözlemleyelim.

$$\begin{bmatrix} R(m) \\ V(m/s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3245 & 3950 & 1908 & 2465 & 1800 & 1392 & 2660 \\ 1054 & 1400 & 541 & 1097 & 678 & 1012 & 1310 \end{bmatrix}$$

Hedeflerin mesafe ve hız bilgileri benzetim çalışmasına girdi olarak verildiğinde taramalardan birinde elde edilmiş hedef vuru frekans çiftlerinin Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform) Şekil-4'de verilmiştir. Görüldüğü gibi ortamda ideal durumun biraz dışında frekans kiplenmiş gürültüye maruz bırakıldığı düşünülmüştür. Gürültü tabanı idealden biraz yüksektir.

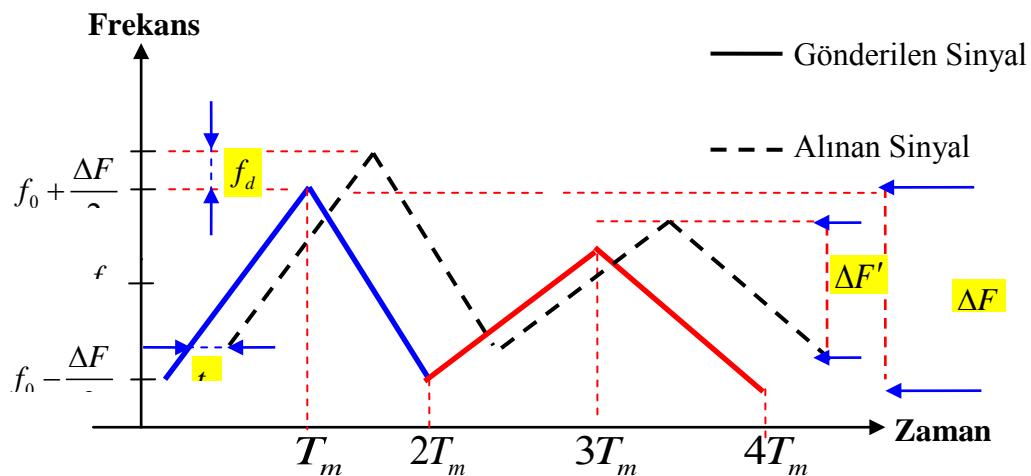


Şekil 4 Yedi hedefin radar almacında algılanan üçgen tarama türüne özel olarak elde edilmiş yükselen ve alçalan frekans çiftlerinin Hızlı Fourier Dönüşümü



Şekil 5 Yedi hedefin mesafe ve hız bilgilerinin ölçüm aralığındaki görüntüleri ($T_m = 2.13ms$, $T_m = 3.49ms$)

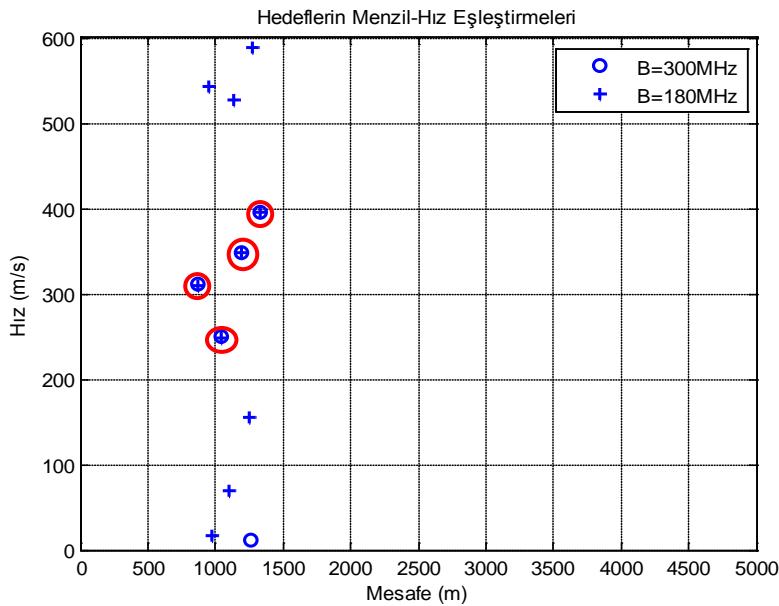
Grafikte “o” 2.13ms’ lik kipleme zamanında alınan ölçümleri, “+” ise 3.49ms kipleme zamanı sonrası alınan ölçümleri göstermektedir. Görüldüğü gibi “o” ve “+” eşleşmelerinin olduğu noktalar doğru mesafe ve hız bilgisini barındıracaktır. Kipleme zamanının değişimine karşılık vermeyen Şekil 5’de önerilen algoritma sonrası elde edilmiş hedefler bizim gerçek hedeflerimizdir. Aynı işlem, eşitlik (2.1)’de verilen mesafe ölçüm denkleminde yer alan bant genişliği (ΔF) Şekil 6’da gösterildiği gibi değiştirildiğinde de aynı sonuçlar elde edilebilmektedir.



Şekil 6 İki farklı bant genişliğinde tarama yapılması durumunda gönderme tarama sinyallerin zaman-frekans eksenindeki görüntüsü

Eğer tarama periyodu yerine gönderilen sinyalin tarama bant genişliği frekansı Şekil 6’da verildiği gibi değiştirilirse; bu denklemler aynı şekilde etkilenecektir ve elde edilen sonuçlar değişimeyecektir. Şimdi tarama bant genişliği değişiminin, birden fazla hedef olması durumundaki etkilerini gözlemleyelim. Benzetim çalışmasında hedeflere ait mesafe ve hız bilgi girişleri sırasıyla $R_1 = 1200m$, $R_2 = 1050m$, $R_3 = 1050m$, $R_4 = 1342m$ ve $V_1 = 350m/s$, $V_2 = 250m/s$, $V_3 = 312m/s$, $V_4 = 398m/s$ olarak seçilmiştir.

İki farklı tarama bant genişliği kullanılarak elde edilen Şekil 7’de verilmiş sonuçlar ile iki farklı kipleme zamanı kullanılarak elde edilmiş hedef mesafe-hız sonuç değerlerinin birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. İki farklı bant genişliği kullanımını yaparak gönderilen taramalardan dönen yansımaya sinyallerinde hedefler birbirinden ayırt edilmiş olup mesafe-hız bilgileri doğru olarak ölçülmüştür.



Şekil 7 Hedeflerin mesafe ve hız bilgilerinin ölçüm aralığındaki görüntüleri ($\Delta F = 300MHz$, $\Delta F' = 180MHz$)

3. SONUÇ

Bu çalışmada FMCW radar huzmesi içinde birden fazla hedefin olması durumunda, üçgen tarama formunun temel parametreleri olan kipleme zamanı T_m ve bant genişliği ΔF parametrelerini farklı taramalarda değiştirerek; çoklu hedeflerin mesafe ve hızlarını belirsizlik olmadan ölçülebilen bir yöntem önerilmiştir. Frekans kodlanmış sürekli zamanlı radar gönderme sinyalinde kipleme zamanı ya da bant genişliğini değiştirerek iki farklı tarama yapılmıştır. Frekans tarama eğrisindeki bu değişimin hedef sinyallerinin mesafe-hız bilgileri üzerindeki etkisi incelenmiştir. İlk tarama ölçüm verileri ile ikinci tarama ölçüm verileri karşılaştırılmıştır. Parametre değişimini sayesinde; sadece hedeflerin hızları belirgin olarak değişirken, mesafelerdeki değişim minimal olarak kalmıştır. Böylece eski ve yeni hedef mesafe-hız çiftleri eşleştirilmeye çalışılmıştır. Eşleştirme, ölçümler arasındaki “*Minimum Aralık Değişimi*” mantığına dayanmaktadır. Değiimin minimum olduğu noktalar bize çoklu hedeflerin mesafe-hız bilgilerini vermektedir. Bu yöntemin, Frekans Kodlu Sürekli Dalga formlu üçgen tarama yaparak hedeflerin mesafe-hız verilerini ölçmek isteyen radarlarda, çoklu hedeflerin analiz edilmesine olanak sağladığı yapılan modelleme ve oluşturulan benzetim çalışmaları ile doğrulanmıştır.

4. KAYNAKÇA

- [1] Komarov, I.V., Smolskiy, S.M., Fundamentals of Short-Range FM Radar, Artech House, 2003.
- [2] Skolnik, M., Radar Handbook, 3rd Eds., McGraw-Hill, 2008.
- [3] Pourvoyeur, K., Feger, R., Schuster, S., Stelzer, A., Maurer, L., Ramp Sequence Analysis to Resolve Multi Target Scenarios for a 77-GHz FMCW Radar Sensor, pp. 428–434, Cologne, Information Fusion, 11th International Conference, June 30 2008-July 3 2008.
- [4] DU, Yuming, YANG, Jianyu, XIONG, Jintao, Novel Method for Ambiguity Elimination in the Linear FMCW Radar, Volume 3, pp. 2066–2069, Signal Processing, Proceedings. ICSP '04. 2004 7th International Conference, 31 Aug.-4 Sept. 2004
- [5] Hermann, Rohling, Waveform Design, Range CFAR and Target Recognition, Advances in Sensing with Security Applications, NATO Security through Science Series, Volume 2, pp. 293–322, 2006,
- [6] Marc-Michael, Meinecke, Hermann, Rohling, Combination of LFMCW and FSK Modulation Principles for Automotive Radar Systems, German Radar Symposium GRS2000, Berlin, October 11.-12. 2000.
- [7] Bassem, R.Mahafza, Radar System Analysis and Design Using MATLAB, 3rd ed. Chapman&Hall/CRC Press, 2000
- [8] Wojtkiewicz, A., Misiurewicz, J., Nalecz, M., Jedrzejewski, K., and Kulpa, K., “Two-dimensional signal processing in FMCW radars,” Proc. XX KKTOiUE, pp. 475–480.
- [9] Donald, Barrick, Oceanic, N., and A.A.W.P. Lab, FM/CW Radar Signals and Digital Processing, Environmental Research Laboratories, July 1973

YERE İŞLEYEN RADARDA VERİ BENZETİMİ VE GÖRÜNTÜLEME YÖNTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Muhammed DUMAN ^(a), Ali Cafer GÜRBÜZ ^(b)

^(a) Elektrik-Elektronik Mühendisliği, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi,
m.duman@etu.edu.tr

^(b) Elektrik-Elektronik Mühendisliği, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi,
acgurbuz@etu.edu.tr

ÖZ

Yere işleyen radar (GPR) veri benzetim ortamı, radar sistemleri için gerekli temel bilgileri kullanıcıdan alarak, çeşitli farklı senaryolar için gereken veriyi oluşturan ve bu verinin birbirinden farklı sinyal işleme metotları ile işlenerek görüntülenmesini sağlayan bir simülasyon programıdır. Bu simülatör; sistemin tasarlandığı senaryoya göre gereken çeşitli parametreleri, kullanılacak veri tipini ve verinin işleneceği algoritmayı kullanıcının yönetimine bırakır. Böylece kullanıcı farklı görüntüleme algoritmalarından elde ettiği sonuçları birbiri ile karşılaştırma imkanına sahip olur. Engel arkası görüntüleme konusu üzerine, MATLAB GUI ortamında hazırlanan bu modül; parametre alma, veri oluşturma ve bu verileri görüntüleme ile ilgili problemleri tek bir yapı da birleştiren çok işlevli bir simülasyon programıdır.

Anahtar Kelimeler: Görüntüleme algoritmaları; MATLAB GUI; Simülasyon; Veri modelleme; Yere işleyen radar.

DATA SIMULATION IN GROUND PENETRATING RADAR AND DEVELOPMENT OF THE IMAGING TECHNICS

ABSTRACT

Data Simulation platform of Ground Penetrating Radar (GPR), is a simulation program which takes the basis information for the radar systems from the user, and builds up the data with different scenarios. The data is processed by using different imaging algorithms. This simulator allows users to choose the parameters, data type and algorithm, which data is processed in. So, users are able to compare the results obtained from the different displaying algorithms. The Module is constructed in MATLAB GUI. It has a unique structure which combines the menu of taking the parameters, forming the data and imaging it in one simulation platform.

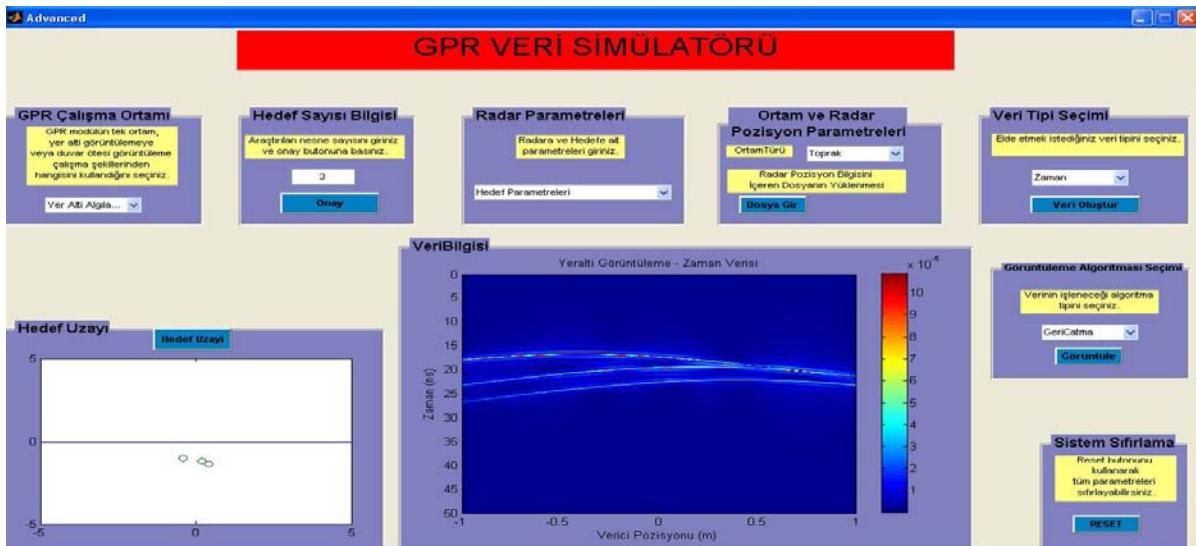
Keywords: Data modelling; Ground penetrating radar; Imaging algorithms; MATLAB GUI; Simulation.

1. GİRİŞ

Yere işleyen radar (GPR) [1, 2], yeraltının sıg tabakalarının araştırılmasında kullanılan yüksek çözünürlüklü elektromanyetik ve jeofizik bilimi tabanlı bir veri toplama tekniğidir. Temel olarak GPR, bir verici anten aracılığı ile yer içine gönderilen çok yüksek frekanslı elektromanyetik dalgaların ara yüzeylerden yansımاسının gözlemlenmesi ilkesine dayanmaktadır. Yere işleyen radar; mühendislik, arkeoloji, jeoloji ve yer araştırmaları, tünel araştırmaları, yapı araştırmaları gibi çeşitli çevresel araştırma alanlarında kullanılmaktadır. Yer altı görüntüleme radarı temel olarak iki farklı yapıya sahiptir. Bunlardan ilki dürtü tabanlı GPR [3, 4] sistemidir. Bu yapı zaman ortamında veri toplanmasını destekler. İkinci sistem, basamak frekans sürekli dalga (SFCW) GPR [5] yapısıdır. SFCW GPR sistemi ise frekans alanında veri toplanmasını [6] destekler.

Son yıllarda GPR konusunda artan araştırmalar ile birlikte yer altı görüntüleme, duvar arkası görüntüleme gibi çeşitli engel arkası görüntüleme metotları üzerine çalışmalar artmış ve bunun sonucunda araştırılan metodların incelenebileceği ortamlar ve ticari paket programlar oluşturulmuştur [7, 8, 9]. Ama bunların birçoğu kullanım olarak çok karmaşıktır. Yapılan veri simülatörleri konuya zamanda sonlu farklar yöntemi (FDTD) gibi elektromanyetik yoğunluklu bir açıdan baktıkları için hızlı veri elde edilmesini gerçekleştiremezler [9]. Bu yüzden geliştirilen modüller değişik sinyal işleme yöntemlerinin karşılaştırılması için uygun bir platform teşkil etmemektedirler.

Mevcut GPR modüllerin kullanımlarının pratik olmayışi sebebiyle, kullanımını basit olan ve veri elde edilmesinin yanında elde edilen verilerin işlenmesini sağlayacak bir modül geliştirilmiştir. Bu modül farklı sinyal işleme yöntemleri ile veriyi görüntüleyebilen bir grafiksel ara yüze sahip veri benzetim ortamıdır. GPR veri benzetim ortamının ara yüzü MATLAB GUI [10] üzerinden gerçekleştirılmıştır. Simülatör, çeşitli farklı senaryolar için (yer altı görüntüleme, duvar arkası görüntüleme ve homojen tek ortam görüntüleme) veri elde edilebilmesini sağlamaktadır. Belirlenen senaryoya bağlı olarak radar parametreleri, ortam parametreleri, hedef parametreleri gibi temel bilgilerin kullanıcıdan alınmasından sonra bu bilgiler kullanılarak frekans veya zaman ortamında veri oluşturulur. Bu veriler de farklı görüntüleme algoritmaları ve sinyal işleme yöntemlerinin uygulanması ile görüntülenirler. Geliştirilen veri benzetim ortamının mevcut diğer simülatörlerden farklı aynı anda farklı senaryolar ile çalışabilme imkanı sunan esnek bir yapısının olması ve ayrıca geliştirilen farklı görüntüleme algoritmaları ile veri görüntüleme ve bunları karşılaştırma imkanına sahip olmasıdır.



Şekil 1. GPR veri benzetim ortamı ana penceresi

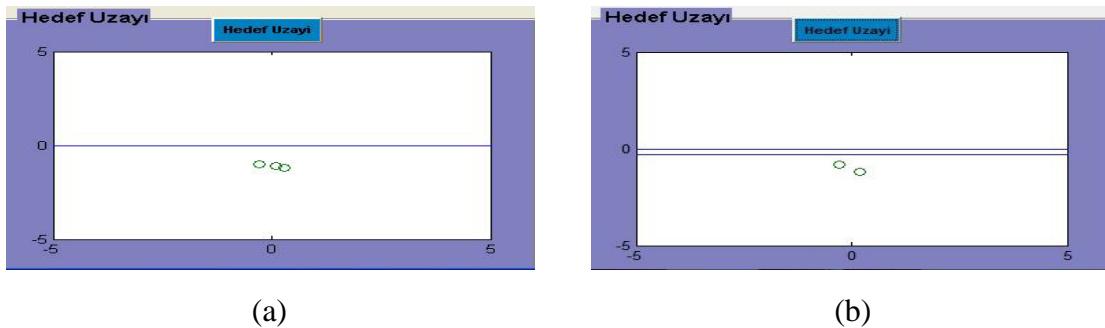
2. GPR VERİ BENZETİM ORTAMI

Geliştirilen GPR veri benzetim ortamı 4 bölümde incelenebilir. Birinci bölüm belirlenen senaryo tipinin tanımlandığı kısımdır. İkinci bölüm belirlenen senaryoya göre gereken çeşitli parametrelerin girildiği kısımdır. Üçüncü bölüm girilen parametre bilgilerine göre verinin oluşturulması ve oluşturulan ham verinin görüntülendiği kısımdır. Son bölüm ise ham verinin belirlenen görüntüleme yöntemine göre işlendiği ve görüntülendiği kısımdır. GPR veri işleme ara yüzünün ana sayfası Şekil 1'de gösterilmiştir.

2.1. Senaryonun belirlenmesi

Oluşturulan veri benzetim ortamı engel arkası görüntüleme senaryolarından 3 farklı tip için veri benzetimi yapabilir. Bunlar; nesneler ve radarın aynı ortamda bulunduğu homojen tek ortam senaryosu, nesneler ve radarın farklı ortamlarda bulunduğu yer altı görüntüleme senaryosu ve son olarak nesneler ve radar arasında farklı ortam özelliklerine sahip bir katmanın olduğu duvar arkası görüntüleme senaryosudur. Şekil 1'deki modülün ana penceresinde GPR çalışma ortamı olarak isimlendirilmiş kısım senaryo seçiminin yapıldığı bölümdür. Seçilen senaryo tipinin hedef uzay benzetimi, hedef uzayı olarak isimlendirilen grafiksel bölgede görüntülenebilir. Hedef uzayının görüntülenmesi iki farklı şekilde olabilir. Birinci yöntem, hedef parametrelerinin girilmesinden sonra sistem yapısının görüntülenmesidir. Bu yöntemde hedef parametre bilgileri girildikten sonra hedef uzayı butonu ile ulaşılır. İkinci yöntem, GPR senaryosunun belirlenmesinden sonra hedefler olmadan sistemin genel yapısının nasıl olduğuna dair bilgi verilmesini planlar. Bu yöntemde senaryo seçiminden sonra otomatik olarak görüntüleme gerçekleştirilir.

Örnek olarak Şekil 2(a) ve Şekil 2(b) de yer altı görüntüleme ve duvar arkası görüntüleme senaryolarının geometrisi gösterilmektedir.



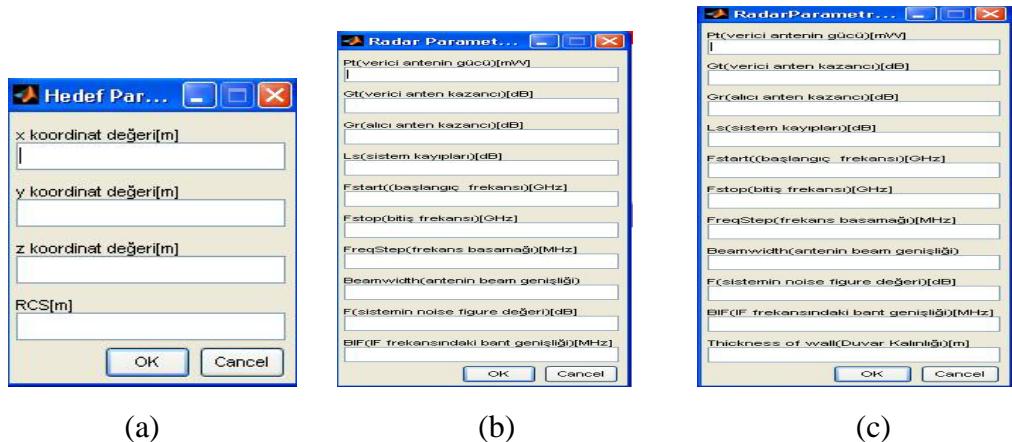
Şekil 2. Engel arkası görüntüleme hedef uzayları a) Yer altı radar görüntüleme b) Duvar arkası görüntüleme

2.2. Parametrelerin belirlenmesi

Seçilen senaryo tipine bağlı olarak gereken parametreler üç farklı grubaya ayrılabilir. Radar kazançları, başlangıç frekansı, bitiş frekansı gibi temel radar parametreleri içeren radar parametreleri kısmı ilk parametre grubudur. İkinci parametre grubu hedeflerin bilgilerini içeren hedef parametreleridir. Son parametre grubu ise ortamın çeşidinin seçildiği ve radarın pozisyon parametrelerinin girildiği ortam ve radar pozisyon parametreleridir. Bu parametreler ana pencere dışında açılan yeni pencerelerden alınarak sistemin ana sayfasının karmaşık görünmesinin önüne geçilmiştir.

2.2.1. Hedef parametreleri

GPR veri benzetimi için geliştirilen modülde hedefler noktasal yansıtıcılar olarak modellenmiştir. Geliştirilen veri simülatörü belirlenecek hedef sayısı için bir sınır koymaz. Kullanıcı istediği sayıda hedefi senaryosuna ekleyebilir. Hedef sayısı ve buna bağlı hedef parametrelerinin sisteme girişi şu şekilde gerçekleştirilir. Öncelikle kullanıcı kaç adet hedef ile çalıştığını belirtmelidir. Şekil 1'deki ana pencerede hedef sayısı bilgisi kısmında bu işlem gerçekleştirilir. Bu işlem sonrası kullanıcı, hedef parametre bilgilerini girebilecektir. Parametre bilgilerinin girilmesi için Şekil 3'deki gibi ayrı bir pencere kullanılır. Hedef parametreleri, hedefin (x, y, z) koordinat değerleri ve RCS değerleridir. Hedef parametreleri giriş ekranı Şekil 3(a) da gösterilmektedir.



Şekil 3. Hedef ve radar parametrelerinin girişi a) Hedef parametrelerinin alındığı menü
b) Yer altı görüntüleme için radar parametrelerinin alındığı menü c) Duvar arkası görüntüleme için radar parametrelerinin alındığı menü

2.2.2. Radar parametreleri

Benzetimi yapılan sisteme bağlı olarak değişen önemli parametrelerin kullanıcıdan alındığı bölümdür. Radar parametreleri belirlenen senaryoya göre farklılık gösterir. Örneğin, duvar arkası görüntülemede duvar kalınlığı parametresi diğer senaryolara göre ekstra istenen bir parametredir. Radar parametreleri olarak kullanıcıdan istenen değerler şu şekildedir:

Verici anten kazancı, alıcı anten kazancı, verici antenin gücü, sistem kayipları, başlangıç frekansı, bitiş frekansı, basamak frekans değeri, antenin huzme genişliği, gürültü figürü değeri ve IF frekansındaki bant genişlik değeridir. Seçilen senaryo duvar ötesi görüntüleme ise bu parametreler ek olarak duvar kalınlığı değerini de içerir. Basamak frekans yapısında çalışan bir GPR sistemi düşünülerek bu parametreler belirlenmiştir. Radar parametreleri Şekil 3(b) ve Şekil 3(c) deki gibi ayrı bir pencere üzerinden girilir. Kullanıcıdan istenen parametrelerin birimleri değerlerin girildiği pencerede özel olarak belirtilmiştir.

2.2.3. Ortam ve radar pozisyon parametreleri

Sistemin belirlendiği senaryoda ortama bağlı değişen parametreler vardır. Bunlar ortamsal özellikler olarak bilinen; dielektrik geçirgenlik, iletkenlik gibi parametrelerdir. Ortam bilgisi, ortam türü olarak seçilir. Yani ortamsal özelliklerin bilinmesine gerek kalmadan kullanıcı, çalıştığı ortamı seçerek bunu gerçekleştirebilir. Geliştirilen veri benzetim ortamı için yaygın olarak kullanılan hava, toprak ve beton ortamları ortam seçenekleri olarak belirlenmiştir. Bu ortamlar dışında, istenilen her türlü farklı ortam modüle eklenebilir. Böylece çok daha geniş bir çerçevede çalışma imkanı elde edilmiş olur.

Radarın hangi pozisyonlarda ölçüm aldığını belirleyen bölüm, radar pozisyon parametreleri olarak ifade edilir. Geliştirilen veri benzetim ortamında bu değerlerin simülatöre bağılılığını yok edecek ve esnek bir şekilde kullanıcı tarafından alınması sağlayacak bir sistem mevcuttur. Kullanıcı radar pozisyon bilgilerini, bu bilgileri içeren bir MATLAB veri dosyası şeklinde senaryosuna ekleyebilir. Oluşturulacak pozisyon dosyası radarın ölçüm noktalarını $3 \times N$ lik bir matris şeklinde ifade edecek şekilde tasarlmalıdır. Burada N ölçüm sayısını göstermekte ve her bir sütunda sırasıyla $[x; y; z]$ pozisyon bilgileri bulunmalıdır.

2.3. Benzetim verisinin oluşturulması

Gerekli parametreler girildikten sonra görüntülemeye geçmeden benzetim verisinin oluşturulması gereklidir. Benzetim verisinin oluşturulması frekans ortamında ve zaman ortamında olmak üzere iki farklı yöntem ile gerçekleştirilir. Veri tipi seçildikten sonra oluşturulan veriler görüntülenebilir. Böylece gerçekleştirilen veri ortamı, oluşturulan verinin doğruluğunu kontrol etme imkanı da sunmuş olur.

2.4. Benzetim verisinin çizilmesi ve sinyal işleme yöntemleri

Gerçekleştirilen veri benzetim ortamı gerekli tüm parametre değerleri girildikten sonra ve veri tipi seçilerek veri oluşturulduktan sonra, bu verileri farklı sinyal işleme yöntemleri kullanarak görüntüleyebilmektedir. Şu anda kullanılan görüntüleme yöntemleri zaman ve frekans alanındaki geri çatma ve F-K (stolt) migrasyonu yöntemleridir [11, 12, 13]. Görüntüleme algoritması seçildikten sonra ilgili imge veri bilgisi olarak adlandırılan kısımdan incelenebilir. Bunlar dışında üzerinde çalışılan ve oluşturulması düşünülen çeşitli sinyal işleme teknikleri mevcuttur. Bunlar; dürtü radar ile zamanda veri toplama [14, 15], sıkıştırılmış algoritma [16, 17] ile ilgili çeşitli teknikler ve üzerinde çalışılan diğer migrasyon teknikleri (Kirchhoff migration, Phase Shift migration) [18, 19] gibi farklı görüntüleme algoritmalarıdır. Gerçekleştirilen her yeni teknik veri benzetim ortamına eklenecektir.

2.4.1. Geri çatma yöntemi ile görüntüleme

Geri çatma ile görüntüleme yöntemi yere işleyen radar için yaygın kullanılan bir görüntüleme yöntemidir. Bu yöntem elde edilen veri tipine göre iki şekilde gerçekleştirilebilir. Eğer veri frekans ortamında oluşturulmuş ise uygulanan yöntem frekans alanında geri çatma yöntemi, eğer veri zaman ortamında oluşturulmuş ise uygulanan yöntem zaman alanında geri çatma yöntemi olarak isimlendirilir. Temel olarak iki yöntem de sistemin veri toplama işlemeye dürtü yanıtının uyumlu filtresini uygulayarak görüntü oluşturulması şeklinde tanımlanabilir. Noktasal hedeflerin oluşturduğu uzay-zaman yanıtı hiperbolik bir şekle sahiptir. Geri çatma metodu her bir uzaysal nokta için bu hiperbolik şekle karşılık gelen verilerin ağırlıklı toplamı olarak da tanımlanabilir. Geri çatma yönteminin matematiksel tanımı (1) ifadesinde verilmiştir.

$$u(r', t) = \int \int w(r). u(r, t + (R1 + R2) / v) dx dy \Big|_{t=0} \quad (1)$$

Oluşturulan ham verinin belirtilen gecikme sürelerindeki cevaplarının bulunarak toplanması geri çatma yönteminin sonucunu verecektir.

2.4.2. F-K migrasyonu yöntemi ile görüntüleme

Ham verilerin görüntülenmesi için geliştirilen yöntemlerden bazıları frekans alanında çalışan görüntüleme yöntemleridir. F-K migrasyonu yöntemi frekans ortamında çalışan görüntüleme metodlarından biridir. F-K migrasyonu yönteminin uygulama basamakları şu şekildedir:

- 1) Gerekli ham veri zaman alanında oluşturulur.
- 2) Oluşturulan ham veri 2-D Fourier dönüşümü ile frekans ortamına taşınır.
- 3) K uzayına geçiş gerçekleştirilmelidir. K uzayı geçisi iç değer bulma (interpolation) ve yerleştirme (mapping) algoritmaları [20] kullanılarak gerçekleştirilir.
- 4) Bu işlemlerden sonra (2) ifadesine ulaşılır.
- 5) İç değer bulma işleminden sonra oluşan verinin ters FFT si alınarak görüntülenecek veri bulunmuş olur.

$$E(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int \left(\int (c^2 k_z / w) E(k_x, k_y, w) e^{jk_z z} e^{jk_x x} e^{jk_y y} dk_x dk_y dk_z \right) (2)$$

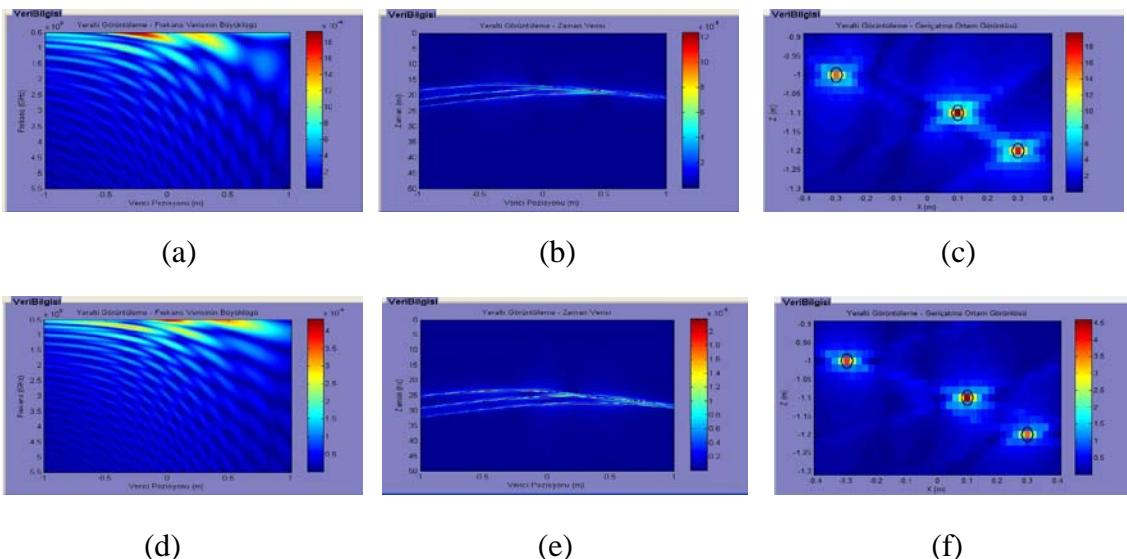
F-K migrasyonu ile görüntüleme yöntemi FFT tabanlı bir metot olduğu için hızlı çalışır. Fakat metot, tek ve homojen bir ortam kabullerine dayanır. Katmanlı (hava-yer veya duvar ötesi) ortamlarda direk kullanılırken görüntüleme ve metodun konumlandırma kabiliyeti azalmaktadır. Bu yöntemde hız değişim görüntüsünün katmanlı ortamlara uyarlanmasıının çözümlenmesi için çeşitli metotlar denenmiş, başarılı sonuçlar alınmasına karşın hesaplama yükünün fazla oluşu ayrı bir problem olarak meydana çıkmıştır. Hız değişim görüntüsünün uyarlanma probleminin çözümlenmesi için faz kaydırmalı migrasyon yöntemi tasarlanmıştır. Faz kaydırmalı migrasyon yöntemi ileriki çalışmalarda uygulanması planlanan görüntüleme yöntemlerindendir.

2.5. Sistem sıfırlama

Bu bölüm sistemde kayıtlı olan tüm parametreler ve değişkenleri sıfırlamayı sağlayan kısımdır. Girilen eski parametre değerleri, grafik verileri gibi değişkenlerin sistemde tutulmaması için geliştirilmiştir. Sistemin en baştan çalışmasını sağlar.

3. UYGULAMALAR

Uygulama olarak üç farklı senaryo belirlenerek bunların simülasyonu gerçekleştirilmiş ve sonuçları yorumlanmıştır. İlk olarak yer altı görüntüleme çalışması yapılmıştır. Radar parametreleri, anten gücü 50 mW, verici anten kazancı 12 dB, alıcı anten kazancı 12 dB, sistem kayipları 5 dB, basamak frekansı 4 MHz, başlangıç frekansı 0.5 GHz, bitiş frekansı 5.5 GHz, antenin huzme genişliği 40 derece, sistemin gürültü figürü değeri 5 dB, IF bant genişliği 2 MHz olarak seçilmiştir. Hedef parametreleri, nesne 1 için koordinat değerleri (-0.3, 0, -1) ve RCS 0.5 m^2 , nesne 2 için koordinat değerleri (0.1, 0, -1.1) ve RCS 1 m^2 , nesne 3 için koordinat değerleri (0.3, 0, -1.2) ve RCS 1 m^2 olarak seçilmiştir. Bunlar dışında ortam olarak toprak ve beton kullanılmıştır. Radar pozisyon bilgileri de hazırlanan MATLAB dosyası ile sisteme eklenmiştir. Şekil 4(a) ortam toprak seçilerek frekans alanında elde edilen verinin görüntüsüdür. Şekil 4(b) ortam toprak seçilerek zaman alanında elde edilen verinin görüntüsüdür. Şekil 4(c) elde edilen verinin geri çatma algoritması ile işlendikten sonra oluşan görüntüsüdür. Aynı şekilde Şekil 4(d), 4(e), 4(f) ortam olarak beton seçildikten sonra elde edilen cevaplardır.

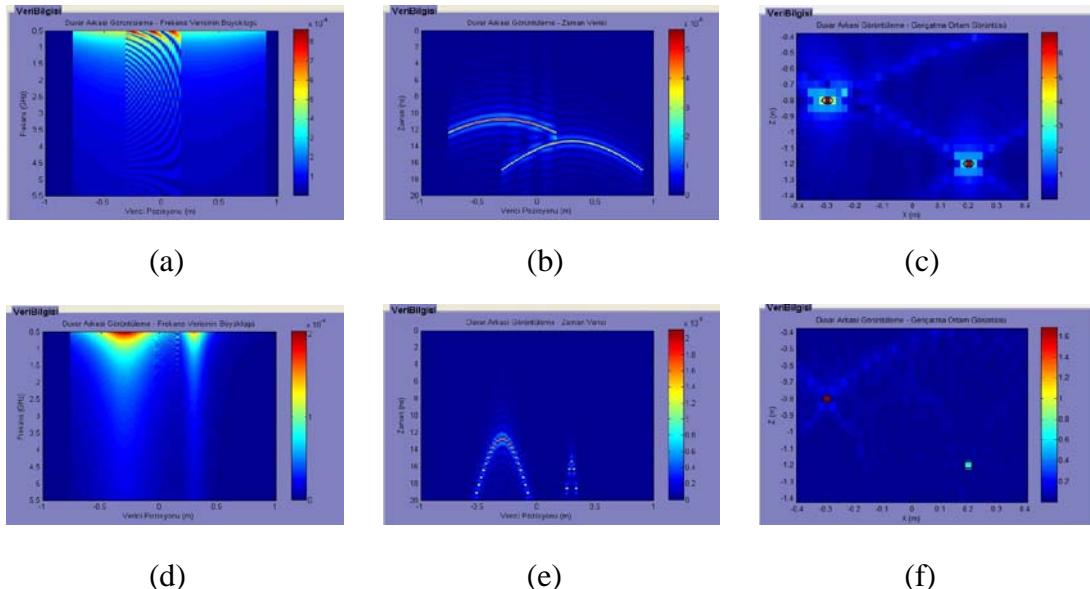


Şekil 4. Yer altı görüntüleme uygulama sonuçları a) Frekans verisi (toprak) b) Zaman verisi (toprak) c) Geri çatma görüntüleme (toprak) d) Frekans verisi (beton) e) Zaman verisi (beton) f) Geri çatma görüntüleme (beton)

İkinci uygulama olarak duvar arkası görüntüleme senaryosu ele alınmıştır. Uygulamada kullanılan parametre bilgileri şu şekildedir:

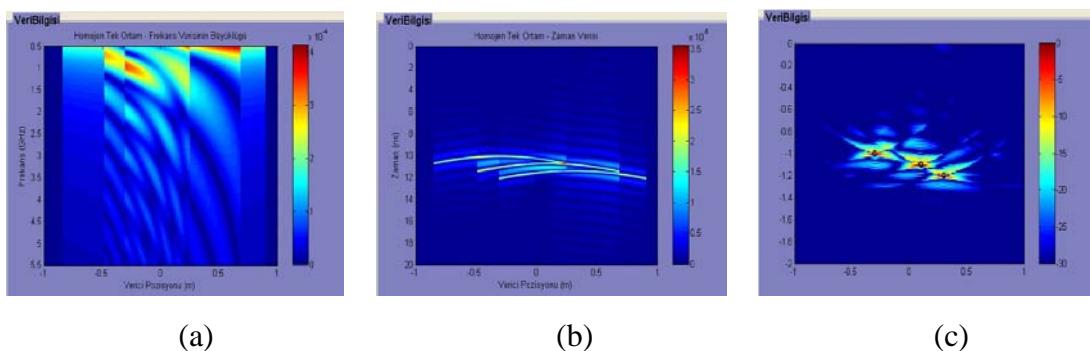
Radar parametreleri ilk uygulama ile aynı seçilmiştir. Ek olarak duvar kalınlığı 0.3 m alınmıştır. Hedef parametreleri nesne 1 için koordinat değerleri (-0.3, 0, -0.8) ve RCS 0.5 m^2 , nesne 2 için koordinat değerleri (0.3, 0, -1.2) ve RCS 1 m^2 , ayrıca Z=0 ortamlar arası sınır olarak kabul edilmiştir. Bunlar dışında ortam olarak toprak ve beton kullanılmıştır. Şekil 5(a) ortam toprak seçilerek frekans alanında elde edilen verinin

görüntüsüdür. Şekil 5(b) ortam toprak seçilerek zaman alanında elde edilen verinin görüntüüsüdür. Şekil 5(c) elde edilen verinin geri çatma algoritması ile işlendikten sonra oluşan görüntüsüdür. Aynı şekilde Şekil 5(d), 5(e), 5(f) ortam olarak beton seçildikten sonra elde edilen cevaplardır.



Şekil 5. Duvar arkası görüntüleme uygulama sonuçları a) Frekans verisi (toprak) b) Zaman verisi (toprak) c) Geri çatma görüntüleme (toprak) d) Frekans verisi (beton) e) Zaman verisi (beton) f) Geri çatma görüntüleme(beton)

Üçüncü uygulama olarak homojen tek ortam senaryosu ele alınmıştır. Uygulamada sinyal işleme teknigi olarak F-K migrasyonu kullanılmıştır. Ortam olarak hava seçilmiştir. Kullanılan parametre bilgileri ilk uygulamadaki parametre değerleri ile aynıdır. Şekil 6(a) frekans alanında elde edilen verinin görüntüsüdür. Şekil 6(b) zaman alanında elde edilen verinin görüntüsüdür. Şekil 6(c) elde edilen verinin F-K migrasyonu algoritması ile işlendikten sonra oluşan görüntüsüdür.



Şekil 6. Homojen tek ortam görüntüleme için uygulama sonuçları a) Frekans verisi b) Zaman verisi c) F-K migrasyonu görüntüleme

4. SONUÇ

GPR veri benzetim modülü MATLAB GUI kullanarak geliştirilen, basamak frekans GPR yapısı baz alınarak çeşitli parametreleri kabul eden ve bu parametreler yardımıyla veri benzetimi gerçekleştiren, ayrıca oluşturulan verileri farklı sinyal işleme teknikleri kullanarak işleyen ve bunları görüntüleyen bir simülasyon programıdır. Bu modül klasik GPR simülatörlerinin sunduğu karmaşık yapılardan ziyade, basitçe belirlenen senaryo çerçevesinde alınan girdilerden ve seçilen görüntüleme ve sinyal işleme tipine bağlı olarak kullanıcıya benzetim yapma ve sonuçları karşılaştırma imkanı sunmaktadır. Geliştirilen modül geliştirilebilir ve genişletilir olması yardımıyla üzerinden çalışan sıkıştırılmış algılama ile GPR modelleme ve farklı migrasyon metotları gibi görüntüleme teknikleri modül üzerine eklenecektir. Ayrıca dürtü tabanlı GPR sistemini baz alan modelleme de modüle eklenmesi düşünülen diğer bir çalışmada. Bunların dışında yüzey yansımalarının modellenmesi ve benzetim verisine eklenmesi bunun yanında yüzey yansımalarını yok eden yöntemlerin de modüle eklenmesi planlanmaktadır.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 109E280 numaralı Sıkıştırılmış Uzaktan Algılama ve Görüntüleme başlıklı kariyer projesi tarafından desteklenmektedir.

6. KAYNAKÇA

- [1] David J. Daniels, " *Ground Penetrating Radar 2nd edition* ", IET radar sonar and navigation series, 2004.
- [2] Harry M. Jol, " *Ground penetraing radar: theory and applications* ", Elsevier, 2009.
- [3] Fang Guangyou, Michele Pipan, " *Instantaneous Parameters Calculation And Analysis Of Impulse Ground Penetrating Radar (GPR) Data* ", IEEE 2001
- [4] D.J Daniels, " *Surface Penetrating Radar* ", IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series 6, 1996.
- [5] K.Iizuka, A.Freundorfer, K.Wu, H.Mori, H.Ogura, V.Nguyen, " *Step frequency radar* ", J.Appl.Physics, vol.56, no.9, pp.2572-2583, 1984.
- [6] Kong, F.-N, " *Ground penetrating radar using a frequency sweeping signal* ", Proceedings, Third International Conference on GPR, Lakewood, Colorado, 1990.
- [7] Spanoudakis S.Nikolaos, Vafidis Antonios, " *GPR-PRO:A MATLAB module for GPR data processing* ", IEEE 2009.
- [8] Randy J. Jost, Ph. D.,Avinash Uppuluri, M.S. , " *MATLAB-Based Toolkit For An Introductory Course in SAR Image* ", Utah State University,2005 IEEE.

- [9] www.gprmax.org
- [10] Mathworks, INC, " *MATLAB 7 Creating Graphical User Interfaces* ", 2004.
- [11] Guolong Cui, Lingjiang Kong, Jianyu Yang, " *A Back-Projection Algorithm to Stepped-Frequency Synthetic Aperture Through-the-Wall Radar Imaging* ", IEEE 2007.
- [12] A.Langman, " *The design of hardware and signal processing for a stepped frequency continuous wave ground penetrating radar* ", Ph.D. dissertation, Univ. Cape Town, Cape Town, South Africa, 2002.
- [13] Juan M.Lopez-Sanchez, Joaquim Fortuny-Guash, " *3-D Radar Imaging Using Range Migration Techniques* ", IEEE transactions on antennas and propagation, vol. 48, no.5, May 2000.
- [14] R.H. Stolt, " *Migration by Fourier Transform* ", Geophysics, Vol.43, No.1, February 1978.
- [15] J. H. , and Jacewitz, C. A. , " *Fundamentals of frequency domain migration* " Geophysics, 46, 717-733, 1981.
- [16] Mehmet Ali Cagri Tuncer, Ali Cafer Gürbüz, " *Basamak Frekanslı GPR için Seyreklik Tabanlı Hızlı Yer Altı Görüntüleme* ", SIU 2010.
- [17] R. Baraniuk and P. Steeghs, " *Compressive radar imaging* ", in Proc.IEEE Radar Conf. , 2007.
- [18] X.Zhuge, T.G. Savylyev, A.G. Yarovoy, L.P. Ligthart, " *UWB Array-Based Radar Imaging Using Modified Kirchhoff Migration* ", ICUWB2008, vol.3 .
- [19] K. Gu, G. Wang, J. Li, " *Migration Based SAR Imaging For Ground Penetrating Radar Systems* ", IEEE Proc.-Radar Sonar Navig. , Vol. 151, No. 5, October 2004
- [20] Zaiming Jiang, John C. Bancroft, " *Interpolation methods for the kernel of f-k migration*" CREWES Research report volume 19, 2007

DAĞINIK AVİYONİK MİMARİLER İÇİN KÜÇÜK ÖLÇEKLİ BİR UÇUŞ GÖSTERGE SİMÜLATÖRÜ TASARIM VE UYGULAMASI

Yasin Kaygusuz ^(a), Koray Özel ^(a), Tolga İnal ^(a)

(a) TAI, TUSAŞ Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş., AEYM, Aviyonik, Elektrik ve Yazılım Mühendisliği Grup Müdürlüğü, Fethiye Mah. Havacılık Bulvarı No:17 Akıncı, Kazan 06980 Ankara Türkiye, vkaygusuz@tai.com.tr, kozel@tai.com.tr, tinal@tai.com.tr.

ÖZ

Hava aracı özgün geliştirme projelerinin önemli fazlarından birisi de temel uçuş göstergesi gibi pilotların yoğun kullandığı cihazların insan faktörü açısından uygunluğunun ve yeterliliğinin, kullanıcılara, uçuş emniyet ya da sertifikasyon otoritelerine gösterildiği aşamadır. Bu tip insan makine arayüzlerinin yeterliliğinin gösterimi konusunda uçuşa elverişlilik dokümanlarında çeşitli taleplerde bulunulmaktadır. Rafta hazır ticari (RAHAT) akıllı aviyonikleri, merkezi bir bilgisayarın olmadığı mimarilerde kullanan sistemlerde bunların çalışır durumda tecrübe edilmesi için bir benzetim sistemi olması büyük fayda sağlayacaktır. Ayrıca bu tip bir benzetim sistemi aviyonik entegrasyon çalışmalarına da büyük fayda sağlayacaktır. Bu çalışmada, gerçek bir hava aracı tasarım projesinde, temel kokpit donanımlarının yeterliliğini ispatlamak ve hava aracını çeşitli ortamlarda tanıtmak amacıyla 2010 yılında tamamlanmış, gerçek aviyoniklerle entegre edilmiş bir küçük ölçek uçuş ve kokpit benzetimi sisteminin aviyonik mimarisi, donanımı ve yazılım yapısı, test ile geliştirme süreçleri anlatılacaktır.

Anahtar Kelimeler: ARINC 429 [1], dağıtık aviyonik mimari, insan-makine arayüzü, kokpit simülasyonu, küçük ölçek simülatör, RAHAT, veri yolu, yedek uçuş göstergesi.

A SMALL SCALE FLIGHT DISPLAYS SIMULATOR DESIGN AND IMPLEMENTATION FOR FEDERATED ARCHITECTURES

ABSTRACT

One of the phases of indigenous air vehicle development projects is to demonstrate the affectivity and adequacy of important HMI tools such as the primary flight display to users or certification authorities. These are the avionics that the pilots are frequently and

directly using in the cockpit. A cockpit simulator is a perfect solution for this demonstration, in the avionics architectures which uses COTS avionics equipments and for the cases where a central (mission) computer unit is not used. Also a simulator will be very helpful on the avionics integration processes. In this study, the avionics architecture, hardware, software and the processes of design and implementation of a small scale flight and cockpit simulator is described. The design and implementation is performed in the year 2010.

Keywords: ARINC 429 [1], cockpit simulator, COTS, data bus, federated avionics architecture, flight display simulator, human-machine interface, small scale simulator.

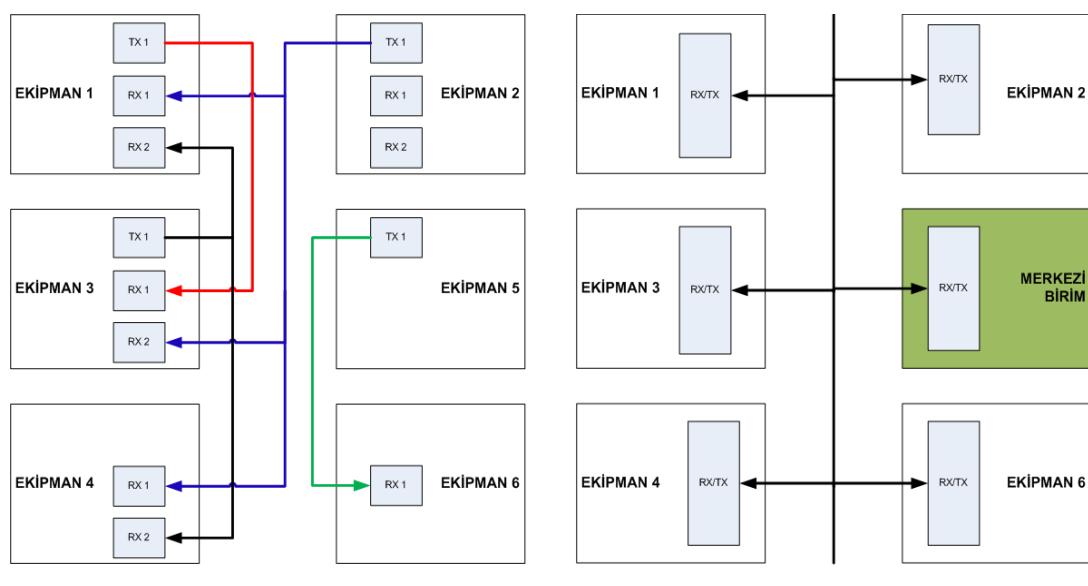
1. HAVA ARACI AVİYONİK SİSTEM MİMARİSİNE GİRİŞ

Hava aracı kokpit işlevsellisinin doğru biçimde planlanması, pilot iş yükünün azaltılmasında oldukça önemli bir rol oynar. Kokpit cihazlarının kolay erişiminin sağlanması için antropometrik özellikleri dikkate alan yerleşim çalışmaları yapılmaktadır. Bu tasarım biçimi genel uygulamanın önemli bir parçasıdır ve uçuşa elverişlilik rehberleriyle çoğulukla zorunlu kılınmıştır [2][3][4]. Benzer şekilde kokpit göstergelerinin de görevlerini etkin biçimde yerine getirmesi beklenmektedir. Daha açık bir ifade ile her bir kokpit göstergesinin üzerindeki sembolojinin, pilota bilgileri doğru iletecek içerik ve görsel yeterlikte olması gerekmektedir. Aynı zamanda bu yetkinliğin entegratör tarafından ispatlanması uluslararası havacılık otoriteleri tarafından talep edilmektedir [2]. Bir “kokpit temel göstergeleri simülasyonu” bu gösterge setinin yeterliliğinin ispatında en açık, en kabul edilebilir çözümlerden biridir. Tam olarak amaçlanan, tüm bir uçuş boyunca bu göstergelerde gösterilecek tüm verilerin, pilotlardan oluşacak bir ekibe gösterimi ve gösterge yetkinliğinin bu ekip tarafından onaylanmasını sağlamaktır.

Tüm hava aracı verilerinin bir ya da birden çok bilgisayarda işlendiği ve göstergelere daha çok video sinyali ile görüntü gönderildiği tümleşik mimarilerde simülatör çözümü geliştirmenin çok zor olmadığı bilinmektedir. Bilgisayarda koşan tüm yazılım genellikle entegratör firmanın ürünü olduğu için, geliştirme testlerinde kullanılan laboratuar ortamı oluşturulan videoların yeterliliğinin ispatı için de kullanılmaktadır. Tümleşik avyonik mimarının merkezindeki bilgisayar, simülasyon mimarisinin de merkezinde yer alabilir. Bu tip bir çalışmada ekranlar planlanırken pilotlar da tüm sürece katılmaktadır, buna bağlı olarak da pilotlar ekranlardaki görsellerin ne derece yeterli olduğundan emin olmaktadır, hatta bu sayede bir insan-makine arayüzü yetkinlik testine gerek bile kalmayacağı öngörlülebilir. Oysaki video sinyallerinin kullanılmadığı, bunun yerine temel avyoniklerin ya da seyrüsefer araçlarının rafta hazır ticari (RAHAT) ve akıllı göstergelere doğrudan bağlılığı dağınık avyonik mimarilerde, ekran görüntülerinin hava aracı tasarlayan firma tarafından oluşturulması mümkün değildir ya da çok yüksek tekrarlanmayan yatırıım maliyeti gerektirmektedir. Şekil 1.a'da bu tip bir mimarının blok çizimi verilmiştir. Görüleceği üzere tüm avyonik cihazlar bağımsız bir

Şekilde kaynak ekipmanlarından istedikleri veriyi almaktadırlar. Bu tip bir mimaride işlem gücü, ya da basitçe yazılımlar tüm cihazlara dağılmış vaziyettedir. Örneğin şekildeki ekipmanlardan bazıları seyrüsefer hesaplaması yapma yeteneğine sahip aktif matris sıvı kristal göstergeler (AMLCD) olabilir. Bu tip bir durumda hava aracı tasarımcısı firma çoğunlukla RAHAT imalatçısı elektronik firmasına bağımlı kalmaktadır. Özellikle temel uçuş göstergesi (primary flight display, PFD) içeriği ile bunun yedeklendiği göstergelerin içerikleri çok kritiktir ve pilotlarca uygun bulunacak bir biçimde görüntülenmelidir.

Dağınık mimarilerde cihazlar sadece ihtiyaç duydukları veriyi aldıkları ve aynı hat üzerinden cevap göndermedikleri için veri yolları da tek yönlü ve kontrolsüzdür. Hat üzerinde bir tek verici mevcuttur. Geri kalan cihazlar hattı dinleyerek ihtiyaç duydukları veriyi alırlar.

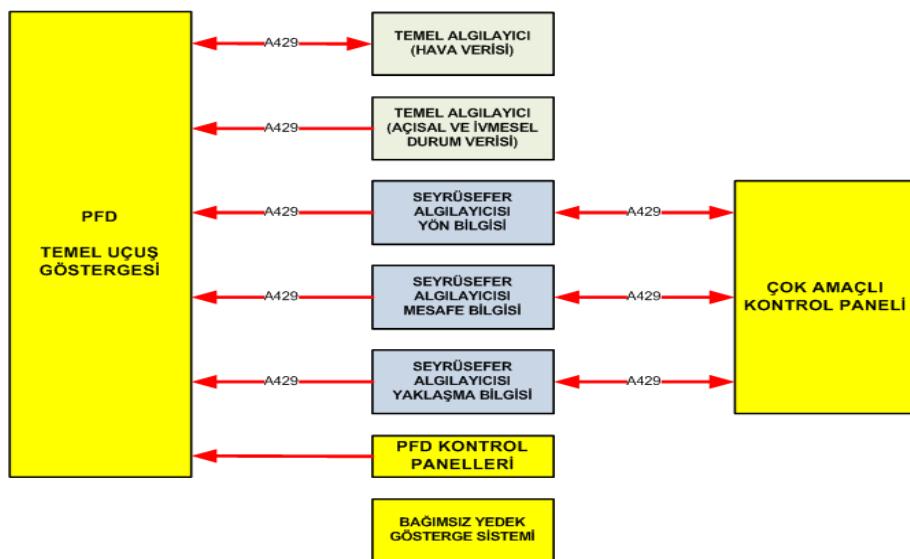


Şekil 1.a Dağınık ya da federe avyonik mimari, **1.b** Tümleşik mimari.

Diger yandan tümleşik mimarilerde tüm veri merkezi bir noktaya akar, orada işlenir ve buradan uygun biçimlerde işlenerek diğer cihazlara dağıılır. Şekil 1.b'de bu tip bir mimarinin blok gösterimi verilmiştir. Bu tip bir sistemde merkezde bir işlemci birimi mevcuttur ki bu mimari biçiminde merkezi işlemci birimini (çoğunlukla görev bilgisayarı) aynı zamanda göstergeler için video işleme ve üretme amacıyla da kullanmak mümkündür. Dolayısı ile bu merkezi birim (şekil 1.b'de yeşil renk ile gösterilmiştir) simülasyonda da video kaynağı olabilecektir. Oysaki şekil 1.a'da yer alan mimari biçiminde bu tip bir kaynak yoktur. Şayet bir de RAHAT göstergeler kullanılıyorsa ise, bu tip bir sistemin insan-makine yeterliliği için bir simülatör tasarlamak ya da üretmek için başka bir veri kaynağı bulmak gerekecektir.

Bu çalışmada RAHAT akıllı göstergelerin kullanıldığı, dağınık mimari ve veri yolları içeren bir hava aracı tasarım projesinde, yukarıda bahsi geçen nedenlerden dolayı tasarlanan ve devreye alınan, küçük ölçekli bir simülasyon sisteminin detayları anlatılacaktır. Bu çalışmaya konu olan hava aracı tasarım projesinde kullanılan dağınık ya da dağınık mimaride de benzer özellikler sergilenmektedir. Akıllı bir PFD göstergesi, bu göstergeye doğrudan bağlı PFD kontrol panelleri, PFD göstergesine yine doğrudan bağlı temel algılayıcılar (hava veri algılayıcı, açısal ve ivmesel durum algılayıcısı), yine temel uçuş göstergesine doğrudan bağlı seyrüsefer aviyonikleri mevcuttur. Hava aracının gösterge sisteminin temel uçuş verisi mimarisi bu şekilde planlanmıştır. Tüm bu aviyonikler PFD cihazına, ARINC 429 veri yolu üzerinden bağlıdır. Hava aracında bulunan tüm seyrüsefer algılayıcıları hem PFD cihazına hem de frekans, mod ve diyagnostik kontrol sağlayan merkezi kontrol radyosuna yine ARINC 429 ile bağlanmıştır. PFD ile birlikte, yedek uçuş göstergesi ve çoklu kontrol paneli en önemli insan makine arayızlarıdır. Şekil 2’te bu mimarinin yüzeysel bir anlatımı verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere bu tip bir mimaride çok fazla veri yolu kullanılmaktadır.

Çizimden de net bir şekilde görülecektir ki, bu dağınık mimari örneği, klasik tanımla “dağınık bir topoloji” sergilemektedir.



Şekil 2. Hava aracı temel donanımlarının ve bağlantılarının blok gösterimi.

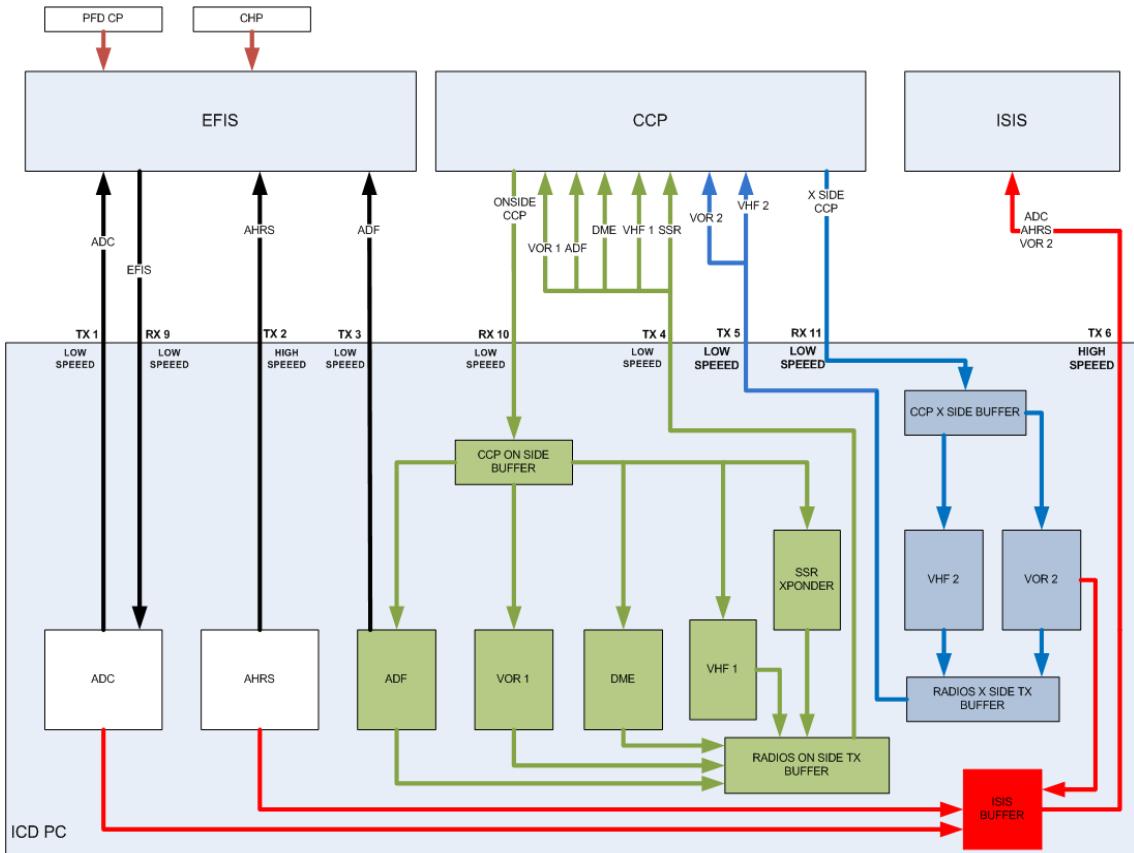
2. BENZETİM SİSTEMİNİN MİMARİSİ

Sistemin temelinde bir uçuş benzeti yazılımından ya da kullanılan ARINC 429 kart arayüzünden alınacak çeşitli verilerin ARINC 429 sinyallerine dönüştürülerek arkasından RAHAT gerçek aviyoniklere yollanması mantığı yatmaktadır. Simülatör sistemi merkezinde bir bilgisayar cihazı olacak şekilde planlanmıştır. Dolayısı ile hava aracındaki mimari dağınık olsa bile, aslında simülatördeki mimari tümleşik bir mimaridir. Veilere kaynaklık eden tüm çevresel donanımların verileri bu bilgisayarcı

taklit edilecektir. Maliyet düşürmek amacıyla uçuşa elverişli bir hava aracı bilgisayarı değil, standart bir ticari ürün üzerinde (PC) ticari bir işletim sistemi ile birlikte kullanılmıştır. Sisteme ARINC 429 veri iletimini sağlayabilecek bir arayüz kartı, PCI slotları üzerinden bağlanmıştır. Ayrıca pilotların uçuş benzemetimi yapmak istemeleri ihtimaline karşı USB bağlantılı analog algılayıcılar kullanılarak bir uçuş kontrol levyesi, bir gaz kolu ve rudder pedalları tasarlanmıştır ve piyasa da yaygın bir şekilde kullanılan 3 temel uçuş benzemetim yazılımı için de ayrı ayrı gerekli arayüz ve bağlantılar hazırlanmıştır. Simülatör sisteminin tüm bağlantılarının yapılabilmesi için cihazların tüm giriş çıkış uçları incelenmiş ve bir kablo ağı planlanmıştır. Bu kablo ağının planlanması öncelik maliyet düşürmek ve uygulama kolaylığı olmuştur. Hava aracı mimarisinin dağınık yapıda oluşu veri yolu sayısını ciddi şekilde artırmaktadır. Veri yolu sayısının azaltılması için çeşitli yöntemler geliştirilerek kablo ağının da rahatlatılması amaçlanmıştır.

2.1. Veri yolu mimarisi

Sistem ne kadar basit tasarılanırsa kullanımı ya da uygulaması o kadar kolay olacaktır. Bu nedenle dağınık veriyolları üzerinden gidecek veriler taranmış ve benzer verilerin gittiği yollar birlleştirilmek yoluna gidilmiştir. Bu çözüm toplamda kullanılacak veri yolu bağlantısı sayısını düşürmektedir. Orijinal hava aracında her biri farklı çıkış portlarından gönderilecek verilerin her biri, aslında simülatörde aynı kaynaktan, yani şekil 3'te ICD PC adıyla gösterilen bilgisayardan üretilmektedir. Öyleyse bunların tek hattan çıkarılıp daha sonra ayrılarak donanımlara dağıtılması mümkündür. Bu nedenle gösterimi yapılacak tüm verilerin ARINC 429 etiket listeleri çıkartılmış, hangi verilerin uyumlu olduğu ya da aynı kaynaktan gelebildiği sorgulanmış ve son olarak aşağıda şekil 3'te gösterilen birleşik veri yolu ağı tasarlanmıştır [1]. Örneğin bu yöntemle şekil 3'te, 5 ayrı veri yolu yerine TX4 tek kanal olarak kullanılmıştır.



Şekil 3. Veri yolları mimarisi.

Burada dikkat edilmesi gereken nokta şudur; bir veri yolu kanalına aşırı veri yüklemek, o veri yolunda hata olasılığını artırmaktadır. Düşük yoğunluklu veri yollarında hata olasılığı daha düşüktür. Bu nedenle veri yoluna 5 ayrı donanımın verisi yüklenirken, her hangi bir aşırı yoğunluk durumuna yol açılmadığından emin olmak gereklidir. Kablo ağında herhangi bir hata olasılığına karşı da ayrıca, hava araçlarında kullanılan, gerçek, uçuş elverişli kablolar ve gerçek konnektörler, yine hava araçlarında uygulanan yöntemlerle uygulanmıştır.

2.2. Benzetimi sağlanacak veriler

Benzetilmesi gereken veriler standart bir hava aracı ekranında olması gereken veriler ile uyumludur. Özellikle PFD için gerekli verileri hava hızı çeşitleri, irtifa, açısal bilgiler ve durum verileri olarak nitelendirmek mümkündür [5]. Simülatör sistemi içinse gerçek aviyoniklerin arayüz kontrol dokümanlarından tüm gerekli veri çıkarılmıştır. Çizelge 1'de bu verinin sadece basit bir örneği görülmektedir. Sadece hava verisi bilgisayarı donanımı (HVB) için bilgiler özetiştir. Aslında toplam simüle edilmesi gereken veri etiketi sayısı 81 adettir. 1 numaralı denklemde de görüleceği gibi veri yolu yoğunluğunun yüzde cinsinden ifadesi ($a_{\%}^G$), bir verinin içerdiği toplam bit sayısı ($C=32$), her bir veri etiketi arasındaki boşluk ($d=4$), ortalama veri yenilenme oranı ($veri$

*etiketinin yenilenme frekansı, $f_{ave}=8$), toplam veri etiketi sayısı ($T=15$) ve veri transfer oranı (*frekans, G*) değerlerinin bir fonksiyonudur. Burada sonucun en yoğun veri yolunda bile kabul edilebilir şekilde düşük bir yüzde ifade ettiği görülmüştür. Veri yolu birleştirilmesinden sonra kanalların yüklenmelerinin tespitini takiben, 81 verinin hangi kanaldan RAHAT aviyoniklere gönderileceğine dair planlama yapılmıştır.*

$$a_{\%}^G = \frac{(C+d)*f_{ave}*T}{G} \cong 34,56 \% \quad (1)$$

Çizelge 1. Simülle Edilmesi Gereken ARINC 429 Etiketleri Örneği.

ARINC 429 Etiketi	Model Adı	TX/RX	1 saniye de Yenilenme oranı	Parametre	Kimden	Kime
204	HVB	TX	16	Baro corrected altitude	HVB	PFD
206	HVB	TX	8	Computed airspeed	HVB	PFD
210	HVB	TX	8	True airspeed	HVB	PFD
205	HVB	TX	8	Mach number	HVB	PFD
212	HVB	TX	16	Altitude Rate	HVB	PFD
211	HVB	TX	2	Total air temperature	HVB	PFD
213	HVB	TX	2	Static air temperature	HVB	PFD
203	HVB	TX	16	Pressure altitude(1013.25 mbar)	HVB	PFD
207	HVB	TX	8	Maximum Allowable Airspeed	HVB	PFD
235	HVB	TX	8	Baro Correction inHg (Echo)	HVB	PFD
235	HVB	RX	8	Baro Correction inHg	PFD	HVB

3. YAZILIM MİMARİSİ

3.1. Oyun simülatörlerine genel bir bakış

Bilgisayar teknolojisindeki ilerlemeler beraberinde oyun yazılım teknolojisinde büyük ilerlemelere sebep olmuştur. Özellikle uçuş simülatörlerindeki kullanılan simülatör yazılımlarının maliyet ve bakımlarının yüksek oluşu bu simülatörler yerine oyun amaçlı kullanılan platform simülasyon araçlarının kullanımını arttırmıştır. Günümüzde en yaygın kullanılan oyun simülatörleri Flight Simulator, Xplane 9.0 ve Flight Gear'dır. Bu simülatörlerin her birinin diğerine göre avantajlı ve dezavantajlı yanları vardır. Flight Simulator ve Xplane ücretli simülatörlerdir. FlightGear ücretsiz olarak kullanılabilen açık kaynak kodlu bir simülasyon programıdır. FlightGear'in avantajı her türlü veri alışverişine izin vermesi ve kendi uçuş modelinizi kullanabilmeyinizdir. Fakat grafiksel kalite ve detay olarak diğerlerine göre zayıftır.

3.2. Simülasyon çerçevesi (framework) yazılımı

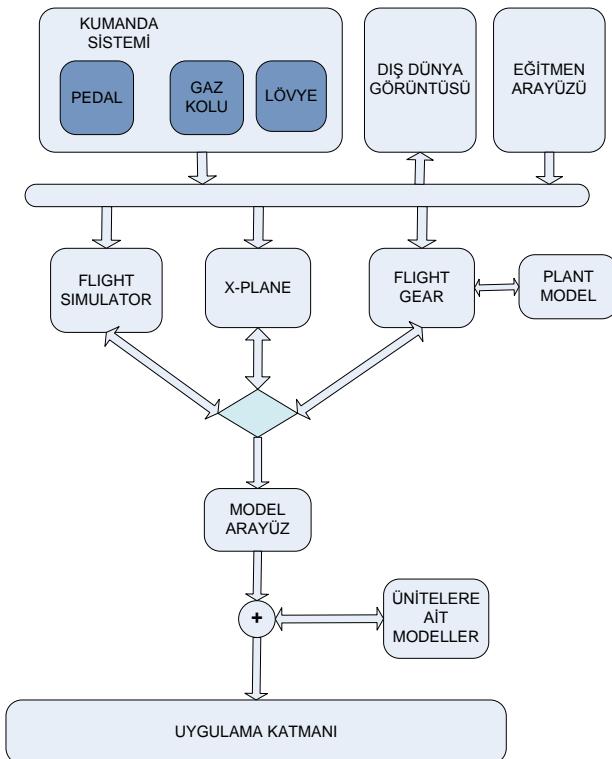
Oyun simülatör araçlarının birbirlerine göre üstünlük ve zayıflıkları bulunmaktadır. Bu doğrultuda gerçekleştirilen bir proje ile bu üç oyun simülatörünü destekleyecek veya (şekil 4'de görülen) bir Simülasyon Çerçeve yazılımı gerçekleştirilmiştir.

Simülasyon çerçevesi yazılımı 5 kısımdan oluşur. Bunlar Kumanda Sistemi, Kullanıcı Arayüzü, Dış Dünya Görüntüsü, Model Arayüz, Ünite Modelleri'dir.

Kumanda Sistemi: Her bir oyun simülatöründe yer alan uçuş modeline olan kumandayı sağlayan sistemdir. Kumanda sisteminde yer alan levye ile uçan platforma yuvarlanma ve yunuslama hareketleri sağlanır. Gaz kolu ile ivmelenme ve hız sağlanır. Pedal yardımı ile uçağın düşey ekseni boyunca yalpalama hareketi yapmasını sağlar.

Eğitmen Arayüzü: Basit Simülatör yazılımlarında kullanıcı arayüzlerinin nasıl olması gerektiğini anlatan, [6] numaralı referansta da belirtildiği üzere kullanıcının klavye, fare vb. araçlarla simülasyon yazılımına müdahale etmesine izin vermemelidir. Bu unsurlar simülasyonun durdurulması, başlatılması, yağmur, sis v.b. hava koşullarının değiştirilmesi suretiyle pilota değişik zorluk seviyelerinde uçma kabiliyetlerinin sınanması olarak düşünülebilir.

Dış Dünya Arayüzü: Dış dünyanın simülasyonu amacıyla oyun simülasyonlarından alınan görüntünün bağımsız bir ekran veya projeksiyona yönlendirilmesi suretiyle sanal uçuş ortamı oluşturulur.



Şekil 4. Simülasyon çerçeve yazılım mimarisi.

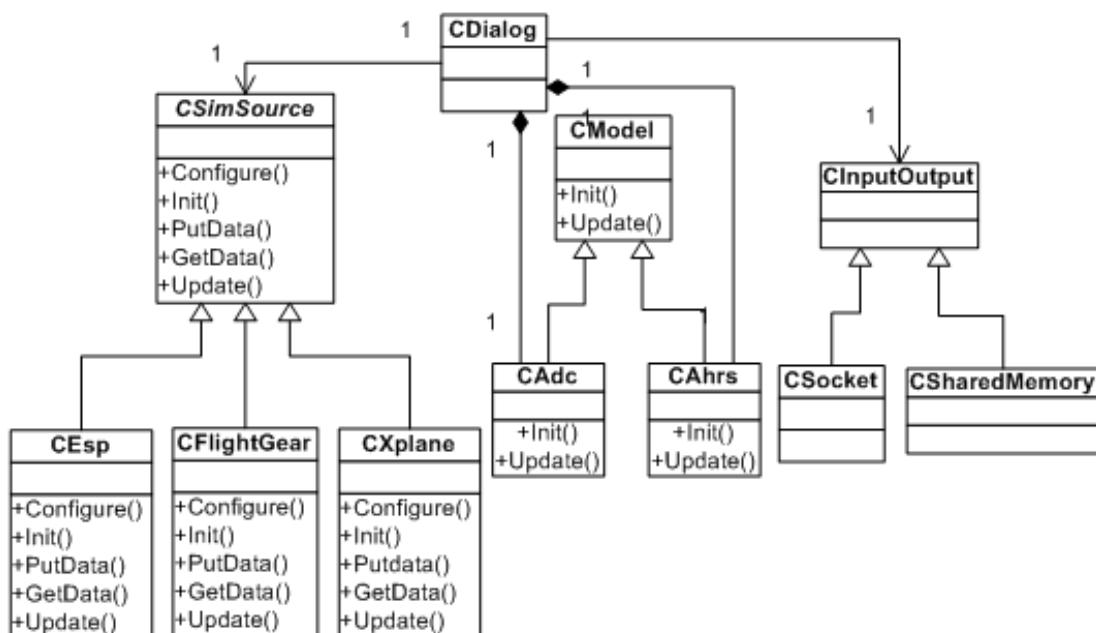
Model Arayüzü: Desteklenen üç oyun simülatörlerinden veri iletişimini sağlayacak arayüz katmanıdır. FlightGear ve Xplane yazılımları ethernet üzerinden iletişim kurarlar. Flight Simulator ise dinamik bağlantı kütüphanesi üzerinden geri çağrıma (callback) fonksiyonları tarafından çağrılarak mesaj iletimini sağlar.

Ünite Modelleri: Simülatör ortamına bağlı olan gerçek ekipmanların dışında kalan ünitelerin modellenmesi bu kısımda gerçekleştirilir. Bu amaçla cihazlara ait işlevsel ister dokümanları incelenir ve bu ünitenin dışarıdan alması gereken veriler bunların hesaplanması yapılır. Ünite modeli tarafından hesaplanan veri tipi, simülasyon

yazılımları tarafından aynı veri sağlanıyor ise bu değerin üstüne yazarak Uygulama Katmanına bu veriyi gönderir.

Çerçeve yazılımı iki farklı konfigürasyonda kullanılabilmektedir. İlk; tek bir bilgisayar üzerinde ve tek bir uygulama altında çalışma şekli ve diğeri ise, bir bilgisayarda çerçeve yazılımının diğer bir bilgisayarda uygulama yazılımının çalıştırıldığı iki bilgisayarlı konfigürasyon şeklidir.

Çerçeve yazılımının sınıf diyagramları şekil 5'de görülmektedir.



Şekil 5. Simülasyon çerçeve sınıf diyagramı.

3.3. Simülasyon çerçeve yazılımı ile küçük ölçekli simülatör uygulaması

Sistem gereksinimleri ve fonksiyonel gereksinimlerden elde edilen bilgiler yardımıyla yazılım gereksinimlerinin oluşturulmuştur. Her bir sistemin ihtiyaç duyduğu giden ve gelen mesajlar ile bunların yenilenme oranları belirlenmiştir. Sisteme bağlanacak ünitelerin arayüzü ARINC 429 olduğu için bu arayızler ile ilgili her bir kanal için bir nesne oluşturulmuştur. Simülasyona gelen kanallar ile ilgili ARINC 429 mesaj formatının çözülmerek, mühendislik verisine çevrilmesi sağlanmıştır. Benzer şekilde simülasyondan çıkan kanallar içinde mühendislik verisinin ARINC 429 mesaj formatına dönüştürülmesi gerekmektedir.

Gerçekleştirdiğimiz projede; bir önceki başlığın sonunda bahsedilen çift ve tek bilgisayarlı donanım mimarilerinden tek bilgisayarlı konfigürasyonun kullanımı tercih edilmiştir. Böylelikle düzeneğin ağırlığı ve maliyeti azaltılmıştır. Bu tip bir ağırlık azaltımı donanımın fiziksel gövde benzetimine entegrasyonu esnasında da kolaylık sağlayacaktır. Bu sebeple simülasyon çerçeve yazılımı ile uygulama yazılımı birleştirilmiştir. Şekil 6'da alt sistem modülü sınıf diyagramı görülmektedir. Özel

durumlarda, örneğin sisteme yeni işlevler eklenmesi gerektiğinde, yine daha yüksek işlemci performansı sağlayan çift bilgisayarlı konfigürasyona donebilmek mümkündür.

Simülatörde kullanılacak alt sistemlere Şekil 3'de görüldüğü gibi 6 gönderme, 4 tanede alma kanalına ihtiyaç vardır. Bu amaçla 8 gönderme, 8 alma kanalına sahip bir ARINC 429 kartı seçilmiştir. Sistemde ARINC 429 kartı üzerinde TX1, TX2,.., TX6 gönderme kanalı ve RX9, RX10,.., RX12 alma kanalları konfigüre edilerek karta veri yollama/alma işlemi sağlanmıştır. Denklem 2'den yararlanarak, Rate Monotonic Scheduling yöntemiyle işlemlerin zamanlama analizi yapılrsa [7];

Çizelge 2. Rate Monotonic zamanlama analizi verileri.

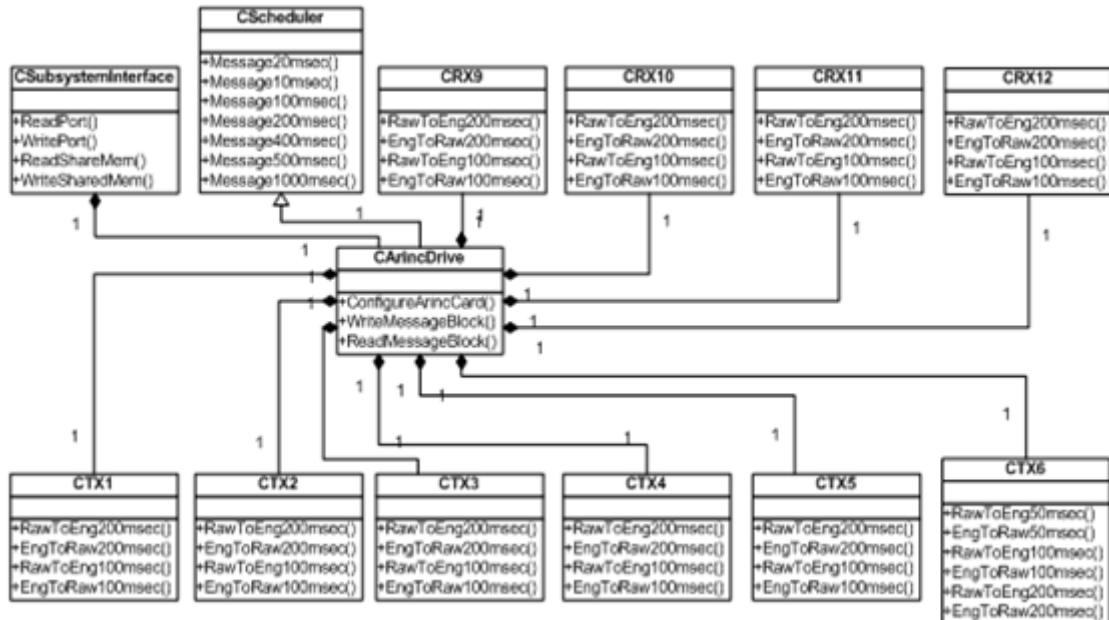
Kanal	Periyodu (T_i)	Proses Süresi (C_i)ms
10msec Messages	10msec	1
20msec Messages	20msec	1
100msec Messages	100msec	1
200msec Messages	200msec	1
400msec Messages	400msec	1
500msec Messages	500msec	1
1000msec Messages	1000msec	1

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{T_i} \leq n(\sqrt[n]{2} - 1) \quad (2)$$

$U = 0.1885 \leq 0.82$ olduğu için zamanlama açısından bir problem oluşturmayacaktır. Simülatörde eğitmen ekranı tasarımda program başlatıldığında giriş ekranı görüntülenmektedir. Bu ekranın simülasyon kaynağı olarak FlightSimulator, FlightGear ya da Xplane'den birisi seçilir. Seçim işleminden sonra Next tuşuna basılarak konsol ekranına geçilir. Konsol ekranı üzerinden simülasyonun başlatılması, durdurulması, havaalanı seçimi, hava şartlarının değiştirilmesi sağlanarak uçuşa değişik varyasyonlar kazandırılmıştır.

4. UYGULAMA VE SONUÇ

Bu uygulamanın sonunda gerçek RAHAT aviyonikleri kullanarak hem insan makine arayüzündeki en temel öğelerin yetkinliklerinin gösterimini mümkün kılan, hem de aviyonik entegrasyonun doğrulanmasında yararlanılan bir uçuş göstergesi benzetim sisteminin tasarlanması ve imalatı tamamlanmıştır.



Şekil 6. Alt sistem modülü sınıf diyagramı

Tasarım sürecinin başında, hava aracının mimarisini detayları ile incelenmiş ve bu mimariye, proje amaçlarına, temel mühendislik prensiplerine ve görevlendirmelere uygun biçimde bir sistem isterleri dokümanı (SID) yazılmış, görüşler ile düzeltilmiş ve yayınlanmıştır. Daha sonra bu SID ve hava aracı mimarisini işığında, aviyonik donanımların da arayüz kontrol dokümanlarından yola çıkarak kablolama tasarımları ve imalatı yapılmıştır. Ayrıca personel ve donanım emniyetini sağlamak amacıyla bir elektrik dağıtım ve izolasyon panosu da imal edilmiştir. Sistemin montajından sonra, yazılım hataları ile donanım hatalarını birbirinden izole etmek amacıyla, geliştirilen benzetim arayüz yazılımı devreye alınmadan evvel, hem kablolamanın testleri hem de donanımın kurum içindeki yazılım entegre edilmeden ticari yazılımlarla test edilmesi süreci gerçekleştirilmiştir. Böylece donanım ve kablolamanın yeterliliği yazılımın entegrasyonundan evvel doğrulanmıştır. Bu süreci takiben yazılım ve donanımın birlikte çalışılabilirliği denenmiş, yazılımda ve donanımda çeşitli konfigürasyonlar ve düzeltmeler yapılmıştır. Ayrıca yabancı ya da yerli kullanımına hazırlık amacıyla, montaj, entegrasyon, kullanım ve arıza tespiti başlıklarını da içeren bir kullanma kılavuzu İngilizce olarak yazılmış ve yayınlanmıştır. Sistem ister, tasarım ve kullanım kılavuzu ile birlikte hazır ve kullanımdadır. Şekil 7'de sistemin hem masa üzerinde hem de entegre edildiği uçak gövdesinde çalışır haldeki fotoğrafları görülmektedir.

Çalışmanın içeriğinden anlaşılacağı üzere oldukça düşük maliyetli bir ticari uçuş benzetim yazılımının verilerinin aviyonik ve havacılık tecrübesiyle, standart veriyollarına dönüştürülmesi, RAHAT aviyoniklerde doğru görüntü ve tepkilerin oluşturulmasında kullanılmıştır. Sistem pilot-makine arayüzüne sürekli iyileştirilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca aviyonik donanımlarda bir değişiklik gerektiğinde benzetim üzerinde doğrulaması yapılabilmektedir.



Şekil 7. RAHAT donanımın masa üzerinde (sol üst köşe) ve gövdeye entegre benzetimde çalışırken görüntüsü (büyük resim).

Kablo ağı, entegrasyon yazılımı ve kontrol araçlarının (levye, gaz kolu gibi) kendi imalatımız oluşunun, maliyetleri oldukça azalttığı gözlemlenmiştir. İlleride yapılacak bu tip çalışmalarla ışık tutacağını düşündüğümüz bu çalışmada edinilen deneyimler, halen şirket içi eğitimlerde, şirket bünyesinde çalışan diğer mühendislerle paylaşılmaktadır. Öncelikle insan faktörü anlamında temel göstergelerin yeterliliğinin sertifikasyon otoritesine gösterimi başarılı olmuştur. Ayrıca benzetim yazılım ve sistemlerinin mimarileri ile ilgili ciddi tecrübe kazanılmıştır. Üretilen elektronik benzetim hava aracı gövde benzetimi ile birleştirilmiş ve entegre edilmiştir, elde edilen komple benzetim yapısı çeşitli fuarlarda, tasarlanan hava aracının tanıtımında kullanılmaktadır.

5. KAYNAKÇA

- [1] ARINC, (2001), *MARK 33 Digital Information Transfer System, (DITS) Part 1, Functional Description, Electrical Interface, Label Assignments, Word Formats*, ARINC Specification 429 Part 1.
- [2] EASA, (2003), *CS 23, Certification Specifications for Normal, Utility, Aerobatics and Commuter Category Airplanes*.
- [3] SAE, (2003), *SAE AS 8034A, Minimum Performance Standard for Airborne Multipurpose Electronic Displays*.
- [4] SAE, (2001), *SAE ARP 4256A, Design Objectives for Liquid Crystal Displays for Part 25 (Transport) Aircraft*.
- [5] A. Helfrick, (2007), *Principles of Avionics*”, Avionics Communications Inc. Leesburg, VA, ABD.
- [6] USA DoT FAA, (2008), *Advisory Circular AC 61-136, FAA Approval of Basic Aviation Training Devices (BATD) and Advanced Aviation Training Devices (AATD)*.
- [7] Liu, C. L., Layland, J., (1973), Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard real-time environment, *Journal of the ACM* 20 (1): 46–61.

RADAR SİMÜLATÖRÜNDE YENİ TEKNOLOJİLERİNİN KULLANIMI VE HAVA TRAFİK KONTROL EĞİTİMİNE KATKILARI*

Ertan Çınar^(a), Fulya Aybek^(b), Cem Çetek^(c), Aydan Cavcar^(d)

Anadolu Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Hava Trafik Kontrol Bölümü
Eskişehir

(a) ecinar@anadolu.edu.tr

(b) faybek@anadolu.edu.tr

(c) ccetek@anadolu.edu.tr

(d) acavcar@anadolu.edu.tr

ÖZ

Hava taşımacılığı endüstrisinin kilit bileşeni olan hava trafik kontrol sistemi hem uçak tasarım ve imalatındaki hem de iletişim-seyrüsefer-izleme sistemlerindeki teknolojik gelişime paralel olarak, otomasyona doğru hızla ilerlemektedir. Bu çalışmanın amacı radar simülörü kurmak isteyen eğitim ve araştırma kurumlarına bir yaklaşım çerçevesi oluşturmaktır. Çalışmada hava trafiğinin mevcut ve ileriye yönelik gereksinimlerini karşılayabilecek, değişen koşullara uyumlu ve yeniliklere açık radar simülörünün hangi niteliklere sahip olması ve hangi teknolojik özelliklerini kullanması gerektiği tartışılmaktadır. Bu kapsamda, Anadolu Üniversitesi-Sivil Havacılık Yüksekokulu kurulan yeni radar simülörü sisteminin geleneksel radar simülör sistemlerine göre farklı nitelikleri ve bu niteliklerin hava trafik eğitimi'ne katkıları irdelenecektir.

Anahtar Kelimeler: Gerçek zamanlı simülasyon, Hava trafik kontrol eğitimi, Hava trafik kontrol simülatörleri, Yenilikçi radar kontrol simülasyonu

* Bu çalışma Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri 071520 kapsamında desteklenmiştir.

USE OF NEW TECHNOLOGIES IN RADAR SIMULATOR AND ITS CONTRIBUTION TO AIR TRAFFIC CONTROL TRAINING

ABSTRACT

Air traffic control system as the critical element of the air transportation industry has been evolving to the more automation based nature in parallel to the developments in aircraft design and manufacturing as well as communication-navigation-surveillance systems. The main purpose of this study is to determine a perspective for various training and research development institutions aiming to procure air traffic radar simulators. This study will discuss what kind of specifications and technologies are necessary for radar simulators in order to keep up with the current and future requirements of the air traffic system. In this context, a comparison is made between the traditional radar simulators and the new radar simulator system installed at Anadolu University-School of Civil Aviation in terms of technical specifications and contributions to air traffic control training.

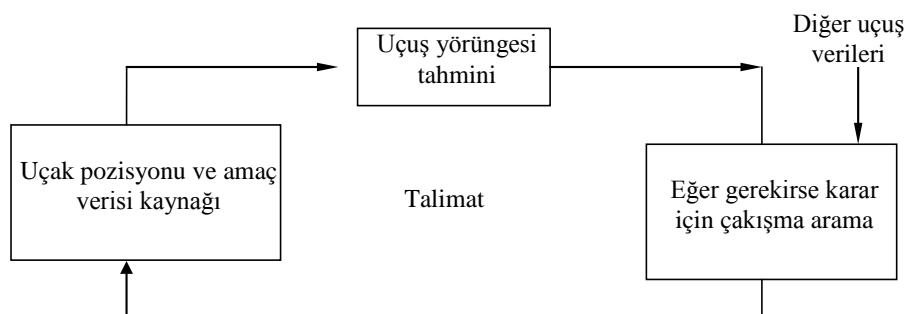
Keywords: Air traffic controller training, Air traffic control simulators, Innovative radar control simulation, Real time simulation,

1. GİRİŞ

Hava taşımacılığı endüstrisinin kilit bileşeni olan hava trafik kontrol sistemi hem uçak tasarımları ve imalatındaki hem de iletişim-seyrüsefer-izleme sistemlerindeki teknolojik gelişime paralel olarak, otomasyona doğru hızla ilerlemektedir. Sistemin giderek emek yoğun işleyişinden teknoloji yoğun işleyişe geçişini onun en önemli unsuru olan hava trafik kontrolörlerinin de rolünü değiştirmektedir. Kontrolörlerin eğitimlerinin bu değişimin gerekliliklerine yanıt verebilecek şekilde yeniden planlanması ve tasarımları hava seyrüseferi ile ilgili eğitim kurumları ve hizmet sağlayıcıları açısından önemli bir konu haline gelmiştir.

Hava trafik kontrolörü, genel olarak, sorumlu olduğu hava sahası içerisindeki uçakların emniyetli uçuş yapmalarını sağlamak amacıyla, hava trafiğini yürürlükteki ulusal ve uluslararası kurallara göre düzenleyen, yürütten ve uçuşlarla ilgili kayıtları tutan kişidir. Bu görevler sırasında planlama, izleme, kontrol, koordinasyon, problem saptama ve çözme işlerinin hızlı ve eş zamanlı şekilde yapılması gerekliliği hava trafik kontrolörlüğünü dünyanın en stresli mesleklerinden bir haline getirmektedir [1]. Hava trafik kontrolörünün görev çevrimi temel hatlarıyla Şekil 1'de gösterilmektedir. Bu çevrimde, kontrolör sorumlu olduğu tüm uçakların gelecekteki yörüngelerini mevcut konumlarına göre tahmin ederek, uçak yörüngeleri arasında herhangi bir çakışma olup

olmadığını hesaplar. Eğer çakışma varsa, en uygun çözümü bularak bunu uçuş ekibine ileter. Kontrolörün ürettiği bu çözümler uçağın hızı, uçuş başı ve irtifası değişiklikleridir. Eğer birden fazla çözüm mevcutsa, kontrolör bu çözümlerden en uygun olanını çok kısa bir sürede seçerek pilota ileter. Bu süreç, bir hava trafik kontrolörünün hem karar verme mekanizmasına hem de bilişim teknolojilerinin kullanımına hâkim olmasını gerektirmektedir.



Şekil 1. Hava trafik kontrolörü görev çevrimi.

Ülkemizde, hava trafik kontrolörlerinin eğitimi ICAO (International Civil Aviation Organization, Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü) ve EUROCONTROL (European Organization for the Safety of Air Navigation, Hava Seyruseferinin Güvenliği için Avrupa Teşkilatı) tarafından tanımlanan esaslar ve gereklilikler çerçevesinde gerçekleştirilmektedir [2,3]. Bu çerçevede, kontrolör adaylarının havacılığın ilgili dallarında kapsamlı bir teorik eğitim almalarının yanı sıra öğrendikleri teorik bilgileri uygulayabilecekleri yoğun bir pratik eğitimden de geçmeleri gerekmektedir. Ancak bu uygulamaların tamamının gerçek trafik ortamında yapılması operasyonların emniyetli, verimli ve ekonomik işleyişi açısından ciddi sakıncalar taşımaktadır. Özellikle acil durum koşulları gibi eğitimlerin canlı trafikte uygulanması olaksızdır. Eğitimin bu tür uygulama yoğun, süreç gerektiren ve yüksek maliyetli yapısı, uygulamalarda simülatör kullanımını zorunlu hale getirmektedir. Gelişen havayolu endüstrisi ve artan uçuş talebiyle karmaşıklaşan hava trafik ortamı; mevcut kontrolörlerin yenileme eğitimleri; yeni ve gelişmiş uçuş prosedürlerinin uygulama ihtiyacı da hava trafik kontrol simülatörlerinin kullanımını giderek artırmaktadır [4]. Günümüzde gerek temel hava trafik eğitiminde gerekse kontrolörlerin hizmet içi ve yenileme eğitimlerinde radar ve meydan kontrol simülatörleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Hava trafik sistemi dinamik bir sistemdir. Bu sistemde çalışacak olan kontrolörlerin eğitiminde kullanılacak olan simülatörlerin de dinamik olması gereklidir.

Bu çalışmanın amacı radar simülatörü kurmak isteyen eğitim ve araştırma kurumlarına bir yaklaşım çerçevesi oluşturmaktır. Çalışmada hava trafiğinin mevcut ve ileriye

yönelik gereksinimlerini karşılayabilecek, değişen koşullara uyumlu ve yeniliklere açık radar simülörünün hangi niteliklere sahip olması ve hangi teknolojik özellikleri kullanması gerektiği açıklanacaktır. Bu kapsamında, A.Ü.-SHYO'da (Anadolu Üniversitesi-Sivil Havacılık Yüksekokulu) kurulan radar simülörünün geleneksel radar simülörlerine göre farklı nitelikleri ve bu niteliklerin hava trafik eğitimi'ne katkıları irdelenecektir.

2. HAVA TRAFİK EĞİTİMİNDE RADAR SİMÜLATÖRÜ

Hava trafik kontrol hizmetleri uçaklar arasındaki ve manevra sahasındaki engellerle uçaklar arasındaki çarpışmaları önlemek hava trafiginin akışını düzenli bir şekilde hızlandırmak ve bunu devam ettirmek amacıyla verilen hizmettir [5]. Hava trafik kontrol hizmeti bir birine bağlı ve koordineli çalışan üç hizmetten oluşur; meydan kontrol, yaklaşma kontrol ve saha kontrol hizmeti. Yaklaşma ve saha kontrol hizmetlerinde uçakların izlenmesi dünyanın birçok yerinde ve ülkemizde radarlar ile yapılmaktadır. Bu nedenle hava trafik kontrol hizmetlerinde radar simülörlerinin ve radar eğitiminin önemli bir yeri bulunmaktadır. Radar hizmetleri, uçaklar arasındaki çarpışmaları önlemek, düzgün bir trafik akışını devam ettirmek ve hızlandırmak amacıyla hava sahalarındaki uçaklara verilen hava trafik kontrol hizmetidir [6].

Artan hava trafik talebi ile birlikte hava trafik kontrol hizmetlerinin radar yardımıyla verilmesi hava seyrüsefer emniyetini ve hava sahası kapasitesini artttırmaktadır. Radar kontrolü altındaki uçakların yönuge bilgileri ile olası çakışma durumlarının tespiti ve çözümü radar kontrolörünün sorumluluğudur. Bu işlerin uygun olarak yapılabilmesi radar kontrolörü adaylarının belirlenmiş seçim ve eğitim sürecinden geçmesini gerektirmektedir. Radar kontrolörünün verdiği kararlar anlık olup sorumluluğu kendisine aittir. Bu nedenle kontrolörler üzerindeki sorumluluk ve zaman baskısı artmaktadır. Bu baskı altında verilen kararların tamamı doğru olmalıdır. Aksi durumda oluşabilecek hatalar hayatı boyutlardadır. Buna en güzel örnek, 2002 yılında Überlingen üzerinde iki uçağın havada çarşaması ile sonuçlanan kazadır [7]. Kaza sonucunda iki uçaktan sağ kurtulan yolcu ve mürettebat olmamıştır.

Hava trafik kontrolörü eğitimi'nde radar simülörlerinin kullanılmasının geçmişi 1970'lere dayanmaktadır. Bu yillardan önce işbaşı eğitimleri hava trafik kontrol birimlerinde gerçek trafik ile yapılmaktaydı. Hava trafiginin karmaşık bir hale gelmesi ve buna paralel olarak kontrolörlerin iş yükünün artması nedeniyle havacılık alanında simülör kullanımının önemi de artmıştır.

Kullanılan hava trafik kontrol sistemlerinin gelişimine paralel olarak simülör sistemi teknolojileri de gelişmiştir. Simülörlerin özellikleri, simülörler arasındaki farklılıklar ve prosedürlerin farklılıklarını radar simülörlerini çesitlendirebilir. Radar simülörleri genellikle hava seyrüsefer sağlayıcıları tarafından kullanıldığından sadece kullanıldığı

ülkenin ihtiyaçlarına cevap verecek şekilde dizayn edilmektedir. Diğer taraftan akademik ortamda kullanılacak bir simülatör sadece bir kullanıcıya cevap vermekten daha fazla yapabilirliklere sahip olmalı ve gelecekteki gelişmelere de açık olmalıdır.

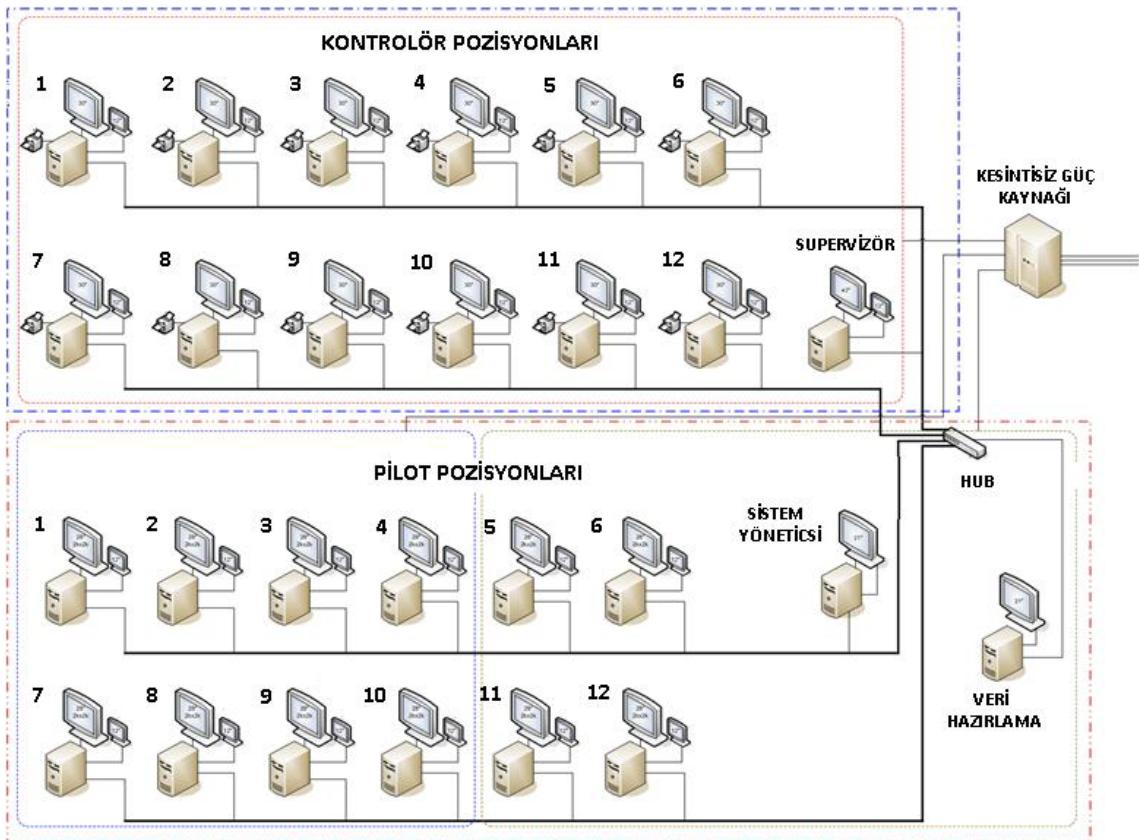
Gelişmiş teknolojiye ayak uydurmuş bir radar simülatörü kontrolör adaylarının eğitmenlerine büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Eğitmenler senaryoların dizayn aşamasında ve koşullarının belirlenmesinde esnek olabilmektedir. Aynı zamanda eğitmenler adayların performanslarını da bilgisayar tabanlı olarak değerlendirebilmektedirler.

Bu kapsamda yeniklere açık ve gelişmiş teknolojilere ayak uydurmuş bir simülatör sisteminin özelliklerinin belirlenmesi ve kurulması aşamasında göz önüne alınacak unsurları açıklamak bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Bu amaç doğrultusunda örnek sistem olarak A.Ü.-SHYO'da 2009 yılında kurulmuş radar simülatörü seçilmiştir.

2.1. Sistem mimarisi

2009 yılında A.Ü. SHYO'da kurulmuş olan radar simülatörü 12 sanal pilot, 12 kontrolör, 1 süpervizör, 1 sistem yöneticisi, 1 veri hazırlama pozisyonu olmak üzere 27 pozisyonundan oluşmaktadır. Bu pozisyonlar birbirlerine ethernet üzerinden bağlıdır. Tüm pozisyonlarda Windows işletim sistemi altına kurulmuş olan BEST (Beginning to End for Simulation and Training) yazılımı bulunmaktadır. Şekil 2.'de A.Ü.-SHYO'da bulunan radar simülatöründeki çalışma pozisyonları ve bu pozisyonların birbirleriyle bağlantıları, fotoğraf ve şema olarak verilmiştir.





Şekil 2. Radar simülatörü sistem akışı.

2.2. Geleneksel radar simülatörlerinde bulunan özellikler

Radar simülatörleri genelde ülkelerin hava seyrüsefer sağlayıcıları veya bunlara insan kaynağı sağlayan eğitim kurumları tarafından kullanılmaktadır. Bu durumda kurumlar üretici firmalardan, radar simülatörü satın alırken sadece kullanılacak olan ülkenin ihtiyaçlarını göz önünde bulundurmakta ya da temel hava trafik eğitimi vermek için sanal hava sahaları ve prosedürler üzerinden çalışan simülatörler talep etmektedirler. Bu nedenle geleneksel radar simülatörlerinin özellikleri aşağıda sıralanan maddeleri içermektedir [8].

1. Hava sahasında (SID, STAR ve hava yolları) gerçekleştirilen değişikliklere göre yeniden düzenleme yapılması ve sanal hava sahalarının yaratılabilmesi,
2. Uçak performanslarının kullanılıp görülebilmesi ve yeni uçak performanslarının sisteme dahil edilebilmesi,
3. Gerçek veya gerçeké yakın operasyon ekipmanlarına benzerlik sağlanabilmesi
4. Meteorolojik bölgelerin oluşturulabilmesi,
5. Değişik olayların (acil durum, yol yenileme vb) senaryolara eklenebilmesi,
6. İstenilen trafiklerle problem oluşturulabilmesi ve yeni trafik eklenebilmesi,

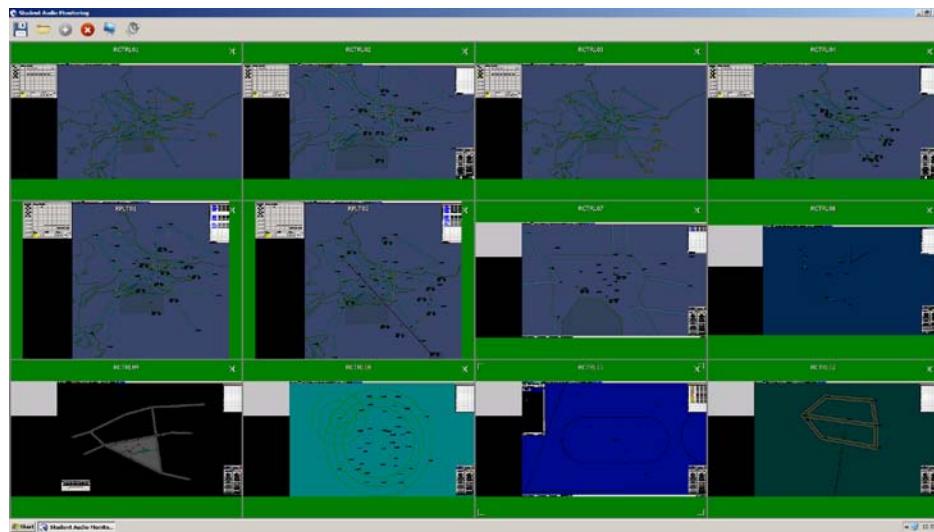
7. Ses ve görüntü kaydı alınabilmesi.

Yenilikçi radar simülatörlerinde yalnızca bu maddelerin bulunması hem eğitim hem ar-ge faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi için yeterli değildir. Yenilikçi bir radar simülatörü sadece belirli özellikleri karşılamadan yanında gelecekte ortaya çıkacak ihtiyaçları da karşılayabilmeli ve hızla gelişen teknolojiye uyum sağlayabilmelidir.

2.3. Yenilikçi radar simülatörlerinde bulunması gereken özellikler

Günümüzde teknolojinin hızlı gelişimi nedeniyle kurulan simülasyon sistemlerindeki donanım ve yazılımlar hızlı bir şekilde güncellliğini yitirmektedir. Hava trafik simülatörlerinin kurulması yüksek maliyetli bir iştir. Bu maliyetler kısa sürede karşılanamayacağından yenilikçi simülatörler hem donanım hem de yazılım olarak esnek kullanıma ve güncellemeye açık olmalıdır. 2009 yılında AÜ-SHYO'da kurulan radar simülatöründe bu iki temel özellik referans kabul edilerek tedarik süreci başlatılmış ve alım yapılmıştır. Bu iki temel özellik içerisinde yer alan diğer özelliklerde aşağıda verilmiştir:

1. Simülatör aynı anda farklı ders konuları veya ar-ge faaliyetlerinin yürütülebilmesine olanak sağlamaktadır. Simülatördeki 25 çalışma pozisyonu (12 sanal pilot, 12 kontrolör ve 1 süpervizör) tek başlarına kullanılabileceği gibi farklı kombinasyonlarla da kullanılabilir. Her çalışma pozisyonuna farklı egzersiz ve hava sahası yüklenerek aynı anda birden çok görev yerine getirilebilir. Sistemde kullanılan iletişim panellerinin fonksiyonları değiştirilebilir.
2. Sivil kullanım amacının yanında askeri amaçlar doğrultusunda çalışılabilecek PAR (Precision Approach Radar) ve muharip uçakların radar kontrolü uygulamaları da simülatörün özelliklerine dâhil edilmiştir.
3. Simülatörde 12 çalışma pozisyonunun aynı anda izlenebilmesi için Picture in Picture (Resim içinde Resim) özelliğine sahip süpervizör pozisyonu oluşturulmuştur. Bu pozisyondan izlemenin yanı sıra çalışma pozisyonlarını dinleme özelliği de bulunmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Resim içinde resim teknolojisinin kullanımı

4. Öğrencilerin ders dışı bireysel çalışmalarını desteklemek amacıyla sanal pilot pozisyonunu kullanacak bir kişiye ihtiyaç duymaksızın çalışan ses tanıma teknolojisi kullanılmıştır. Bu sistem aynı zamanda simülasyon egzersizlerini sessiz simülasyonlara dönüştürülerek, yapılması istenen komutları radar ekranında yazılı olarak çıkartılarak çalışanın dikkat ve tepki sürelerinin ölçülmesine de olanak sağlanmıştır.
5. Mevcut hava seyrüsefer hizmeti sağlayıcılarının kullandıkları son teknolojiler simülatör sisteminde bulunmaktadır. Sistemin donanım özellikleri çok hızlı bir şekilde yenileme yapmaya, parça ve konfigürasyon değiştirmeye olanak sağlamaktadır. Sistemin yazılım olanakları da sistem yöneticisi pozisyonu aracılığıyla hızlı bir şekilde yenilenebilmekte, yedeklenebilmekte ve internet üzerinden “on-line” destek alınabilmektedir.
6. Radar simülatörü temel hava trafik kontrolörü eğitiminin yanı sıra, tazeleme ve derece eğitimleri içinde düzenlenebilmektedir. Sistemde eğitim almak isteyen kişilerin isteklerine göre radar görüntülemenin değiştirilmesi, stripli veya stripsiz çalışma ortamı sağlanması, istege bağlı iletişim paneli dizaynı ve FDP (Flight Data Processing, Uçuş Bilgilerini İşleme) sisteminin yeniden düzenlenmesi, kablolu, kablosuz ya da mikrofonla çalışma olanağı sağlanması ile STCA (Short Term Conflicy Alert, Kısa Vadeli Çakışma Alarmı) ve MTCD (Mid-Term Conflict Detection, Orta Vadeli Çakışma Tarama) sistemlerinin kullanıcı isteklerine göre artırılıp azaltılması gibi değişiklikler yapılmasına olanak sağlamaktadır.
7. Simülatörde yeni bir hava sahası yaratılması ya da var olan bir hava sahası üzerinde değişiklik yapılması çok kısa sürelerde gerçekleştirilmektedir. Simülatörde güncel olarak kullanılan hava trafik prosedürlerinin yanı sıra

gelecekte de kullanılacak prosedürler dizayn edilebilir. Deneysel olarak yapılabilecek prosedürlerin de simülasyonu hazırlanarak test edilebilir.

8. Simülatörde sonsuz sayıda uçak hareketi gerçeklestirmesi sayesinde hava sahası ve trafik hacmi sınırı olmaksızın inceleme ve ar-ge çalışmaları yapılabilmektedir.
9. Simülasyon egzersizleri hazırlanması sırasında trafik yoğunluğunun grafik ve tablo yoluyla gösterimi yapılmaktadır.
10. Simülatör süpervizör pozisyonundan sanal pilotlara ya da kontrolör pozisyonuna yazılı mesaj gönderilerek eğitmenin anlık olarak belirtmek istediklerini iletmesi sağlanabilmektedir.
11. Yaklaşma ve saha kontrol radar simülasyonlarında uçakların performansları kritik öneme sahiptir. Simülasyon ortamında üretecek uçak yörüngelerinin mümkün olduğunda gerçek yörüngelere yakın olması hem eğitimin kalitesi hem de ar-ge çalışmaları için önemlidir. Uçak yörüngelerinin kullanıcı tarafından tanımlanması sayesinde farklı uçak performans modelleri karşılaştırılabilir. Geleneksel radar simülatörlerinde yalnızca tek bir tabloya dayalı tek bir performans modeli kullanılmaktadır. AÜ-SHYO'daki radar simülatörü ise farklı performans modellerinin kullanımına olanak sağlayan bir arayüze sahiptir.

3. TARTIŞMA

Radar simülatörleri hava trafik kontrolörü eğitiminin vazgeçilemez bir parçasıdır. Hava trafik kontrolörü eğitimi veren kurumlar, planlamış oldukları aday öğrenci sayısına göre ve ekonomik olanaklarını da göz önünde bulundurarak kendileri için en iyi sistemi tanımlarlar. Sistemin tasarılanması aşamasında, simülatörün sahip olması gereklili ar-ge faaliyetlerine ait yetenekleri, yalnızca üniversite ortamında verilen eğitimler için öngörlüyor. Hava seyrüsefer hizmet sağlayıcılarının yürüttüğü eğitim faaliyetlerinde kullanılan simülasyon sistemleri sadece günün operasyon koşullarını karşılayacak niteliklere sahip olması yeterlidir. Günümüzde teknolojinin gelişimini takip etmek oldukça zorlaştırmıştır. Bu durumda tasarlanacak olan simülatörün özellikle donanım kısmı yeni teknolojilere kolayca uyarlanabilir olmalıdır. Yazılım da ise; özellikle uçak hareketlerinin gerçeğe yakın şekilde sergilenebilmesi, hazırlanan egzersizlerin iş yüklerinin değerlendirilebilmesi, eğitim sırasında eğitici müdahalesinin yapılabilmesi, MTCD ve STCA gibi karar destek sistemlerinin kullanılabilmesi, FTP özelliklerinin kullanımı, ses tanıma teknolojisi yardımıyla kendi-kendine eğitim olanağı yeni simülatörlerin en önemli özellikleridir. A.Ü-SHYO'da kurulan radar simülatörü kurulduğu günden bu yana öncelikle temel hava trafik kontrol eğitimlerinde kullanılmanın yanı sıra proje, lisans ve lisansüstü araştırmalarda kullanılmaktadır.

4. KAYNAKÇA

- [1] Çınar, E. (2010), *Hava Trafik Kontrol Hizmetlerinde Algılanan Hizmet Kalitesi*, Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Eskeşehr, Doktora Tezi.
- [2] ICAO International Civil Aviation Organization (2006), *Personel Licensing - Annex 1*, ICAO, Montreal.
- [3] Eurocontrol (2004), *Guidelines for ATCO Common Core Content Initial Trainig*, Eurocontrol, Brussels.
- [4] Jones, T.H. (1999), New-Generation ATC simulators designed to provide quicker, more cost effective training, *ICAO Journal*, 1-9.
- [5] ICAO International Civil Aviation Organization (2006), *Air Traffic Services - Annex 11*, ICAO, Montreal.
- [6] Cavcar, A. (1998), *Temel Hava Trafik Yönetimi*, Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu Yayınları, No:8, Eskeşehr.
- [7] Nunes A.; Laursen T. (2004), Identifying the Factors that Contributed to the Ueberlingen Midair Collision, *Proceedings of the 48. Annual Chapter Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*, New Orleans.
- [8] Mansolas, I. (2002), *Principles for the Design of Radar Simulation Exercises*, EUROCONTROL, Luxembourg.

**HAVA TRAFİK KONTROL EĞİTİMİ VE MEYDAN KAPASİTESİ
GELİŞTİRİLMESİNDE MEYDAN KONTROL SİMÜLATÖRÜ
UYGULAMALARI***

Fulya Aybek^(a), Ertan Çınar^(b), Cem Çetek^(c), Aydan Cavcar^(d)

Anadolu Üniversitesi, Sivil Havacılık Yüksekokulu, Hava Trafik Kontrol Bölümü
Eskişehir

(a) faybek@anadolu.edu.tr

(b) ecinar@anadolu.edu.tr

(c) ccetek@anadolu.edu.tr

(d) acavcar@anadolu.edu.tr

ÖZ

Günümüz hava trafik kontrolörü uygulamalı eğitiminin vazgeçilmez bir elamanı olan meydan kontrol simülatörlerinin hava taşımacılığının gelişimine paralel olarak nitelikli kontrolörlerin yetiştirilmesi ve meydan kapasitesi iyileştirme çalışmalarındaki rolü de giderek artmaktadır. Bu çalışmanın amacı, yeni taleplere yanıt verebilecek gelişmiş meydan simülatörlerinin kontrolör eğitimine ve meydan kapasitesine ilişkin simülasyon çalışmalarına katkılarını irdelemektir. Bu kapsama meydan simülatörlerin gelişimi konusunda bilgiler verilecektir. Daha sonra bu simülatörlerin hava trafik kontrolörü eğitimindeki ve gerçek zamanlı kapasite geliştirme uygulamalarındaki rolü, Anadolu Üniversitesi'ndeki 360° projeksiyonlu meydan kontrol simülatörü örneğiyle birlikte tartışılacaktır.

Anahtar Kelimeler: Gerçek zamanlı simülasyon, Hava trafik kontrol eğitimi, Hava trafik kontrol simülatörleri, Meydan kapasitesi analizi, Meydan kontrol simülasyonu

* Bu çalışma Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri 071520 kapsamında desteklenmiştir.

TOWER SIMULATOR PRACTICES IN ATC TRAINING AND AIRPORT CAPACITY ENHANCEMENT

ABSTRACT

Tower simulators are the irreplaceable tools in the practical training of air traffic controllers, and as the air transportation industry develops, they play more important role in training of qualified air traffic controllers and airport capacity enhancement. This paper aims to assess the tower simulators satisfying the emerging needs of the industry as well as their contribution to simulation practices in air traffic controller training and airport capacity enhancement studies. In this context, the development of tower simulators is briefly presented first, and then their role in real time simulation for training and research development practices are discussed through the example of the new tower simulator with 360° projection at Anadolu University-School of Civil Aviation.

Keywords: Air traffic controller training, Air traffic control simulators, Airport capacity analysis, Real time simulation, Tower control simulation

1. GİRİŞ

Hava taşımacılığına olan talebin giderek artmasına karşın, mevcut kapasitenin aynı hızda artması hava trafik sisteminde ciddi gecikmeler ve tıkanıklıklar yaratmaktadır. Bu sorunların en yoğun şekilde yaşandığı noktalar ise tüm uçuş operasyonlarının başladığı ve bittiği hava meydanlarıdır [1]. Yapılan araştırmalar, kalkışlardaki gecikmelerin %45'inin meydan operasyonları ve hava trafik hizmetlerinden kaynaklandığı ortaya koymuştur [2]. Türkiye'de de 2003 yılında iç hat uçuşlarının THY'nin tekelinden çıkışlarıyla, hava alanlarındaki trafiğin yıllık artışı Avrupa ve Dünya ortalamalarının üzerinde gerçekleşmiştir. 2007 yılında, ülkemizdeki meydanlarda 446.351 iniş/kalkış operasyonu gerçekleştirken, 2009 yılında bu sayı 505.819'a yükselmiştir. Ortaya çıkan %13,3 oranındaki bu artış ülkemizde de kapasite probleminin giderek büyüyeceğini göstermektedir [3].

Artan trafik talebini karşılamanın iki temel yöntemi mevcuttur. Bunlardan birincisi yeni meydanların yapılması, ikincisi ise mevcut meydanların en yüksek verimle kullanılmasıdır. İlk yöntem ciddi bir kapasite artışı sağlamakla birlikte yüksek maliyeti nedeniyle en son çözüm olarak düşünülmelidir. İkinci yöntem meydanların hava tarafı elemanlarında yapılacak olan kapasite yönetimi kapsamlı iyileştirmeleri ve meydan kontrolörlerinin iş verimini artıracak eğitim faaliyetlerini içermektedir. Bu faaliyetler orta-uzun vadede çok daha düşük maliyetlerle meydan kapasitelerine önemli katkıda bulunabilirler [4]. Günümüzdeki yazılım ve görüntüleme teknolojilerindeki gelişim düşünüldüğünde, meydan kontrol simülatörleri, hem kontrolörlerin temel, işbaşı ve tazeleme

eğitimlerinde hem de meydan kapasitesini iyileştirici çözümlerin araştırılmasında önemli katkılar sunabilir. Bu çalışmanın amacı, yeni nesil meydan simülatörlerinin kontrolör eğitimi ve meydan kapasite yönetimi ile ilgili gerçek zamanlı simülasyon süreçlerine katkıları irdelemektir. Bu kapsamda öncelikle meydan simülatörlerinin gelişimi konusunda bilgiler verilecektir. Sonrasında simülatörlerin hava trafik kontrol eğitimi katkılara ve gerçek zamanlı araştırma-geliştirme uygulamalarındaki rolüne değinilecektir. Bu çalışmaya örneklem olarak Anadolu Üniversitesi’nde bulunan Türkiye’nin tek 10 projektorlu 360° meydan kontrol simülörü verilmiştir.

2. MEYDAN KONTROL SİMÜLATÖRLERİ ve GELİŞİMİ

Bir meydanın çevresinde ve manevra sahası üzerinde hareket eden tüm hava araçları meydan trafiğini oluşturur. Meydan kontrol hizmeti, meydan trafiği için meydan kontrol kulesi tarafından gözle görülen hava araçlarına verilen hava trafik kontrol hizmetlerinden birisidir [5]. Meydan kontrol kulelerinde görev yapan kontrolörler, meydandaki ve civarındaki, kontrolü altında bulunan hava araçlarına emniyetli, düzenli ve hızlı hava trafik akışını sağlamak amacıyla, gerekli bilgi ve izinleri vermekten sorumludur. Ayrıca meydan kontrol kulesinin sorumluluk sahasında uçan, meydan trafik paternine dâhil olan hava araçları; manevra sahasındaki uçaklar; kalkan ve inen uçaklar; manevra sahasındaki uçaklar ile diğer araçlar ve manevra sahasındaki uçakların engellerle çarpışmalarını engellemekle sorumludur [6]. Bu görevleri yapacak olan kişilerin eğitiminde uygulamanın yeri çok önemlidir. Hava trafik kontrolörü adaylarının meydan kontrol eğitimiinde insan tabanlı, bilgisayar tabanlı ekran görüntüülü ve bilgisayar tabanlı projeksiyonlu olmak üzere üç farklı gelişmişlik derecesinde meydan simülatörleri kullanılmaktadır.

2.1. İnsan tabanlı meydan kontrol simülatörleri

Meydan kontrol eğitimiinde kullanılan ilk simülatör örnekleri ölçekli ya da ölçeksiz olarak hazırlanmış olan meydan ve elemanlarını içeren maketlerden (mock-up) oluşmaktadır. Bu tür simülatörlere örnek olarak 1986-2009 yılları arasında AÜ-SHYO’da (Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu) kullanılan Atatürk Hava Limanının maketi Şekil 1’de gösterilmiştir. Bu simülatörler tamamıyla insan beceri ve yeterlilikleri temel alınarak geliştirilmiş olup teknolojiye bağımlılık en az düzeydedir. Çalışılacak senaryolardaki trafik sayısına bağlı olarak görev alacak kişi sayısı değişebilmektedir. Bu tür simülatörlerde egzersizlerin işleyişi sanal pilot pozisyonundaki kişilerin uçak maketlerini uçakların performanslarını da göz önünde bulundurarak hareket ettirmesi ve trafik akışının görsel açıdan canlandırmasıyla gerçekleştirilmektedir.

İnsan tabanlı meydan simülatörlerinin kurulum ve bakım giderlerinin nerdeyse hiç olmaması en büyük avantajıdır. Bunun yanında kullanıcılar tek bir meydan ve buna ait

usullerini çalışma olanağı sunması, görsel gerçekliğin düşüklüğü ve insan performansına bağımlılığı, eğitmen ve sanal pilotlar açısından fazla dikkat ve güç harcanması, fazla istihdam gerektirmesi ve sadece temel eğitimde kullanılabilmesi bu tür simülatörlerin en büyük dezavantajlarıdır.



Şekil 1. AÜ-SHYO insan tabanlı meydan simülatörleri

2.2. Bilgisayar tabanlı ekran görüntüülü meydan kontrol simülatörleri

Gelişen bilgisayar teknolojisi ile ilk bilgisayar tabanlı meydan kontrol simülatörleri 1970'li yillardan itibaren kullanılmaya başlanmıştır. Bu tür sistemlerde meydanların iki boyutlu plan ya da üç boyutlu plan perspektif görüntümleri çoklu ekranlarda oluşturulmaktadır. Ekranların dizilimine göre meydanın 180° ye kadar görüntüsünü elde etmek mümkündür. Bu meydan simülatörlerinin dezavantajları ekranların çerçeveleri nedeniyle kesintisiz bir görüntü sağlamak ve görüntünün boyutlarının ekran boyutlarıyla sınırlı olması nedeniyle yeterince gerçekçi görselliğin elde edilememesidir.



Şekil 2. Ekran görüntüülü meydan simülatörleri[†]

2.3. Bilgisayar tabanlı projeksiyonlu meydan kontrol simülatörleri

Bilgisayar tabanlı projeksiyonlu meydan simülatörlerinde görüntüler, tavana ya da perdenin arkasına yerleştirilmiş projektörlerden yansıtılarak elde edilmektedir.

[†] <http://www.atc-network.com/Upload/News/28977/Simulator1.jpg> (3 Şubat 2011 tarihinde alınmıştır.)

Projektörlerin yerleşim şeklinin seçimi yalnızca simülatörün kullanılacağı alanın boyutları ile ilgilidir. Elde edilen görüntü 180, 270 veya 360° olabilir. Gelişen bilgisayar teknolojisi uçakların hareketlerini meteorolojik koşulların etkileriyle birlikte yansıtılabilmektedir. Ayrıca bu tür simülatörlerde kullanılan ses sistemleri ile meydan kontrol kulesine yansıyan dış sesler de gerçeğe çok yakın bir şekilde canlandırılabilmektedir. Bu tür simülatörlerde kulenin fiziksel ortamı da gerçeğe yakın bir şekilde yaratılabilmektedir. Bu sistemlerin donanım ve idame maliyetlerinin oldukça yüksek olması önemli bir dezavantajdır.

2.4. Anadolu Üniversitesi meydan kontrol simülatörü

AÜ-SHYO’nda Ağustos 2009’da kurulmuş olan meydan kontrol simülatörü, gelişmiş bilgisayar tabanlı projeksiyonlu meydan kontrol simülatörlerine iyi bir örnektir. Bu simülatör tavana monte edilmiş 10 projektör yardımıyla 360°lik özel bir perde üzerinde yüksek çözünürlükte kesintisiz görüntü yaratma yeteneğine sahiptir. Simülasyon sırasında seçilen bir meydanın tüm hava tarafı elemanları (pistler, taksi yolları, apron, ve park yerleri vb); kara tarafı elemanlarından yolcu terminali ve çevresindeki ilgili yapılar ve tüm hareketli görseller (uçaklar, yer araçları, insanlar vb.) gerçekçi olarak görüntülenebilir (Şekil 3).

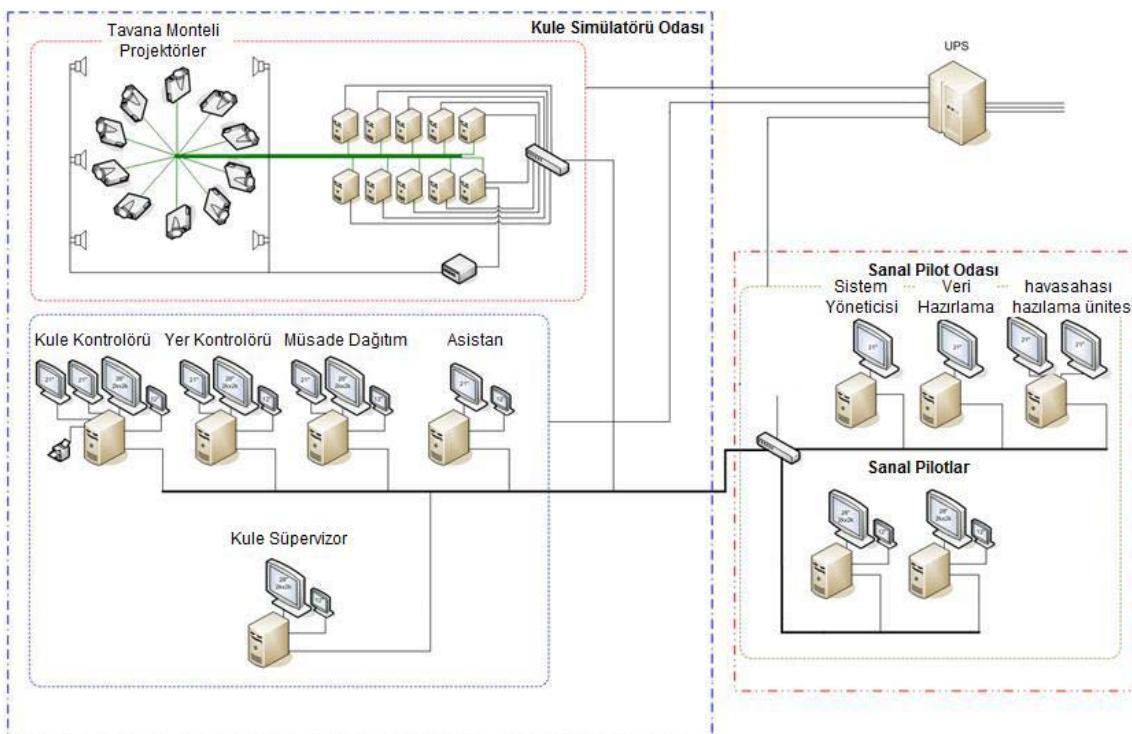


Şekil 3. AÜ-SHYO meydan kontrol simülatörü çalışma pozisyonları

Simülatörde meydan kontrol kulelerindeki tüm çalışma pozisyonları bulunmaktadır. Bunlar meydan kontrolörü, yer kontrolörü, asistan, müsaade dağıtım pozisyonudur. Ayrıca eğitim sırasında tüm pozisyonlar izleme ve egzersizin yönetimini sağlayan süpervizör pozisyonu haline getirilebilir. Sistemde çalışılan egzersizler içerisindeki hareketli görselleri yöneten sanal pilot pozisyonları bulunmaktadır. Kullanılacak senaryolarda planlanan hava trafiğinin niteliği ve yoğunluğuna göre sanal pilot çalışma pozisyonlarının sayısı ise 2'dir.

2.4.1. Sistem mimarisi

Meydan kontrol simülatörü 2 sanal pilot, 4 kontrolör, 1 süpervizör, 1 sistem yöneticisi, 1 veri hazırlama pozisyonu olmak üzere 9 pozisyonundan oluşmaktadır. Bu pozisyonlar birbirlerine ethernet üzerinden bağlıdır. Tüm pozisyonlarda Windows işletim sistemi altına kurulmuş olan BEST (Beginning to End for Simulation and Training) yazılımı çalıştırılmaktadır. Görüntü üretimi 10 adet projekture veri sağlayan aynı sayıda görüntü üretici bilgisayarlar ile yapılmaktadır (Şekil 4). Bu bilgisayarlarda da yine Windows altında çalışan Imagine görüntü işleme ve üretme yazılımı kullanılmaktadır. Bunlara ek aynı ağ üzerinde, görüntü üretici bilgisayarlara bağlı olarak çalışan FAB (First Airport Builder) ve 3-D Max yazılımının bulunduğu ayrı bir veri hazırlama ünitesi mevcuttur.



Şekil 4. Meydan simülatörü sistem akışı.

2.4.2. Geleneksel meydan kontrol simülatörlerinden farklılıklar

Gerek geleneksel, gerekse gelişmiş sistemlerde çift yönlü telsiz/telefon haberleşmesi ve uçuş bilgilerinin kayıt edildiği strip sistemleri mevcuttur. Ancak tipik bir gelişmiş sistem olan AÜ-SHYO'da kurulu bulunan meydan simülatörü hem öğrenci açısından görsel algılama ve uyumu artıran, hem de eğitici açısından daha geniş uygulama ve değerlendirme kolaylıklarını yanında araştırma geliştirme çalışmalarına da olanaklar sunan bir dizi farklı özelliklere sahiptir. Bu sistemin başlıca farklılıkları şunlardır:

- i. Esnek Meydan Tasarımı: Sistemde sentetik veya gerçek meydanların gerekli tüm elemanlarıyla simülasyon ortamında oluşturulmasını sağlayan sisteme entegre bir veri hazırlama ünitesi vardır. Bu ünite, kullanıcı dostu arayüzüyle hızlı ve detaylı şekilde yeni meydan modellerinin oluşturulmasını veya mevcut modellerin değiştirilmesini sağlar. Yeni meydan modellerinin oluşturulmasında 3D Max veya Autocad gibi çizim programları kullanılabilir ve oluşturulan çizimler sisteme entegre bir yazılımla simülatör sistemine yüklenir.
- ii. Gerçekçi Senaryo Tasarımı: Mevcut tüm hava trafik usulleri uçak performansları, hava durumu, pistin durumu, gece ve gündüz koşulları dâhil olmak üzere hava trafik ortamında mevcut olabilecek her türlü koşulu canlandıran egzersiz senaryoları tasarlanabilir. Gerçekleşmiş hava trafik olaylarında sağlanan veriler ile gerçek zamanlı meydan kontrol simülasyonları yapılabilir ve yapılan hatalar irdelenerek en iyi çözümler, yapılacak olan yeni simülasyonlar ile test edilebilir.
- iii. Ses tanıma teknolojisi: Sanal pilot pozisyonları eğitim sırasında ilave eğitici gerektirmesinden dolayı sistemin tamamında vazgeçilmez olduğu kadar kullanımı zor bir parçasıdır. Sanal pilot pozisyonu, yürütülen senaryoların başarıya ulaşabilmesinde en önemli rolü oynamaktadır. Günümüzde bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişim ses tanıma yazılımları ile teknik donanımları oldukça geliştirmiştir. Gelecekte de bu konudaki hızlı gelişim göz önünde bulundurulduğunda geleceğin simülatörlerinde sanal pilot pozisyonlarının yerini tamamen bilgisayarlar alabilir. Bu sayede sanal pilot pozisyonunda çalışan insanlardan kaynaklı hatalar minimuma inerken öğrencilerinde hem dil becerileri hem de havacılık terminolojisine yatkınları daha hızlı bir şekilde artacaktır. Bu pozisyonların görevlerinin insan yerine bilgisayar tarafından yürütülmesi eğitim ekonomisi açısından da büyük fayda sağlayacağı gibi aynı zamanda bu teknolojinin kullanılması hava trafik kontrolörü adaylarına kendi-kendine çalışma olanağı sunmaktadır.
- iv. Haberleşme için kablosuz kulaklı seti ile dokunmatik iletişim paneli kullanımı: Simülatörde haberleşme amacı ile kullanılacak sistemde kablosuz kulaklıkların kullanımı özellikle eğiticiye hareket serbestliği sağlayacaktır. Bunun yanında güncel sistemlerde kullanılan kablosuz kulaklı setleri ile aynı setlerin simülatör ortamında da kullanılması gerçek hava trafik ortamına adaptasyonu kolaylaştırır. Dokunmatik iletişim panelleri gerçek kontrol kulelerinde de kullanılmaktadır. Geleneksel sistemlerde ise hem kurulum maliyetleri hem de donanım ve yazılımla ilgili ilave gereklilikler nedeni ile bu tip teknolojiler tercih edilmemektedir.
- v. Uçuş verilerinin hava trafik kontrolörüne aktarımı: Simülatörlerde ve gerçek hava trafik ortamlarında uçuşlar ile ilgili veriler strip, sanal strip ve FDP (Flight Data Processing, Uçuş Bilgileri İşleme) gibi sistemler ve yöntemlerle sağlanmaktadır. Geleneksel simülatörlerde bu sistemlerden yalnızca biri tercih edilmektedir. AÜ-

SHYO'daki sistemde bu üç veri aktarımı sistemi ve yöntemi kullanıcı tercihlerine göre farklı şekillerde kullanılmaktadır.

3. HAVA TRAFİK KONTROLÖRÜ EĞİTİMİ ve MEYDAN SİMÜLATÖRLERİ

Hava trafik kontrolörü eğitimleri ICAO (International Civil Aviation Organization, Uluslararası Sivil Havacılık Örgütü) ile EUROCONTROL'ün (European Organization for the Safety of Air Navigation, Hava Seyruseferinin Güvenliği için Avrupa Teşkilatı) belirlemiş olduğu standartlara bağlı olarak yapılır. Eğitimin temel konuları; hava hukuku, hava trafik kontrol donanımları, uçuş prensipleri, insan performansı, meteoroloji, seyrusefer ve hava trafik kontrol prosedürleridir [7]. Hava trafik kontrolörlüğü eğitimi teorik bilginin yanı sıra yoğun pratik eğitimler gerektirmektedir. Öğrenilen teorik bilgilerin gerçek ortamda pratiğinin tam anlamı ile yapılamaması simülör kullanımını zorunlu hale getirmektedir. Temel hava trafik kontrolörü eğitimi veren tüm eğitim merkezlerinde ders programlarının simülasyon aşaması, meydan kontrol simülörü ile başlamaktadır [8]. Bu açıdan bakıldığından adayların meslekleriyle ilk tanışıkları ders olması açısından ve mesleki alışkanlıklarının temelini burada almaları nedeni ile meydan kontrol simülasyon dersleri büyük öneme sahiptir.

Hava trafik kontrolöründen beklenen temel bilgi ve beceriler şunlardır: açık ve net bir sözlü iletişim becerisi; verilen kararların sorumluluklarını taşıyabilme; düzenli ve planlı çalışma; iyi bir hafiza ve özdenetim; stres yönetimi; kısa sürede doğru kesin kararlar verebilme, dikkatini uzun süre koruyabilme; İngilizce bilgisi ve akıcı şekilde konuşabilme [9]. Eğitim sürecinde bu becerilerin mesleki pratiğe aktarılması ancak ve ancak simülör ortamlarında mümkündür. EUROCONTROL'ün belirlemiş olduğu hava trafik kontrolörü eğitimleri ile ilgili dokümanlarda simülasyon eğitimlerinin gerekliliği belirtilmiştir.

3.1. Meydan kontrol simülörlerinin eğitime katkıları

Hava trafik kontrolörü eğitiminde kullanılan bilgisayar tabanlı simülörlerin eğitime katkıları, şu şekilde sıralanabilir:

- i. Eğiticiler farklı trafik durumlarını ve özel durumları daha kolay bir şekilde öğrencilere aktarabilmektedirler.
- ii. Hava sahalarında ve meydanlarda yapılan değişikliklere göre yeniden düzenlemeler yapılabilir,
- iii. Sanal hava sahaları ve meydanlar yaratılabilir,
- iv. Gerçek uçak performansları kullanılabilir,
- v. Yeni uçak performansları sisteme girilebilir,

- vi. Gerçek operasyonel ekipmanlarına benzerlik sağlanabilir,
- vii. Her türlü meteorolojik koşul oluşturulabilir,
- viii. Eğitimi verilmesi istenen farklı olaylar yansıtılabilir.
- ix. İstenildiği şekilde trafik çeşitliliği yaratılabilir,
- x. Hızlı şekilde senaryolar oluşturulabilir,

AÜ-SHYO'da bulunan meydan kontrol simülatörü bu katkıların yanı sıra, aşağıdaki ek faydaları da sağlamaktadır:

- i. Çalışma pozisyonlarının içeriği donanımların yerlesimi kolay bir şekilde değiştirilerek farklı ortamlar yaratılabilir, her bir çalışma pozisyonu farklı çalışma pozisyonları olarak belirlenebilir,
- ii. Kullanılan operasyonel ekipmanlar, gerçek ekipmanlarla aynıdır. Bu ekipmanlar gelecekte ihtiyaca bağlı şekilde yenilenebilir,
- iii. Oluşturulacak senaryolarda iş yükü ve performans ile ilgili kriterler belirlenebilir ve bu geliştirilen kriterlere göre senaryoları uygulayanların performansları değerlendirilebilir,
- iv. Sistemde yüklü olmayan bir meydan en baştan yaratılarak çalışmalara hazır hale getirilebilir. Gerekli görüldüğünde mevcut meydanlar üzerinde de değişiklikler yapılabilir,
- v. Sistemde hem performans hem de görsel olarak yeni bir uçak tipi oluşturulabilir,
- vi. Çalışılan egzersize anlık olarak müdahale yapılabılır (trafik ekleme ve çıkartma, meteorolojik durumlar değiştirilebilir, günün farklı saatleri sergilenebilir). Egzersiz sırasında zaman durdurulabilir ya da saniye, dakika ve saat bazından geri veya ileri alınabilir.
- vii. Senkronize olarak 24 saat bazında çalışılan egzersizlerin görüntüleri ve sesleri kaydedilebilir. Kaydedilen ses ve görüntüler tekrar farklı hızlarda oynatılabilir.
- viii. Meydan kontrolde kullanılan yer radarları egzersiz içeriklerinde, farklı varyasyonlarıyla kullanılabilir,
- ix. Eğitim sırasında süpervizör pozisyonları, istediği pozisyonlara yazılı ve görsel mesajlar gönderebilir,
- x. Sisteme kullanıcı tanımlı komut dizileri (script) girilerek yeni fonksiyonlar kazandırılabilir.

4. MEYDAN KONTROL SİMÜLATÖRLERİYLE GERÇEK ZAMANLI KAPASİTE GELİŞTİRME ÇALIŞMALARI

Gelişmiş meydan kontrol simülatörlerinin hava trafik eğitimine yaptığı önemli katkılarının yanı sıra, meydan trafiğinin kapasitesini artırıcı araştırma-geliştirme çalışmalarında da kullanılması bir zorunluluk olmuştur. Yeni meydan yapımı yüksek maliyeti nedeni ile pek çok meydan işletmecilerini ve hava seyrüsefer hizmet sağlayıcılarını mevcut meydan kapasiteleri üzerinde iyileştirme çalışmaları yapmaya yönelmektedir.

İyileştirme çalışmaları operasyonel iyileştirmeler ve yapısal iyileştirmeler olmak üzere iki başlık altında toplanabilir. Bunlardan ilki mevcut kapasitenin nasıl yönetildiğini analiz eden çalışmalardır. Kapasitenin verimsiz kullanıldığından saptanması durumunda bunu giderecek farklı operasyon ve kontrol usulleri araştırılır. İkinci yöntemde ise aynı kapasite sorunları çeşitli altyapı geliştirmeleri yoluyla çözülmeye çalışılır. Bu geliştirmelere örnek olarak yeni paralel pist ve taksi yollarının yapımı; hızlı çıkış taksi yollarının sisteme eklenmesi; apronların genişletilmesi ile kapı ve park yerlerinin sayısının artırılması verilebilir. Her iki tür iyileştirmede de önerilen çözümlerin simülasyon modelleriyle sınanarak kapasite ve maliyet açısından en iyi çözümün bulunması gereklidir. Bu tür iyileştirmelerin sınanmasında çoklukla hızlı zamanlı simülasyon teknikleri kullanılmaktadır [10,11,13]. Hızlı zamanlı simülasyonlar çabuk ve kolay sonuç üretmelerine karşın, insan faktörlerini ve kontrol edilmeyen diğer faktörleri göz önünde tutmadıkları için sundukları sonuçlar gerçege göre iyimserdir. Bu nedenle elde edilen bulguların gerçek zamanlı simülasyonlarla sınanması gereklidir.

5. TARTIŞMA

Meydan kontrol simülatörleri hava trafik kontrolörü eğitiminin vazgeçilemez bir parçasıdır. Bu eğitimi veren kurumlar, planlamış oldukları öğrenci kapasitesi sınırları içerisinde, ekonomik olanaklarını da göz önünde bulundurarak kendileri için en iyi simülatörü tanımlarlar. Simülatör sistemi tasarlarken kullanım amaçları iyi bir şekilde tanımlanmalıdır. Bu amaçlar eğitim ve veya araştırma-geliştirmeye yönelik faaliyetlerdir. Daha sonra gelişen teknolojinin yapabilecekleri ile birlikte, kullanıcının vizyonu simülatör sisteminin yeteneklerini tanımlayacaktır.

6. KAYNAKÇA

- [1] Shifeng, M.; Danxia, W. (2009), Implementation of a Flight Control Tower Simulator Using Commercial off-the-shelf Hardware, *Simulaton* 86 (2), 127-135.

- [2] Çınar, E. (2010), *Hava Trafik Kontrol Hizmetlerinde Algılanan Hizmet Kalitesi*, Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Eskişehir, Doktora Tezi.
- [3] DHMİ (2010), *DHMİ İstatistik Yıllığı 2009*, DHMI, Ankara.
- [4] Aybek, F. (2009), *Uçuş Eğitimi Amaçlı Havaalanlarının Kontrol Bölgesi Kapasitesinin Modellenmesi*, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Yüksek Lisans Tezi.
- [5] ICAO International Civil Aviation Organization (2006), *Air Traffic Services - Annex 11*, ICAO, Montreal.
- [6] ICAO International Civil Aviation Organization (2006), *Air Traffic Management – Doc. 4444*, ICAO, Montreal.
- [7] ICAO International Civil Aviation Organization (2006), *Personel Licensing - Annex 1*, ICAO, Montreal.
- [8] Eurocontrol (2004), *Guidelines for ATCO Common Core Content Initial Training*, Eurocontrol, Brussels.
- [9] Tech Directions, Prakken Publications U.S.A. M.I. (2003), Air Traffic Controller, *Career Directions*, 30.
- [10] Odoni, A. R., J. Bowman, D. Delahaye, J. J. Deyst, E. Feron, R. J. Hansman, K. Khan, J. J. Kuchar, N. Pujet, R. Simpson. (1997) *Existing and Required Modeling Capabilities for Evaluating ATM Systems and Concepts*, Final Report to National Aeronautics and Space Administration Ames Research Center, International Center for Air Transportation.
- [11] SIMMOD Reference Manual (1989), *AOR-200*. FAA, U.S. Department of Transportation.
- [12] Enterprise Dynamics Airport Suite. (2011) INCONTROL www.enterprisedynamics.com. (24 Şubat 2011 de alınmıştır).
- [13] RAMS Plus Simulation Solutions: What is RAMS Plus™? (2011) www.ramsplus.com. (24 Şubat 2011 de alınmıştır).

AĞLARIN HAREKETLİ YOL-KESİCİ TARAFINDAN EN KISA GÜZERGĀH KULLANILARAK KESİLMESİ

Ahmet Kabarcık ^(a), Levent Kandiller ^(a), Haluk Aygunes ^(a)

^(a) Endüstri Mühendisliği Bölümü, Çankaya Üniversitesi, Ankara,
{a.kabarcik, kandiller, aygunes}@cankaya.edu.tr

ÖZ

Bu makalede yolların hareketli yol-kesici tarafından devre dışı bırakıldığı bir ağ kesme problemi ele alınmıştır. İçinde geçmiş iki ağdan biri ağ-kullanıcı tarafından, diğeri ise yol-kesici tarafından kullanılmaktadır. Yol-kesici ağ üzerindeki düğümler ağ-kullanıcılarındaki yolların ya da düğümlerin üzerinde konuşlanmıştır. Yol-kesici ağ üzerindeki düğümler imha edilmeye aday noktalardır. Bu çalışmada ağ-kullanıcının başlangıç ve hedef düğümleri arasındaki tüm güzergâhları imha etmek için yol-kesicinin kullanacağı en kısa güzergâh bulunmaya çalışılmaktadır. Problemin çözümü için dal-sınır yöntemi kullanılarak bir algoritma geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ağ Kesme, En Kısa Güzergâh, Maksimum Akış / Minimum Kesme.

NETWORK INTERDICTION BY DYNAMIC INTERDICTOR USING SHORTEST PATH

ABSTRACT

This paper considers a network interdiction problem in which arcs are disabled by a dynamic interdictor. One of the two interconnected networks is used by the network-user and the other one is used by the interdictor. An interdictor's node may either be deployed on an arc or on a node of the network user. Nodes on the interdictor's network are candidate points for destruction. In this study, it is aimed to find the shortest path that can be used by the interdictor while destroying all paths between origin and destination nodes of network user. An algorithm is developed to solve the problem by using branch and bound method.

Keywords: Maximum Flow / Minimum Cut, Network Interdiction, Shortest Path.

1. GİRİŞ

Ağ modelleri çok farklı alanların analizinde temel oluşturmaktadır. Grafların, tedarik zincirlerinin, ulusal altyapı tesislerinin, sosyal ilişki ve organizasyonların çalışılması ve analizinde kullanılırlar [1]. Dolayısıyla ağ kesme problemleri de bir çok uygulama alanında geniş çaplı çalışılmaktadır. Bu çalışmalar uyuşturucu madde kaçakçılığının engellenmesi, hastanelerde enfeksiyon önleme ve askeri faaliyetler gibi bazı alanlarda uygulanmaya konulmuştur [2].

Literatürde ele alınan ağ kesme problemlerinde genellikle yol-kesicinin (YK) sabit, ağ-kullanıcının (AK) ise hareketli olduğu durumların ele alındığı gözlemlenmiştir. Yola sensör döşenmesi, hava sahasının radar yardımıyla kontrol edilmesi, kullanılması istenilmeyen yollara mayın döşenmesi ya da belirli noktalara karakollar kurulması gibi durumlarda YK statiktir. Statik yol-kesici (SYK) bulunduğu yolu kesme işlemini sürekli olarak icra eder. Eğer SYK konumunu değiştirirse yolun kesilme işlemi sona erer. Ayrıca birden fazla yolun kesilmesi gerekiyorsa birden fazla SYK'ya ihtiyaç vardır.

YK devre dışı bırakılan yol üzerinde sabit kal(a)mayabilir. Mesela uçak sortileriyle saldırılan bir ağıda, uçağın imha edilen yol üzerinde sabit beklemesi düşünülemez. Uçak bir yolu devre dışı bıraktıktan sonra imha edebileceği diğer alternatif yollar arasında seçim yapmak ve ona göre güzergâhını belirlemek durumundadır. Bu durumda YK hareketlidir ve kendine ait bir ağa sahiptir. Hareketli yol-kesici (HYK) ağı, AK açısından yol ve düğümlere göre belirlenmektedir. Bu ağdaki düğümler AK ağı üzerinde kesilebilecek noktalardan oluşmaktadır. Bu düğümler arasında ulaşımı sağlayacak yollar ise HYK ağıının yolları ve güzergâhlarını oluşturmaktadır.

AK'nın başarılı olması demek; başlangıç (b) ve hedef (h) düğümleri arasındaki yolculuğunu tamamlayabilmesi demektir. AK açısından b-h düğümleri arasındaki bir güzergâh üzerindeki bir yol ya da düğüm kesildikten sonra AK kesilen nokta ile h düğümü arasındaki bölümde kalıyorsa kesme işlemi anlamsızdır. Çünkü AK kesilen noktayı zaten geçmiştir. Bu nedenle kesilecek noktaya AK'nın ulaşmamış olması gerekmektedir. Bu çalışmada AK'nın her zaman en kısa güzergâhı (EKG) kullanacağı varsayılmaktadır. Dolayısıyla HYK'nın da AK'ya engel olmak için kesme işlemini en kısa sürede gerçekleştirecek bir güzergâh belirlemesi gerekecektir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde ele alınan bazı ağ kesme problemlerinde ağ üzerinde mücadele eden tarafların amaçlarının optimizasyonu çalışılmıştır. Bu amaçlar AK açısından akışın minimizasyonu veya EKG'nin maksimizasyonu ya da YK için kesme maliyetinin minimizasyonudur. Rocco vd. (2009), çalışmalarında ağdaki yolların kapasitelerinin ve kesilme maliyetlerinin birbirinden farklı olabileceğini gözönüne alarak kesme işleminin

nasıl olacağını incelemiştir [3]. Israeli vd. (2002), ise çalışmalarında EKG'yi maksimize etme problemlerinin bilevel karmaşık tamsayılı programlama olarak ele aldığı çalışmaları değerlendirmiştir [4]. Wood (1993) ise maksimum akışın sınırlı bir kaynak ile minimize edilmesi problemini çalışmıştır [5]. Ayrıca ağ kesme problemlerinde birden fazla amaç göz önüne alınarak kesme işlemi de yapılabilir. Buna Royset vd. (2007)'nin çalışmaları örnek olarak verilebilir. Royset vd. (2007) çalışmalarında maliyete ve ağdaki akışa göre bi-objektif deterministik ağ kesme problemlerinin analizini yapmışlardır. Çalışmada ağ kesme problemi belirlenen bir dizi amaca göre tek-amaçlı olarak ayrı ayrı çözülmüştür [6].

Ağ kesme problemi ile ilgili tüm bilgilerin deterministik olmadığı durumlarda literatürde çalışılan bir alan olmuştur. Bu duruma Cormican vd. (1998)'in çalışmaları örnek olarak verilebilir. Çalışmada yol kapasitesinin net bilinemediği durumlarda kapasite değerine olasılıklar verilmesi, kapasitenin belirlenen bir alt sınır ile üst sınır arasında olması gibi durumlar ele alınmıştır [7].

Washburn vd. (1995), исследованияlarında ağ kesme problemini oyun teorisi açısından incelemiştir. Çalışmada her oyuncu rakibine karşı uyguladığı stratejilerle kârını maksimize etmeye çalışır düşüncesi ile ağ kesme problemi Stackelberg oyun teorisi yapısına benzetilmiştir [8].

3. PROBLEM TANIMI

Ağ-kesme problemlerinin incelenmesinde bir çok etmen göz önüne alınmaktadır. Ağ kesme problemlerinin daha kolay sınıflandırılabilmesi için bu çalışma kapsamında Tablo 1'de görülen taksonomi oluşturulmuştur.

3.1. Problem taksonomisi

Taksonomi için oluşturulan tabloda 19 adet etmen belirlenmiştir. İlk 9 etmen YK için, 10-16 arasındaki etmenler AK için, 17-19 arasındaki etmenler ise yolların durumu için tanımlanmıştır.

Tablo 1'de her bir etmen numarasının altında iki adet dikdörtgen kutu görülmektedir. İlk dikdörtgende etmenin ne olduğu tanımlanmaktadır. İkinci dikdörtgen ise etmenin alabileceği değerleri göstermektedir. Örneğin 1 numaralı etmenin altındaki ilk dikdörtgende bulunan "Tip" değişkeni 1. etmenin YK'nın tipini belirttiğini göstermektedir. Aynı etmenin altındaki ikinci dikdörtgende bulunan SYK ve HYK değerleri ise YK'nın tipinin neler olabileceğini göstermektedir. İkinci sırada bulunan dikdörtgenlerdeki değerler kısaltmalar ile gösterilmektedir. Bu kısaltmaların açılımı tablonun altında belirtilmiştir. Ancak 4 ve 5 numaralı etmenler altlarındaki dikdörtgenler içerisinde görüldüğü gibi birden fazla değer içermektedirler. Örneğin 4 numaralı etmenin altındaki ilk dikdörtgende "AK Kaynağının Durumu" değişkeni

Tablo 1. Problem tanımlama çizelgesi

YOL-KESİCİ (YK)		+ AG-KULLANICI (AK)		+ YOLLARIN DURUMU	
1	2	3	4	5	6
Tip / Amaç	Coklu / Tekli	AK Kaynağının Durumu & Durumu	AK Deposunun Durumu & Durumu	AK'ının Amacı / İmha	Sıralı + Amacı / İmha
Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6
SYK / HYK	CYK / TYK	ÇYK / BY	BY	O B -	O B -
Ym				BY	BY

KISALTMALAR: (Alfabetic sirayla)

A1,...,An : AK'ının sahip olabileceği amaçların herbiri.	HYK : Hareketli Yol-Kesici	T(-) : AK kesilen yolu tamir edemez.
B : Belirgin (kesin bilgiye sahip olumması).	O : Olasılıklı (kesin bilgiye sahip olummasası)	TAK : Tek Ağ-Kullanicı olması
BY : Bilgi Yok.	S(-) : AK savunma yapamaz..	Tk : AK kesilen yolu kaynak kısıtına bağlı olarak tamir edebilir.
C : Çoklu (YK 4 numaralı etmende AK'ının birden fazla kaynağı olduğu, 5 numaralı etmende AK'ının birden fazla deposu olduğu bilgisine sahiptir anlamına gelmektedir.)	S(+): AK savunma yapabilir.	Tkz : AK kesilen yolu kaynak ve zaman kısıtına bağlı olarak tamir edebilir.
ÇAK : Çoklu Ağ-Kullanicı (Ağ üzerinde birden fazla AK olması durumu)	SRL : YK'ının yolları bir öncelik sırasına göre kesmesi. (Örneğin öncelikli olarak EKG üzerinden bir yolu kesilmesi durumu)	TÜ : AK ağ üzerinde tek tip ürün sevkiyatı yapmaktadır.
ÇÜ : Çok Üründü (Örneğin bir düğümün bir taraftan gida talep ederken başka tarafa silah arz etmesi durumu).	SRZ : YK'ının yolları bir öncelik sırası olmadan kesmesi.	TYK : Tek Yol-Kesici olması durumu.
ÇYK : Çoklu Yol-Kesici (Birden fazla YK olması durumu)	SYK : Sabit Yol-Kesici	Tz : AK kesilen yolu zaman kısıtına bağlı olarak tamir edebilir.
	T : Tekli (YK 4 numaralı etmende AK'ının tek kaynağı olduğu, 5 numaralı etmende AK'ının tek deposu olduğu bilgisine sahiptir anlamına gelmektedir.)	Y1,...,Ym : YK'ının sahip olabileceği amaçların herbiri.

bulunmaktadır. Bu etmen YK'nın AK'nın kaynak düğümü ile ilgili neler bildiğini göstermektedir ve altındaki dikdörtgende de görüldüğü gibi iki adet bilgi içermektedir. 4 numaralı etmenin altındaki bu bilgiler iki sütun halinde oluşturulmuştur. İlk sütunda O, B, BY (Olasılıklı, Belirgin, Bilgi Yok) değerleri, ikinci sütunda ise T, Ç, BY (Tek Kaynaklı, Çok Kaynaklı, Bilgi Yok) değerleri bulunmaktadır. İlk sütun AK'nın kaynak düğümü ile ilgili eldeki bilgilerin ne kadar net olduğunu, ikinci sütun ise AK'nın kaç adet kaynak düğümü olduğunu göstermektedir.

Tablodaki 2 ve 10 numaralı etmenler sırasıyla YK ve AK'nın amaçlarıdır. Bu etmenlerin alabilecekleri değerlerin sadece kısaltmalar ile ifade edilmesi çok zordur. Bu kısaltmalar çalışma içerisinde ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

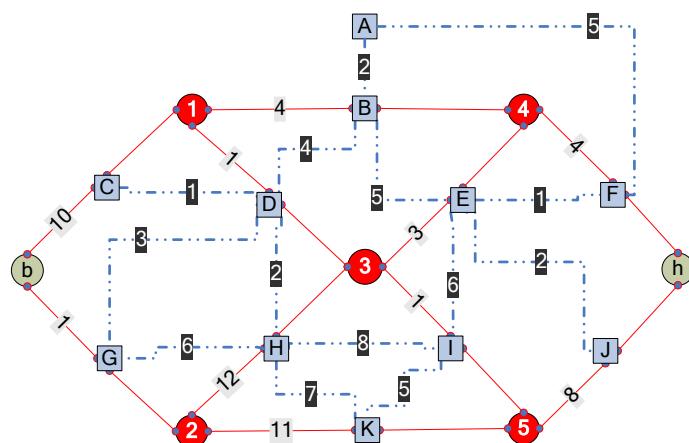
3.2. Problem

Tablo 1'e göre problemleri tanımlarken sadece etmen numaraları ve bu numaraların altındaki ikinci dikdörtgen içerisindeki değerlerden biri kullanılır. Bu çalışma kapsamında incelenen olan problemin özellikleri Şekil 1'de gösterilmektedir. Problemdede dikkate alınmayan etmenlerin alacağı değer “-” ile belirtilmiştir. Örneğin 17 numaralı etmen dikkate alınmamıştır. Tablo 1'de 17 numaralı etmen yolların durumu için oluşturulan “Kapasite” etmenidir. Yani problemde yolların kapasitesi dikkate alınmaktadır.

1	HYK	/	2	Y14	/	3	TYK	/	4	B	-	T	&	B	-	T	/	5	B	/	6	/	7	/	8	/	9	SRZ	+	10	A1	/	11	TAK	/	12	TÜ	/	13	/	14	/	15	T(-)	/	16	S(-)	+	17	-	/	18	B	/	19	B
---	-----	---	---	-----	---	---	-----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-----	---	----	----	---	----	-----	---	----	----	---	----	---	----	---	----	------	---	----	------	---	----	---	---	----	---	---	----	---

Şekil 1. İncelenen problemin tanımlanması

Ağ üzerinde AK ve HYK'nın kullanabileceği düğüm ve yollar farklı olabilir. Şekil 2'de AK ve HYK ağlarını tek bir ağda gösteren bir örnek görülmektedir. Kare düğümler HYK'nın, yuvarlak düğümler ise AK'nın kullanabileceği düğümlerdir. Kesikli çizgiler ile gösterilen yollar HYK'nın, düz çizgiler ile gösterilen yollar ise AK'nın kullanabileceği yollardır. Her bir yolun uzunluğu üzerinde gösterilmektedir.



Şekil 2. AK ve HYK'nın birleşik ağı

Şekil 2'deki örneğe göre, AK, başlangıç (b) düğümünden yola çıkarak, düz çizgiler ile gösterilen ağ üzerinden, hedef (h) düğümüne en kısa güzergâhı kullanarak gitmektedir. HYK, başlangıçta, merkez (A) düğümünde bulunmaktadır ve kesikli çizgiler ile gösterilen ağ üzerinden, imha edeceğinin noktalara (kare düğümlere) gitmektedir. Bu çalışmada HYK, AK'nın herhangi bir anda hangi konumda olduğunu bilmemektedir. HYK, AK'nın b-h düğümleri arasındaki güzergâhları kendi ağı üzerinde en az yol katederek kesmeyi amaçlamaktadır.

Çalışmada ele alınan problem için aşağıda açıklanan matematiksel model oluşturulmuştur.

Parametreler:

$G = (V, A)$: Ağ kullanıcının ağı

$H = (A \cup \{0\}, E)$: Yol kesicinin ağı

$K = (A \cup \{0\}, J)$: Yol kesicinin güzergahlar ağı

EKG_{ij} : H ağındaki i ve j düğümleri arasındaki en kısa güzergah

$LEKG_{ij}$: H ağındaki i ve j düğümleri arasındaki en kısa güzergahın uzunluğu

GK : G ağındaki başlangıç (b) ve hedef (h) düğümleri arasındaki tüm güzergahların kümesi

g : G ağındaki b-h düğümleri arasındaki herhangi bir güzergah

$\delta\{0\}$: K ağı üzerindeki 0'a dokunan ayrıtlar kümesi

$P(g)$: J 'nin g güzergahını kesen elemanları ($e = \{i, j\} \in J$: i ile j arasındaki H üzerindeki EKG_{ij} 'da yer alan en az bir düğüm g güzergahını kesmektedir.)

Karar Değişkenleri:

$$Z_e = \begin{cases} 1, & K \text{ üzerindeki } e \text{ şartısı (} i \text{ ile } j \text{ arasıın } H \text{ üzerindeki } EKG_{ij} \text{) sağlanımlı} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$$

$$e = \{i, j\}$$

$$u_i = \begin{cases} 1, & \text{Eğer } i \text{ düğümü seçilmişse} \\ 0, & \text{aksi halde} \end{cases}$$

Formülasyon:

$$\text{Min} \sum_{e \in J} LEKG_e Z_e \quad (1)$$

Öyle ki

$$u_0 = 1; \sum_{e \in \delta(0)} Z_e = 1 \quad (2)$$

$$Z_e \leq u_i \quad Z_e \leq u_j \quad \forall e = \{i, j\} \in J \quad (3)$$

$$\sum_{e \in J} Z_e \geq -1 + \sum_{i \in A} u_i \quad (4)$$

$$\sum_{e \in \delta(i)} Z_e \leq 2u_i \quad \forall i \neq 0 \in A \quad (5)$$

$$\sum_{e \in P(g)} Z_e \geq 1 \quad \forall g \in GK \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Z_e &= 0 \text{ veya } 1 \quad \forall e \in J \\ u_i &= 0 \text{ veya } 1 \quad \forall i \in A \cup \{0\} \end{aligned} \quad (7)$$

Amaç fonksiyonu (1) ağ kullanıcının b ile h arasında kullanabileceğİ tüm güzergâhları kesen yol kesicinin kendi ağı üzerinde katettiği en kısa güzergâhın uzunluğunu vermektedir.

(2) nolu kısıt yol kesicinin başlangıçta 0 nolu düğümde (Şekil 2'de A düğümünde) olduğunu ve bu düğümden hareket etmesi gerektiğini ve güzergahların bitiş noktası olarak bu düğümde bulunmaması gerektiğini ifade etmektedir.

(3) nolu kısıt kümesi yol kesicinin H ağı üzerinde i ile j arasındaki güzergahı katetmesi durumunda, bu güzergahın başlangıç ve bitiş düğümlerini seçmesi gerektiğini ifade etmektedir. Ancak seçilen herhangi iki k ve l düğümleri arasında mutlaka bir güzergah seçilmesi gerektiğini zorlamamaktadır. Ayrıca (5) gibi, (3) nolu kısıt kümesi bir düğümün seçilmemesi durumunda o düğümde başlayan veya sonlanan bir güzergahın seçilemeyeceğini ifade etmektedir.

(4) nolu kısıt yol kesicinin H üzerindeki güzergahlarının bağlantılı olmasını sağlamaktadır.

(5) nolu kısıt kümesi ise 0 nolu düğümün dışında bir düğümün güzergâhların sonlandığı bir düğüm olması durumunda yol kesicinin bir patika (en fazla tek giriş ve tek çıkış olmak üzere) güzergâhı halinde yürümesi için yazılmıştır.

- (6) nolu kısıt kümesi ise, seçilen güzergâhlar sayesinde yol kesicinin ağ kullanıcının b'den h'ye olan tüm güzergâhlarını en az bir kez kesmesini garanti altına almaktadır.

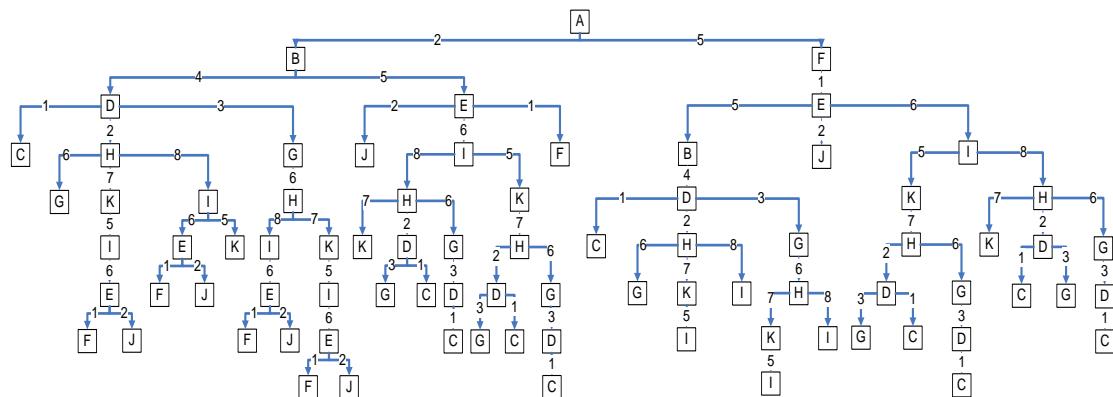
(7) nolu kısıt ise tamsayı kısıtlarıdır.

Bu formülasyonda eğer yol kesici ağının (H) düğümlerinin sayısına $n = |A| + 1$ dersek,

$\binom{n}{2} + n$ adet karar değişkeni $2 + 2\binom{n}{2} + n + |GK|$ kadar kısıt yer almaktadır.

4. PROBLEMİN ÇÖZÜM YÖNTEMİ

Şekil 2'deki HYS'nın A düğümünden başlayarak döngü oluşturmadan gidebileceği tüm güzergâhlar Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. HYSK'nın döngüsüz gidebileceği tüm güzergâhlar

Şekil 3; enumerasyon ile çözüm ararken sadece döngüsüz güzergâhlar için bile ne kadar çok hesaplama yapılması gerektiğini açıkça göstermektedir. Dolayısıyla çözüm için daha etkin bir yönteme ihtiyaç bulunmaktadır.

4.1. Dal-sınır yöntemi ile çözüm

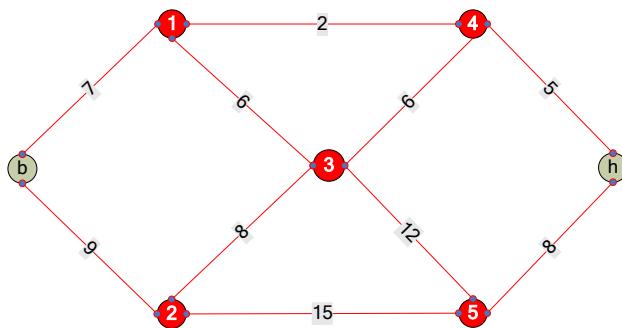
Problemin çözümünde derinlik öncelikli araştırma (DÖA) yöntemini kullanan dal-sınır yöntemi uygulanmaktadır. DÖA bir kök değerden başlayarak dallanan ağaç yapısı içerisinde istenilen bir değeri aramakta kullanılır. DÖA'nın özelliği öncelikle ağacın dallanmasının derinliğini tamamlamasıdır.

Dal-sınır algoritmasının daha çabuk sonuca ulaşması için optimal sonuç veremeyecek daların budanması gereklidir. Dalların optimal sonuç verip veremeyeceği ise üst sınır (ÜS) ve alt sınır (AS) değerleri belirlenerek anlaşılabılır.

4.1.1. Çözüm için üst sınır

ÜS'nin belirlenmesinde maksimum akış / minimum kesme problemi göz önünde bulundurulmuştur. HYK'nın keseceği düğümlere ulaşmak için kendi ağı üzerinde hareket etmesi gereklidir. Bu anlamda kesim değeri kesimde bulunan yolların uzunluğundan ziyade HYK'nın başlangıç düğümünden (A düğümü) bu yollara ulaşmak için katedeceği yol uzunluğu olarak değerlendirilmiştir. Bu durum Şekil 4'te, Şekil 2'de verilen örnek ağ için uygulanmıştır. Örneğin b ve 1 düğümleri arasındaki yolun uzunluğu 10 birimdir. Fakat HYK'nın A düğümünden bu yola ulaşım değeri 7 birimdir ve Şekil 4'te bu yol için 10 yerine 7 değeri alınmıştır.

Şekil 4'te verilen ağ için hesaplanacak olan maksimum akış / minimum kesme değeri Şekil 2'deki HYK için ÜS olacaktır. ÜS değerinden daha büyük bir değer ile ulaşılan düğümün olduğu dal doğrudan budanacaktır.



Şekil 4. AK yolları ile HYK'nın A düğümü arasındaki uzaklıklar

4.1.2. Çözüm için alt sınır ve dallanma

Problemin tanımında AK'nın EKG'yi kullandığı varsayılmıştır. EKG'nin kullanılamaması için EKG'yi oluşturan yollar ya da düğümlerden birinin kesilmesi gereklidir. Dal-sınır yönteminin dallanan ağaç yapısı üzerinde HYK'nın EKG üzerindeki her bir düğümüne ulaşmak için başlangıç düğümünden itibaren katettiği yolun uzunluğu her bir düğümün AS değeri olarak kabul edilecektir. AS değeri ÜS değerinden büyük olan düğümün dalı budanacaktır. Eğer HYK bir düğüme ulaştığında tüm b-h güzergâhları kesiliyorsa o düğümün olduğu dal yine budanacaktır ve bu düğümün AS değeri ÜS değerinden küçük ise ÜS değeri olarak bu düğümün AS değeri atanacaktır. En küçük AS değerli düğümden dallanmaya devam edilecektir. Başlangıç düğümü ile dallanan düğüm arasındaki düğümlerin üzerinde bulunduğu AK yollarının kesilmiş olduğu farzedilerek agdaki yeni EKG bulunacaktır. Yeni EKG üzerindeki HYK düğümlerinin AS değerleri bulunur ve ağaç bu şekilde dallanmaya devam eder. Dallanamayan bir düğüme gelindiğinde bir üst seviyeye çıkarılır ve bu seviyedeki yeni en küçük AS değerli düğümden dallanmaya devam edilir. Böylece ağacın dallanması AS değerine göre yapılmış olmaktadır.

4.2. Problemin çözüm algoritması

Problemin çözümü için şu ana kadar anlatılanlar doğrultusunda aşağıdaki algoritma oluşturulmuştur.

$\bar{U}S$: Üst sınır,

n : Yol-kesenin ağında bulunan düğüm sayısı,

$i : \{1, \dots, n-1\}$

j : Dallanan düğüm,

s : Dallanan düğümden gidilen düğüm,

$AS(i)$: HYK'nın i . düğümüne ait alt sınır değeri,

L_s^j : j düğümünden s düğümüne ulaşmak için katedilen EKG'nin uzunluğu,

k : seviyeyi gösteren indeks.

Adım 1 : Başlangıç

1.1 $k = 0, AS(0) = 0, AS(i) = \infty$.

1.2 HYK'nın başlangıç düğümü ile AK ağı üzerindeki her bir yoluun EKG'sini hesapla ve hesaplanan değerleri yolların uzunluk değeri olarak ata.

1.3 Maksimum Akış / Minimum Kesme problemini kullanarak $\bar{U}S$ 'yi belirle.

Adım 2 : Başlangıç ve hedef arasındaki bağı kesecik düğümlerin belirlenmesi

2.1 AK ağında b-h düğümleri arasındaki EKG'yi bul. (YK'nın başlangıç düğümünden dallanacak düğüme gelinceye kadar üzerinden geçtiği AK ağındaki yollar ve düğümler EKG'de olmamalıdır).

2.2 EKG varsa,

- i. EKG üzerindeki HYK düğümlerini belirle.
- ii. $k = k + 1$ olarak ata.
- iii. Adım 3'e git.

2.3 EKG yoksa,

- i. Eğer $\bar{U}S > AS(j)$ ise, $\bar{U}S = AS(j)$ olarak ata. Adım 4'e git.

Adım 3 : AS ve $\bar{U}S$ 'nin belirlenmesi ve dallanma

3.1 i. Eğer $AS(s) > (AS(j) + L_s^j)$ ise, $AS(s) = (AS(j) + L_s^j)$ olur.

ii. Eğer $AS(s) > \bar{U}S$ ise, s . düğümün olduğu dalı buda. Adım 4'e git.

3.2 k seviyesindeki en küçük AS değerli düğümü dallanacak düğüm olarak seç. Adım 2'ye dön.

Adım 4 : Geri izleme

4.1 k seviyesinde dallanmayan düğüm varsa, en küçük AS değerli düğümü dallanacak düğüm olarak seç. Adım 2'ye git.

4.2 k seviyesindeki tüm düğümler dallandıysa;

i. $k = k - 1$ 'e eşitle.

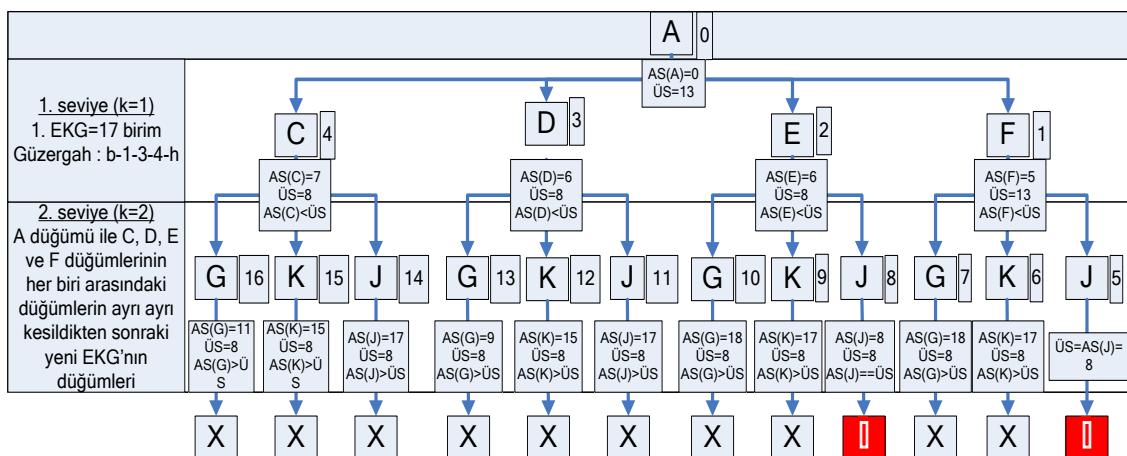
ii. $k=0$ ve tüm düğümler için $AS(i) \neq \infty$ ise Adım 5'e git. Diğer durumlarda Adım 4.1'e dön.

Adım 5 : Sonlandırma

5.1 Ağacın en son ÜS değerini oluşturan dalı optimal değeri veren güzergâhı içermektedir.

4.3. Çözümün uygulanması

Şekil 2'de verilen örnek ağ için yukarıdaki algoritmanın uygulaması Şekil 5'te görülmektedir. Dikdörtgen ile gösterilen HYK düğümlerinin sağ tarafındaki sayılar her bir düğümün işleme girme sırasını göstermektedir. Ayrıca her düğümdeki AS, ÜS değerleri düğümlerin altındaki kutularda gösterilmektedir.



Şekil 5. Örnek problem için çözüm yönteminin uygulanması

Şekil 2'deki AK ağı üzerindeki EKG (b-1-3-4-h) olarak belirlenmiştir. HYK'nın bu güzergâh üzerinde C, D, E, F düğümleri bulunmaktadır. HYK'nın A düğümünden bu düğümlere ulaşlığı EKG uzunlukları bu düğümlerin AS değerleri olarak atanmıştır. Şekil 4'teki ağa göre maksimum akış / minimum kesme problemi yardımıyla ÜS'nin ilk değeri 13 olarak bulunmuştur. AS(F)'nin en küçük olması nedeniyle F düğümü dallanmıştır. F düğümünün bulunduğu (4,h) yolu ağdan çıkarılmış ve yeni EKG (b-2-5-h) olarak bulunmuştur. HYK'nın A'dan başlayarak F üzerinden bu düğümlere ulaşığı EKG uzunlukları bu düğümler için AS değeri olarak atanmıştır. Gidilen düğümler arasında AS(J) en küçük değerli olan düğümdür. J düğümüne gelindiğinde kesilecek başka güzergâh kalmamıştır. F-J arasındaki EKG F-E-J'dır. A-F-E-J 8 birimdir. Dolayısıyla AS(J)=8'dir. AS(J)<ÜS olması nedeniyle ÜS=8 olarak değiştirilir. İlk çözümün değeri 8'dir ve A-F-E-J güzergâhı üzerindedir. F'den bir sonraki dallanma K'ya olacaktır ve AS(K)=17'dir. AS(K)>ÜS'dir. Dolayısıyla K düğümünün bulunduğu bu dal budanacaktır. Algoritma bu mantık çerçevesinde uygulanmaya devam edilir.

Şekil 5'te görüldüğü gibi algoritma Şekil 2'de görülen enumerasyon yöntemine göre oldukça az hesaplama yaparak sonuca ulaşabilmektedir.

5. SONUÇ

Bir çok alanda uygulanması mümkün olan ağ-kesme problemlerinde karar verici için düğümler ve düğümleri birbirine bağlayan yollar bu faaliyetlerin oluşturulmasında göz önünde tutulacak temel bileşenlerdir. YK için önemli ayrımların başında YK'nın hareketli ya da statik olması gelmektedir. Her iki YK'nın yapıları itibarıyla uygulamada önemli farklılıklar bulunmaktadır. YK'nın hareketli olması bir YK ile birden fazla yolu kesme avantajı getirmektedir. Ancak YK kestiği yoldan ayrılmak durumunda olması nedeniyle yolun sürekli kesilmesini sağlayamamaktadır.

Taktik geliştirme, ikmal ve lojistik planlaması için ağların doğru analiz edilmesi gereklidir. Bunun için ağır zayıf noktaları belirlenmelidir. Ağ analizinde YK, AK ve ağır durumunun incelenmesi ağ kesme işlemlerinin temelini oluşturmaktadır.

6. KAYNAKÇA

- [1] K.T. Kennedy, *Synthesis, Interdiction, and Protection of Layered Networks*. Degree of Doctor of Philosophy, Air Force Institute of Technology (2009).
- [2] Y. Dai, K. Poh, *Solving the Network Interdiction Problem with Genetic Algorithms*. Proceedings of the Fourth Asia-Pacific Conference on Industrial Engineering and Management System, Taipei, December 18-20, 2002.
- [3] Rocco S., C.M., Ramirez-Marquez, J.E., (2009), *Stochastic network interdiction optimization via capacitated reliability modeling and probabilistic solution discovery*, Elsevier – Reliability Engineering and system Safety, 94, 913-921.
- [4] Israeli, E., Wood, R.K., (2002), *Shortest-Path Network Interdiction*, Networks, Vol. 40(2), 97-111.
- [5] Wood, R.K., (1993), *Deterministic Network Interdiction*, Mathematical and Computer Modeling, Vol. 17, No.2, pp. 1-18
- [6] Royset, J.O., Wood, R.K., (2007), *Solving the Bi-Objective Maximum-Flow Network Interdiction Problem*, Informs, Vol.19, No.2, pp.175-184.
- [7] Cormican, K.J., Morton, D.P., Wood, R.K., (1998), *Stochastic Network Interdiction*, Operations Research, Vol. 46, No.2.
- [8] Washburn, A. ve Wood, K., (1995), *Two Person Zero-Sum Games For Network Interdiction*, Operations Research, Vol.43, No.2, 243-251.

**YOLLARDAN GEÇİŞ GÜVENLİĞİNİ SAĞLAYACAK BİR
SENSÖR AĞININ MODELLENMESİ VE
UYGULANABİLİRLİĞİNİN BENZETİMLE DENENMESİ**

Murat KARAKAYA ^(a)

^(a) Kara Harp Okulu, Dekanlık Sistem ve Yönetim Bilimleri Bölümü BAKANLIKLAR -
ANKARA, kmkarakaya@kho.edu.tr

ÖZ

Bu çalışmada yoldan geçenek araçlara karşı yapılabilecek saldırının hazırlıklarının tespiti için bir sensör ağı modeli önerilmektedir. Önerilen model; algılayıcılar, bilgi saklayıcı birimler, kullanıcı arayüzü ve gerekli haberleşme protokolünden oluşmaktadır. Algılayıcı birimlerin ürettiği uyarıları kaydeden ve işleyen saklayıcı birimler yoldan geçmek üzere yaklaşan dost kuvvetlere tanımlanan arayüz üzerinden muhtemel tehdit raporunu vereceklidir. Çalışmamız; benzetim yöntemlerini kullanarak önerilen modelin tasarımını ve başarısını test etmek ve ileride geliştirilecek ağlar için gerekecek uygulama gereklerini ortaya çıkartmayı hedeflemektedir.

Anahtar Kelimeler: Yol güvenliği, algılayıcı ağlar, hareket modelleri, hareket noktasıkestirimi.

**MODELING A SENSOR NETWORK PROVIDING ROAD
SECURITY AND TESTING ITS FEASIBILITY VIA SIMULATIONS**

ABSTRACT

In this work we propose a sensor network model to locate possible treats to the vehicles travelling on a road. The proposed model consists of sensors, storage units, interfacing units, and required communications protocol. Recording and processing the warnings of the sensors, the storage units will provide the activity report to the friendly forces approaching the road via the determined interface protocol. In the work, we aim to test the proposed model and its performance by simulation experiments and to determine prospective requirements for implementation.

Keywords: Road security, sensor networks, mobility models, mobility detection.

1. GİRİŞ

Sensör ağlar sahip oldukları bir çok özellikten dolayı askeri uygulamalar için geniş imkânlar sunmaktadır. Algılayıcıların araziye kısa sürede ve çok sayıda farklı yöntemlerle yerleştirilebilmeleri, aralarındaki haberleşme ağının kendiliğinden kurulması ve yaşanabilecek sorunlara rağmen bu haberleşme ağının kendiliğinden yeniden yapılması, düşman tarafından kolayca imha edilemeyecek matris yapıya sahip olması ve insan hayatını tehlikeye atmadan bilgi toplayabilmesi bu özelliklerden bazlıdır. Bu çalışmada, yol kenarlarına düşman unsurlarca yerleştirilebilen patlayıcılara karşı sensör ağlarının nasıl kullanılabileceği dair bir model önerilmiştir. Önerilen model ile araziye yerleştirilecek hareket algılayıcılarından oluşanak bir sensör ağının nasıl yapılandırılabileceği, patlayıcı yerleştirilen noktaları nasıl kestirilebileceği ve önerilen bu yöntemlerin benzetim yöntemiyle denenerek çalışabilirliği ve etkinliği değerlendirilmiştir.

2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Yol üzerine veya kenarlarına patlayıcı yerleştirilmesine karşı Sensör ağlarının kullanılması daha önceki sınırlı sayıda çalışmada önerilmiştir. Örneğin, [2]'de yazarlar görüntü işleme teknolojisini desteklemek üzere sensör ağların kullanılmasını önermişlerdir. Ancak modelleri hareket eden objeleri takip edecek şekilde geliştirilmediğinden gerçekçi olamamıştır. Ayrıca sensör ağının kurulumu, yönetimi ve idamesi hakkında bilgi sunulmamıştır. Başka bir çalışmada ise özellikle manyetik algılayıcı birimler kullanarak patlayıcıların yerleştirilmesini alışveriş merkezi veya sokak gibi şehir ortamında tespit etmeyi hedeflemiştir [3]. Ancak yapılan çalışma satılmakta olan Kızılıötesi ve Madeni algılayıcı birimlerin testi ile sınırlı kalmış herhangi bir yer tespiti veya geniş ölçekli bir sensör ağı oluşturulmamıştır. Algılayıcı birimlerin yol kenarına optimum algılama alanını kapsayacak şekilde yerleştirilmesi içinde bazı çalışmalar yapılmıştır. Örneğin, [4]'te yazarlar algılayıcı birimlerin optimum yerleştirilme noktalarını bulurken algılama menzili ile yolu genişliğini dikkate alarak en az birimle yolu tüm yüzeyini kapsamayı hedeflemiştir. Ancak askeri uygulamalarda kullanılacak birim sayısının kısıtlamasından daha çok sistemin güvenirliliği ve idamesi önemli olduğundan algılayıcı birimlerin yoğun bir şekilde araziye konuşturulacağı beklenmektedir. Dolayısıyla çalışmamızda en az sayıda algılayıcı birim kullanmak yerine gerçek askeri uygulamalarda beklenecek şekilde çok sayıda birim kullanmayı öngördük.

Önerdiğimiz modele en yakın olan çalışmada [5] insansız hava aracı kullanılarak araziye yerleştirilen algılayıcı birimlerden bilgi toplanması hedeflenmiştir. Ancak

önerilen modelin çalışabilmesi için bu birimlerin veri depolama kapasitelerinin yeterli büyülükte olması, uygun antene ve çıkış gücüne sahip olması ve ayrıca hava aracının konvoy geçişlerinden önce bölgede bulunması, bilgiyi toplayıp yorumlaması ve geçiş yapacak olan birliğe ulaştırması gerekmektedir. Dolayısıyla sistemin karmaşıklığı ve hataya açılığı artmaktadır. Bizim önerdiğimiz sistemde hava aracı sisteme dahil olabilir ancak bu şart değildir. Ayrıca, algılayıcılar sadece algılama yapacak şekilde tasarlandılarından ayrıca depolama birimine ihtiyaç duymayacaklardır. Söz konusu makalede herhangi bir uygulama yapılmadığı gibi önerilen modelin gerekli detayları veya benzetimi sağlanmamıştır.

3. ÖNERİLEN SENSÖR AĞI MODELİ

Model üç ana unsurdan oluşmaktadır (Şekil 1):

- Algılayıcı Birimler:** Sıcaklık, hareket, ses, manyetizma vb. uyarılara karşı hassas olan algılayıcılar çevrelerinde meydana gelen değişiklikleri takip edecek ve bu değişiklikleri zaman bilgisiyle etiketleyerek Saklayıcı birime aktaracaklardır.



Şekil 1. Sensör ağı ile yolların gözetlenmesi: (Sol) Algılayıcı ve Saklayıcı birimler araziyi gözlemler ve (Sağ) Saklayıcı birimler yaklaşan dost birliklere rapor verirler.

- Saklayıcı Birimler:** Algılayıcıların gerek hafiza ve hesaplama kapasitelerinin az olması ve gerekse algılayıcıların bataryalarının uzun süre dayanması için Saklayıcı birimler sorumlu oldukları alanda bulunan tüm algılayıcıların aktardıkları bilgileri inceleyecek, birleştirecek ve saklayacaktır.
- Arayüz Birimi:** Yol üzerinde intikal edecek olan dost kuvvette bulunacak Arayüz Birimi belli bir mesafeden Saklayıcı Birimlerle güvenli bir kanal üzerinden

haberleşerek Algılayıcıların sağladığı bilgilerden derlenen muhtemel tehdit noktalarını sayısal harita üzerinde gösterecektir.

Bu unsurların birlikte çalışabilmesi için gerekli olan haberleşme protokolü ise iki katmandan oluşmaktadır.

- **Ağ Kurulumu ve Yönetimi:** Algılayıcılar ve Saklayıcı birimler araziye ilk konuşlandıklarında otomatik olarak haberleşme protokolünün bu katmanını kullanarak etraflarındaki birimleri keşfedeceklerdir. Daha sonra Algılayıcılar ile Saklayıcı birim arasında bilgi değişiminin karışım olmadan yapılabilmesi için her bir algılayıcının raporlama zamanı belirlenecek ve Saklayıcı birim tarafından yayımlanacaktır.

- **Bilgi Aktarımı ve Sorgulama:** Ağ Kurulumu ve Yönetimi katmanında belirlenen zamanlamaya göre her bir algılayıcı birim kendisinde bulunan bilgileri Saklayıcı birime aktaracaktır. Saklayıcı birim de kendisine Arayüz tarafından gönderilen sorguları ve hazırlanan cevapları aynı katmanı kullanarak cevaplayacaktır.

3.1. Sistemin çalışması:

Ağ kurulup işlemeye başladıkten sonra ikinci katman olan Bilgi Aktarımı ve Sorgulama kuralları işletilecektir. Algılayıcı Birimler; Algılama Süresine (AS) göre algılamalarını yapacaklardır (Şekil 2). Eğer algılayıcı, algılama çapını yürüyüş hızıyla geçmek için gereken süreden (En Kısa Tehdit Süresi) daha fazla süren bir hareketlilik hissederse bu uyarıcıyı bir tehdit olarak değerlendirecektir. Algılamalarında bir uyarıcı hissetmezlerse kendilerini Uyuma Süresi (US) kadar uyutacaklardır. Eğer bir uyarıcıyı tehdit olarak değerlendirirse bu uyarıcı ortadan kalkana kadar uyanık kalacak ve uyarının başlangıç ve bitiş zamanını kaydederek Uyarıcı Tespit Raporunu (UTR) oluşturarak Saklayıcı Birime gönderecektir. Uyarıcının ortadan kalkmasından sonra hemen uykuya geçmeyecek İhtiyat Süresi (İS) kadar uyanık kalacak daha sonra yaşam döngüsüne devam edecektir.



Şekil 2. Enerji tassarrufu sağlayacak şekilde tasarlanan Algılayıcı birim yaşam döngüsü.

Saklayıcı Birimler, UTR mesajı aldıklarında bunu Muhtemel Tehdit Ceridesine (MTC) kaydedecekstir. Arayüz Birimi bölgeye geldiğinde kendini Saklayıcı Birimlere tanıtmak maksadıyla Arayüz Tanıtım Mesajını (ATM) yaymayıacakstır. Bu mesajda bulunan rapor başlangıç zamanına göre, Saklayıcı Birimler kendi MTC'lerini kontrol edip uygun nitelikteki kayıtları MTC Raporu (MTCR) olarak aktaracaklardır. Arayüz birimi gelen MTCR'yi yorumlayacak ve Muhtemel Tehlikeli Bölgeleri koordinatlarıyla sayısal harita üzerinde gösterecektir.

4. ALGILAMANIN YORUMU VE YER KESTİRİMİ

Algılayıcılar ses, ışık, manyetizma, ısı, hareket vb. uyarıcılara hassas donanıma sahip olabilirler. Bu çalışmada, Algılayıcıları en basit yapıda tutabilmek için algılayıcı birimlerin *yalnızca hareketliliği hissedebildiklerini, uyarıcıların konumunu veya istikametini tespit edemediklerini kabulleniyoruz*. Dolayısıyla, Arayüz birimi kendisine ulaşan MTCR'leri uygun algoritmalarla yorumlayarak tehdidin yerini bulmak durumundadır.

Bu çalışmada önerdiğimiz algoritmada (Tablo 1), öncelikle Saklama Birimi tarafından Arayüz Birime aktarılan MTCR'deki tüm raporları Uyarıcı Başlangıç Zamanına göre – en eskiden en yeniye doğru- sıralayarak Gelen Tüm Raporlar (GTR) listesi oluşturulur. Daha sonra GTR listesinin başında bulunan ilk rapor alınarak bu raporu yayımlayan algılayıcının kapsama alanını ile kapsama alanları kesişen diğer algılayıcılar tespit edilir. Tespit edilen bu algılayıcılar öncelikle söz konusu uyarıcıyı algılamamış oldukları kabul edilerek Uyarıcıyı Hissetmemiş Komşular (UHK) listesine kaydedilirler. Bu algılayıcılarından hangilerinin aynı uyarıcıyı hissetmiş olabileceğini tahmin edebilmek için söz konusu uyarıcının bitiş zamanını dikkate alabiliriz. Eğer UHK'da bulunan bir algılayıcı MTCR'de bir rapor yayımlamışsa ve bu raporun başlangıç zamanı ilk raporun bitiş zamanından önce ise bu algılayıcının da bildirilen uyarıcıyı hissettiği kabul edebiliriz. Aynı uyarıcıyı hissettiği tahmin edilen algılayıcı UHK'dan çıkartılıp Uyarıcıyı Kaydetmiş Komşular (UKK) listesine eklenir, ilgili mesajını da GTR'den silinir.

UHK'da bulunan diğer tüm algılayıcılar için aynı işlem tamamlandığında elde edilecek UHK ve UKK listelerindeki algılayıcıların kapsama alanları üzerinde çalışarak uyarıcının yerini tahmin edebiliriz. Bunun için iki adımda algılayıcıların alanlarını kullanabiliriz. İlk adımda, UKK' da bulunan algılayıcıların kapsama alanlarının kesimini alarak uyarıcının bulunduğu bölgeyi kestirebiliriz. İkinci adımda, bu bölgeyi daha da daraltabilmek için UHK'da bulunan algılayıcıların kapsama alanlarının bileşimini bu bölgeden çıkartırız. Böyleceye aynı uyarıcıyı hissettiğini tahmin ettiğimiz

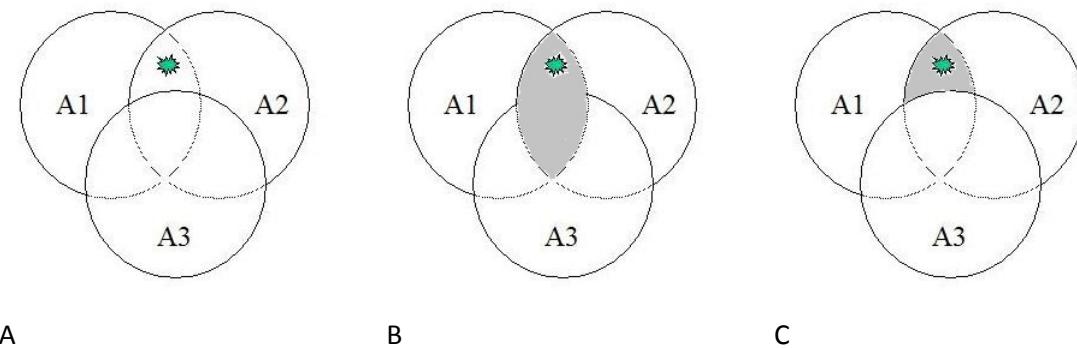
algılayıcıların kapsama alanlarının kesişim kümesinden, söz konusu uyarıcıyı hissetmediğini tahmin ettiğimiz algılayıcıların kapsama alanlarının bileşim kümesini çıkartarak uyarıcının yerini kapsayan bir bölgeyi bulabiliriz. Önerdiğimiz algoritma Tablo 1'de verilmiştir. Algoritmanın sonlanmasıyla MTCR'de bildirilen tüm raporların işlenmesi sonucu yerleri tahmin edilen tehditlerin her biri bir bölge olarak listelenecik ve sayısal harita üzerinde görüntülenecektir.

- (1) MTCR'deki tüm raporları Uyarıcı Başlangıç Zamanına göre –en eskiden en yeniye doğru- sıralayarak Gelen Tüm Raporlar (GTR) listesini oluştur.
- (2) Uyarıcıyı Kaydetmiş Komşular (UKK) ve Uyarıcıyı Hissetmemiş Komşular (UHK) adlı iki boş liste oluştur.
- (3) GTR'deki ilk raporu çıkart ve bu raporu gönderen aygılayıcıyı Uyarıcıyı Kaydetmiş Komşular (UKK) listesine koy.
- (4) İlk raporu gönderen aygılayıcının algılama yarıçapı ile yarıçapları kesişen tüm komşularını Uyarıcıyı Hissetmemiş Komşular (UHK) listesine koy.
- (5) İlk raporun bildirdiği Uyarıcı Bitiş Zamanından önce UHK'da bulunan herhangi bir algılayıcı tarafından gönderilen bir rapor varsa; bu algılayıcıyı UHK'dan, mesajını da GTR'den çıkartıp kendisini Uyarıcıyı Kaydetmiş Komşular (UKK) listesine koy.
- (6) Uyarıcının yerini; UKK listesindeki algılayıcıların kapsama alanlarının *keşiminden* UHK listesindeki algılayıcıların kapsama alanlarının *bileşimini* çıkartarak bul ve uyarıcının tahmin edilen yerini kaydet.
- (7) GTR listesinde başka rapor kalmışsa 2. adımdan devam et; liste boş ise dur.

Tablo 1. Yer kestirme algoritması.

Algoritmanın nasıl çalıştığı Şekil 3'te basit bir örnek üzerinde açıklanmıştır. Şekil 3A'da üç adet algılayıcı ve bir tehdit faaliyeti görülmektedir. A1 algılayıcısı tarafından bildirilen raporun başlangıç zamanının 10:40, bitiş zamanının 10:44; A2 tarafından bildirilen raporun ise başlangıç ve bitiş zamanlarının sırasıyla 10:42 ve 10:44 olduğu; A3 tarafından ise bir rapor verilmediği kabul edilmiştir. Algoritma gereği, önce A1 ve A2 tarafından gönderilen raporlar sıralanarak GTR oluşturulur. GTR'den alınan ilk rapor A1 algılayıcısının raporu olacaktır. A1 algılayıcısının kapsama alanı ile kesişen A2 ve A3 algılayıcıları öncelikle UHK'ya ekleneciktir. A2 algılayıcısının raporunun başlangıç zamanı dikkate alındığında, A2 UHK'dan çıkarılıp UKK'ya aktarılacak ve GTR'den raporu silinecektir. A3 herhangi bir raporu olmadığından UHK'da kalacaktır. A1 ve A2 algılayıcılarının kesişim kümesi hesaplanacaktır (Şekil 3B). Bu alandan

uyarıcayı hissetmeyen A3 algılayıcının kapsama alanı çıkartıldığında Şekil 3C'de taranan bölge bulunmuş olacaktır. GTR'de başka rapor kalmadığından algoritma sonlanacaktır.



Şekil 3. Önerilen Yer Kestirim algoritması için bir örnek

5. BENZETİM TASARIMI

Benzetim Java dilinde geliştirilmiş ve kesikli benzetim altyapısı olarak MASON Kütüphanesi kullanılmıştır [1]. Benzetim modelimizi oluşturan ana elemanlar ve özellikleri Tablo 1'de özetlenmiştir. İki boyutlu olarak modellenen arazide düz bir yolun her iki tarafında Algılayıcı birimlerin birbirlerinden eşit uzaklıkla yerleştirildikleri, her bir algılayıcı birimin dairesel bir alanı algılayabildiği ve bir adet Saklama Biriminin tüm Algılayıcı birimleri kendi kümesine dahil ettiği kabul edilmiştir. Algılayıcı Birimlerin ve Saklayıcı Birimin arazi modeline yerleştirilmesi ve haberleşme protokolünün **Ağ Kurulumu ve Yönetimi** katmanının çalışması sonucu algılayıcı birimler ile saklayıcı birim arasında gerekli olan irtibatlar ve eşgcdüm kurulmasından sonra sistem çalışmaya başlar. Tehdidi temsil eden hareketli nesne; yaya veya araçlı olarak yolun belli bir noktasına gelir, belli süre patlayıcıyı yerleştirmek üzere faaliyet gösterir ve daha sonra yaya veya araçlı olarak bölgeden uzaklaşır. Hareketli nesne, iki patlayıcı yerleştirme faaliyeti arasında yol üzerinde durup yön değiştirip hareket etmeye devam ederek sistemi yanıltmaya çalışır. Yol kenarına patlayıcı yerleştirilmesinin, genellikle trafik yoğunluğunun düşük veya hiç olmadığı saatlerde yapılacağını değerlendirdiğimizden saldırganın başka bir hareketlilik senaryoya dahil edilmemiştir. Hareketliliği hisseden birimler belirlenen raporlama zamanına uygun olarak hazırlayacakları raporları Kaydedici birime haberleşme protokolünün **Bilgi Aktarımı ve Sorgulama** katmanını kullanarak ulaştırırlar. Saldırganın 100 adet patlayıcıyı yerleştirmesi sonunda Saklayıcı

birimin ürettiği **MTCR**'lerdeki bilgiler yer kestirme algoritmasına göre değerlendirilerek muhtemel tehdit koordinatları tahmin edilir. Bu koordinatlarla, saldırganın gerçekte patlayıcıyı yerleştirdiği koordinatlar karşılaştırılarak benzetim sonuç raporları oluşturulur.

6. BENZETİM SONUÇLARI

Tüm testlerde özellikle belirtildiği sürece Tablo 2'de verilen değerlerle model çalıştırılmıştır. Her bir testin sonuçlanması için benzetimde saldırganın 100 adet patlayıcı yerleştirilmesi beklenilmiştir ve 10 kez testler çalıştırılıp ortalaması sonuç olarak verilmiştir. Başarımı yorumlamak için belirlenen ana ölçütler şunlardır:

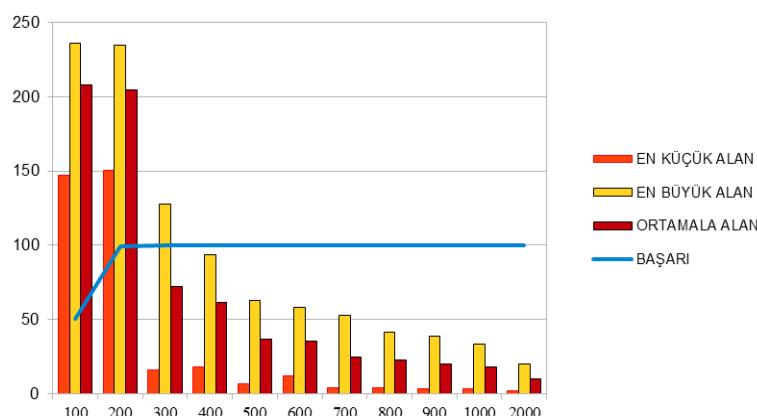
Tehdit Değerlendirme Doğruluğu: Raporların analizinden elde edilen Muhtemel Tehdit Alanının, gerçekte patlayıcı yerleştirilen konumu kapsayıp kapsamadığı ölçülmüştür.

Muhtemel Tehdit Alanının Büyüklüğü: Raporların analizinden elde edilen Muhtemel Tehdit Alanının büyülüğu metrekare olarak incelenmiştir. Salırganın hareket modeli 1 metrekare içersine patlayıcı yerleştirecek şekilde tasarlanmıştır.

NESNE	ÖZELLİKLER	AÇIKLAMA
Arazi	MxN boyutlarda	M= 2000 m., N=1000 m.
Yol	GxU boyutlarda.	G= 5 m., U= 2000 m.
Algılayıcı Birimler	Toplam algılayıcı sayısı AKap: Algılama çapı AHkap: Haberleşme çapı US: Uyuma Süresi AS: Algılama Süresi İS: İhtiyat Süresi EKTS: En Kısa Tehdit Süresi	400 20 m. 2000 m. 120 sn 1.2 sn (US * 1/100) 0.4 sn (AS * 1/3) 18 sn (AKap/Yürüyüş Hızı)
Saklayıcı Birimler	SHKap: Saklayıcı birimlerin kapsama yarıçapı	2000 mt.
Tehdit	Hareket Hızı: Patlayıcı Yerleştirme Süresi Patlayıcı Yerleştirme Yeri	Yürüyüş (4km/saat) En az 3 – en fazla 5 dk. Yolun üzerinde veya 5 m. civarındaki herhangi bir nokta

Tablo 2. Benzetim tasarımının ana parametreleri

İlk testimizde tüm algılayıcı birimleri algılama durumunda tutarak uyumalarına imkân verilmemiştir. Şekil 4'de görüldüğü üzere, tahmin başarısı 200 ve daha fazla algılayıcı kullanıldığında %100 olmaktadır. 100 algılayıcı modellenen yolun ancak yarısını kapsadığından %50 başarılı olmaktadır. Ayrıca, kullanılan algılayıcı sayısını artırıldığında tahmin edilen alan giderek küçülmektedir. Yerleştirilen patlayıcıların yeri 400 algılayıcı birim kullanıldığında ortalama $60m^2$ bir alan içinde olacak şekilde raporlanabilmektedir.

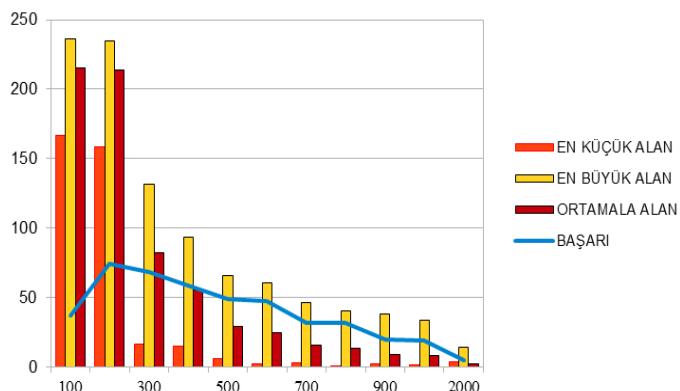


Şekil 4. Tüm algılayıcılar sürekli çalışırken başarım sonuçları. (Yatay eksen algılayıcı sayısı, dikey eksen metrekare cinsinden alan ve yüzde olarak başarımı göstermektedir.)

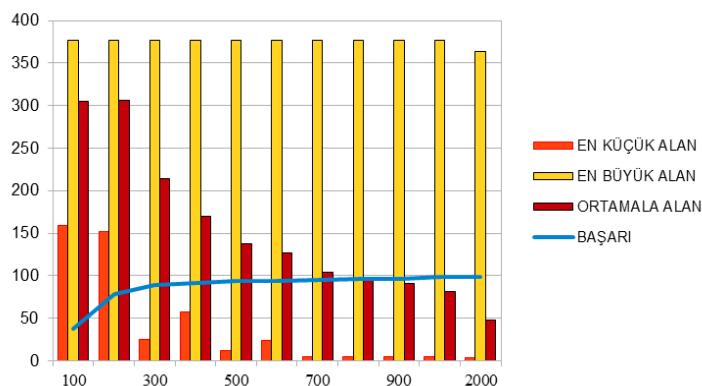
Şekil 5'de, algılayıcıların belirlenen yaşam döngüsüne uygun olarak uyumasına izin verdiğiimizde elde ettiğimiz sonuçlar sunulmuştur. İlk sonuçların aksine burada algılayıcı sayısının artmasının tahmin başarısını azalttığı görülmüştür. Bunun sebebi üçüncü kısımda verilen yer kestirimi algoritmasında rapor göndermeyen tüm komşuların tehdidi hissetmediğine dayanan varsayımdır. Aslında uyuyan komşuların rapor göndermemesi onların duymadığı anlamına gelmemektedir. Bu nedenle algoritmanın 6. adımının aşağıdaki gibi değiştirilmesi gerekmektedir:

- (6) Uyarıcının yerini; UKK listesindeki algılayıcıların kapsama alanlarının kesişimi olarak bul ve kaydet

Algoritmanın yeniden düzenlenmesi ile Şekil 6'daki sonuçlar elde edilmiştir. Tahmin doğruluğu tüm algılayıcıların çalıştığı testinde olduğu başarıyı en az 400 algılayıcı kullanılması durumunda yakalamışlardır. Ancak tahmin edilen alanlar algoritmada yapılan değişiklik nedeniyle göreceli olarak artmıştır. Örneğin, 400 aygılayıcı birim kullanıldığında ortalama alan $60 m^2$ 'den $160 m^2$ 'ye çıkmıştır. Bu gözlem, sistemin hassasiyet ile enerji tassarrufu arasında bir açmazı olduğuna işaret etmektedir.

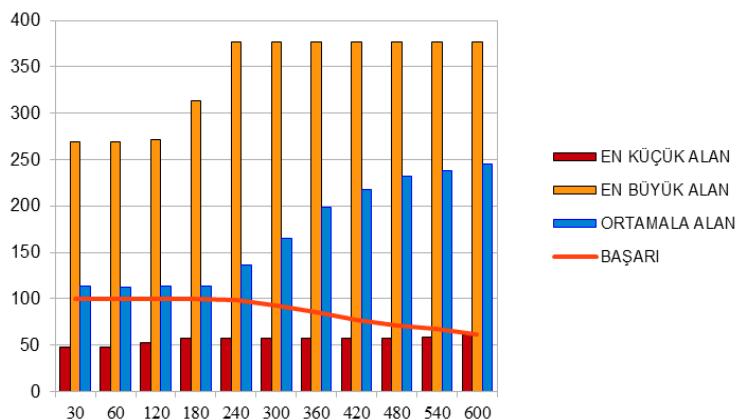


Şekil 5. Orjinal algoritma kullanıldığında ve Algılayıcıların uyumasına izin verildiğinde elde edilen başarıım sonuçları. (Yatay eksen algılayıcı sayısı, dikey eksen metrekare cinsinden alan ve yüzde olarak başarımı göstermektedir.)



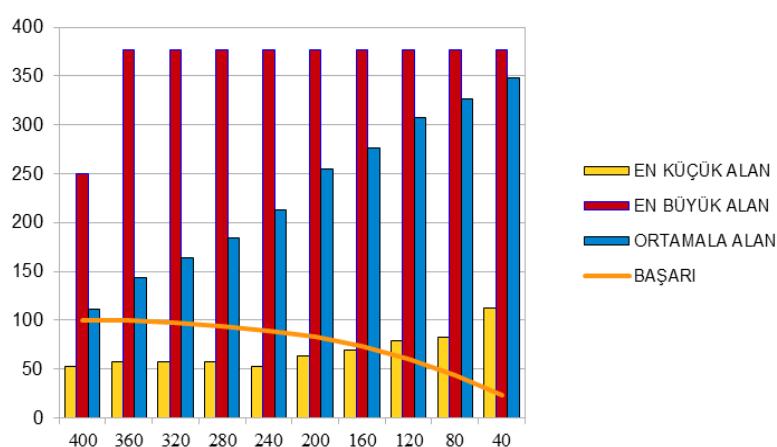
Şekil 6. Orjinal algoritma yeniden düzenlenliğinde ve Algılayıcıların uyumasına izin verildiğinde elde edilen başarıım sonuçları. (Yatay eksen algılayıcı sayısı, dikey eksen metrekare cinsinden alan ve yüzde olarak başarımı göstermektedir.)

Üçüncü testimizde, uyuma süresinin başarıma olan etkisini gözlemledik. Şekil 7'de verilen sonuçlarda öne çıkan gözlem 180 sn.'ye kadar olan uyuma sürelerinde başarımın %100 olduğunu söyleyebiliriz. Bunun en önemli nedeni saldırganın bombayı yerleştirmek için en az 3 dk. İhtiyaç duymasıdır. Algılama süresinin uyuma süresinin %1 olarak ayarlandığı düşünülürse, Tablo 1'de verilen değerler için algılayıcıların bir saatte sadece 36 sn., yani gündə yaklaşık 15 dk. çalışmaları yeterli olacaktır.



Şekil 7. Algılayıcıların uyuma süresinin başarım üzerindeki etkisi. (Yatay eksen uyuma süresi (sn.), dikey eksen metrekare cinsinden alan ve yüzde olarak başarımı göstermektedir.)

Son testimizde daha önceki testlerimizde kullandığımız algılayıcı birimlerin bazı nedenlerle çalışamaz duruma gelmeleri nedeniyle ağımızın ne kadar tehdidi hala algılayabildiğini test ettik. Bu amaçla her bir deneyin başında, toplam Algılayıcı birim sayısının %10 azaltacak şekilde rastgele seçtiğimiz algılayıcı birimleri gayri faal yaparak başarımı gözlemledik. Şekil 8'de görüldüğü üzere, 400 algılayıcının oluşturduğu ağda her seferinde rastgele seçilen 40 algılayıcının azaltılması sonucu başarı giderek düşmüştür. Ancak burada dikkat edilmesi gereken bir gözlem algılayıcılarının dörtte birinden fazlası (120) kaybedilmesine rağmen başarının %95 seviyesinde korunabilmesidir. Hatta yarısının kaybedildiği durumda dahi başarı %80 üzerindedir.



Şekil 8. Arızalanmış algılayıcıların ağ üzerindeki etkisi. (Yatay eksen faal algılayıcı sayısı, dikey eksen metrekare cinsinden alan ve yüzde olarak başarımı göstermektedir.)

7. SONUÇ

Önerilen modelin benzetiminin gerçekleştirilmesiyle yapılan deneylerde modelin uygulanabilirliği incelenmiştir. Sonuçlar, sadece hareketi hissedebilen en basit yetenekli algılayıcılardan oluşan bir ağın bile söz konusu tehditleri başarı ile tespit edebildiği, önemli miktardaki algılayıcı birimlerinin arzlanması durumunda dahi yeterli seviyede bilgi üretmeye devam ettiği ve pil ömürlerinin uzatılması için alınabilecek tedbirlerin başarımı olumsuz etkilememesi için saldırının ihtiyaç duyabileceği en az faaliyet süresinin dikkate alınması gerektiği gözlemlenmiştir.

Bundan sonraki aşamada, modelin ve benzetim yazılımının daha detaylandırılması ve görsel arayüze kavuşturulması hedeflenmektedir. Ayrıca sistemin çalışması için çok önemli olan enerji harcaması ve maliyet-etkinlik hesabı da sistemde modelleneciktir.

8. KAYNAKÇA

- [1] Luke, S., Cioffi-Revilla, C., Panait, L., Sullivan, K. ve Balan, G. (2005), MASON: A Multi-Agent Simulation Environment, *In Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, 82(7):517-527.
- [2] Rowe, N.C., O'Hara, M., Singh, G. ve CA, G. (2009), Wireless sensor networks for detection of IED emplacement, *Proceedings of the 14th International Command and Control Research and Technology Symposium (ICCRTS)*.
- [3] Sundram, J. , Sim, P.P. , Rowe, N.C., Singh, G. ve CA, G. (2008), Assessment of Electromagnetic and Passive Diffuse Infrared Sensors in Detection of IED-Related Behavior,” *Proceedings of the 13 th International Command and Control Research and Technology Symposium (ICCRTS)*.
- [4] Cheng, X.F. (2010), The Optimal Sensing Coverage for Road Surveillance, *Wireless Sensor Network*, vol. 02, pp. 318-327.
- [5] Saarelainen, T. ve Jormakka, J. (2010), C4I2-Tools for the Future Battlefield Warriors, *Proceedings of the Fifth International Conference on Digital Telecommunications*, 38-43.

GÜVENLİK ZAFİYET ANALİZİ VE RİSK DEĞERLENDİRME SİSTEMİ

Mehmet Özer METİN ^(a), Mert KARADAĞLI ^(b), Onur AK ^(c)

^(a) AnelArge, Hacettepe Teknokent 2. Arge Binası Çankaya/ANKARA,
ozer.metin@anelarge.com

^(b) AnelArge, Hacettepe Teknokent 2. Arge Binası Çankaya/ANKARA,
mert.karadagli@anelarge.com

^(c) AnelArge, Hacettepe Teknokent 2. Arge Binası Çankaya/ANKARA,
onur.ak@anelarge.com

ÖZ

Bilgi sistemleri ve ağ altyapılarını oluşturan yazılım bileşenleri birçok güvenlik zayıflığını içerisinde barındırırlar. Güvenlik zayıfet tarayıcıları, tek tek ağ varlıklarını bazında zayıflıkları ortaya çıkarsa da zayıflıkları bir bütün olarak değerlendiren ve gerçek saldırın bakış açısıyla siber güvenlik risklerini değerlendiren sistemlere ihtiyaç vardır. Bu çalışmada sistem zayıflığını analiz ederek kritik sistem bağımlılılarına ve servis hizmet kalitelerine göre risk değerlendirmesi yapan bir yazılım sunulmuştur. Sistem, güvenlik zayıfet ve ağ topoloji tarayıcılarının ve varlık yönetimi yazılımlarının çıktılarını kullanarak ağ cihaz ve uygulamalarının zayıflıklarını belirler. Belirlenen zayıflıklar CVE (Common Vulnerabilities and Exposures) ve BugTraq gibi zayıfet veritabanları analiz edilerek ortak bir semantik ontoloji üzerinde ilişkilendirilir. Ağ cihaz ve uygulamalarının zayıflıklarını saldırı ağaçları üzerinden değerlendirip, sistemi etkileyebilecek en etkin siber saldırı modellerini otomatik olarak üretir. Bu saldırın modelleri ayrı olay simülasyon yazılımıyla kullanıcı tarafından tanımlanan servis ve kaynakları göre denenerek servis sürdürülebilirliği, servis kalitesi, saldırı başarı durumu gibi sonuçlar elde edilir. Simülasyon sonuçları kullanılarak kritik sistem, servis veya kaynakların risk değerlendirme raporları oluşturulabilir. Kullanıcılar bu raporlardan faydalananarak alınacak önlemleri belirler ve sonuçlarını “what-if” senaryoları yardımıyla simülasyon ortamında tekrardan değerlendirebilir. Böylelikle incelenen sistemin güvenlik zayıflıklarını kırmızı takım (read team) yaklaşımı ile analiz eden, olası etkilerine göre ağırlıklandıran ve siber saldırıların kritik servisler üzerinde oluşturduğu riskleri değerlendiren simülasyon ve karar destek ortamı oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Bilgi Sistemleri Güvenlik Simülasyonları, Saldırı ve Zayıfet Ontolojisi, Saldırı Ağaçları, Siber Güvenlik Risk Değerlendirmesi, Zayıfet Veritabanları

VULNERABILITY ANALYSIS AND RISK ASSESSMENT SYSTEM

ABSTRACT

Software components that are used in information and communication systems are affected by many security vulnerabilities. Although vulnerability scanners find vulnerabilities of each network assets, systems that evaluate vulnerabilities as a whole and assess security risk by considering attacker point of view are needed. In this study, a risk assessment system that evaluates security vulnerabilities according to critical system dependencies and quality of service parameters is presented. The system collects security vulnerability scanners, topology builders and asset management software outputs to generate whole map of security vulnerabilities of the system. Collected vulnerabilities are then related with common vulnerability databases like CVE (Common Vulnerabilities and Exposures) and BugTraq on a common ontology. The vulnerabilities are evaluated using attack graphs to generate the most dangerous cyber-attack models. These attacker models are then used in discrete event simulation with critical resources and services of the system to find the results like survivability and quality of the services and success of attacks. The users can use these results to decide on the most efficient remedies and reevaluates the consequences of them using what-if scenarios on simulation environment. As a result a simulation and decision support system that evaluates the security vulnerabilities, quantify the consequences of cyber-attacks and asses the security risks on critical system and services in a RED team manner can be implemented.

Keywords: Attack and Vulnerability Ontologies, Attack Graphs, Cyber Security Simulations, Cyber Security Risk Assessment, Vulnerability Databases.

1. GİRİŞ

Özel şirketler, devlet organizasyonları ve askeri kuruluşlar sahip oldukları bilgi ve ağ altyapıları üzerinden kritik servis ve operasyonlarını yürütürler. Tüm bu bilgi sistemlerinin gizliliğini, sürdürülebilirliğini ve doğruluğunu sağlamak kısacası güvenliğini sağlamak ülke çıkarları içinde önemli bir unsurdur.

Organizasyonlar için bilgi güvenliği yaşayan bir süreçtir ve SSE – CMM (Systems Security Engineering Capability Maturity Model), ITIL (Information Technology Infrastructure Library), Cobit (Control Objectives for Information and related Technology), ISO/IEC 27001 - 27002 ve 17799 gibi standartlar ve sertifikalar ile tanımlanmaya çalışılmıştır. Bilgi güvenliği sürecinin temelinde ise risk değerlendirmesi bulunur. Buna göre öncelikle kritik sistem kaynak ve servisleri tanımlanmalı, bu kaynak ve servisleri etkileyebilecek tehditler ortaya koymalı, tehditlerin sistemi etkileme yolları ve olası etkileri değerlendirilmelidir. Risk değerlendirmesi sonucunda alınacak önlemler belirlenmelidir.

Güvenlik denetçileri, bilgi güvenliği süreçlerinin denetlenmesinde ve sistemin düzenli olarak kontrolden geçirilmesinden sorumludur. Yapılan kontrollerde sistemin güvenlik kayıtları incelenir, zafiyet tarayıcıları yardımıyla sistemin zafiyetleri ortaya çıkarılır bu sonuçlara göre risk analizi ve önceliklendirmesi yapılarak kritik zafiyetler bulunur, önlemler planlanarak kritik servis ve kaynakları etkileyebilecek riskler azaltılmaya çalışılır. Tüm bu süreç büyük ölçekli sistemler için haftalar hatta aylar sürebilmektedir. Sistemi ciddi ölçüde etkileyebilecek zafiyetleri kapatmak için haftalar süreBILECEK bir değerlendirme ise uygulanabilir değildir. Bu süre içerisinde siber saldırganların zafiyetten yararlanabilecek bir metod bulması ve bunu sistem açığına dönüştürmesi yüksek bir ihtimaldir.

Öte yandan bilgi sistemlerinin sürekli değişen bir yapısı vardır. Sisteme eklenecek yeni bir servis, kurulan yeni bir yazılım veya otomatik uygulanan bir yama yeni saldırı vektörleri yaratabileceği gibi incelenmekte olan saldırıcı vektörlerini de kapatabilir. Bu sebeple risk değerlendirmesinin çok daha kısa sürelerde yapılabileceği otomatik analiz ortamlarının oluşturulması bir gereklilikti.

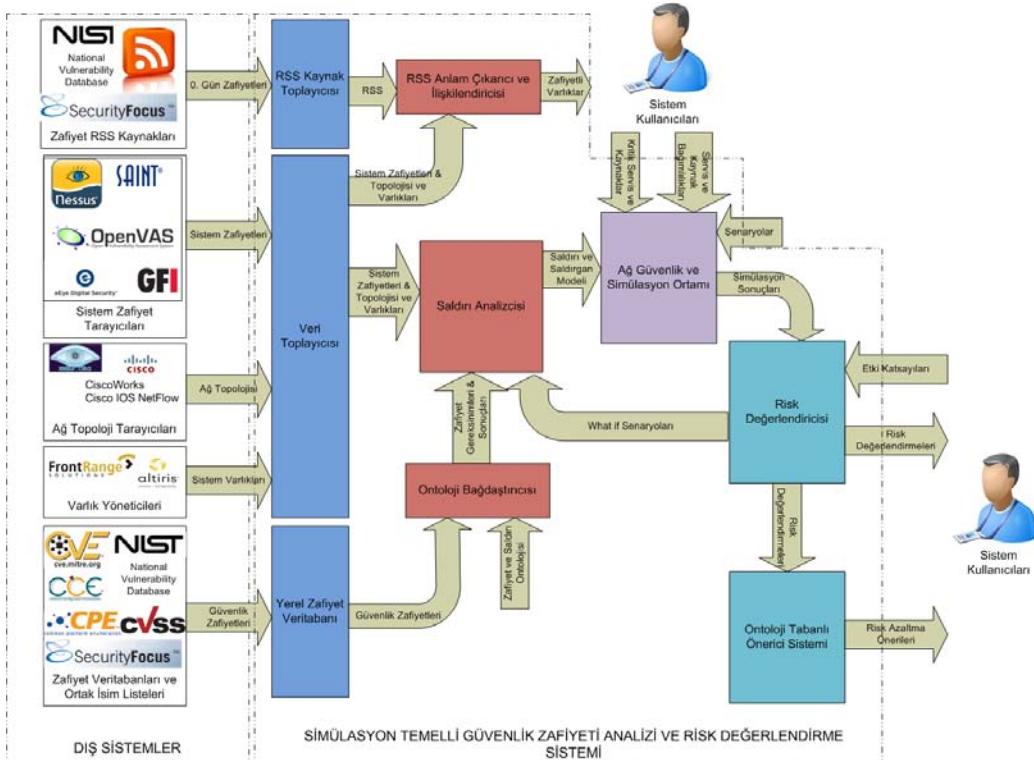
Zafiyet analizi için oluşturulmuş sistemlerden biri NetSPA (Network Security Planning Architecture) dir. NetSPA MIT Lincoln Laboratory tarafından oluşturulmuştur. NetSPA zafiyet tarayıcılarından, CVE sisteminden ve NVD (National Vulnerability Database) zafiyet veritabanından topladığı bilgileri kullanarak erişilebilirlik matrisini hesaplar. Daha sonra bu matrisi kullanarak, saldırganın belirli bir cihazdan başlayıp hedef cihazlara ulaşma yollarını gösteren saldırıcı ağacını otomatik olarak oluşturur. Ayrıca, saldırıcı ağacını kullanarak ağ yöneticilerine otomatik olarak risk değerlendirme ortamı ve etkin yama seçenekleri sunar [1]. Zafiyet analizi için bir başka yaklaşım ise mantık tabanlı programlamadır. Mantıksal programlamayı temel alan ağ güvenlik analizcisi

MulVAL (Multi-host, Multi-stage Vulnerability Analysis Language) üzerine geliştirilmiş saldırı ağacı üretim yazılımı [2] de anlatılmaktadır. TVA (Topological Vulnerability Analysis) adı verilen zafiyet analiz sistemi ise simülasyon yöntemini kullanarak saldırı ağacını çıkarmakta ve ağ güvenlik yöneticisine açıkların kapatılması için belirli tavsiyeler sunmaktadır [3]. MsAMS (Multi-step Attack Modelling and Simulation) de mobil yapıları temel alan, simülasyon yöntemini kullanarak saldırı ağacını çıkarıp ve yama önerileri sunan bir başka sistemdir [4]. Skybox View, zafiyet analizi kapsamında geliştirilen ve kullandığı algoritmanın $O(n^3)$ kompleksliği olduğunu iddia eden bir ticari hazır ürünüdür [5].

Bu çalışmada, sistem zafiyetlerini analiz ederek kritik sistem bağımlılılarına ve servis hizmet kalitelerine göre risk değerlendirmesi yapan bir yazılım sunulmuştur. Sistem zafiyet analizi ve saldırı yollarının belirlenmesinde yararlanılacak olan saldırısı ve zafiyet ontolojisi oluşturulmuştur. Ontoloji oluşturulurken zafiyetler için ortak bir önsel koşul ve sonuç seti belirlenmiş ve böylece saldırısı ağaclarının oluşturulmasına imkan sağlanmıştır. Bölüm-2'de sistemin oluşturulması ve çalışma mantığı anlatılmıştır. Oluşturulan sistemin denemesi için bir sınama ortamı hazırlanmış saldırısı ağacları yardımıyla sınama ortamında bulunan servisleri en çok etkileyen saldırısı yolları çıkartılarak kritik servislerin risk analizi ve değerlendirilmesi yapılmıştır. Oluşturulan sınama ortamı ve sonuçları Bölüm-3'te verilmiştir. Böylelikle incelenen sistemin güvenlik zafiyetlerini kırmızı takım (red team) yaklaşımı ile analiz eden, olası etkilerine göre ağırlıklandırın ve siber saldırıların kritik servisler üzerinde oluşturduğu riskleri değerlendiren simülasyon ve karar destek ortamı gerçeklenmiştir.

2. SİSTEM

Sistemin fonksiyonel mimarisi şekil-1'de verilmiştir. Sistemin dış sistem arayüzleri RSS (Really Simple Syndication) kaynak toplayıcısı, veri toplayıcısı ve yerel zafiyet veritabanıdır. RSS kaynak toplayıcısı NVD, BugTraq (Security Focus) gibi kaynakların sunduğu RSS'leri anlık olarak toplar. Veri Toplayıcısı, sistem zafiyet tarayıcıları, ağ topoloji tarayıcıları ve varlık yöneticilerin statik (XML, HTML,...) veya dinamik (SMTP, RPC, web servis) çıktı ve servislerinden sistem zafiyetlerini, ağ topolojisi ve varlıklarını alarak sisteme dahil eder. CVE, CPE (Common Platform Enumeration), CVSS (Common Vulnerability Scoring System), NVD gibi zafiyet veritabanlarından zafiyetler düzenli aralıklarla çekilerek yerel zafiyet veritabanında saklanır.



Yerel zayıflık veritabanlarındaki bilgiler, oluşturulmuş olan saldırısı ve zayıflığının ontolojisine Ontoloji Bağdaştırıcı üzerinden eşlenir ve ontoloji üzerinden sorgulanır. Sistemin yeni zayıflıklardan haberdar olabilmesi için RSS kaynak toplayıcısı kullanılır. Saldırı Analizcisi incelenen bilgi ve ağ yapısına göre kritik servisleri hedef alan saldırısı adımlarını saldırısı ağaçları oluşturarak değerlendirir ve simulasyonda kullanılmak üzere saldırısı modellerini oluşturur. Ağ güvenlik ve simülasyon ortamı kullanıcıdan girdi olarak incelenen sistemin veri modelini, kritik servis veya kaynakları ve risk değerlendirmesinde bulunacak saldırısı senaryolarını alır. Saldırı analizcisinden gelen saldırısı modellerinin yardımıyla risk değerlendirmesi için ihtiyaç olacak toplu zayıflıkların başarılı saldırıyla dönüşme yüzdesi ve saldırısı etki sonuçlarını oluşturur. Risk değerlendirmecisi kullanıcıdan kritik servis, kaynak veya operasyonlara ait etki katsayılarını alarak risk değerlendirmesi ve önceliklendirmesi yapar. Ontoloji tabanlı önerici sistem kullanıcının belirlediği risklerin derecelerini düşürmeye yönelik yama, konfigurasyon ve ürün seçimi önerisinde bulunur. Kullanıcı belirlediği güvenlik önlemlerini sisteme girerek "What-if" senaryoları kapsamında güvenlik önlemlerinin sistemi ve riskleri ne şekilde etkilediğini analizini yapar. Tüm bu altyapılar aşağıda özetlenmiştir.

2.1. Veri toplayıcısı

Sisteme girdi sağlayan veriler zafiyet tarayıcıları, ağ topoloji tarayıcıları ve varlık yöneticileri olmak üzere üç gruba ayrılmıştır. Sistem zafiyet tarayıcısı olarak Nessus[7], Saint[8], OpenVAS[9], Retina Network Vulnerability Scanner[10] ve GFI LanGuard[11] kullanılabilir. Bu tarayıcılar zafiyetleri CVE'yle ilişkili olarak, XML veya HTML formatında sunmaktadır. Ağ topoloji tarayıcıları olarak Nmap[12] ve CISCO IOS Net Flow[13] kullanılabilir. Bu tarayıcılar ağdaki cihazları formatlı metin ve XML formatında listelemektedirler. Varlık yöneticileri olarak ise FrontRange Software Asset Management[14] ve Altiris IT Management Suite[15] kullanılabilir. Varlık yöneticileri sistemdeki cihazlarda hangi uygulamalar olduğunu versiyonlarını çıkarmaktadır. Bildiride güvenlik tarayıcısı olarak Nessus, ağ topoloji tarayıcısı olarak NMAP kullanılmış, sistem varlıklarını manuel olarak yazılıma aktarılmıştır.

2.2. Yerel zafiyet veritabanı ve saldırısı ontolojisi

Zafiyet veritabanı ve saldırısı ontolojisi oluşturulurken NVD'ye [16] kaynak oluşturan CVE [17], CPE [18], CWE (Common Weakness Enumeration)[19], CVSS [20] ve CAPEC (Common Attack Pattern Enumeration and Classification) [21] listelerinden yararlanılmıştır. Tanımlanan zafiyet veritabanı ve saldırısı ontoloji yapısı ile ontoloji bağdaştırıcı için gerekli olan, belli ön şartlarda hangi saldırular ile nelerin elde edilebileceği gibi analizler yapılmaktadır. Normal ilişkisel veritabanında gösterilemeyecek olan saldırısı, açıklık ve ürün ilişkileri ontoloji yardımıyla sorgulanabilir ve anlamlanırılabilir bir hale getirilmiştir. Ayrıca bu ontolojide tanımlanan ürünler arasındaki ilişkiler, ontoloji tabanlı önerici sistemde sistemin daha güvenli hale getirilebilmesi için yapılabilecek ürün güncellemelerinin ve değişikliklerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

2.3. Ontoloji bağdaştırıcısı

Bu çalışma kapsamında geliştirilen sistem, ağ durumunu ve daha önceki zafiyetlerden yararlanmaların sonuçlarını dikkate alarak bir sonraki muhtemel zafiyetten yararlanma durumu için ön şartların oluşup olmadığını belirlemektedir. Bu işlevi, saldırısı analizcisi ontoloji bağdaştırıcısını sorgulayarak gerçekleştirmektedir. Saldırı analizcisi tarafından ontoloji bağdaştırıcısına hedef cihazdaki açıkların belirteçleri, hedef cihazın kullandığı ürünler ve saldırganın saldırıyı gerçekleştireceği cihazda kazandığı kabiliyetler gönderilir. Ontoloji bağdaştırıcısı bu bilgilerden yararlanarak saldırıyı gerçekleştiren cihazın hedef cihazdaki hangi zafiyetlerden nasıl yararlanabileceği bilgisini çıkarır ve bu bilgiyi saldırısı analizcisiné gönderir.

Bu sistemin işleyişinde en önemli nokta zafiyetlerin önsel şartlarının ve etki sonuçlarının belirlenmesidir. Bu aşamada hazır bulunacak bir veritabanı yoktur. 440 adet güvenlik zafiyeti, internet zafiyet veritabanlarından çekilerek önsel şartlar ve etki sonuçları olmak üzere ontoloji üzerinde işlenmiştir. Güvenlik uzmanı tarafından yapılan

bu değerlendirmeler projenin sonunda da devam ettirilip kapsamlı bir yerel zafiyet veritabanına kavuşulması hedeflenmiştir. Bildiride anlatılan yazılım kapsamında zafiyetler ontoloji üzerine aşağıdaki başlıklarda incelenerek işlenmiştir.

- Kullanıcı Yetkisi, Uygulama Yetkisi, Grup Yetkisi, Dosya Hakları, Dosya Grupları, Hafıza Erişimi, Ağ Erişimi, Bozma, Red, Değiştirme, Çökertme, Kapatma

2.4. Saldırı analizcisi

Sistemin maruz kalabileceği bütün saldırısı adımlarını bulmak için saldırıcı ağaçları kullanılmıştır. Saldırı analizcisiné girdi olarak başlangıç ağ cihazı ve hedef ağ cihazı verilir. Saldırı analizcisi zafiyet ve saldırısı ontolojisini kullanarak her bir düğümde saldırganın kazandığı ekstra yetkiler veya oluşturduğu illegal durum değerlendirilerek bir sonraki adımdaki güvenlik açığından yararlanıp yararlanmayıcağını hesaplar.

Saldırı ağacının düğümleri saldırısının durumunu temsil etmektedir. Düğümler arasındaki ayrıtlar ise durumlar arasında geçişlerde kullanılan zaafiyetleri temsil etmektedir. Saldırısının anlık durumunu belirtmek için kullanılan özellikler aşağıdaki gibidir:

Tablo 1: Saldırısının anlık durumunu belirtmek için kullanılan özellikler

Durum Id: Durum Numarası
Düğüm İsmi: Saldırısının o an hangi bilgisayara ulaştığını belirtir.
Erişilebilir Düğümler: Erişilebilirlik matrisinden alınmaktadır, saldırganın bir sonraki adım için fiziksel erişiminin olduğu bilgisayarlar listesi.
Zafiyet Listesi: Saldırısının bir sonraki adımı için kullanılabilen zafiyetlerin listesi.
Erişim Yetkileri: Saldırısının ulaşabileceği bilgisayarlardaki yetkisi
Kabiliyetler: Saldırganın önceki adımlarda kazandığı kabiliyetler
Kullanılan Zafiyet ve Sonraki Durum: Saldırganın kullanabileceği zafiyet ve sonraki durum belirtilmektedir. Saldırı ağacında sonraki durum başka bir düğümü, zafiyet ise ayrıtı temsil etmektedir.

Bölüm-3'te belirtilen sınama ortamı için saldırıcı ağaç örnekşi şekil-3 da gösterilmiştir.

2.5. Ağ güvenlik simülasyon ortamı

Saldırı ağacından elde edilen bir saldırganın izleyebilecegi potansiyel yollardaki cihazların saldırıldan etkilenmeleri simülasyon ortamında modellenmekte ve bu modeller kullanılarak ağ üzerindeki cihazların veri gizliliği, veri bütünlüğü ve erişilebilirlik değerlerinin saldırıcı senaryolarından nasıl etkilendiği simüle edilmektedir. Simülasyon ortamı kullanmanın temel amacı saldırıcı ağacında belirlenen yolları kullanıp saldırıcı ağaç kullanılarak belirlenemeyecek olan değerleri hesaplamak ve zamana göre bu değerlerin değişimini takip etmektir. Simülasyonun servis kalitesinin zamana bağlı izlenmesinde kullanılabilmesi için saldırganın izlediği yollardaki cihazlara olan etkisinin simülasyon ortamına aktarılması gerekmektedir. Herbir cihazda meydana gelen etki katsayısı CVSS den alınarak simülasyon ortamına yansıtılır. Daha sonra simülasyon ortamında saldırısının kritik servislere olan kümülatif etkisi hesaplanır.

2.6. Risk değerlendirme

Risk değerlendirilmesi yapılırken [22] de belirtilen risk formülünden yola çıkılarak aşağıdaki hesaplamalar kullanılmıştır.

Tablo 2: Risk değerlendirme hesabında kullanılan özellikler

L_{at} : Bütünleşik Saldırıya Dönüşme Olasılığı
C: Bütünleşik saldırının gizliliğe etkisi (Confidentiality)
C _{im} : Kullanıcının gizlilik değerlendirmesi
I: Bütünleşik saldırının veri bütünlüğüne etkisi (Integrity)
I _{im} : Kullanıcının veri bütünlüğü değerlendirmesi
A: Bütünleşik saldırının servis sağlama yeterliliğine etkisi (Availability)
A _{im} : Kullanıcının servis sağlama değerlendirmesi

$$\text{Risk} = L_{at} * (C * C_{im} + A * A_{im} + I * I_{im})$$

Sistem güvenlik açıklarının saldırıyla dönüşme olasılığını ve saldırılardan etkisini simülasyon yardımıyla otomatik olarak hesaplar ve kullanıcıdan etki katsayılarını alarak risk değerlendirmesini yapar. Kullanıcıdan etki katsayılarının alınmasının nedeni CVSS 'de de belirtilen çevresel etkilerin risk değerlendirmesine yansıtılmasıdır.

Saldırı analizi esnasında oluşturulan saldırının her bir düğümünde saldırmanın izleyeceği bir atak metodu (exploit) yer almaktadır. Her atak metodunun başarı ihtimali CVSS ve CAPEC verilerinden yararlanarak hesaplanmaktadır. Açıklardan yararlanma ihtimali tek bir değer olarak hesaplanmamakta, belirli iki değer arasında düzgün bir dağılıma sahip olduğu kabul edilmektedir. Saldırı ağacındaki her bir yol için toplam saldırı etkisi ise simülasyon ortamından yararlanılarak sayısal olarak hesaplanabilmektedir.

2.7. Önerici sistemi

Sistemde yer alan zafiyetleri tamamen ortadan kaldırmak mümkün olmasa da zafiyetlerin sisteme olan etkisini en aza indirmek için ontoloji tabanlı ve ağ güvenlik kuralları önerici sistemleri olmak üzere iki farklı önerici sistem geliştirilmiştir. Ontoloji tabanlı önerici sistemde tanımlanmış olan benzer ürün ilişkisi ile hedef sistemin çalışmasını engelleyen açılığa sahip ürünün yerine aynı açılığı içermeyen başka bir ürünün veya aynı ürünün farklı versiyonlarının kullanılması önerilir. Diğer çözüm olarak önerici sistem erişilebilme matriksinden yararlanarak ağ güvenlik kuralları için, gerekli yerde güncelleme yapılması konusunda kullanıcıya öneriler sunmaktadır.

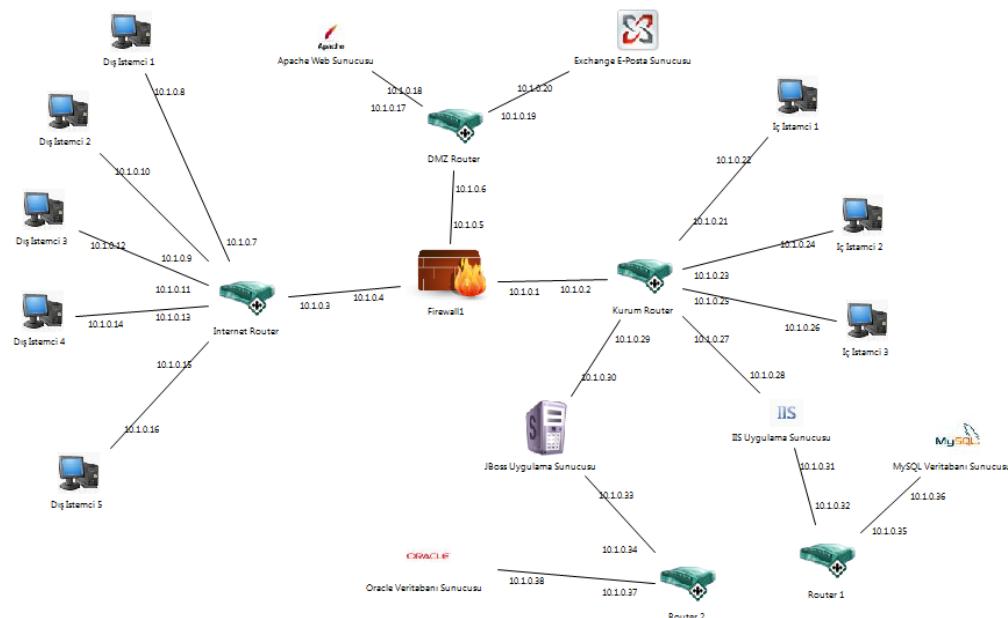
2.8. RSS ilişkilendiricisi

NIST tarafından yayınlanan NVD ve CVE verileri, farklı ürünlerde yeni zafiyetler yakalandıkça güncellenmektedir. Bu sebeple zafiyet bulundukça güncellenen RSS kayıtlarının takip edilmesi gerekmektedir. Sistem RSS kayıtlarını takip ederek risk

analizi yapılan topolojide bulunan envantere göre, sistem varlıklarının zayıflıklarını güncel olarak takip eder ve sistem kullanıcısına otomatik olarak mesaj gönderir.

3. SINAMA ORTAMI DENEY SONUÇLARI

Sistemin denenmesi için sanal makineler kullanılarak şekil-2 de verilen topolojide bir sınama ortamı hazırlanmıştır.



Şekil 2: Simülasyon görseli: Sınama ortamı topolojisi

Zayıfet tarayıcısı olarak Nessus kullanılmış ve ateş duvarı tarayıcısının etkili biçimde çalışmasını engellediği için kurum ağı, DMZ ve internet olarak adlandırılan bölgelerde ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Zayıfet tarayıcısı sisteme 106 güvenlik zayıflığı tespit etmiş olup, bu güvenlik açıkları analiz edilerek önsel koşulları ve kurulan ontoloji üzerinden yerel veritabanına eklenmiştir.

Tehdit analizi yapılarak JBoss uygulama sunucusu üzerinde çalışan bir J2EE uygulamasının kritik bir servis sunduğu değerlendirilmiştir. Buna göre JBoss üzerindeki servisin Oracle veritabanını kullandığı ve aynı zamanda IIS sunucusu üzerindeki bir servise bağlılığı, IIS sunucu üzerindeki servisin de MySQL veritabanını kullandığı kabul edilmiştir. Tehdidi yaratacak saldırgan olarak Dış İstemci-1 bilgisayarının kullanıcısı seçilmiştir. Yukarıdaki topolojide ve belirlenen zayıflıklar sonucunda saldırı analizcisi 548 saldırı durumu tespit etmiş olup şekil-3 da sadece hedef servis ve bağımlılıklarını etkileyen saldırı durumları gösterilmiştir.

Saldırıların olası etkileri gizlilik (C), bütünlük (I) ve servis sağlama yeterliliği olarak 3 boyutta bölüm 2.5'te anlatıldığı gibi simülasyon yardımıyla hesaplanmış ve görselleştirilmiştir. Servis ve bağımlılıkların saldırı etki katsayıları girilmiş ve bu

girdilere göre aşağıdaki tabloda gösterilen risk değerlendirmesi sistemden elde edilmiştir.

Tablo 3: Örnek senaryoda risk değerlendirmesi

Saldırı Yolu	Hedef Cihaz	Kümülatif Saldırı Olasılığı	Saldırı Etki Katsayıları (C,I,A)	Kümülatif Saldırı Etkisi (C,I,A)	Risk Değerlendirmesi
Durum 1 –8 –12 – 15	IIS Sunucusu	0,7396	(1,3,7)	(0.32,1.67,4.03)	24,806
Durum 1 – 8 – 12 – 15 – 19	MySQL Veritabanı	0,6361	(1,5,5)	(0.4,1.35,2.5)	12,499
Durum 1 – 8 – 12 –15 – 17	JBoss Sunucusu	0,7396	(7,7,9)	(1.8,5.3,3.7)	61,386
Durum 1 – 8 – 12 –15 – 17 – 18	Oracle Veritabanı	0,7396	(7,7,7)	(2.3,2.5,7.3)	62,644
Durum 1 - 8 - 14 - 16 - 22 - 23	JBoss Sunucusu	0,1984	(7,7,9)	(1.8,5.3,3.7)	16,467
Durum 1 - 8 - 14 -16 - 22 - 23 - 24	Oracle Veritabanı	0,1984	(7,7,7)	(2.3,2.7,7.3)	17,082

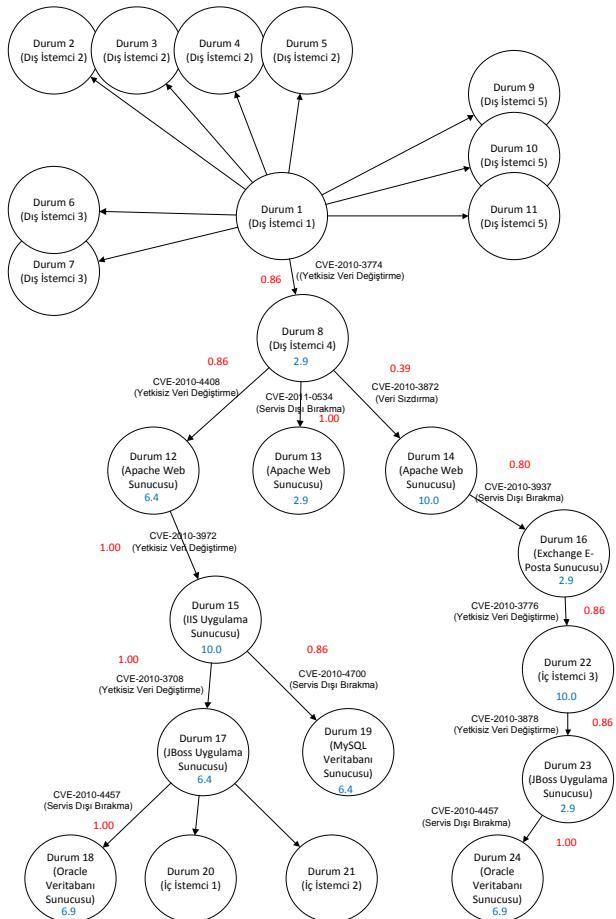
Bu tabloya göre JBoss uygulama sunucusu üzerinde çalışan kritik bir servis için en büyük riski oluşturan saldırısı adımları, Dış istemci-4 bilgisayarı üzerinde CVE-2010-3774 numaralı zafiyeti kullanarak yetkisiz veri değiştirme yapılması, Apache Web sunucusu üzerinde CVE-2010-4408, IIS uygulama sunucusu üzerinde CVE-2010-3972 ve JBoss uygulama sunucusu üzerinde CVE-2010-3708 numaralı zafiyetlerden yararlanarak Oracle Veritabanı üzerinde CVE-2010-4457 numaralı zafiyetten yararlanarak servis dışı bırakma saldırısında bulunulmasıdır. Saldırganın sadece JBoss sunucusunu hedefleyen bir saldırısı yapması yerine asıl hedefi Oracle veritabanını servis dışı bırakmak olduğunda tüm sisteme etkisinin daha büyük olduğu değerlendirilmiştir.

Risk azaltma stratejisi olarak Oracle veritabanı sunucusundaki CVE-2010-4457 numaralı ve JBoss sunucusu üzerindeki CVE-2010-3708 numaralı güvenlik zafiyetlerinin kapatılması belirlenmiş ve bu durumu gösteren “What-if” senaryosu hazırlanarak simulasyon ortamında denenmiştir. Bu açıklar kapandığında risk değerlendirme tablosu aşağıdaki gibi olmaktadır.

Tablo 4: Belirtilen açıklar kapatıldıktan sonra ortaya çıkan risk değerlendirme tablosu

Saldırı Yolu	Hedef Cihaz	Kümülatif Saldırı Olasılığı	Saldırı Etki Katsayıları (C,I,A)	Kümülatif Saldırı Etkisi (C,I,A)	Risk Değerlendirmesi
1 –8 –12 –15	IIS Sunucusu	0,7396	(1,3,7)	(0.32,1.07,2.37)	14,806
1 – 8 – 12 - 15 -19	MySQL	0,6361	(1,5,5)	(0.4,0.8,1.5)	12,499

Tabloda görüldüğü gibi güvenlik zafiyetine ait durumların ortadan kaldırmasının yanısıra, servis bağımlılıklarının sistem üzerinde yarattığı riskler de azalmıştır. Bu bilgi önemli olup, kümülatif saldırısı etkisinin hesaplanması simülasyonun getirdiği faydayı göstermiştir.



Şekil 3: Örnek senaryo için saldırı ağacı

4. SONUÇ

Bu çalışmada anlatılan zafiyet analizi ve risk değerlendirme yazılımını kullanarak ağ güvenlik yöneticileri, ağlarındaki cihazlardaki zafiyetleri, olası bir saldırmanın izleyebileceği potansiyel saldırı yollarını öğrenebilir, bu saldırı yollarının risk analizini yapabilir. Bu çalışmada 3 temel alanda özgün çalışma yapılmıştır. Öncelikle ortak bir saldırı ve zafiyet ontolojisi oluşturulmuş, zafiyetler literatürde çoğulukla yer aldığı gibi sadece erişim ve hak yönünden değil Bölüm 2.3'te anlatıldığı gibi çok boyutta incelenerek yerel zafiyet veritabanı oluşturulmuştur. Diğer bir özgün yanı zafiyetlerin kritik sistemler üzerindeki etkisinin istatistiksel skor bazlı değil, temel skorları kullanan simülasyon sonuçlarına dayandırmasıdır. Böylelikle kritik sistemlerin zafiyetlerden direk veya dolaylı etkilenmesi daha gerçekçi olarak risk analizine yansımıştır. Ontoloji yardımıyla risk azaltmaya yönelik öneriler getirilmesi ve bunların simülasyon ortamında "what-if" senaryolarıyla etkinliğinin gözlenmesi diğer özgün yönüdür.

5. KAYNAKÇA

- [1] Kyle Ingols, Richard Lippmann, Keith Piwowarski, (2006), "Practical Attack Graph Generation for Network Defense", *Computer Security Applications Conference*
- [2] Xinning Ou, Wayne F. Boyer, Miles A. McQueen, (2006), "A Scalable Approach to Attack Graph Generation", *Proceedings of the 13th ACM conference on Computer and Communications Security*
- [3] Sushil Jajodia, Steven Noel, (2007), "Topological Vulnerability Analysis: A Powerful New Approach for Network Attack Prevention, Detection, and Response", *World Scientific Press*
- [4] Virginia N. L. Franqueira, Raul H. C. Lopes, Pascal van Eck, (2009), "Multi-step Attack Modelling and Simulation (MsAMS) Framework based on Mobile Ambients", *Proceedings of the 2009 ACM symposium on Applied Computing*
- [5] Skybox Security, Inc., <http://www.skyboxsecurity.com>
- [6] R. Ritchey, P. Ammann, (2000), "Using model checking to analyze network vulnerabilities", *Proceedings of the 2000 IEEE Symposium on Security and Privacy*
- [7] Nessus, <http://www.nessus.org/nessus/intro.php>
- [8] Saint, <http://www.saintcorporation.com/solutions/vulnerabilityScan.html>
- [9] OpenVAS, <http://www.openvas.org/index.html>
- [10] Retina, <http://www.eeye.com/Products/Retina/Network-Security-Scanner>
- [11] GFI LANguard, <http://www.gfi.com/lannetscan/>
- [12] Nmap Security Scanner, <http://nmap.org/>
- [13] Cisco IOS NetFlow,
http://www.cisco.com/en/US/products/ps6601/products_ios_protocol_group_home.html
- [14] FrontRange, <http://www.frontrange.com/software/it-asset-management/>
- [15] Altiris IT Management Suite, <http://www.symantec.com/business/it-management-suite>
- [16] NVD, National Vulnerability Database, <http://nvd.nist.gov/>
- [17] CVE, Common Vulnerabilities and Exposures, <http://cve.mitre.org/>
- [18] CPE, Common Platform Enumeration, <http://cpe.mitre.org/>
- [19] CWE, Common Weakness Enumeration, <http://cwe.mitre.org/>
- [20] P. Mell, K. Scarfone, S. Romanosky, (2007), "A Complete Guide to the Common Vulnerability Scoring System Version 2.0", <http://www.first.org/cvss/>
- [21] CAPEC, Common Attack Pattern Enumeration and Classification, http://capec.mitre.org/documents/documentation/CAPEC_Schema_Description_v1.3.pdf
- [22] Wang J.A, Guo M., Wang H., Xia M., Zhou L., 2009, "Environmental Metrics for Software Security Based on a Vulnerability Ontology", *IEEE International Conference on Secure Software Integration and Reliability Improvement*

SİBER GÜVENLİK VE TRAFİK ANALİZ SİMÜLASYON ORTAMI

Kerem KAYNAR ^(a), Mehmet Özer METİN ^(b)

^(a) AnelArge, Hacettepe Teknokent 2. Arge Binası Çankaya/ANKARA,
kerem.kaynar@anelarge.com

^(b) AnelArge, Hacettepe Teknokent 2. Arge Binası Çankaya/ANKARA,
ozer.metin@anelarge.com

ÖZ

Siber saldırıların işleyişini ve etkilerini değerlendirmek amacıyla gerçek ağ deney ortamları oluşturmak oldukça zor ve pahalı bir işlemidir. Bu sebeple, kesikli olay modeline göre çalışan siber güvenlik ve trafik analiz simülatörü geliştirilmiştir ve “Ulusal Siber Saldırı Tatbikatı” kapsamında bir kamu kuruluşuyla yürütülen çalışmada kullanılmıştır. Kamu kuruluşunun ağ varlıklarını, uygulamaları ve servisleri paket seviyesinde modellenmiş, birbirinden farklı trafik yükü ve siber saldırı senaryoları simülere edilerek sanal tatbikat durumları yaratılmıştır. Kuruluşun ağ topolojisi üzerinde gerçekleştirilen port tarama ve Dağıtık Servis Reddi (DDOS) saldırısının normal trafik üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. “What-if” senaryoları kapsamında, kurumda bulunan ateş duvarları ve ağa sızmayı önleyen güvenlik cihazları (IPS) değişik konfigurasyonlarda ve kurulumlarda denenmiş, siber savunmadaki etkinliği analiz edilmiştir. Simülasyonların sonucunda, siber saldırıların bazı uygulama ve servislere etkileri net olarak görülebilmiştir. Kuruma düzenlenebilecek olası bir DDOS saldırısının dolaylı etkisi olan, kurumun kullandığı dış servislerin hizmet kalitesinin düşmesi simülasyon ortamında gözlemlenmiştir. Kullanılan simülasyon ortamı aynı zamanda kuruluşunlarındaki operasyonel kritik yolların belirlenmesinde ve siber saldırıların etkisinin değerlendirilmesinde de kullanılmıştır. Bu simülasyon platformunun, kamusal ve askeri ağlar için siber güvenlik sanal tatbikat ortamlarının yaratılması, güvenlik açıklarının ve siber saldırı durumlarında kritik servislerin hizmet kalitesi ve sürdürülebilirlik analizinin yapılması gibi durumlarda kullanılabileceği değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dağıtık Servis Reddi, Siber Güvenlik ve Ağ Simülasyonu, Siber Saldırı, Siber Tatbikat, Veri Kritikliği

CYBER SECURITY AND TRAFFIC ANALYSIS SIMULATION PLATFORM

ABSTRACT

It is difficult and expensive to build real network experimentation environments to evaluate the operation and effects of cyber attacks. So, a discrete-event network security simulator is developed and used in a work conducted with a governmental organization in the scope of “National Cyber Security Application”. The organization’s network assets, applications and services are modelled in packet-level and virtual sessions are created by simulating different cyber security scenarios under varying traffic loads. The effects of port scanning and Distributed Denial-of-Service (DDOS) attacks on normal traffic is observed. In what-if scenarios, models of the firewalls and intrusion prevention systems on the organization’s network are tested and those devices’s effectiveness in cyber defense is analyzed. The decrease in quality of external services, which is an indirect consequence of a possible DDOS attack to the organization, is observed in the simulation environment. The simulation environment is also used in determining the operational critical paths in the organization’s network and assessing the effect of cyber attacks on those paths. It is concluded that the simulator can be used to create cyber security virtual application environments for military and governmental networks and analyze the continuity and quality of critical services under cyber attacks.

Keywords: Cyber Security and Network Simulation, Cyber Attacks, Distributed Denial-of-Service, Cyber Attack Practice, Data Criticality

1. GİRİŞ

Birçok devlet, uluslararası kurum ve kuruluş kendi ağ altyapılarını olası siber saldırısı senaryolarına karşı denemek ve olası güvenlik açılarını tespit etmek için çeşitli yöntemler kullanmaktadır. Bu yöntemlerden bir tanesi beyaz-şapka bilgisayar korsanları kullanmaktadır. Bu yöntem kapsamında gerçek altyapının güvenlilik arz eden bilgiden arındırılmış daha küçük ölçekte bir benzeri oluşturulmalı ve beyaz-şapka bilgisayar korsanlarının yaptıkları siber saldırılar sırasında ağ altyapıları gözlenmelidir. Fakat bu yöntem oldukça pahalı olmakla beraber, çoğu zaman güvenlilik arz eden bilgilerin ağdan ayrılamaması sebebiyle uygulanabilirliği de düşüktür. Öte yandan saldırıların tekrarlanabilir ve alınacak önlemlerin etkilerinin incelenmesi gerekmektedir. Bu yüzden bilgi ve ağ güvenliği konularında simülasyonların önemi her geçen gün artmaktadır. Olası bütün saldırı ve savunma senaryolarının denenebileceği ağ altyapıları ve savunma sistemlerinin modellenebileceği ve gerçege uygun olarak analizlerin yapılabileceği ortamlara ihtiyaç vardır.

Bilgi sistemleri ve ağ simülasyonu konusunda dünyada gerek kâr gütmeyen organizasyonlar, gerek özel şirketler gerekse askeri kuruluşlar bünyesinde yapılmış çalışmalar vardır. Ağ simülasyon araçlarında ön plana çıkan simülasyon ortamları ns2 ve yeni versiyonu ns3[1], QualNET[2] ve GTNetS[3] olarak listenebilir. Askeri tarafta ağ simülasyonu ihtiyacı Amerika Birleşik Devletleri ordusu tarafından adreslenmiş, özellikle yeni geliştirilecek C4 sistemlerinin simülasyon ortamında trafik analizi için 1996 yılında eski adı NETWARS yeni adı Joint Communications Simulation System (JCSS) olan proje başlatılmıştır. Bu yönde simülasyon ihtiyacına bir temel oluşturulması için sivil çözümler için geliştirilmiş OPNET ağ planlama ve simülasyon aracı seçilmiştir ve proje kapsamında silahlı kuvvetlerin ihtiyaçları doğrultusunda geliştirilmiştir. Bütün bu simülasyon altyapılarında ana hedef gerçege yakın ağ trafiği simülasyonudur. Halbuki bilgi ve ağ güvenliği senaryolarının denenebileceği simülasyon ortamlarının en başta gelen ihtiyacı bilgi sistemlerinin ve siber saldırılarının modellenebilmesidir. Bu sebeple sadece ağ ve iletişim katmanlarının simüle edilebildiği ortamların değil oturum (session), sunum ve uygulama seviyesi protokol ve uygulamaların simüle edilebileceği platformlara ihtiyaç vardır.

Bu sebeple bu bildiride kullanılan siber güvenlik ve trafik analiz simülasyonu Berlin Teknik Üniversitesi DAI-Labor tarafından oluşturulan NESSI 2 (Network Security Simulator) ağ güvenlik simülatörü temel alınarak yapılmıştır. NESSI 2'nin diğer ağ simülasyon altyapılarından en büyük farkı bilgi güvenliği simülasyonları için özel olarak geliştirilmiş olması ve uygulama seviyesi simülasyon modellerine odaklanmasıdır [4-6].

25-28 Ocak 2011 tarihleri arasında Siber Güvenlik Tatbikati, TÜBİTAK Bilişim ve Bilgi Güvenliği İleri Teknolojiler Araştırma Merkezi (BİLGEM) ve Bilgi Teknolojileri

ve İletişim Kurumu (BTK) koordinasyonunda gerçekleştirilmiştir [7]. Bu tatbikatta siber savaş tehdidine karşı hazırlıklı olmak, kurumların bilgi sistemi güvenliği olaylarına müdahale yeteneği ile kurumlar arası koordinasyon yeteneğini tespit etmek, kurumlar arası iletişimini artırmak, bilgi ve tecrübe paylaşımını ve siber güvenlik bilincinin artırılmasını sağlamak amaçlanmıştır.

Bu bildiri de bu tatbikata hazırlık kapsamında bir kamu kuruluşuyla yürütülen ortak bir çalışma ve sonuçları değerlendirilmiştir. Tatbikat öncesinde tatbikatta kullanılacak saldırıcı yöntemlerinden olan Dağıtık Servis Reddi (Distributed Denial of Service – DDOS) saldırısı ve Port Tarama (Port Scanning) aktivitesi simüle edilmiştir. Simülasyonlar, NESSi 2 üzerine yapılan eklentiler sonucu ortaya çıkarılan ağ güvenlik simülatörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kuruluşa sıkça kullanılan ve çok bilinen web sunucuları (Apache), veritabanı sunucuları (MS SQL, Oracle), e-posta sunucuları (Exchange) ve bu sunuculara karşılık gelen istemciler istatistiksel yöntemlerle modellenmiş ve NESSi 2 ortamına eklenmiştir. Önce normal trafik akışını gözlemek amacıyla bir simülasyon senaryosu yürütülmüş, daha sonra port tarama ve DDOS saldırısının normal trafik üzerine etkilerini gözlemlemek amacıyla farklı simülasyon senaryoları yürütülmüştür. Bu simülasyon senaryoları esnasında her bir ağ düğümünden belirli bir anda geçen verinin toplam kritikliği de görülebilmiştir. Bu bildirinin 2. Bölümünde tatbikat simülasyonu için oluşturulmuş modellerden bahsedilmiş, 3. Bölümde simülasyon sonuçları değerlendirilmiştir, 4. Bölümde güvenlik simülasyon ortamının gelecekte geliştirilmesi düşünülen özelliklerinden ve olası kullanım alanlarından bahsedilmiş ve sonuçlandırılmıştır.

2. SİBER GÜVENLİK VE TRAFİK ANALİZ SİMÜLASYONU

2.1. TCP/IP modeli

2.1.1. Ağ seviyesi

Simüle edilen her bir ağ düğümünün her bir ağ arayüzü için o arayüze gelen ve giden IP paketlerini tutmak için birer tane kuyruk yapısı kullanılmıştır. Her kuyruk yapısının maksimum kapasite değeri (bayt cinsinden) mevcut olup bu değerden fazla boyutta veri kabul etmemekte, fazla paketleri düşürmektedir. Kuyruk yapılarının kapasite değerleri simülasyon öncesinde ayarlanabilir durumdadır. Bir ağ arayüzü, kuyruk yapısından her bir birim simülasyon zamanında, bağlı olduğu bağlantının (linkin) bant genişliği kadar veri sunabilmektedir.

Çalışma süresince, NESSi 2 IP katmanında yapılan en önemli değişikliklerden biri veri kritikliği hesaplamasının IP katmanına eklenmesidir. Belirli bir andaki veri kritikliği sadece uç düğümlerde değil, yönlendirici düğümlerde de hesaplanmaktadır. Bu nedenle, veri kritikliği hesabı IP katmanında gerçekleşmiştir. Her bir IP paketinde o paketin kritiklik değeri saklanmaktadır. Bir paketin içindeki kritiklik değeri o paketin içindeki

üst seviye protokol verisi alanında (payload) tutulmakta ve paket oluşturulurken bir üst seviye protokolden (TCP veya UDP) IP katmanına aktarılmaktadır. Simüle edilen herbir ağ düğümü, belirli aralıklarla, sahip olduğu kuyruk yapılarında saklanan paketlerin toplam kritikliğini hesaplayıp simülasyon veritabanına kaydetmektedir. Bu sayede, simülasyon esnasında ve sonrasında herhangi bir ağ düğümünden geçen verinin toplam kritikliği belli aralıklarla izlenebilmektedir. Bu aralık değeri simülasyon öncesinde belirlenebilir. Veri kritikliği değerleri kullanıcı tarafından bir ağ cihazına yüklenen herbir uygulama için belirlenmektedir.

2.1.2. Uygulama seviyesi

Çalışma kapsamında, NESSi 2 TCP katmanında önemli değişiklikler yapılmıştır. Bu değişikliklerin temel amacı simülasyon modellerini çalışma için gerekli olan minimum detay seviyesinde tutup simülasyonu olabildiğince hızlandırmaktır. Bu amaçla web, veritabanı sunucuları ve istemcileri vb. gibi uygulamalar tarafından üretilen veriler için sadece önemli olan veri özelliklerini dikkate alınmıştır. Bu uygulamaların ürettiği verinin içeriği bu çalışma kapsamında önem taşımamakta, ancak verinin bir atağa ait olup olmadığı, verinin boyutu, kritikliği gibi değerler simülasyon için çok büyük önem arz etmektedir. Sonuç olarak, simülasyon esnasında her uygulama ürettiği verinin boyutunu, kritikliğini, bir atağa ait olup olmadığını ve veriye özel bir belirteci belirlemekte, verinin gerçek içeriğiyle (verinin veritabanı sorgusu olup olmadığı vb.) ilgili bir şey sunmamaktadır. Bu sayede uygulama veri blokları sadece veriye ait belirleyici bilgi içermektedir.

Uygulama veri bloğuna ait yukarıda bahsedilen belirleyici bilgiler uygulama seviyesinden IP seviyesine aktarılmakta, IP seviyesinde de bu belirleyici bilgilerin bir kısmından (kritiklik, veri kimliği) yararlanılmaktadır. Bu çalışmada temel amacın DDOS gibi atakların normal trafik üzerindeki etkisini görmek olduğu anımsandığında, uygulama verileri için sadece belirleyici bilgileri kullanmak doğrulanabilir. Zaten, siber savunma cihazları da istatistiksel yöntemlerle modellenmiştir ve herhangi bir uygulamanın gerçek verisinden (veritabanı sorgusu gibi) yararlanılmamaktadır.

2.2. Uygulama modelleri

Simülasyon ortamını daha gerçekçi hale getirebilmek için kuruluşa yaygın olarak kullanılan yazılım ürünlerine ait sunucu ve istemci modelleri (web sunucusu ve istemcisi, e-mail sunucusu ve istemcisi, veritabanı sunucusu ve istemcisi vb.) oluşturulmuştur. Bu modeller zaman aşımı süresi, soketin yaratılma zamanı gibi genel özelliklerin yanında modele özgü port bilgilerini, portlardaki veri akışı hızı ve miktarı gibi bilgileri kullanıcı tarafından değiştirilebilir parametreler olarak sunmaktadır. Paket boyutlarının belirlenmesinde port bazında pareto dağılımı kullanılmaktadır. Pareto dağılımı için kullanıcı her port için paketin boyutunun en az ve en çok kaç bayt olabileceği bilgileriyle beraber pareto sabit değeri girmektedir. Bu bilgiler

doğrultusunda gönderilecek paketin boyutu belli aralıktır gerçekçi bir dağılımdır. Paket gönderme aralığının belirlenebilmesi için ise poisson dağılımı kullanılmaktadır. Kullanıcı yine her bir port için poisson parametresi olarak bir lambda parametrik değeri girmektedir.

Tüm bu modeller, modellere ait parametreler, paket gönderim zamanını belirlemek için kullanılan poission dağılımı ve paket boyutlarının hesaplanması sırasında kullanılan pareto dağılımının amacı gerçekçi bir simülasyon ortamının yaratılmasını sağlamaktadır.

2.3. Siber savunma modelleri (IDS/IPS ve Firewall)

Siber savunma çalışması kapsamında, bir güvenlik duvarı (firewall) ve bütünselik bir ağa sızmayı önleme ve tespit cihazı (intrusion prevention and detection system – IPS/IDS) modeli yazarlar tarafından geliştirilmiştir. Bu cihaz modellerinin geliştirilmesinde istatistiksel yöntemler kullanılmış, özel bir ağa sızma tespit algoritmasından (Intrusion detection with clustering vb.) kaçınılmıştır.

Ateş duvari kural tabanlı modellenmiştir. Kullanıcı ateş duvarını simüle edilen ağ topolojisi üzerinde herhangi bir yere yerleştirdikten sonra istediği kuralları tanımlayabilir. Örnek olarak, belirli bir cihazın belirli bir kapısından (port) yine başka bir cihazın belirli bir portuna giden paket trafiğini engelleyebilir. Başka bir örnek olarak, belirli bir cihazın belirli bir portundan gelen trafiğin hedef adresini değiştirip o trafiği başka bir hedef cihaza yönlendirebilir. Bu kurallar, güvenlik duvarı uygulamasının belli parametrelerini ayarlayarak tanımlanır. Güvenlik duvarının bir başka özelliği de simülasyon esnasında kendisinde meydana gelen önemli olayları simülasyon veritabanına kaydetmesidir. Örnek olarak engellenen, başka bir hedefe yönlendirilen ve izin verilen paketlerin sayısı simülasyon esnasında takip edilebilir.

Modellenen bir diğer siber savunma cihazı da ağa sızmayı önleme ve tespit cihazıdır. Bu cihaz, tamamen istatistiksel olarak modellenmiştir ve herhangi özel bir ağa sızmayı tespit algoritması kullanılmamaktadır. Bu cihaz modelinin kullanıcıya sunulan en önemli parametreleri veri işleyiş hızı (throughput), atak tespit başarı oranı, yanlış sinyal oranı ve tespit edilen paketleri düşürme oranıdır. Burada yanlış sinyal oranı, cihazın atak olarak tespit ettiği ancak atak olmayan verinin (normal veri), cihazdan geçen toplam normal veriye oranıdır. Cihaz IP seviyesinde çalışmaktadır ve üzerinden geçen herbir paket için düzgün bir ihtimal dağılımına (uniform probabilistic distribution) uyacak biçimde bir ihtimal değeri belirlemekte ve bu değeri belirlenen oran değerleriyle karşılaştırarak paketin tespit edilme ve düşürülme durumunu belirlemektedir.

2.4. Saldırı modelleri (DDOS, Port Scan)

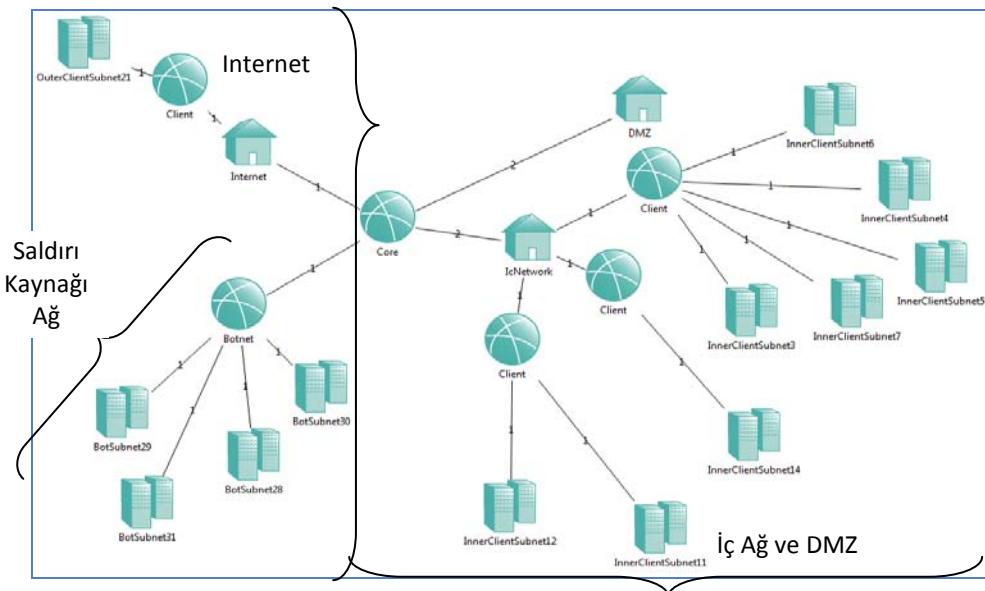
DDOS saldırısı ağ üzerinde seçilen belirli sayıda düğümden kuruluş içi ağındaki bir sunucuya hedef alacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu saldırında amaç kuruluşun Internet

kapısının giriş bandını tıkanmaktadır. Seçilen her bir düğüm saniyede 1000 bayt boyutunda 10 adet UDP paketiyle iç ağdaki sunucuya saldırmaktadır. Bu değerler ayarlanabilir durumdadır ve simülasyon öncesinde uygun değerler verilerek saldırı yoğunluğu artırılıp azaltılabilir. Gönderilen her bir UDP paketi atağa özel bir belirteç içermektedir. Bu sayede paketin dolaştığı cihazlar o paketin atağa ait olduğunu anlayabilir ve ona göre istatistiksel işlemler yapabilir. DDOS saldırısı yazarlar tarafından modellenmiş ve NESSi 2 simülasyon ortamına uygulama olarak eklenmiştir.

Yazarlar tarafından modellenen bir diğer atak olan Port Taraması, TCP SYN yöntemiyle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde bir cihazın belli bir portuna SYN paketi gönderildiğinde eğer o cihazın o portu kapalı ise cihaz RST paketiyle karşılık verir. Eğer o cihazın o portu açıksa cihaz SYN ACK paketiyle karşılık verir. Saldırgan hedef cihazın belli bir portuna TCP SYN paketi gönderir ve gelen cevaba göre o portun açık olup olmadığına karar verir.

3. SANAL TATBİKAT SONUÇLARI

3.1. Topolojiler : Gerçek sisteme yakın fakat aynı olmayan topoloji



Şekil 1: Kuruluş için oluşturulan ağ topolojisi

Kuruluş için oluşturulan ağ topolojisi modeli birebir gerçek topolojiyle aynı olmamakla birlikte (gizlilik nedeniyle), olabildiğince gerçeğe yakın bir ağ topolojisi oluşturulmaya çalışılmıştır. Bu ağ modelinde, DMZ bölgesinden dışarıya sunulan bir web hizmeti, iç ağda Internetten hizmet alan iç istemciler, DDOS saldırısının gerçekleştirildiği Internette bulunan alt ağlar, Internette bulunan web hizmeti veren sunucular ve yine Internette bulunan DMZ bölgesinden hizmet alan istemciler bulunmaktadır. Yukarıdaki şekilde oluşturulan ağ topolojisi gösterilmiştir.

BotSubnetx ile gösterilen kısımlar DDOS atağı başlatan alt ağları, InnerClientSubnetx iç ağdaki istemcilerin bulunduğu alt ağları, OuterClientx Internette bulunan ve DMZ bölgesinden hizmet alan istemcilerin bulunduğu alt ağının, Core ise kuruluş ağının omurgasını oluşturan yönlendirme cihazlarının bulunduğu alt ağının göstermektedir. Kuruluş ağının Internete çıkış bant genişliği 10Mb'tır. Toplam 400 adet iç istemci bulunmaktadır. DMZ bölgesinden hizmet alan Internetteki istemci sayısı da 100 dür. İç ağa ve DMZ bölgesine olan paket girişleri birer güvenlik duvarı ve ağa sızmayı önleyen ve tespit eden cihazla kontrol edilmektedir. Ayrıca iç ağda, iç istemcilere hizmet veren sunucular (web, e-posta ve veritabanı sunucuları) da bulunmaktadır.

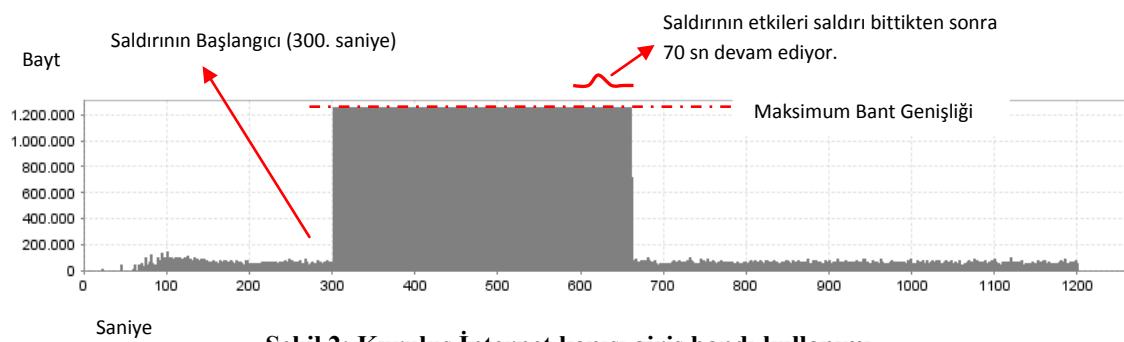
3.2. Simülasyon senaryosu ve sonuçları

3.2.1. Simülasyon senaryosu

Simülasyon senaryosu Internette saldırgan tarafından ele geçirilen bir grup (200 adet) bilgisayardan (Botnets) kuruluşun iç ağındaki bir sunucuya DDOS atağı yapılması esasına dayanmaktadır. Her bir bilgisayardan başlatılacak DDOS atağının yoğunluğu ayarlanabilmekle birlikte, senaryoda saldırgan tarafından ele geçirilen her bir bilgisayar bir saniyede iç ağdaki hedef sunucuya 1000 baytlık 10 adet UDP paketi göndererek saldırmaktadır. Toplamda hedef sunucuya birim zamanda (1 saniye) 2000000 bayt veri gönderilerek kuruluş ağının Internete açılan bağlantısı tıkanmak istenmektedir. Atak süresi 300 saniyedir. Atak trafiğinin yanısıra ağda normal trafik akmaya devam etmektedir. İç ağda bulunan istemcilerin %80'i yine iç ağdaki sunuculara bağlanıp hizmet almakta, %70'i ise Internetteki sunuculardan hizmet almaktadır. Bir istemci hem iç sunuculardan hem dış sunuculardan hizmet alabilir. Senaryo kapsamında sunuculara ve istemcilere uygun uygulama modelleri (Apache web sunucu uygulaması, MySQL veritabanı sunucusu uygulaması, Exchange sunucu uygulaması) yüklenmiştir.

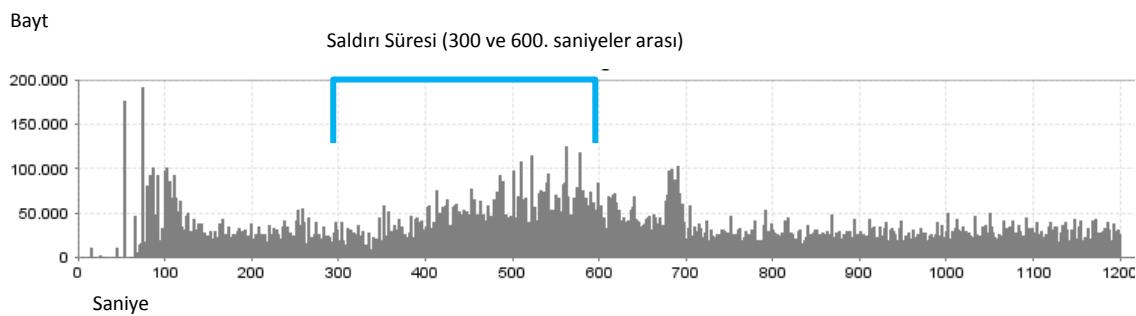
3.2.2. Saldırı etkileri

Saldırı saldırganın elindeki her cihazdan iç ağdaki hedef sunucuya saniyede 10 adet 1000 baytlık UDP paketi göndermek suretiyle 300. ve 600. saniye aralığında 300 saniye boyunca devam etmiştir. Simülasyon esnasında kuruluş ağının Internet bağlantısının iç ağa giriş bant genişliğinin kullanım miktarı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



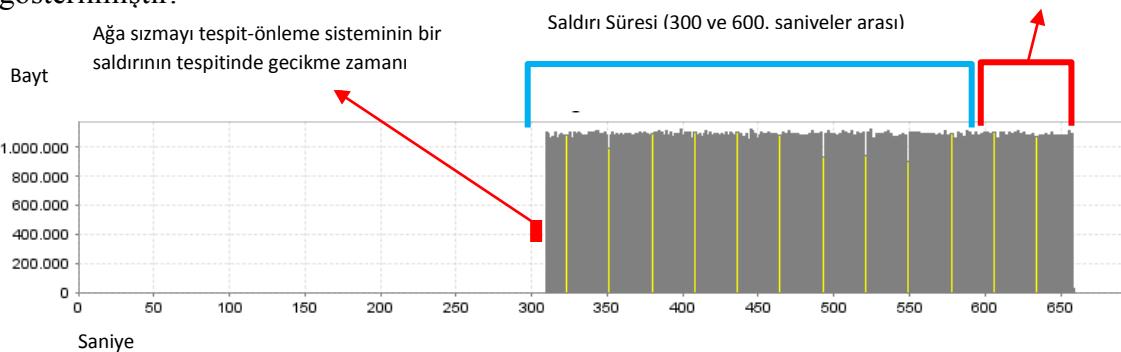
Saldırı esnasında Internet kapısı giriş bandı yükünün giriş bandının bant genişliğini (10 MB) tamamen kapladığı görülmektedir. Hatta, bu durumun saldırıldan sonra da 60-70 saniye kadar devam ettiği görülmektedir. Bunun nedeni atak paketlerinin izledikleri yol boyunca yönlendirme (router) cihazlarının kuyruklarında depolanmaları ve atak bittikten sonra dahi bu kuyruklarda bir miktar atak paketinin kalmasıdır.

Simülasyon esnasında kuruluş ağının Internet bağlantısının çıkış bandının kullanım miktarı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Internet kapısı çıkış bandında da saldırı esnasında yoğunluk görülmemesine rağmen tıkanıklık yaşanmamıştır. Bu yoğunluğun sebebi istemcilerin DDOS saldırısı nedeniyle isteklerine dış sunuculardan cevap alamaması neticesinde tekrar istek göndermeleridir (retransmission). Bu durum simülasyon esnasında herbir istemci için kaydedilen TCP tekrar gönderme (retransmission) olaylarının simülasyon grafiksel kullanıcı arayüzü ortamında izlenmesiyle doğrulanmıştır.



Şekil 3: Kuruluş İnternet kapısı çıkış bandı kullanımı

Saldırı ve ağa sızmalara karşı kuruluşa kullanılan siber savunma cihazı modellerinden yukarıda bahsedilmiştir. Kuruluşun iç ağında kullanılan bir ağa sızmayı önleme ve tespit cihazının simülasyon esnasında cihazın veri işleyiş hızına ve atak tespit başarısı yüzdesine bağlı olarak tespit ettiği saldırının verisinin miktarı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

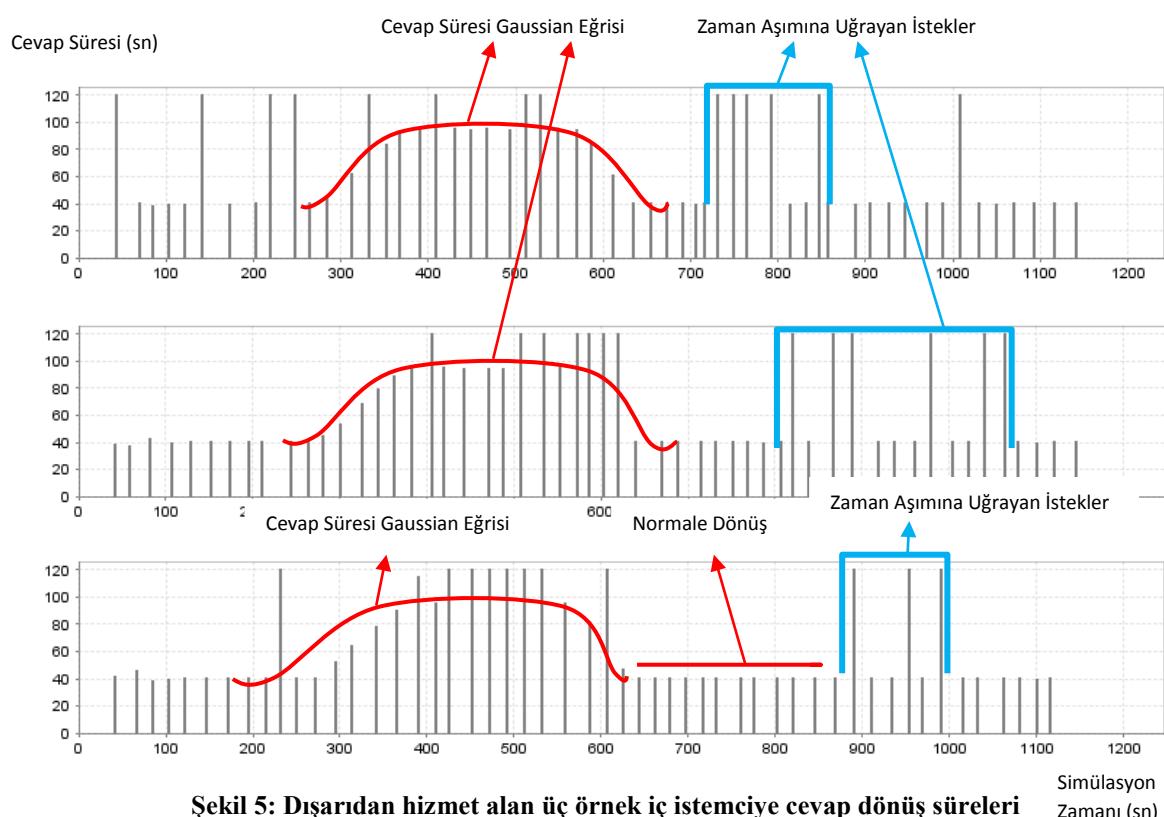


Şekil 4: Ağa sızmayı tespit-önleme sisteminin yakaladığı saldırısı

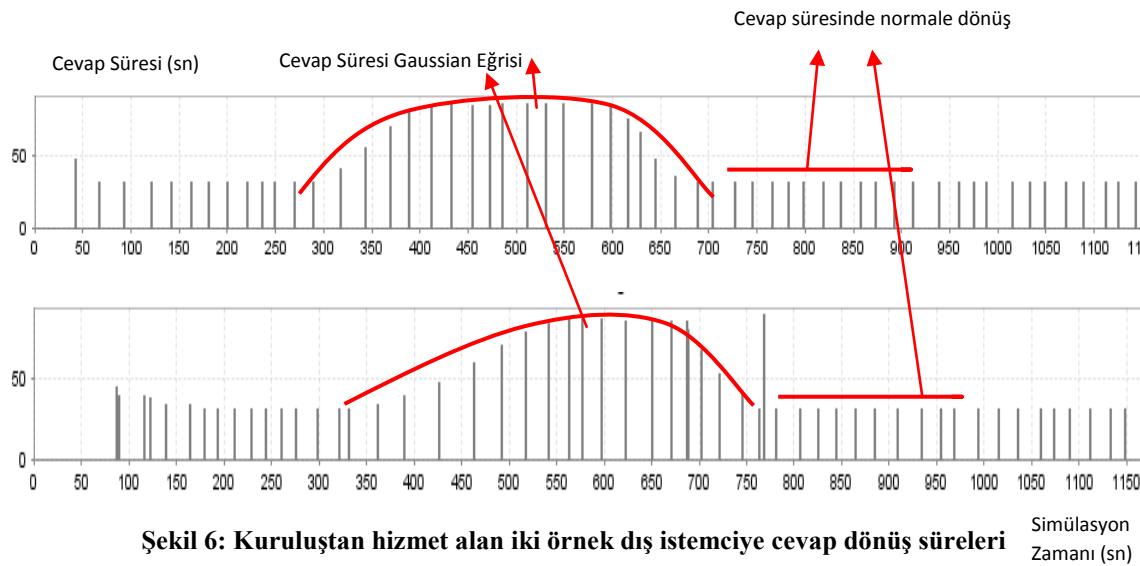
Ağa sızmayı önleme ve tespit cihazının saldırı esnasında saniyede 1000000 bayttan fazla atak verisini tespit ettiği gözlemlenmiştir. Cihaz atak verilerini tespit etmeye atak başladığı anda değil atak başladıkten bir müddet sonra başlamıştır (Yaklaşık 310.

saniye). Bunun nedeni ise cihaz modelinde kullanıcı tarafından ayarlanan, gerçeğe yakınlığı katkıda bulunan tespit gecikme süresidir. Bu süre her atak tipi için ayrı ayrı dikkate alınır. Ayrıca, atak tamamlandıktan sonra dahi atağın etkileri devam ettiği için cihaz atakları tespit etmeye devam etmektedir. Cihaz tespit ettiği her atak paketini düşürmemiştir. Düşürdüğü paket oranı, kullanıcının simülasyon öncesinde belirlediği tespit edilen veriyi düşürme yüzdesine yaklaşmıştır.

Saldırının en büyük etkisi dışarıdaki sunuculardan hizmet alan iç istemcilere olmuştur. Dış sunuculardan bu istemcilerin isteklerine gelen cevap süresindeki gecikme aşağıdaki şekilde gösterildiği üzere Gaussian eğrisi şeklindeki gecikmeler yönlendiricilerdeki kuyruk büyülüklerinden kaynaklanan gecikmelerdir. Atak esnasında iç ağdaki sunuculardan hizmet alan iç istemcilerin isteklerine gelen cevap süresinde önemli bir değişiklik olmamıştır, bu istemciler ataktan etkilenmemiştirlerdir.



Saldırının bir başka etkisi de DMZ bölgesindeki sunuculardan hizmet alan Internetteki dış istemcilere olmuştur. Bu dış istemcilere gelen cevap süresindeki gecikme aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi Gaussian eğrisi şeklinde gerçekleşmektedir. Cevap süreleri saldırının başlangıcında artarken bitişinde azalmaktadır. Bunun nedeni ise dış istemcilerin isteklerinin kuruluşun Internet kapısı giriş bandındaki tıkanıklıkta dolayı DMZ bölgесine ulaşamamalarıdır.

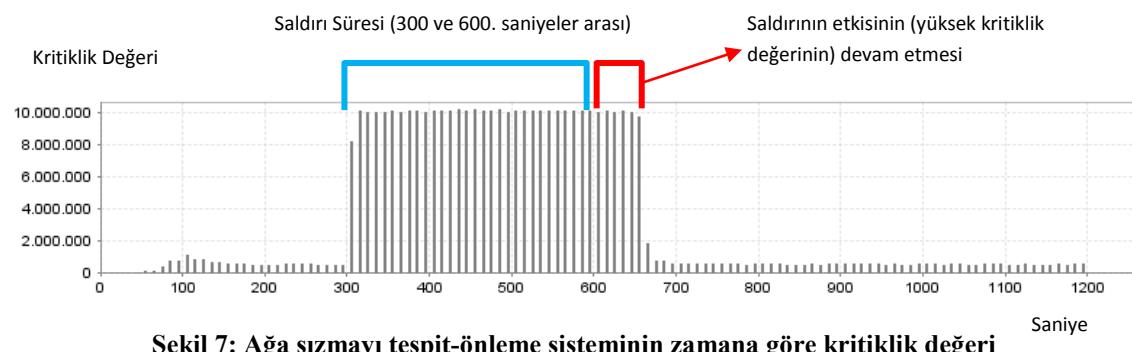


Şekil 6: Kuruluştan hizmet alan iki örnek dış istemciye cevap dönüş süreleri

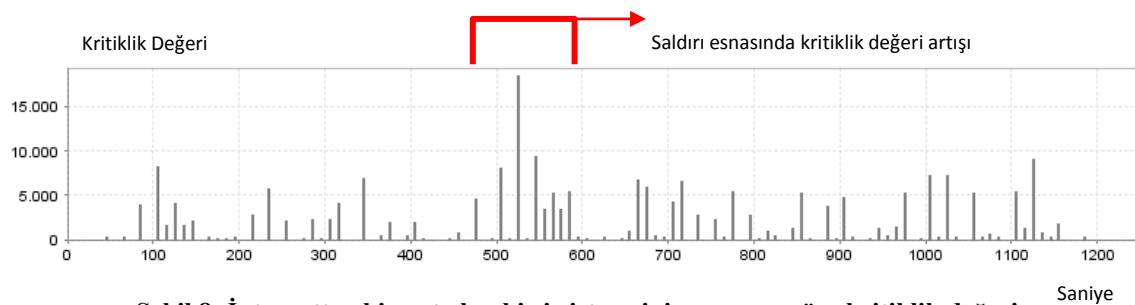
Simülasyon
Zamanı (sn)

3.2.3. Kritiklik verileri

Daha önce bahsedildiği gibi, simülasyon esnasında belirli aralıklarla her bir ağ düğümünden geçen verinin toplam kritiklik değeri hesaplanmış ve analiz amacıyla simülasyon veritabanına kaydedilmiştir. Bu sayede ağ üzerindeki cihazların kritiklik değerlerinin zamana ve şartlara bağlı değişimi gözlenmiştir. En ucta hizmet veren sunucuların verdikleri hizmetlere 0-1 aralığında kritiklik değerleri verilmiştir. Her hizmetin gönderilen paketlerine de aynı değerler yüklenmiştir. Ağ üzerindeki cihazların kritiklik değerleri ise üzerinden geçen paket sayısı ve paketlerin kritiklik değerlerinin çarpımlarının toplamı şeklinde hesaplanmıştır. Simülasyon ortamında birim zamanda geçen paket sayısı saldırının yanında çok arttığı için cihazların kritiklik değerleri de saldırının aralığında yükseliş göstermiştir. Bunda saldırının oluşturduğu Internet kapısı giriş bandındaki tıkanıklık nedeniyle cevap alınamayan ve tekrar gönderilen paketlerin etkisi de büyktür. Aşağıdaki iki şekilde sırasıyla iç ağa giriş trafiğini kontrol eden ağa sızmayı tespit ve önleme cihazının ve Internetten hizmet alan bir iç istemcinin zamana göre kritiklik değeri gösterilmiştir.



Şekil 7: Ağa sızmayı tespit-önleme sisteminin zamana göre kritiklik değeri



Şekil 8: İnternetten hizmet alan bir iç istemcinin zamana göre kritiklik değeri

4. SONUÇ

Bu çalışmada siber güvenlik tatlukları hazırlık kapsamında bir kamu kuruluşuyla yürütülen ortak bir çalışma ve sonuçları değerlendirilmiştir. Kamu kuruluşunda kullanılan uygulamalar, savunma sistemleri ve istemciler modellenmiş ve olası siber saldırının etkileri simülasyon ortamında incelenmiştir. Dışarıdan gelen olası bir DDOS saldırısının kuruluş içinde bulunan ve dışarıdaki sunuculardan hizmet alan iç istemcilere gelen cevap süresinde meydana getirdiği önemli derecedeki artışlar gözlemlenmiştir. Ayrıca, dışarıdan gelen DDOS saldırısının kuruluş içindeki DMZ bölgesindeki sunuculardan hizmet alan dış istemcilere gelen cevap süresini de önemli ölçüde artttırduğu tespit edilmiştir. Simüle edilen her bir ağ düğümünün belli aralıklarla üzerinden geçen toplam veri kritikliği gözlenmiş ve kuruluş için yüksek öneme sahip ağ cihazları belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda ortaya çıkan bilgi güvenliği simülasyon ortamı ve uygulama modelleri genişletilerek kamu veya askeri kurumların ihtiyaç duyabileceği bilgi güvenliği ve ağ trafiği simülasyon ortamına yönelik çalışmalar yapılabileceği değerlendirilmiştir.

5. KAYNAKÇA

- [1] Kevin Fall, Kannan Varadhan, (2010), “The ns Manual”, UC Berkeley, USC/ISI, LBL, Xerox PARC
- [2] QualNet, <http://www.scalable-networks.com/products/qualnet/>
- [3] GtNetS, <http://www.ece.gatech.edu/research/labs/MANIACS/GTNetS/>
- [4] Stephan Schmidt, Rainer Bye, Joël Chinnow, Karsten Bsufka, Ahmet Camtepe, Sahin Albayrak, (2008), “Application-level simulation for network security”, *Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops*
- [5] Ralf Sesseler, Sahin Albayrak, (1998), “JIAC IV – An Open, Scalable Agent Architecture for Telecommunications Applications”, DAI-Labor, TU Berlin
- [6] DAI-Labor, TU Berlin, (2010), “JIAC – Java Intelligent Agent Componentware Version 5.1.0 Manual”, DAI-Labor, TU Berlin
- [7] Siber Güvenlik Tatlukları, TÜBİTAK Bilişim ve Bilgi Güvenliği İleri Teknolojiler Araştırma Merkezi (BİLGE) ve Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu (BTK), <http://www.tubitak.gov.tr/sid/0/pid/0/cid/21886/index.htm;jsessionid=7EBEE8C265C940DA465919029E35ADCD>

RADAR BENZETİMİNDE OLUK ETKİSİNİN MODELLENMESİ

Koray Başbilen^(a), Murat Efe^(b), Murat Atun^(a), Orkun Zorba^(a)

^(a) Meteksan Savunma Sanayi A.Ş., Beytepe Köyü Yolu No.3 Bilkent-Ankara,
{kbasbilen, matun, ozorba}@meteksansavunma.com.tr

^(b) Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Tandoğan-Ankara, efe@eng.ankara.edu.tr

ÖZ

Yükseklik değişimi ile elektromanyetik (EM) dalganın kırılma indisindeki değişime bağlı olarak, EM dalgalar bazı atmosferik katmanlar tarafından yakalanabilir ve bu katman içinde uzun yollar kat edebilirler. EM dalgaların içinde uzun yollar kat edebildiği bu katmanlara atmosferik oluk veya kısaca oluk adı verilmektedir. Radar performansını en fazla etkileyen oluk etkisi suyun buharlaşmasından kaynaklanan etkidir. Buharlaşma oluğu, yaklaşık olarak 3 GHz ve yukarı frekanslarda çalışan radarlarda tespit mesafesini etkiler. Bahsedilen frekans aralığı, operasyonel kullanıldığı radarların çoğunu kapsadığı için gerçekçi bir radar benzetiminde bu etkinin modellenmesi hususu büyük önem taşımaktadır. Ancak oluk etkisinin analitik olarak bir formüle dayanarak hesaplanması ve bunun her benzetim anı için gerçekleştirilmesi, benzetim sırasında büyük bir zamanın ve işlemci gücünün bu iş için ayrılmasını gerektirecektir. Bu çalışmada, gerçek radar verileri ve karışık EM yayılım modellerini kullanarak radar menzil hesaplarını yapan paket program çıktıları kullanılarak, oluk etkisinin daha basit şekilde, gerçeğe yakın ve işlem yüküne en az düzeyde etki edecek şekilde radar benzetimi içinde yer almasını sağlayacak bir model geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Buharlaşma oluğu, kırılım, modelleme, oluk etkisi, radar benzetimi.

MODELING DUCTING EFFECT IN RADAR SIMULATION

ABSTRACT

Because the density of the atmosphere changes with altitude, the index of refraction changes gradually with height. Due to the change in the index of refraction electromagnetic (EM) waves can get trapped in an atmospheric layer and travel long distances. These layers are called atmospheric ducts. Radar's performance is most

affected by the ducting effect that is caused by evaporation of water. Evaporation duct changes the maximum detection range of radars operating at 3 GHz and above. Therefore, modeling the evaporation duct is of utmost importance in radar simulators as the frequency range in question is valid for almost all operational radars. However, analytical calculation of the ducting effect at each radar scan during the simulation would require allocating valuable processing time and power for this purpose. In this study, a simple but effective modeling of the ducting effect with minimum processing requirement has been developed based on the real radar data and data obtained from commercial software utilizing complex EM propagation models for detection range calculations.

Keywords: Ducting effect, evaporation duct, modeling, radar simulation, refraction.

1. GİRİŞ

Radar performanslarını değerlendirmek için ilk radar üretiminden bu yana yüzlerce farklı model geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Gelişen teknoloji ve bilgi birikimi ile bu modeller de iyileştirilmiş gerçeğe çok yakın sonuçlar veren EM yayılım modelleri geliştirilmiştir. Güçlü bir çok yönlerine karşın bu modeller çok karmaşık ve çok yavaşırlar.

Birçok farklı mühendislik alanında radarlara yönelik farklı çıktırlara ihtiyaç duyulabilmektedir. Ancak en basit mühendislik sorusu bir radarın belli bir hedefi yaklaşık ne kadar mesafeden tespit edebileceği sorusudur. Bu sorunun cevabı, radar için üretilen ve boşluk zayıflaması teorisine dayanan ilk radar denklemidir. Bu denklem basit olarak radar vericisinden çıkan EM dalganın ortamda yayılımı sonrası hedef radar kesit alanından yansıyarak alıcıya ulaşan kesiminin hesaplanması üzerine dayanır. Bu denklemelere EM dalganın izlediği yoldaki atmosferik/meteorolojik koşullara bağlı olarak birçok kayıp dâhil edilebilmektedir.

Modelin çalışacağı sürenin önemli olmadığı, sadece bir radarın, belli bir andaki kapsama alanını bulmak (radar performansının izlenmesi) gibi işlemler için EM yayılım modelleri kullanılabilecekken, hareketli bir unsur üzerindeki bir radarın, birden fazla hareketli unsur için sürekli olarak tespit ihtimallerinin hesaplanması gibi işlemler için basit radar denklemeleri kullanılmak zorundadır [14].

Kırılım, EM dalgaların ilerlediği ortamın yoğunluğunun değişmesi sonucu dalganın bükülmüşidir. Atmosferin yoğunluğu irtifa ile değiştiğinden kırılımın büyülü de yükseklikle kademeli olarak değişir. Yoğunluk gibi atmosferin sıcaklığı ve nem miktarı da artan irtifa ile değişir ve normal olarak bu değişim artan irtifa ile düzgün biçimde azalma şeklinde olur. Ancak belirli şartlarda bu durumda değişiklik olabilir ve sıcaklık yükseklikle önce artış gösterip daha sonra azalabilir. Bu duruma sıcaklık tersinimi denir.

Daha önemli saptmalar geniş su yüzeyleri üzerinde olur. Geniş su yüzeylerine yakın noktalarda atmosfer normalden daha fazla nem içereceği için, hemen su yüzeyi üzerindeki yüksekliklerde nem miktarı çok daha hız azalabilir. Bu etkiye de nem boşluğu adı verilir.

Sıcaklık tersinimi veya nem boşluğu etkilerinin tek başlarına ya da birlikte oluşması ilk bir kaç yüz metrelük irtifalarda kırılımın büyük şekilde değişmesine yol açar. Bu durum, oluşan normalin dışındaki bu ortamdan geçen radar dalgalarının fazladan bükülmesine yol açar. Bu gereğinden fazla bükülmeye oluklanma denir ve radar performansı operasyon sırasında bu durumdan büyük ölçüde etkilenir. Oluklanmanın etkisiyle radar ufku, radar dalgalarının bükülme yönüne göre genişleyebilir veya küçülebilir.

Radar performansını en fazla etkileyen oluk etkisi suyun buharlaşmasından kaynaklanan etkidir. Buharlaşma oluğu, yaklaşık olarak 3 GHz ve yukarı frekanslarda çalışan radarlarda tespit mesafesini etkiler. Bahsedilen frekans aralığı, operasyonel kullanıldığı radarların çoğunu kapsadığı için gerçekçi bir radar benzetiminde bu etkinin modellenmesi hususu büyük önem taşımaktadır. Ancak oluk etkisinin analitik olarak bir formüle dayanarak hesaplanması ve bunun her benzetim anı için gerçekleştirilemesi, benzetim sırasında büyük bir zamanın ve işlemci gücünün bu iş için ayrılmasını gerektirecektir.

Bu çalışmada gerçek radar verileri ve karışık EM yayılım modellerini kullanarak radar menzil hesaplarını yapan paket program çıktıları kullanılarak oluk etkisinin daha basit, gerçeğe yakın ve işlem yüküne en az düzeyde etki edecek şekilde radar benzetimi içinde yer almasını sağlayacak bir model geliştirilmiştir.

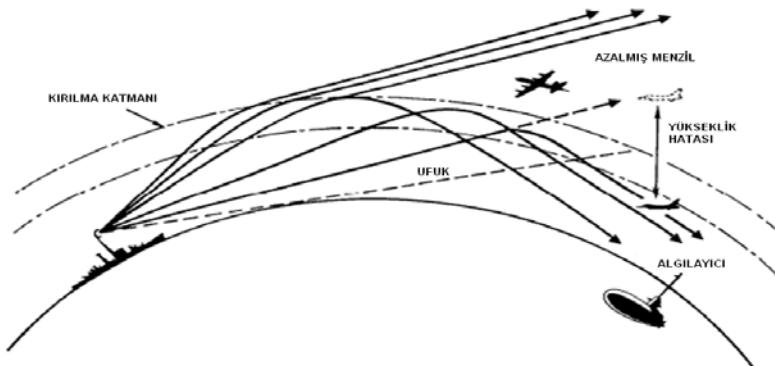
Bölüm 2'de oluklar, oluklar üzerine geliştirilmiş modeller, kullanılan paket programlar ve bu paket programların modelleri ile ilgili bilgi verilmiştir. Bölüm 3'te buharlaşma oluğunu etkileyen faktörler irdelenerek, önerilen model detaylı olarak anlatılmıştır. Bölüm 4 ise sonuç kısmını içermektedir.

2. ATMOSFERİK OLUKLAR

EM dalgaların içinde uzun yollar kat edebildiği atmosferik katmanlara atmosferik oluk veya kısaca oluk adı verilmektedir. Yükseklik değişimi ile EM dalgalanın kırılma indis eğimindeki değişime bağlı olarak, EM dalgalar bazı atmosferik katmanlar tarafından yakalanabilir ve bu katman içinde uzun yollar kat edebilirler.

Oluklar, radar ve elektronik destek cihazlarına daha uzun menzilden tespit imkânı verebildikleri gibi bazı durumlarda tespit menzillerine negatif etkileri de olabilmektedir. Şekil 1'de (Skolnik, M.I., Radar Handbook, 2008) görüldüğü gibi normalde tespit edilemeyecek bir hava unsuru oluklanma etkisi ile oluşabilecek kör bir bölgeye düşerek

tespit edilemeyeilmektedir, başka bir hava unsuru ise çok uzun mesafeden tespit edilebilmektedir.



Şekil 1. Oluk etkileri

Oluklar EM dalgalar için bir kılavuz görevi görmesine kararlı, bu kılavuzların katı sınırları yoktur. EM enerji bu olukların dışına sızabilmekte ve bu sayede uzun menzillerden radar ve elektronik destek tespitleri alınabilmektedir. Birçok atmosferik/meteorolojik durum/olay olukların oluşumuna yol açabilmektedir. Bu durum/olayların ne olduklarına ve nerede olduklarına göre olukların isimlendirilmesi ve davranışları değişmektedir [14]. Bu oluklar *i*) yüzey olukları, *ii*) yüzey tabanlı oluklar, *iii*) yükseltilmiş oluklar ve *iv*) buharlaşma olukları şeklinde adlandırılırlar. Bu çalışmada bahsi geçen bu oluklardan radar tespit mesafesi performansını en çok etkileyen oluk olan buharlaşmaluğu üzerinde durulacaktır.

2.1. Buharlaşma olukları

Hava sıcaklığında büyük bir değişim olmaksızın, havadaki nem oranındaki ani değişimler de EM dalgalanın kırılmasında oldukça etkilidir. Okyanusların hemen yüzeyindeki hava, su buharı bakımından doyumuştur. Yüzeyden bir kaç metre yukarıya doğru çıktıktan sonra doygunluk azalır ve su buharı yoğunluğu ve basıncı hızla düşer. Su buharı basıncındaki düşüş, kırılma indisini de düşürür. Belli bir yükseklikten sonra su buharı dağılımı kırılma indisinin asgari bir değere inmesine ve sonra tekrar yükselmesine neden olur. Kırılma indisinin asgari seviyeye indiği yükseklik buharlaşmaluğunun yüksekliği olarak adlandırılır.

Buharlaşma olukları okyanuslar üzerinde sürekli mevcuttur. Kuzey kutbuna yakın kesimlerde kış geceleri 1-2 metrede oluşabildikleri gibi ekvatoral kesimlerde yılın bazı günleri 40 metreye kadar yükselebilir. EREPS (Engineer's Refractive Effects Prediction System)'te bulunan SDS (Surface Duct Summary) veritabanından alınan verilere göre, buharlaşmaluğu yükseklıklarının Dünya ve Türkiye ortalaması 13,1 metredir. Dünya ve Türkiye verilerine göre bu yükseklik %72 olasılıkla 6-20 metre arasında olmaktadır. Buharlaşma oluklarının EM dalgaları yakalama gücü, yüzey

tabanlı oluklara oranla daha zayıftır ve bunun neticesinde ancak 3 GHz üzerindeki sinyallere etkili olabilmektedirler.

2.1.1. Buharlaşma oluğu yüksekliği tespiti

Buharlaşma oluğu yüksekliğini ya doğrudan ölçme yaparak ya da meteorolojik verilere (atmosferik basınç, hava sıcaklığı ve su buharı) dayanarak hesaplamak mümkündür.

Doğrudan ölçüm cihazları oldukça karmaşık ve pahalıdır. Ayrıca, doğrudan ölçüm, sürekli değişken ortam şartları ile çok değişken sonuçlar vermekte ve doğrulanabilen bir ölçüme ulaşılamamaktadır. Bu sebeplerle, günümüzde tüm hesaplama yöntemleri, meteorolojik ölçümlerin Monin-Oboukhov benzerlik teorisi [5] üzerine geliştirilen tekniklere uyarlanmasıma dayanmaktadır [14]. Monin-Oboukhov benzerlik teorisinin parametreleri deneysel verilere dayanmaktadır. Teoriyi kullanan farklı yöntemlerden Jeske yöntemi [2] ortalama 7 metre hata ile, Paulus-Jeske (PJ) düzeltmesi [9][10] ortalama 4.5 m hata ile hesaplamaya imkan vermektedir. Bütün bu yöntemler yüksekliğe bağlı basınç, sıcaklık ve nemlilik profillerinin eldeki verilere dayanarak tahminine dayanmaktadır.

EREPS [7] ve AREPS (Advanced Refractive Effects Prediction System) [15] (A.B.D. Hükümeti desteği ile zaman içinde, EM sistemlerin performansını değerlendirmek amaçlı geliştirilmiş yazılımlar) gibi yazılımlar buharlaşma oluğu yüksekliğinin tespiti için Paulus-Jeske düzeltmesini kullanmaktadır.

2.1.2. Buharlaşma oluğu etkisi modelleri

Buharlaşma oluklarının radar performansına etkileri üzerine literatürde birçok çalışma gerçekleştirılmıştır. Paulus (1984) [8], IREPS (Integrated Refractive Effects Prediction System) için ilk buharlaşma oluğu modelini geliştirmiştir, Marom (1988) [4] radar performansına buharlaşma oluklarının etkilerini inceleyerek, radar tasarıımı ve operasyonel kullanımınına yönelik radar performansını arttıracı sonuçlara ulaşmış, Reilly ve Dockery (1990) [13] buharlaşma oluklarının deniz ekosuna, dolayısı ile radar tespit performansına etkisini incelemiştir ve deniz ekosu için bir model ortaya koymuş, Paulus (1990) [11] yine buharlaşma oluklarının deniz ekosuna etkisi üzerine mevcut modelleri bir arada değerlendirmiş ve kendi modelini ortaya koymuş, Patterson (1990) [6] IREPS modelini geliştirerek EREPS'e uygulamış, Paulus (1994) [12] EREPS modelini gerçek veriler ile karşılaştırmış ve Lin ve Yong-gang (2008) [3] radar tespitine yatay eksende heterojen buharlaşma oluklarının etkisini incelemiştir.

Tüm bu çalışmalar, buharlaşma oluğu varlığında, gerçeğe en yakın biçimde radarların performanslarını irdelemek, radarın performansını arttıracı tasarım veya operasyonel sonuçlara ulaşmak ve EM yayılımının olukanma durumunda nasıl etkilendiğini bir model ile ortaya koymak amacıyla gerçekleştirilmiş çalışmalarlardır. Bu yüzden tüm bu çalışmalar sonucunda geliştirilen modeller, hızın çok olduğu bir radar modelinde kullanılamayacak kadar karmaşık ve yavaş modeller olarak ortaya çıkmaktadır. Bu

durum, literatürde eksik olan, daha basit ve etkili bir buharlaşma oluğu modeli ortaya koyma ihtiyacını doğurmaktadır. Bunun için EREPS, AREPS ve CARPET (Computer-Aided Radar Performance Evaluation Tool) [1] (Hollanda Bilimsel Araştırmalar Merkezi (TNO) kuruluşunca geliştirilen ve AREPS gibi gelişmiş bir EM yayılım modeli kullanan radar performans analizi aracıdır) gibi paket programların kullandığı modellerin çıktıları incelenmiştir.

EREPS, AREPS ve CARPET yazılımları, buharlaşma olukları etkilerini modellerine yansımıştır. Her üç yazılım da olukanma etkisi için Patterson (1990) [6] tarafından Naval Oceans System Center (NOSC) ve EREPS için geliştirilmiş olukanma modelini kullanmaktadır. Diğer bir çok modelde olduğu gibi bu model de olukanmanın etkili olduğu bölgelerde kullanılmak üzere mesafe kazanım ve yükseklik kazanım denklemlerini tanımlamaktadır.

Yapılan incelemeler sonucunda buharlaşma oluğu etkisi için bu denklemlerin temel olarak sadece *i*) radar frekansı, *ii*) olukanma yüksekliği, *iii*) radar yüksekliği ve *iv*) hedef yüksekliği gibi 4 ana parametreye bağlı oldukları görülmüştür. CARPET kullanılarak olukanma koşullarında birçok radar ve hedef parametresi ile atmosfer ve meteorolojik veriler değiştirilerek farklı yayılım faktörü eğrileri alınmış ve olukanma koşullarında, yayılım faktörünün sadece bu 4 ana parametreye bağlı olduğu ayrıca doğrulanmıştır.

3. ÖNERİLEN BUHARLAŞMA OLUĞU MODELİ

Olukanma etkisi ile oluşan yayılım faktörü eğrisinin sadece radar frekansı, radar yüksekliği, hedef yüksekliği ve olukanma yüksekliğine bağlı olmasından yola çıkarak, bu eğrilerin karakteristiğinin anlaşılması amacıyla, bu değişkenler ile oynanarak CARPET yazılımindan çeşitli sonuçlar alınmıştır. Eğrilerin en fazla üç ayrı bölgede hesaplanan kırıklı doğrusal denklemler olduğu görülmüştür ve eğrilerin en fazla üç nokta ile tanımlanabildiği anlaşılmıştır.

Buradan yola çıkarak, belirli veriler için alınan yayılım faktörü eğrilerinin, üç noktadan oluşan karakteristiklerinin baz veri seti olarak alınması ve herhangi bir veri seti için yayılım faktörü eğrisinin baz verilerden elde edilmesi yöntemi üzerine çalışmalar yapılmış ve başarılı sonuçlar alınmıştır.

Ancak baz veri seti olarak doğru verilerin alınması, buradan elde edilecek diğer eğrilerin hata paylarını asgariye indirmek adına çok önemlidir. Bunun için bu dört değişkenin buharlaşma oluğu etkisinde yayılım faktöründe detaylı inceleme yapılmıştır.

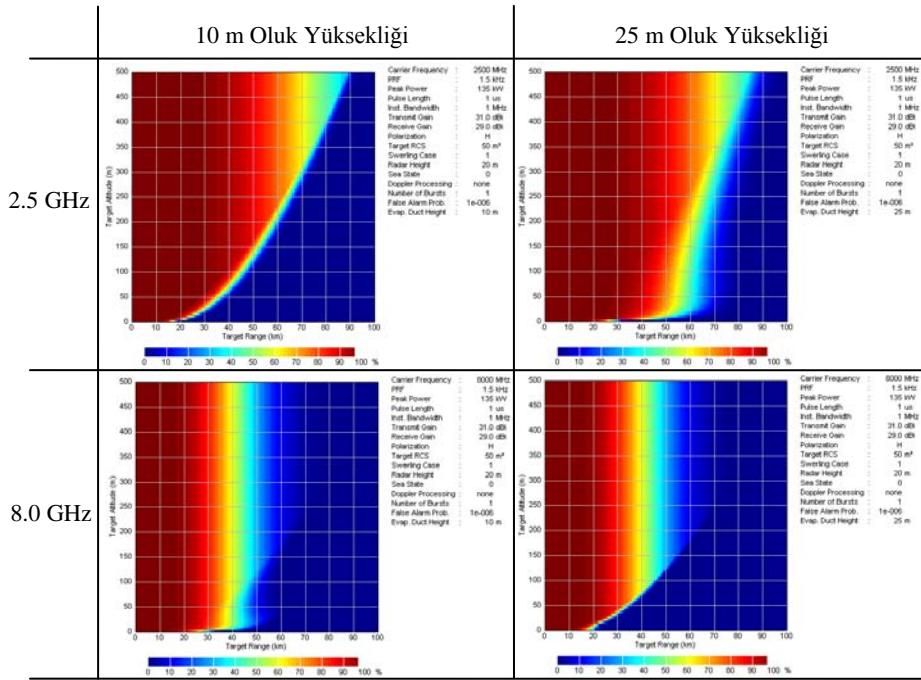
3.1. Radar frekansının etkisi

Buharlaşma oluklarının, 3 GHz ve üzeri sinyallere etkisinin olduğu önceki bölümlerde belirtildi. Radar frekansı değiştirilerek alınan yayılım faktörü eğrilerinde de bu

durum aynen gözlemlenmiş ve hatta 10 GHz üzerindeki sinyallerde de buharlaşma oluşu etkisinin giderek azalarak yok olduğu izlenmiştir. CARPET yazılımından elde edilen grafikler incelediğinde, 2.5 GHz ve 15 GHz arasında her bir radar bantı için (E, F, G, H, I, J) bir yayılım faktörü eğrisinin baz veri setine alınması gerektiği ortaya çıkmıştır.

3.2. Buharlaşma oluşu yüksekliğinin etkisi

Buharlaşma olukları yükseldikçe düşük frekanslarda, alçaldıkça ise yüksek frekanslarda etkilidirler. Şekil 2'de verilen CARPET yazılımından alınan kapsama grafiklerinde, 20 metre yükseklikte bulunan ve 2.5 GHz ve 8 GHz'de çalışan iki radara 10 m ve 25 m yükseklikteki buharlaşma oluk etkileri görülmektedir. Bu grafikler tespit olasılığının kırmızı renk için %100'den mavi renk için %0'a değişimini ifade etmektedir. Sol üst köşedeki grafikte 10 m olugunun 2.5 GHz'e ve sağ alt köşedeki grafikte ise 25 m olugunun 8 GHz'e çok fazla etkisinin olmadığı görülmektedir. Öte yandan sol alt köşedeki grafikte görüldüğü üzere 10 m olugunun 8 GHz'e ve sağ üst köşede bulunan grafikte 25 m olugunun 2.5 GHz'e tespit mesafesi açısından etkisinin oldukça yüksek olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 2. Buharlaşma oluşu yüksekliğinin yayılım faktörüne etkisi

Türkiye denizlerinde 13,1 m olan ortalama oluk yüksekliğinin en fazla etkili olduğu frekanslar ise 6-9 GHz (H-I bantları) aralığıdır ki, su üstü radarlarının büyük çoğunluğu bu frekans bantlarında çalışmaktadır. Bu tespitler irdelendiğinde baz alınacak veri setine ait buharlaşma oluşu yüksekliğinin, ortalama buharlaşma oluşu yüksekliği olan 13,1 m

olması gerekiği görülmektedir. Farklı oluk yüksekliklerinin etkilerinin, oluk yüksekliğinin 13,1 m ile olan farkından yola çıkararak, radar frekansının aşağı yukarı kaydırılması ile elde edilebilir.

3.3. Radar ve hedef yüksekliklerinin etkisi

Radar yüksekliklerinin oluk yüksekliği üzerinde veya altında olmasının getirdiği belirgin bir fark yoktur [14]. Çünkü su üstü unsurlarındaki radarların yükseklikleri ile oluk yükseklikleri arasında çok belirgin farklar oluşmamakta ve her durumda sinyallerinin oluk sınırları ile yaptıkları açılar, olğun bu sinyalleri bükebilmesi için yeterince dar olabilmektedir. Yayılım faktörü denklemlerinde yükseklik kazancı genelde hedef yüksekliği ve radar yüksekliği için iki kere yer almaktadır. Buradan, radarın bulunduğu yükseklik ile hedefin bulunduğu yüksekliğin, bu yüksekliklerde etkili olacak yayılım faktörü eğrisine etkilerinin aynı olduğu anlaşılmaktadır. Yani 10 metre yükseklikteki bir radar ile 30 metre yükseklikte bulunan bir hedef için ortaya çıkan yayılım faktörü eğrisi ile 30 metre yükseklikteki bir radar ile 10 m yükseklikte bulunan bir hedefin yayılım faktörü eğrileri tamamen aynıdır. Daha farklı bir deyişle, 10 metredeki bir radarın 30 metredeki bir hedefi tespit olasılığı ile 30 metredeki bir radarın 10 metredeki bir hedefi tespit olasılığı birebir aynıdır.

3.4. Buharlaşma oluğu modeli

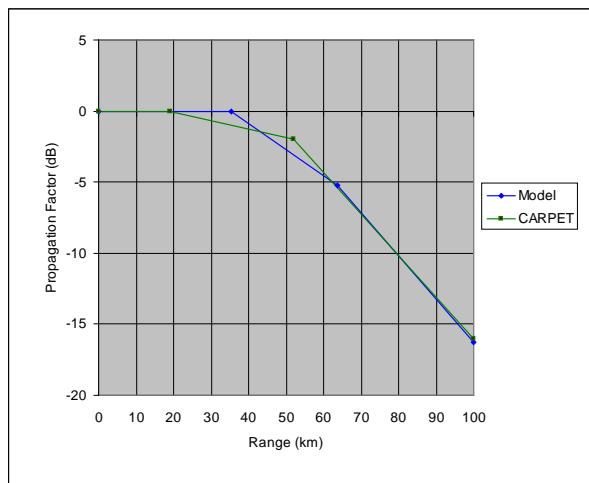
Önceki bölümde yapılan tüm tespitler ışığında 13,1 m buharlaşma oluğu ve 20 metre radar yüksekliği verileri için, E, F, G, H, I ve J radar bantları frekanslarında ve 3 ayrı hedef yükseklik aralığında CARPET yazılımı kullanılarak tespit edilen azami yayılım faktörü eğrileri baz veri seti olarak çıkartılmıştır. Bu veriler Çizelge 1'de sunulmuştur.

Oluşturulan radar benzetimine Çizelge 1'de verilen veriler dâhil edildiğinde 50 metre yüksekliğin altındaki hedefler için ufuk ötesi kontrolü yapılmaksızın, mevcut oluk ve hedef yükseklikleri ile radar frekansından, yayılım faktörü değeri doğrusal interpolasyon yöntemi ile çizelge kullanılarak hesaplanır. Elde edilen yayılım faktörü, radar denkleminde kullanıldığında, buharlaşma olüğünün radar tespit mesafesine etkisi basit ve işlem yükünü arttırmadan modele eklenmiş olmaktadır.

Çizelge 1. 13,1 m Buharlaşma Oluğu Yayılm Faktörü Tablosu

13,1 m Buharlaşma Oluğu Yayılm Faktörü Tablosu					
Bant	Frekans (GHz)	Yükseklik (m)	Mesafe (km)	YF (dB)	Grafik
E	2.5	15	12	0	
			55	-26	
			100	-50	
		30	19	0	
			60	-23	
			100	-44.5	
		45	24	0	
			70	-25	
			100	-41	
F	3.5	15	14	0	
			53	-16	
			100	-37	
		30	20	0	
			50	-12	
			100	-34	
		45	26	0	
			60	-13	
			100	-31	
G	5	15	15	0	
			50	-5	
			100	-22	
		30	23	0	
			57	-5	
			100	-19	
		45	29	0	
			62	-5	
			100	-17.5	
H	7	10	13	0	
			46	3	
			100	-5	
		30	38	0	
			53	-0.5	
			100	-7.5	
		45	33	0	
			61	-2	
			100	-7.5	
I	9	5	10	0	
			60	2.5	
			100	2.5	
		30	27	0	
			54	-8	
			100	-8	
		45	32	0	
			59	-9	
			100	-9	
J	15	15	22	0	
			45	-32.5	
			100	-29	
		30	29.5	0	
			52	-34	
			100	-32	
		45	35	0	
			57	-35	
			100	-33	

Bu yöntem ile hesaplanan ve CARPET yazılımının verdiği yayılım faktörü eğrileri karşılaştırılmış ve yok sayılabilir farklar ile benzer sonuçların elde edildiği görülmüştür. Örnek olarak; Şekil 3'te 5.5 GHz radar frekansı ve 15 metre yükseklikte bulunan bir hedef için CARPET çıktısı ve önerilen model çıktısı birlikte verilmektedir.



Şekil 3. Önerilen model ve CARPET çıktısı karşılaştırması

4. SONUÇ

Bu çalışmada, buharlaşma oluğunu etkilerinin, basit radar modeli seviyesinde çalışan bir simülasyon sistemine yansıtılması anlatılmıştır. Buharlaşma oluklarının, oluşma olasılıkları yüksek ve radar modeline etkileri önemlidir. CARPET, AREPS ve EREPS gibi ticari yazılımlar üzerinde yapılan detaylı incelemeler ve literatür araştırmaları sonucunda, yayılım faktörünün radar frekansı, oluklanma yüksekliği, radar yüksekliği ve hedef yüksekliğine bağlı olarak, çok karmaşık sinyal seviyesi formüller yerine oluşturulan bir baz tablo üzerinden modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Modelenen yayılım faktörü, basit radar formülünde doğrudan kullanılarak, ölçümler yapılmış ve yine paket programlar kullanılarak, çıkan sonuçlar kontrol edilmiş ve tatminkar sonuçlar alınmıştır.

Bu sayede, buharlaşma oluğunu etkilerinin, hızlı ve kolay bir şekilde hesaplanabilmesi sağlanmıştır. Farklı atmosferik oluk etkilerinin modele yansıtılması bir başka çalışmanın konusu olacaktır.

5. KAYNAKÇA

- [1] Huizing A.G., Theil A., *Computer-Aided Radar Performance (CARPET 2.0) Evaluation Tool User Manual v1.2*, TNO

- [2] Jeske, H. (1973), State and limits of prediction methods of radar wave propagation conditions over the sea, *Modern Topics in Microwave Propagation and Air-Sea Interaction*, A. Zancla, ed., Reidel Pub
- [3] Lin, J., Yong-gang, Z. (2008), The Effects of Radar Detection in Heterogeneous Evaporation Duct Conditions, *Antennas, Propagation and EM Theory*, Kasım 2008, 1402-1405
- [4] Marom, M. (1988), Effects of Irregular Sea Surface and Evaporation Duct on Radar Detection Performance, *Naval Postgraduate School*
- [5] Monin, A. S., Obukhov A. M. (1954), Basic laws of turbulent mixing in the atmosphere near the ground. *Tr. Geofiz. Inst., Akad. Nauk SSSR*, 24
- [6] Patterson, W. L., Hattan C. P., Hitney H. V., Paulus R. A., Barrios A. E., Lindem G. E., Anderson K.D., (1990). Engineer's Refractive Effects Prediction System (EREPS) Revision 2.0, NOSC TD 1342 (Feb), (with revision 2.2 updates), *Naval Ocean Systems Center, San Diego, CA.*
- [7] Patterson, W. L., Hattan C. P., Hitney H. V., Paulus R. A., Barrios A. E., Lindem G. E., Anderson K.D., (1994). Engineer's Refractive Effects Prediction System (EREPS) Revision 3.0, NOSC TD 2648 (May), *NRad, San Diego, CA.*
- [8] Paulus, R. A. (1984), Practical application of the IREPS evaporation duct model *NOSC Tech. Rep.*, 966
- [9] Paulus, R. A. (1985), Practical Application of an Evaporation Duct Model, *Radio Science*, 20
- [10] Paulus, R. A. (1989), Specification for Environmental Measurements to Assess Radar Sensors, *NOSC TD*, 1685
- [11] Paulus, R. A. (1990), Evaporation Duct Effects on Sea Clutter, *Antennas and Propagation IEEE Transactions*, 38, 1765-1771
- [12] Paulus, R. A. (1994), Propagation in the Evaporation Duct, Technical Report 1644, *NRad, San Diego, CA.*
- [13] Reilly, J. P., Dockery, G.D. (1990), Influence of Evaporation Ducts on Radar Sea Return, *Radar and Signal Processing*, IEE, Part F, 137, 80-88
- [14] Skolnik, Merill I. (2008), *Radar Handbook*, McGraw-Hill Inc.
- [15] User's Manual for Advanced Refractive Effects Prediction System, *Space and Naval Warfare Systems Center, San Diego, CA.*, 6 Nisan 2009

SAR SİSTEM TASARIMI AMACIYLA BİR MÜHENDİSLİK ARACI

Ozan Doğan ^(a), Tayfun Aykırı ^(b), Abdullah Kurtoğlu ^(c)

^{(a) (b) (c)} SDT A.Ş., Galyum Blok 2. Kat No: 2 ODTÜ Teknokent, 06531, Ankara

^(a) odogan@sdt.com.tr ^(b) taykir@sdt.com.tr ^(c) akurtoglu@sdt.com.tr

ÖZ

Bu makalede Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) sistem tasarımı için mühendislik ihtiyaçlarına bağlı olarak geliştirilmiş olan yeni bir SAR Simülatörü (SARSİM) anlatılmaktadır. SARSİM algılayıcı, platform, çevre ve hedef parametrelerini girdi alarak farklı mod geometrileri ve senaryoları için ham SAR verisi üretmektedir. Bu ham veri daha sonra işlenerek SAR görüntüsü üretilmektedir. SARSİM'de görüntü oluşturmak amacı ile Şerit (Stripmap) modunda Menzil Doppler Algoritması (RDA), Cıvıltı Ölçekleme Algoritması (CSA) ve Omega-K Algoritması, Spot (Spotlight) modunda ise Polar Format Algoritması (PFA) ve CSA desteklenmektedir. SARSİM ile ideal olarak düz platform hareketinin olduğu, radar gürültü figürünün düşük olduğu koşullarda nokta hedefler ile üretilen basit senaryoların yanısıra gerçek bir hava veya uydu platformuna entegre edilmiş ve kısıtları olan bir SAR algılayıcısının bulunduğu zor senaryolar da modellenebilmektedir. Böylece geliştirilen görüntü oluşturma algoritmalarının gürbüzlükleri ve performansları değerlendirilebilmektedir. Uydu ve hava platformlarından alınan gerçek ham verilerin işlenmesiyle elde edilen sonuçlar SARSİM'in doğru sonuçlar verdiği ve gerçek durumları andıran senaryolar tasarılanarak SAR sisteminin tasarım ve görüntü oluşturma algoritmasını optimize edebilecek güvenilirlikte olduğu değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Radar Simülasyonu, Radar Sinyal İşleme, Sentetik Açıklıklı Radar, Şerit Modu SAR, Spot Modu SAR

AN ENGINEERING TOOL FOR SAR SYSTEM DESIGN

ABSTRACT

In this paper, an engineering tool that can be utilized to design a Synthetic Aperture Radar (SAR) system is explained. Given the sensor, platform, environment and target parameters as input, SAR Simulator (SARSIM) generates the SAR raw data for various modes and scenarios. This raw data is processed to form the final SAR image. The SAR

image formation algorithms for Stripmap mode are Range-Doppler Algorithm (RDA), Chirp Scaling Algorithm (CSA) and the Omega-K Algorithm and for Spotlight mode the Polar Format Algorithm and CSA. SARSIM models not only the simple scenarios like smooth platform trajectories, low radar noise figures and pointwise targets but also very complex scenarios like the real air or space-borne platforms, limited SAR systems and extended scene targets. In such way, the robustness and performance of the SAR image formation algorithms can be evaluated. The real raw data obtained from airborne and spaceborne systems are processed with SARSIM for validation purposes and as a result SARSIM became a proven tool to optimize the SAR system design and image formation algorithms.

Keywords: Radar Signal Processing, Radar Simulation, Spotlight Mode SAR, Stripmap Mode SAR, Synthetic Aperture Radar

1. GİRİŞ

SAR, elektromanyetik ışımıyla elde edilen yüzey geri saçılım karakteristiklerinin görüntülenmesi prensibine dayanan etkili bir uzaktan algılama yöntemidir. Böyle bir sistemin tasarımları ve geliştirilmesi için anten, almaç ve göndermeç parametreleri belirlenmelidir. Ayrıca platform ile ilgili parametrelerin de hesaba katılması gerekmektedir. Radar donanımının optimizasyonu, sinyal işleme yaklaşımları ve yörüngeerdeki sapmalar gibi bir çok parametrenin hesaba katılabilmesi ve belirlenebilmesi için SAR sisteminin simülasyonuna ihtiyaç vardır.

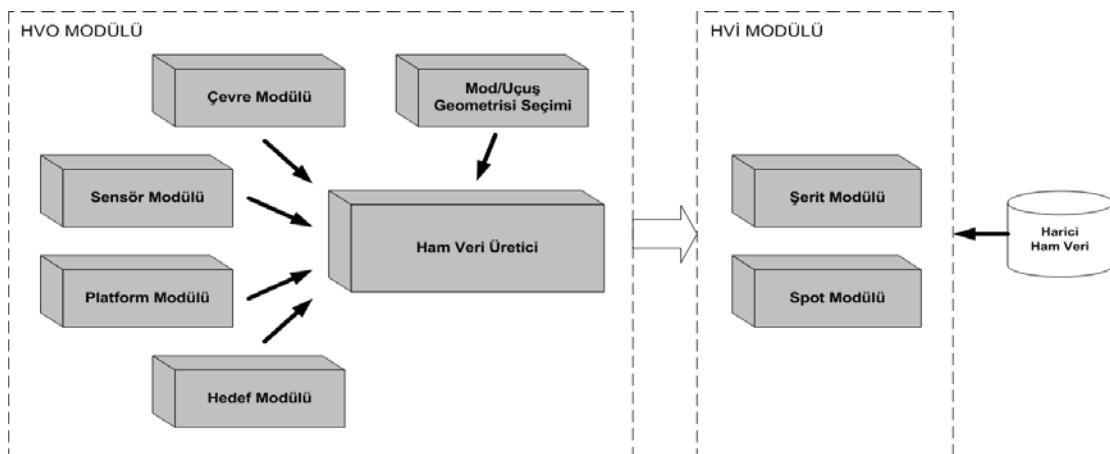
Uygulama alanlarına göre SAR simülatörleri, görev planlama için görüntü odaklı [1, 2] ve algoritma tasarımlına yönelik sinyal odaklı [3] olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. SARSİM, SAR'ın entegre edileceği platformu, sensörün kendisini ve görüntülenecek hedefi de modelleyen sinyal odaklı bir simülasyon aracıdır. Platform yörüngeindeki sapmaları [4, 5], yüzeyden saçılma mekanizmalarını [3] veya farklı SAR modlarını [6] simüle eden çalışmalar bulunmaktadır.

SAR simülatörü yalnızca bir ham veri simülatörü değil aynı zamanda bir SAR sinyal işleyicisidir. Gerçek zamanlı bir sistemdeki sinyal işleme adımlarını belirlemek için birçok değişiklik ve basitleştirmeye ihtiyaç vardır ve farklı algoritmalar denenmelidir. SARSİM bunları yapan bir araç olarak farklı görüntü oluşturma algoritmalarına ve ilaveten Doppler Parametreleri Kestirimi, Otomatik Odaklama ve Ön-filtreleme gibi işleme adımlarına da sahiptir. Simüle edilmiş veriler veya harici gerçek ham veriler (örneğin ERS, RADARSAT) bilinen sinyal işleme algoritmalarıyla işlenebilmektedir [7].

SARSİM MATLAB[®] aracı kullanılarak geliştirilmiştir [8]. Bütün algoritmalar ve Grafiksel Kullanıcı Arayüzleri bu araç ile oluşturulmuştur. Bu sayede, simülatore farklı algoritmalar ve modlar kolaylıkla eklenebilmektedir.

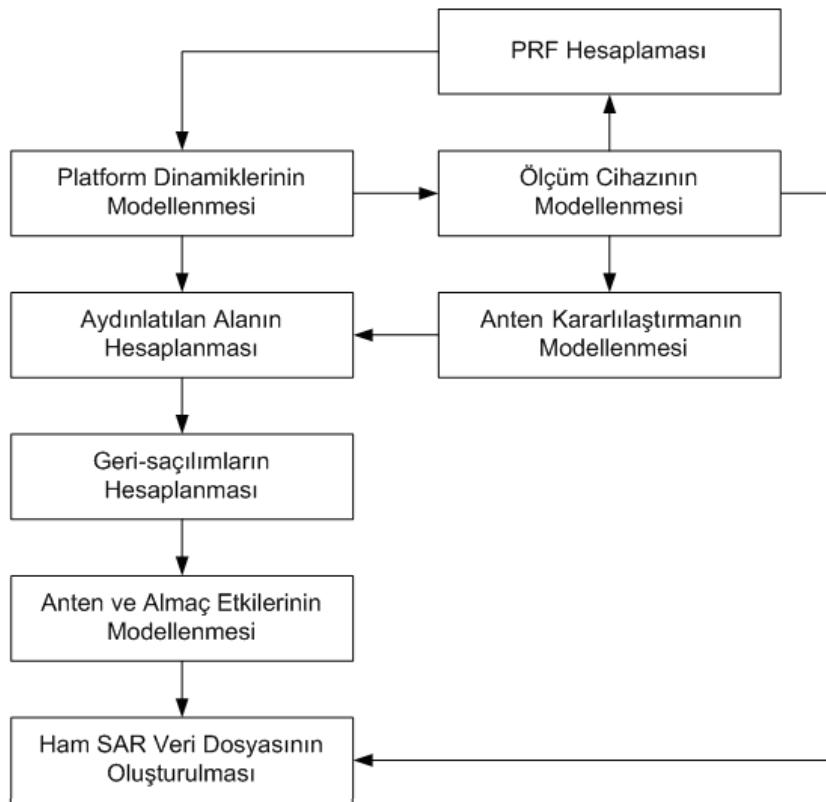
2. SARSİM SİMÜLASYON ARACI

SARSİM modüler bir yaklaşımla oluşturulmuştur. Şekil 1'de görüleceği üzere simülörün simüle ham veriyi oluşturan ve bu ham veriyi daha sonra işleyen iki ana modülü bulunmaktadır. Ham veri üretmek amacıyla çevre, hedef, sensör ve platform modülleri girdi olmaktadır. Ham veri kullanıcı tarafından oluşturulan senaryoya göre bu modülde üretilmektedir. Ham veri işlemek amacıyla Şerit ve Spot olmak üzere iki modda çalışan modüller bulunmaktadır. SARSİM senaryoya uygun olarak ilgili modda ham veri üretmekte ve kullanıcının seçtiği sinyal işleme algoritmalarıyla bu veriyi işlemekte, dolayısıyla bir SAR sisteminin performansını belirleyen ve birbiri ile etkileşimde olan bir çok parametrenin modellenmesini sağlamaktadır.



Şekil 1. SARSİM Modülleri

Şekil 2'de ham veri simülasyonunun akış şeması verilmiştir. İlk adımda platform dinamikleri simüle edilmektedir. Platformun hızı, konumu ve açısal değişkenleri bu adımda oluşturulmaktadır. Platform hızları üzerine iki tip bozulma eklenmektedir. Bu bozulmalardan ilki platform hızlarının yavaş değişimlerini modelleyen harmonikler, diğer ise platform hızlarının hızlı değişimlerini (titresimler) modelleyen beyaz gürültüdür. Platformun ideal yörüngeden yaptığı sapmalar, ilgili hızların entegrasyonu ile elde edilmektedir. Platformun açısal değişkenlerindeki bozulmalar ise üretilen beyaz gürültünün filtrelenmesi ile elde edilen renkli gürültü kullanılarak modellenmektedir. Böylece SAR sisteminin entegre edileceği platformun zarfi ve hareket karakteristiği belirlenmektedir.



Şekil 2. Ham veri hesaplama akış şeması

Bir sonraki adımda INS/GPS ve IMU ölçüm cihazları simüle edilmektedir. Ölçüm cihazlarının sonuçları platformun ideal yörüngesi ve kullanıcı tarafından belirlenen hatalar kullanılarak üretilmektedir. Bu cihazların doğrulukları SAR görüntülerinin kalitesini belirlemekte çok önemlidir.

SAR sistemlerinde, görüntüde doğrusal yanca (azimut) piksel aralıkları elde edebilmek maksadıyla, PRF (Darbe Tekrarlama Frekansı) ölçülen yatay hızla bağlı olarak değiştirilmektedir. Şemadaki PRF Hesaplama adımı bu işlemi icra etmektedir. Ölçüm cihazı çıktıları, ayrıca platformun açısal bozulmalarının görüntü üzerindeki negatif etkilerinin antenin dinamik olarak yönlendirilmesi yoluyla bertaraf edilmesi anlamına gelen Anten Kararlılaştırma (Antenna Stabilization) adımda da kullanılmaktadır.

Aydınlatılan alan hesaplamasında, antenin ve platformun konumu ve açılarına bağlı olarak yer yüzeyinde aydınlatıldığı alan ve bu alandaki hedefler hesaplanmaktadır. Geri saçılım hesaplama adımda sahnenin Radar Kesit Alanı (RKA) haritası yüzey tiplerinin ve DEM verilerinin tablo değerlerinden [9] faydalanılarak hesaplanır. Anten ve Almaç etkileri ise patern, gürültü sıcaklığı, verimlilik gibi anten parametreleri ve kazanç, gürültü figürü gibi almaç parametrelerinin etkilerinin alınan darbeler üzerine yansıtılmasını kapsar.

Çevre hedefe sahip bir SAR ham veri simülasyonu nokta hedef simülasyonuna göre daha kullanışlıdır. Özellikle parametre kestiriminde ham veriyi kullanan Otomatik Odaklama ve Doppler Parametreleri (Doppler Merkezi ve Oranı) Kestirimi gibi işlemlerde çevre hedeflerin bulunması gerekmektedir. Bu sebeple SARSİM çevre hedefler eklenmesini sağlar.

Şerit modunda, anten platform yatay hız vektörü yönüne dik şekilde yönlendirilmiştir. Böylece SAR görüntüsü uçuş yönüne paralel şeritler halinde oluşturulmaktadır. Spot modunda ise anten yerdeki sabit bir noktaya yönlendirilmekte ve böylece yüksek çözünürlüklü görüntüler oluşturulmaktadır.

HVI (Ham Veri İşleme) Modülü’nde Şerit modunda Menzil Doppler Algoritması (RDA) ve Cıvıltı Ölçekleme Algoritması (CSA) ve Spot modunda Polar Format Algoritması (PFA) ve CSA kullanılmaktadır. Otomatik Odaklama için Harita Kayma (Map Drift Autofocus) ve Faz Gradyanı (Phase Gradient Autofocus) algoritmaları kullanılmaktadır. Ayrıca Doppler Merkezi Kestirimi yöntemi olan genlik tabanlı yöntemler uygulanmaktadır. Bunların yanında yanca yönündeki sinyal gürültü oranını artırmak ve veri miktarını azaltmak için ön-filtreleme işlemi yapılmaktadır.

HVI’de Şerit ve Spot modlarında, platform hareket kararsızlıklarından kaynaklı hataların düzeltilmesi için Hareket Dengelemesi (Motion Compensation) işlemi de gerçekleştirilebilmektedir. Şerit modunda bu dengeleme şerit çizgisine göre yapılırken Spot modda sahnenin orta noktasına göre yapılır. Hareket dengelemesi INS/GPS verilerinin kullanımıyla gerçekleştirilmektedir.

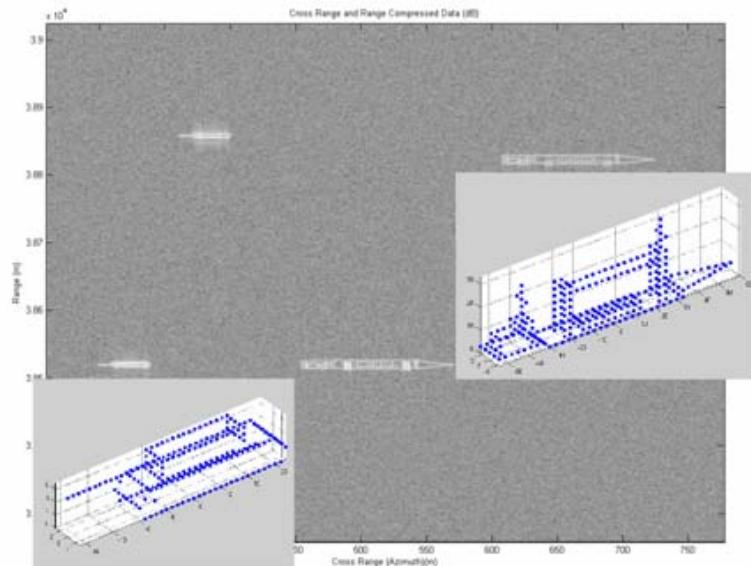
Her görüntü işleme adının parametreleri kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir. Örneğin Şerit modunda RDA için ön-filtreleme parametreleri, Menzil Hücre Ötelenme Düzeltmesinin derecesi (doğrusal veya kuadratik) ve Otomatik Odaklama parametreleri (kuadratik faz hatası eşiği ve çevrim sayısı) gibi parametreler seçilebilir. Benzer şekilde Spot modunda da Otomatik Odaklama parametreleri, aradeğerleme yöntemi, pencere ve görüntü boyutu gibi parametreler kullanıcı tarafından belirlenebilmektedir.

3. UYGULAMALAR

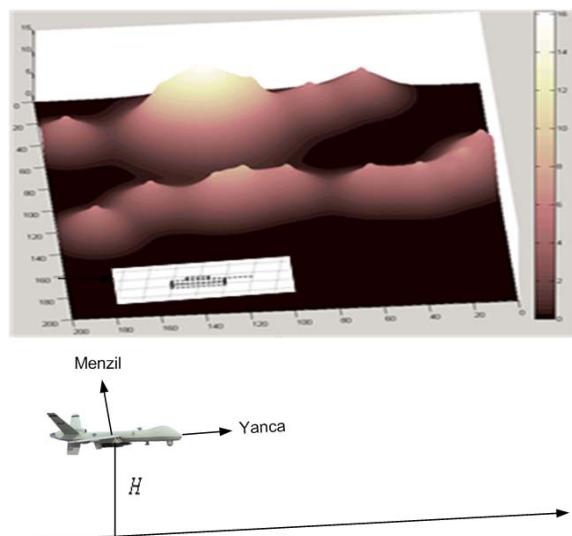
Şekil 3’té gürültülü ortamda elde edilen SAR görüntülerini verilmiştir. Bu görüntüde mavi noktalar hedef modeli, siyah-beyaz görüntü ise elde edilen SAR görüntüsüdür. Böyle kontrollü bir veri kullanarak tasarlanan algılayıcının elde ettiği görüntüde hedefin art alandaki gürültüden ayırt edilebilmesini sağlayacak parametrelere karar verebilir ve almaca, anten ve gönderme tasarımını bu parametrelere göre yapılabılır.

Şekil 4’té yapay olarak oluşturulan sayısal yükseklik verisi, bu sayısal yükseklik modeli üzerine yerleştirilmiş tank benzeri hedef ve H yüksekliğindeki platform görülmektedir. Platform yanca yönünde ilerlemekte ve bir menzil-yanca görüntü oluşturmaktadır.

Platformun baktığı yön ile yüzey normalleri arasındaki açı ne kadar küçükse o derece yüksek bir yansıtıcılık elde edilir. SAR görüntüsünde yüksek yansıtıcılıklı bölgeler daha parlak görülür. Radarın aydınlatmadığı yerler ise gölge etkisinden ötürü koyu görünecektir.



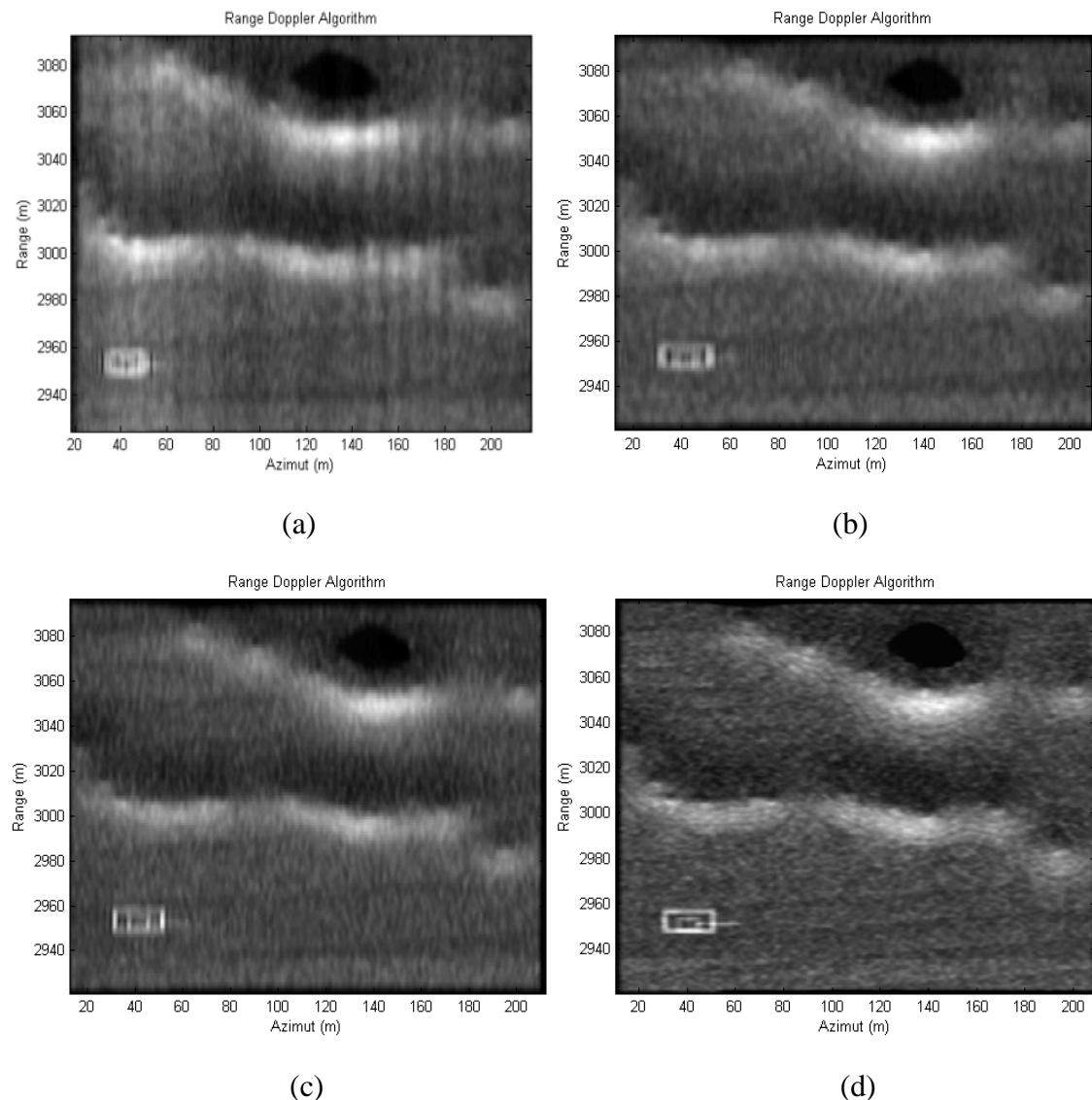
Şekil 3. 3 boyutlu tank ve gemileri barındıran simüle edilmiş sahnenin SAR görüntüsü



Şekil 4. Yapay Sayısal Yükseklik modeli

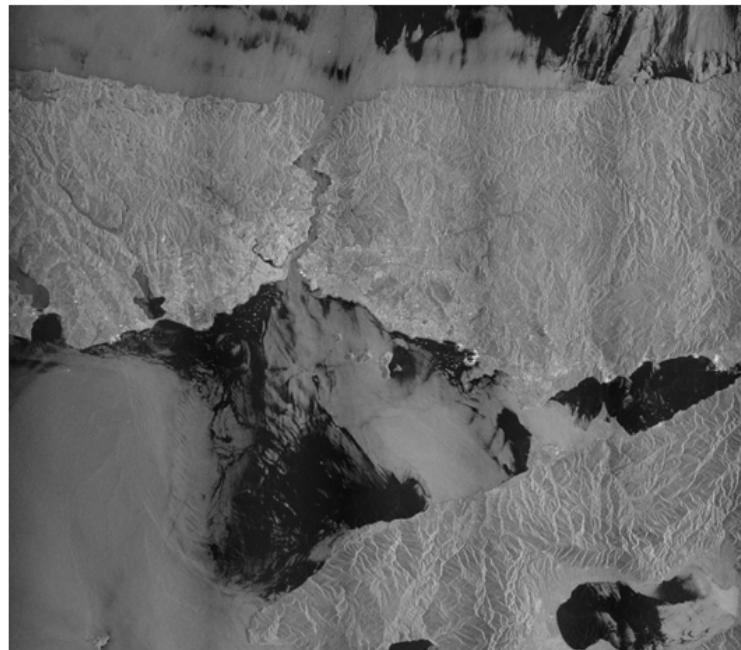
Şekil 5.(a)'da menzil yönündeki hareket hatasının düzeltilmemiş durumda elde edilen SAR görüntüsü görülmektedir. Beklendiği üzere yüksekliklerin radara bakan tarafları daha yüksek yansıtma ürettiği için daha parlak iken daha az aydınlatılan veya aydınlatılmayan kısımlar görüldüğü üzere daha koyu görülmektedir. Hedefin şekline bakıldığından, görüntü yorumlama açısından kalitesi düşük bir görüntü elde edildiği

görülmektedir. Şekil 5.(b)'de bu sefer yanca yönünde hareket hatasının düzeltildiği durumdaki SAR görüntüsü görülmektedir. Şekil 5.(c)'de aynı çözünürlükteki görüntünün iki yöndeki hareket dengelemesi yapılmış hali görülmektedir. Bu durumda görüntü kalitesinin doğal olarak arttığı görülmektedir. Şekil 5.(d)'de ise hem hareket dengelemesi yapılmış hem de çözünürlüğü iyileştirilmiş bir SAR görüntüsü görülmektedir. Şekillerde platformdaki (hareket vb.) veya algılayıcılardaki (çözünürlük vb.) değişimlerin elde edilecek SAR görüntüsünün kalitesine etkileri açık şekilde görülmektedir. Bu görüntüler değerlendirilerek hareket dengelemesi, INS/GPS ve IMU doğrulukları gibi tasarım parametreleri belirlenebilir. Bu değerlendirmenin yapılması için hareket hatasının olmadığı simüle SAR görüntüsü ile karşılaştırma yapılabilir.



Şekil 5. SAR görüntüleri (a) Menzil hareket hatalı (b) Yanca hareket hatalı (c) Hareket hatasız (d) Çözünürlüğü iki kat iyileştirilmiş

SARSİM'in doğrulanması için gerçek ERS SAR ham verisi yeniden formatlanmış ve Şerit modunda işlenmiştir. Şekil 6'da sonuç görüntüsü verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere SARSİM aracı görüntüyü oluştururken detayları da koruyabilmektedir.



Şekil 6. ERS SAR Görüntüsü

4. SONUÇ

Bu çalışmada yeni bir SAR simülatörü sunulmuştur. Simülatör birçok SAR ham veri üretim senaryosunu destekleyebilmektedir. Senaryoda farklı sensör ve platform özellikleri, hareket sapmaları, bölge topografyası, yüzey tipi ve hareketli/hareketsiz hedefler modellenebilmektedir. Simülatör ayrıca farklı algoritmala sahip farklı SAR ham veri işleme tekniklerini kullanmaktadır. Bu hali ile SARSİM'e gereği bazı modüller de eklenecek, geliştirilen bir SAR sisteminin tasarım parametrelerinin belirlenmesi ve entegre edileceği platforma bağlı olarak bu parametrelerin optimize edilebilmesi sağlanabilir.

5. KAYNAKLAR

- [1] Gelautz M., Frick H. Raggam J., Burgstaller J., Leberl F. (1998), SAR Simulation and Analysis of Alpine Terrain, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 53, 17-38.

- [2] Sheng Y., Alsdorf D.E. (2005), Automated Georeferencing and Orthorectification of Amazon Basin-Wide SAR Mosaics Using SRTM DEM Data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol: 43, No: 8.
- [3] Franceschetti G., Migliaccio M., Riccio D., Schirinzi G. (1992), SARAS: A Synthetic Aperture Radar (SAR) Raw Signal Simulator, *IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing*, Vol: 30, No: 1.
- [4] Franceschetti G., Iodice A., Perna S., Riccio D. (2006), Efficient Simulation of Airborne SAR Raw Data of Extended Scenes, *IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing*, Vol: 44, No: 10.
- [5] Vandewal M., Speck R., Süß H. (2008), Efficient SAR Raw Data Generation Including Low Squint Angles and Platform Instabilities, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol: 5, No: 1.
- [6] Wang Y., Zhang Z., Deng Y. (2008), Squint Spotlight SAR Raw Signal Simulation in the Frequency Domain Using Optical Principles, *IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing*, Vol: 46, No: 8.
- [7] Cumming I.G., Wong F.H. (2005), *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*, Artech House: Norwood, MA, ABD.
- [8] Mathworks Inc. (2011), www.mathworks.com
- [9] Ulaby F.T., Dobson M.C. (1989), *Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain*, Artech House: Norwood, MA, ABD.

YÜKSEK FREKANSLARDA BÜYÜK VE KARMAŞIK HEDEFLERİN RADAR KESİT ALANI BENZETİMİ YAZILIMININ GELİŞTİRİLMESİ

Caner Özdemir ^(a), Betül Yılmaz ^(b), Feyza Toktaş ^(c)

^(a) Mersin Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yenişehir 33343
Mersin, cozdemir@mersin.edu.tr

^(b) Mersin Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yenişehir 33343
Mersin, betuly@mersin.edu.tr

^(c) Mersin Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yenişehir 33343
Mersin, feyzatoktas@mersin.edu.tr

ÖZ

Bu çalışmada, yüksek frekanslarda büyük ve karmaşık hedeflerin Radar Kesit Alanı (RKA) değerlerini oldukça hızlı ve verimli bir şekilde hesaplayan benzetim kodu geliştirilmiştir. Geliştirilen benzetim kodu, Geometrik Optik (GO) ve Fiziksel Optik (FO) teorilerini kullanan Seken Işın Yöntemine (SIY) [1] dayanmaktadır. Benzetim kodunun dayandığı kuramsal çıkarım kısaca verilmiştir. Literatürdeki RKA değerleri bilinen çeşitli referans hedefler kullanılarak benzetim kodu test edilmiştir. Geliştirilen kod, söz konusu hedeflerden saçılma hesabı kullanılarak doğrulandıktan sonra elektriksel olarak büyük ve karmaşık bir hedeften elektromanyetik saçılma ve RKA hesabı benzetimi gerçekleştirilmiştir. Benzetim zamanı, mevcut elektromanyetik benzetim yazılımı [2] ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Elektromanyetik benzetim, fiziksel optik, geometrik optik, nümerik elektromanyetik, radar kesit alanı, seken işin yöntemi.

DEVELOPMENT OF SIMULATION SOFTWARE FOR THE RADAR CROSS SECTION OF LARGE AND COMPLEX TARGETS AT HIGH FREQUENCIES

ABSTRACT

In this work, we set out to develop a fast and effective simulation code for the fast calculation of radar cross section (RCS) from large and complex-shaped targets at high frequencies. The code is based on the famous shooting and bouncing ray (SBR) method [1] that uses geometric optics (GO) and the physical optics (PO) theory. The theory behind the implementation of the code is briefly given. The code is tested with various benchmark targets whose RCS values can be readily found in the literature. After validating the code with those objects, the electromagnetic scattering and the RCS calculation from electrically large and complex shaped objects are simulated with the code. The simulation time of our code is also compared with a commercially available electromagnetic simulator software [2] for comparison purposes.

Keywords: Electromagnetic simulator, geometric optics, numerical electromagnetic, physical optics, radar cross section, shooting and bouncing rays.

1. GİRİŞ

Doğrusal boyutları birkaç dalga boyunu aşan karmaşık nesnelerden saçılan elektromanyetik (EM) alanların hesaplanması ve RKA değerlerinin bulunması büyük önem arz etmekte olup, pek çok çalışmanın da konusu olmuştur [1]. RKA, bir cisim radardaki görünürlük miktarı veya radar sinyallerini yansıtma miktarı olarak tanımlanabilir [3]. Elektriksel olarak büyük ve karmaşık nesnelerden saçılan elektrik alanı; tam dalga yöntemleri (Moment metodu ve sonlu farklar gibi) ile hesaplamak çok yüksek boyutlu matris denklemlerin çözümünü gerektirdiğinden günümüz bilgisayarlarında mümkün değildir [4]. Son yıllarda bilgisayarlardaki ve saçılan alan analiz kavramlarındaki gelişmeler ile karmaşık ve büyük cisimlerin saçılan alanlarının hesabı yüksek frekans teknikleri ile mümkün olabilmektedir [5]. Literatürde bu yöntemlerden Geometrik Optik ve Fiziksel Optik (GO-FO); saçılan dalga yayılımını tanımlayan yüksek frekans tekniklerinden olup, saçılan fiziksel alan yaklaşık olarak, gerçek değere çok yakın şekilde bulunabilmektedir [6]. Bu nedenle yüksek frekanslarda, büyük ve karmaşık hedefler için saçılma kestirimini yapabilen RKA hesabında en etkin yöntem olarak FO bazlı Seken İşin Yöntemi (SIY) başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [1].

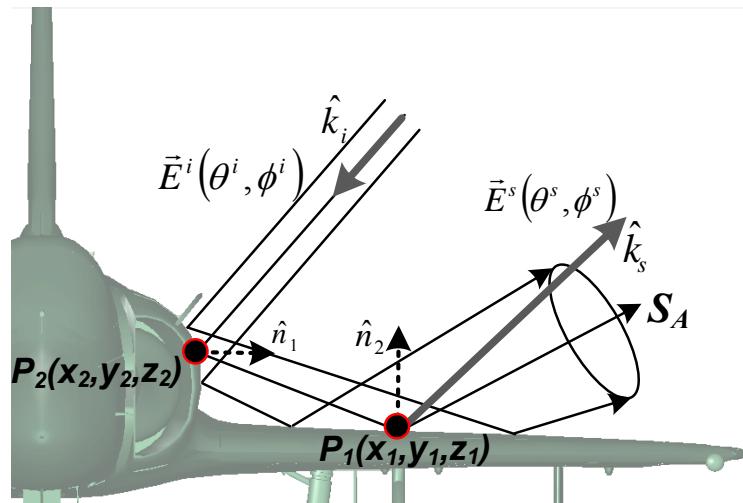
Bu bildiride, yüksek frekanslarda büyük ve karmaşık hedeflerden EM saçılma alanlarını hesaplayan ve bunun sonucunda RKA değerlerini hızlı ve verimli bir şekilde tahmin edebilen SIY-FO yöntemini kullanan bir benzetim kodu geliştirilmiştir. Söz konusu

kod, sadece elektriksel olarak büyük mükemmel iletken nesnelerden saçılan alanı oldukça hızlı bir şekilde hesaplayabilmektedir. Benzetim kodu, literatürde RKA değerleri bilinen çeşitli referans hedefler için test edilmiştir. Aynı zamanda mevcut hedefler için kod ile elde edilen sonuçlar, ticari bir EM yazılımı olan FEKO[®]'nun sonuçları ve ölçüm/analitik sonuçlar ile de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Geliştirilen kod ile referans hedeflerden saçılma doğrulandıktan sonra özellikle askeri önem arz eden bazı karmaşık platformlar için RKA analizi gerçekleştirilmiştir.

2. SEKEN İŞİN YÖNTEMİ İLE SAÇILMA HESABI

Seken İşin Yöntemi (SIY), büyük ve karmaşık nesnelerden elektromanyetik saçılmayı yüksek frekanslarda başarılı şekilde tahmin edebilen nümerik bir yöntemdir. SIY yönteminde, çok yoğun işin demeti platforma doğru gönderilir, işinlar Geometrik Optik (GO) kurallarına göre takip edilir (Şekil 1). Her bir işinin alan şiddeti, Yansıma katsayıları (Γ) ve İşin-Tüpü iraksama faktörleri (DF) hesaplanarak bulunur. Dolayısıyla Şekil 1'den de görüleceği üzere P_1 noktasından saçılan alan, P_2 noktası civarında aşağıdaki şekilde hesaplanabilir [1,7].

$$\vec{E}(x_2, y_2, z_2) = (DF) \cdot (\Gamma) \cdot \vec{E}(x_1, y_1, z_1) \cdot \exp\left(-jk\left[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2\right]^{1/2}\right) \quad (1)$$



Şekil 1. Seken İşin Yöntemi Geometrisi

Buna göre P_2 noktası civarına gelen elektrik alan, P_1 'deki elektrik alanının $\vec{k} \cdot \vec{r}$ miktarı kadar faz kaybından sorumlu olan faz terimi ile Γ ve DF katsayılarının çarpılması ile hesaplanır. Dolayısıyla her sekme için, sadece bu üç parametrenin hesaplanması o sekmeye ait elektrik alanının bulunması için yeterli olacaktır.

Elektrik alan takibinin bu şekilde yapılmasıından sonra, ışın platformdan ayrılrken, bakan yönüne doğru saçılan elektrik alan aşağıdaki FO saçılma entegrali sayesinde hesaplanır.

$$E^{BS}(\theta, \varphi) = \frac{jk\eta \cdot \exp(-jkr)}{4\pi r} \cdot \iint_{S_A} \vec{J}_s \cdot \exp(j\vec{k} \cdot \vec{r}_N) \cdot d\vec{s} \quad (2)$$

Burada, \vec{k} dalga numarası vektörünü, η ortamın karakteristik empedansını, \vec{r}_N orijinden ışının son çarpma noktasına kadar olan vektörü ve $\vec{J}_s = 2 \cdot \vec{E}(x_N, y_N, z_N) \times \hat{n}$ son sekme yüzeyindeki akım yoğunluğunu vermektedir.

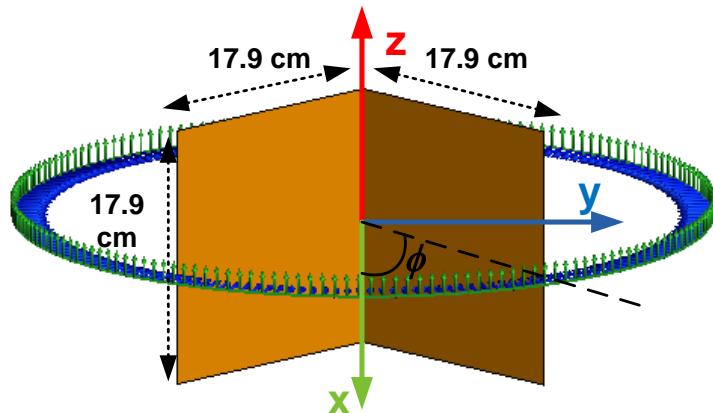
3. REFERANS NESNELER İLE DOĞRULAMA

Bu çalışmada yüksek frekanslarda benzetimi gerçekleştirilecek olan büyük ve karmaşık nesnelerden elektromanyetik saçılma hesabı, yukarıda da teorisi kısaca özetlenen SIY'a dayanan C programlama dilinde geliştirilmiş bir kod ile gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen kod, hedef cismin bilgisayar destekli tasarım dosyasına ihtiyaç duymaktadır. Hedef cismin yüzeyi küçük üçgensel yamalar şeklinde oluşturulur.

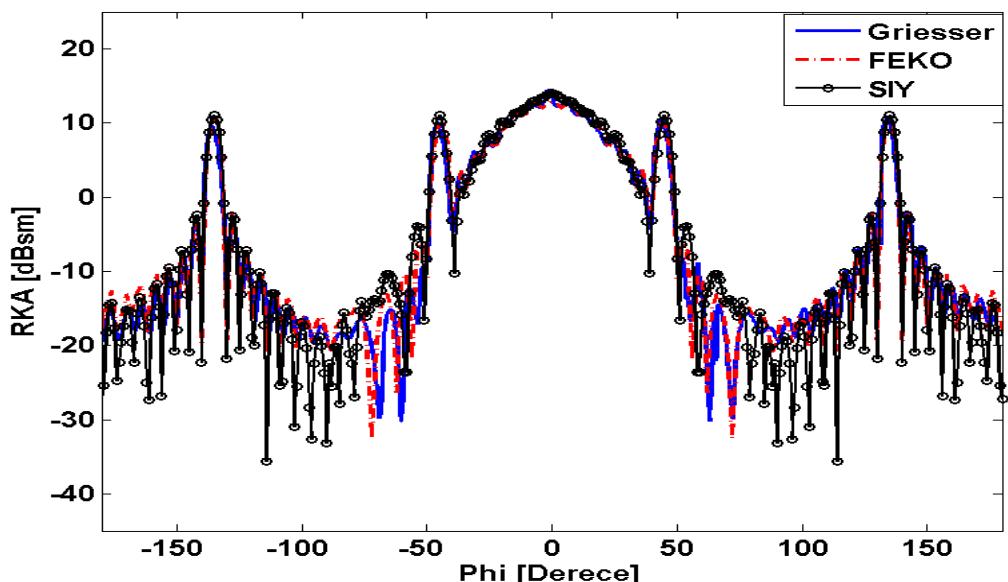
Geliştirmiş olduğumuz kodun doğruluğunu test etmek için, literatürde RKA değerleri analitik olarak bilinen ya da RKA değeri ölçülmüş değişik kanonik yapıların [8,9] farklı frekans ve bakan açılarında benzetimleri gerçekleştirilmiştir.

3.1. Dihedral köşe yansıtıcısı:

Yazılımın çoklu yansımalarındaki başarısını doğrulamak için, geometrisi Şekil 2' de verilen ikili köşe yansıtıcısı kullanılmıştır. Elde edilen sonucu, referans diğer sonuçlarla karşılaştırmak [10] üzere, geometrideki her bir kare plakanın boyutları $5.6\lambda \times 5.6\lambda$ olarak seçilmiştir. Bu durumda, plakaların her bir kenarı 9.4 GHz de 17.90 cm olarak hesaplandı. Saçılan elektrik alan, belirtilen frekans değerinde $\theta^i = \theta^s = 90^\circ$ ve $\phi^i = \phi^s = -180^\circ : 180^\circ$ bakan açılarında monostatik olarak dikey-dikey (DD) polarizasyonunda elde edilmiştir. Şekil 3'de farklı yatay açılarında ikili köşe yansıtıcısı için benzetim sonuçları karşılaştırılmış olarak sunulmuştur. Burada kesik olmayan çizgi, literatürden referans olarak alınan Griesser'in ölçüm sonucunu [10], kesikli çizgi aynı benzetim parametreleri kullanılarak FEKO yazılımı ile gerçekleştirmiştir olduğumuz benzetim sonucunu ve noktalarla belirtilmiş olan ise geliştirmiştir olduğumuz yazılım ile elde ettiğimiz RKA sonucunu göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, geliştirdiğimiz kod ile elde edilen RKA sonucu referans RKA değeri ve FEKO yazılımı sonucu ile mükemmel yakınlık şekilde örtüşmektedir.



Şekil 2. İkili köşe yansıtıcısı için benzetim geometrisi

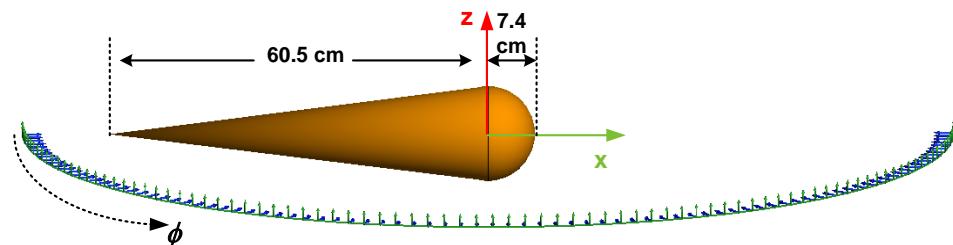


Şekil 3. Farklı yatay açıları için RKA sonuçları: Griesser benzetimi (kesiksiz), FEKO sonucu (kesikli) ve geliştirilen SIY kodu sonucu (noktasal)

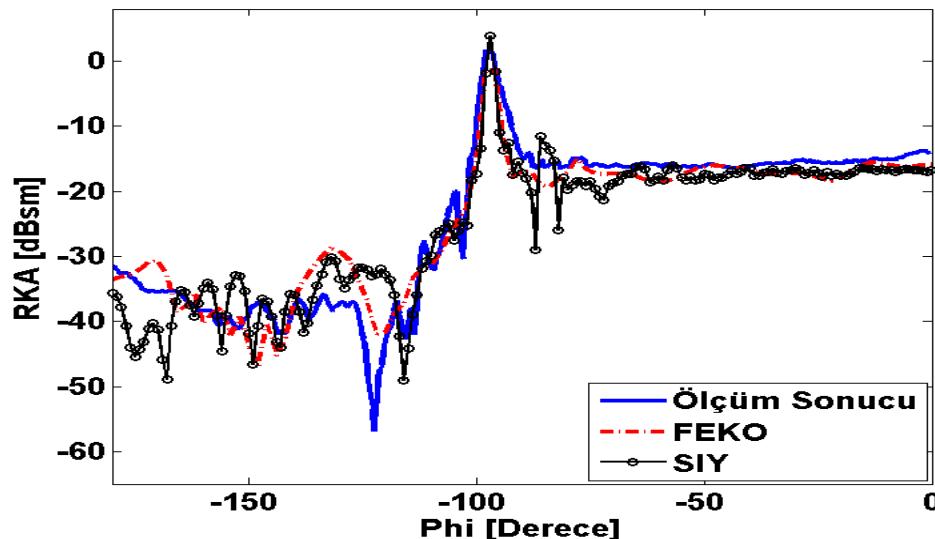
3.2. Koni - küre:

Koni-küre geometrisi literatürde RKA hesaplamalarında sıkılıkla karşılaştığımız referans hedef olarak kullanılan bir nesnedir. Bu çalışmada, [10, 11]'deki RKA ölçüm sonucuya karşılaştırmak üzere, söz konusu geometrinin benzetimi geliştirilen kod ile gerçekleştirılmıştır. Şekil 4, benzetimi gerçekleştirilen geometriyi göstermektedir. Benzetim, 9 GHz frekansında $\theta^i = \theta^s = 90^\circ$ ve $\phi^i = \phi^s = -180^\circ : 0^\circ$ bakış açıları için monostatik konfigürasyon ve yatay-yatay (YY) polarizasyonu için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen benzetim sonucu, aynı parametreler ile hesaplanan FEKO yazılımının

sonucu ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5, farklı yatay açılarında (181 ayrık açıda) hesaplanan RKA değerlerini göstermektedir. Şekilden de gözlemlenebileceği üzere, geliştirmiş olduğumuz yazılım ile gerçekleştirilen RKA benzetim sonucu, referans ölçüm sonucu ve FEKO yazılımının ürettiği sonuçla oldukça iyi bir şekilde uyışmaktadır. Sonuçlar arasındaki küçük tutarsızlıklar, farklı benzetimlerde, geometrinin farklı ızgaralama (üçgensel yamaların boyutları) değeri kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Kavisli yüzeylere sahip olan koni-küre geometrisinin çok daha küçük düzlemsel üçgensel yamalar kullanılarak, bilgisayar destekli tasarımının (BDT) gerçeklenmesi sayesinde; sonuçlar arasındaki uyumun daha iyi olabileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 4. Koni-küre için benzetim geometrisi

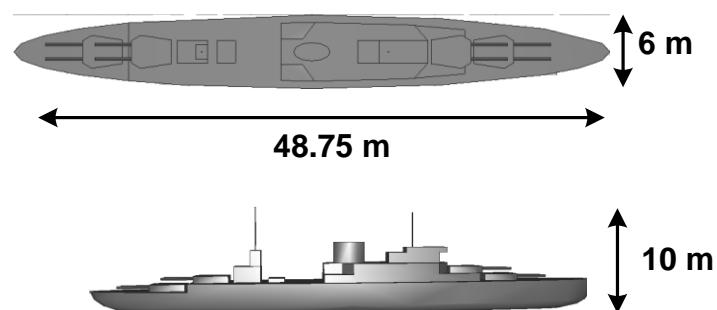


Şekil 5. Farklı yatay açıları için RKA sonuçları: Ölçüm Sonucu [11] (kesiksiz), FEKO sonucu (kesikli) ve geliştirilen SIY kodu sonucu (noktasal)

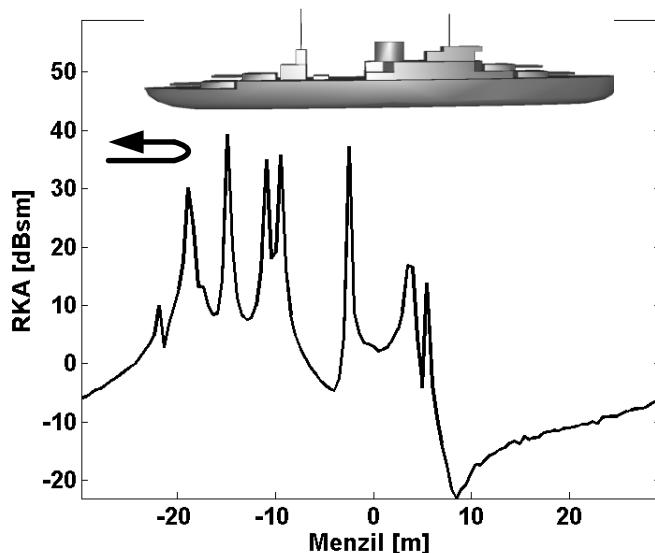
4. Büyük ve karmaşık hedeflerin RKA hesabı

Bir önceki bölümde, kanonik yapı (ikili köşe yansıtıcısı) ve referans bir hedef (koniküre nesnesi) ile kodumuzun RKA hesaplamalarındaki geçerliliği ve doğruluğu test

edilmiş olup, bu bölümde geliştirilen kod elektriksel olarak büyük ve karmaşık hedeflerin yüksek frekanslardaki elektromanyetik saçılım benzetimi için kullanılacaktır. İlk olarak, BDT modeli Şekil 6'da verilen bir savaş gemisi modeli için elektrik alan saçılım benzetimi gerçekleştirılmıştır. Saçilan elektrik alan, geminin burun yönünden 3 GHz orta frekansında, 300 MHz frekans bandında ve 2.5 MHz eşit aralıklarla toplam 120 ayrık frekans değeri için toplanmıştır. Elde edilen bu ayrık frekans verisine Ters Fourier Dönüşümü uygulanmasıyla mevcut hedefin zaman uzayındaki geri saçılım cevabı elde edilmiştir [12]. Şekil 7'de, hedefe zaman-menzil dönüşümü uygulanması ile elde edilen menzil profili sunulmaktadır. Şekilden de görüleceği üzere önemli saçılma merkezleri, geminin ön tarafındaki toplardan ve orta bölümündeki ikili, üçlü yansıtıcı gibi çalışan yapılardan kaynaklanmaktadır.



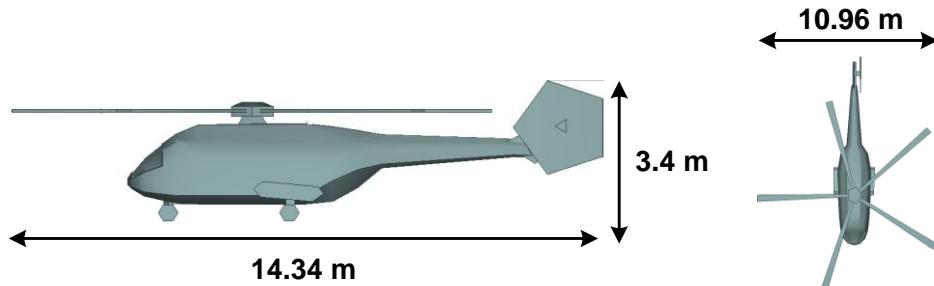
Şekil 6. Savaş gemisinin BDT modeli



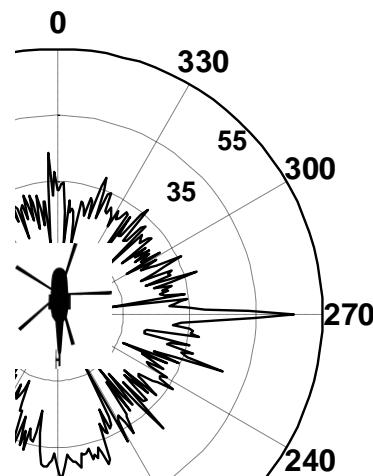
Şekil 7. Savaş gemisi modeline ait menzil profili

İkinci olarak, farklı yatay açılarındaki RKA değişimini gözlemlemek için, bir helikopter modelinin DD-monostatik RKA benzetimi aynı yöntemle gerçekleştirilmiştir. Benzetim

8 GHz taşıyıcı frekansında 1° lik açı aralıkları ile yapılmıştır. Şekil 8'de hedefin BDT modeli ve Şekil 9'da da farklı yatay açılarına karşılık gelen monostatik RKA imzası verilmektedir.



Şekil 8. Helikopterin BDT modeli



Şekil 9. 8 Ghz'de, farklı yatay açılarında helikopter modelinin DD polarizasyonda monostatik RKA değişimi (dBsm)

5. SONUÇLAR

Bu bildiride yüksek frekanslarda elektriksel olarak büyük ve karmaşık nesnelerden sağlanan alan hesabı ve RKA kestirimini yüksek doğrulukta ve oldukça hızlı tahmin edebilen SIY-FO yöntemine dayanan bir kod geliştirilmiştir. Geliştirilen kodun güvenirligini test etmek amacıyla, analitik sonuç ve ölçüm sonucu literatürde mevcut olan bazı referans hedeflerin RKA benzetimi gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda elde edilen sonuçlar ticari bir EM yazılımı olan FEKO yazılımı sonuçları ile de

karşılaştırılmıştır. Sonuçlar söz konusu kodun, RKA hesabındaki başarısını açıkça ortaya koymaktadır. Kodun güvenirliği bu şekilde doğrulandıktan sonra, karmaşık ve büyük hedefler için benzetimler gerçekleştirılmıştır. Benzetim sonuçlarından farklı frekans ve bakış açılarına göre hedefin farklı polarizasyonlarında RKA değişimi incelenerek yorumlanmıştır. Çizelge 1'de benzetim zamanlarına göre incelendiğinde, geliştirilen kodun oldukça hızlı ve etkin çalıştığı açıkça görülmektedir.

Geliştirilen kod, mevcut ticari yazılımlarla karşılaştırıldığında; oldukça hızlıdır. Söz konusu kod, görsel ara yüzü tasarımları yapılarak radar endüstrisi sanayisinin kullanımına açılabilir. Mevcut yazılımların çözemediği elektriksel olarak büyük ve karmaşık platformların elektromanyetik çözümlemesi rahat bir şekilde bu kod ile yapılabilir.

Çizelge 1. Benzetimi yapılan hedefler için benzetim zamanı

Nesne	Benzetim Aralığı	Tek bir CPU için toplam benzetim zamanı	
		FEKO	SIY-FO kod
<i>İkili köşe yansıtıcı</i> (her plaka $5.6\lambda \times 5.6\lambda$)	361 açı değeri	109 sn	10 sn
<i>Koni-küre</i> (uzunluğu: 20.4λ)	181 açı değeri	108 saat 20 dk	9 dk
<i>Savaş gemisi</i> (boyutu $\sim 500\lambda \times 60\lambda$)	120 frekans değeri	-	6 dk
<i>Helikopter</i> (boyutu: $\sim 400\lambda \times 293\lambda$)	361 açı değeri	-	1 saat

6. KAYNAKÇA

- [1] Ling, H., Chou, R.C. ve Lee, S.W. (1989), Shooting and Bouncing Rays: Calculating the RCS of an arbitrarily shaped cavity, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 194-205.
- [2] FEKO Suite 6.0, EM Software and Systems (www.feko.info), 2010.
- [3] Knott, E.F., Shaeffer, J.F. ve Tuley, M.T. (2004), Radar cross section (2nd edition), *Scitech Publishing*.
- [4] Harrington, R.F. (1993), Field computation by moment methods, *IEEE Press*.
- [5] Baldauf, J., Lee, S., Lin, L., Jeng, S., Scarborough, S.M. ve Yu, C.L. (1991), High frequency scattering from trihedral corner reflectors and other benchmark targets: SBR versus experiment, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1345-1351.
- [6] Keller, J.B. (1950), Determination of reflected and transmitted fields by geometrical optic, *Journal of Optical Society of America*.

- [7] Bhalla, R. ve Ling, H. (1995), A fast algorithm for signature prediction and image formation using the shooting and bouncing ray technique, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 727-731.
- [8] Zhenghong, G. ve Mingliang, W. (2008), An efficient algoritm for calculating aircraft RCS based on the geometrical characteristics, *Chinese J. Aeronautics*, 296-303.
- [9] Fernandez-Recio, R., Jurado-Lucena, A., Errasti-Alcala, B., Poyatos-Martinez, D., Escot-Bocanegra, D. ve Montiel-Sanchez, I. (2009), RCS measurements and predictions of different targets for radar benchmark purpose, *Intern. Conf. on Electromagnetics in Advanced Applications*, 443-446.
- [10] Grieesser, T., Balanis, C.A. ve Liu, K. (1989), RCS analysis and reduction for lossy dihedral corner reflectors, *Proceedings of the IEEE*, 806-814.
- [11] Woo, A.C., Wang, H.T.G., Schuh, M.J. ve Sanders, M.L. (1993), EM programmer's notebook-benchmark radar targets for the validation of computational electromagnetics programs, *Antennas Propagat. IEEE*, 84-89.
- [12] Özdemir, C. ve Chang, K. (2005), Synthetic aperture radar, The Wiley Encycl. of RF and Microwave Engineering, New York: Wiley Interscience.

GENİŞ BANTLI ELEKTRONİK KARIŞTIRICI ETKİNLİĞİNİN UZAY – ZAMAN UYARLAMALI RADAR SİSTEMLERİNDE BASTIRILMASININ MODELLENMESİ

Halil Uysal^(a), Ali Rıza Bozbulut^(b), Mete Severcan^(c)

^(a) TÜBİTAK UEKAE / İLTAREN Yüzbaşı İlhan Tan Kışlası, 06800,
Ümitköy/ANKARA halil.uysal@iltaren.tubitak.gov.tr

^(b) Kara Harp Okulu, Savunma Bilimler Enstitüsü, 06654, Bakanlıklar/ANKARA
arbozblut@kho.edu.tr

^(c) ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, severcan@metu.edu.tr

ÖZ

Uzay – Zaman Uyarlama İşleme (STAP) hava ve uzayda konuşlandırılmış radar sistemlerinde yerde hareket eden hedeflerin takibi için kullanılmakta olan etkin bir yöntemdir. Bu tür radarlarda platform hareketinden kaynaklı çevre yankısı yerde konuşlandırılmış sabit radar sistemlerine göre farklı özellikler göstermektedir. STAP özelliğine sahip radar sistemleri hareketten kaynaklı çevre yankısı etkilerini başarıyla bastırabilmektedir. Bu çalışmada STAP özelliğine sahip radar sistemlerinin genel bir modeli geliştirilmiş ve benzetim ortamında modellenmiştir. Gerçekleştirilen bu model aracılığıyla belirtilen radar sistemlerinin çevre yankısı etkileriyle beraber geniş bantlı elektronik karıştırıcı etkinliğinin bastırılması amacıyla da kullanılabileceği başarıyla gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Uzay – Zaman Uyarlama İşleme, Hava ve Uzay Konuşlu Radar, Yerde Harekete Eden Hedefler, Çevre Yankısı, Elektronik Karıştırıcı

SIMULATION OF WIDEBAND JAMMER SUPPRESSION IN SPACE – TIME ADAPTIVE PROCESSING RADAR SYSTEMS

ABSTRACT

Space – Time Adaptive Processing (STAP) has been widely used in spaceborne and airborne radar platforms in order to track ground moving targets. Ground clutter returns exhibit different characteristics in these radar systems compared to the ground based radars. STAP is able to suppress the clutter spread due to the platform motion. In this study, a generic STAP radar model is developed and implemented in simulation

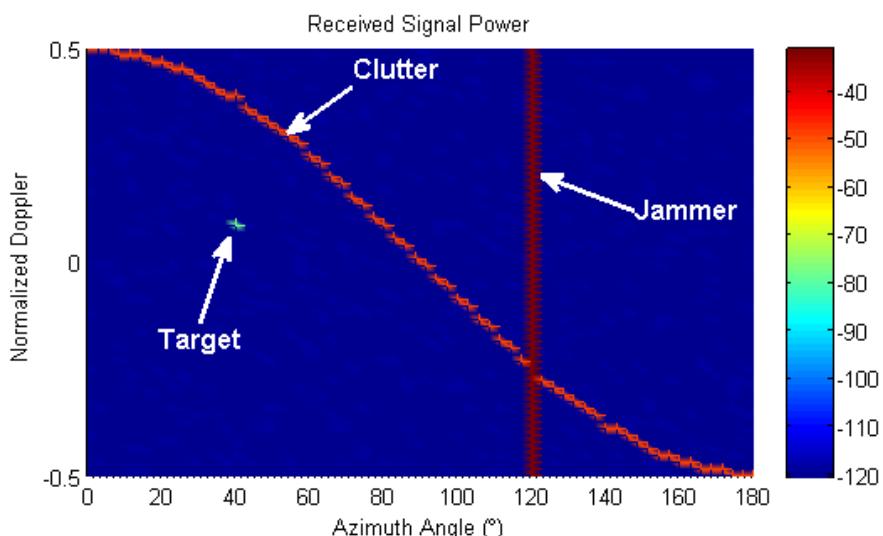
environment. The implemented radar model demonstrates that STAP can be used in order to suppress wideband jammer effectiveness together with ground clutter effects.

Keywords: Clutter, Ground Moving Targets, Jammer, Spaceborne and Airborne Radar Platforms, Space – Time Adaptive Processing.

1. GİRİŞ

Radar sistemlerinde çevre yankısı ve elektronik karıştırıcılarından kaynaklanan istenmeyen sinyallerin tümüne girişim (interferans) adı verilmektedir. Girişim, hava ve uzay konuşlu radarlarda hedeflerin tespitini ve takip edilmesini güçleştirmektedir. Uzay – zaman işlemede, anten dizisi elemanlarına ortamdan gelen sinyaller evre uyumlu bir şekilde toplanmaktadır. Toplama işleminin ardından sinyaller çok boyutlu filtreleme algoritmalarında işlenmektedir. Bu işlemde bir yandan girişim etkileri bastırılırken öte yandan hedefler tespit edilmeye çalışılmaktadır [1].

Çevre yankısı, konuşlu olduğu hava veya uzay platformunun hızı, anten elemanlarının platform üzerindeki yerlesimi (yana/öne bakan anten dizisi) ve radarın darbe tekrarlama aralığına bağlı olarak Doppler frekansı ve yanca açısı uzamında iki boyutlu bir dağılım göstermektedir. Geniş bantlı elektronik karıştırma ise çevre yankısından farklı olarak platforma göre karıştırmanın yapıldığı yanca (azimut) açısından baskındır. Şekil 1’de, hava konuşlu ve yana bakan anten dizili bir radar sisteminin alıcısında gözlenen sinyal gücünün dağılımı verilmiştir [2]:



Şekil 1. Radar alıcısındaki sinyal gücü dağılımı.

Çevre yankısının yatay açı ve Doppler uzamında gözlemlenen dağılımından dolayı iki boyutlu filtre gereksinimi ortaya çıkmıştır [3].

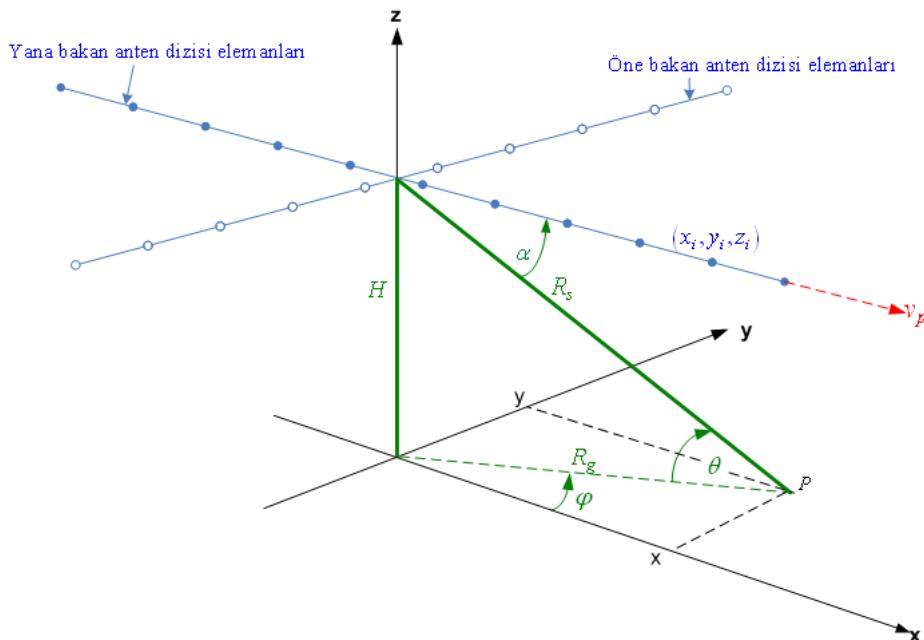
Bu bildiri beş bölümden oluşmaktadır. Bölüm 2'de girişim kaynaklarının uzay – zaman uzamındaki özellikleri tanıtılmıştır. Bölüm 3'te STAP özelliğine sahip radar sistemlerinde yaygın olarak kullanılan filtreleme teknikleri üzerinde durulmuştur. Bildirinin son iki bölümünde ise gerçekleştirilen benzetimler ve bu benzetimlerden çıkarılan sonuçlar aktarılmıştır.

2. GİRİŞİM KAYNAKLARI

Bu bölümde öncelikle uzay – zaman sinyalleri tanımlanmıştır. Yapılan tanıma bağlı olarak çevre yankısı ve geniş bantlı elektronik karıştırıcı sinyallerinin uzay – zaman uzamındaki özellikleri açıklanmıştır.

2.1. Uzay – zaman sinyalleri

Şekil 2'de hava konuşlu radarın anten dizi geometrisi gösterilmektedir.



Şekil 2. Hava konuşlu anten dizisi geometrisi

Radar vericisinden yayınlanan evre uyumlu darbeli sinyal matematiksel olarak (1)'de ifade edilmiştir [4].

$$s_t(t) = R[A_t E(t) \exp(j\omega_c(t+mT))] \quad m=1 \dots M \quad (1)$$

(1)'de, A_t yayınlanan sinyalin tepe gücünü, $E(t)$ sinyalin zarf fonksiyonunu, ω_c açısal taşıyıcı frekansını, T darbe tekrarlama aralığını (PRI) ve M evre uyumlu olarak işlenen darbe sayısını belirtmektedir. Yayınlanan verici sinyali sabit bir yansıtıcıya çarpıp geri döndüğünde anten elemanlarının koordinat sisteminde tanımladıkları konumlarına

bağlı olarak faz kaymasına uğrayacaktır. Faz kaymasının matematiksel ifadesi (2)'de verilmiştir [5].

$$\Delta\varphi = j \frac{2\pi}{\lambda} ((x_i \cos \varphi + y_i \sin \varphi) \cos \theta - z_i \sin \theta) \quad i=1\dots N \quad (2)$$

(2)'de, N anten dizisinde bulunan eleman sayısını, λ yayınlanan verici sinyalinin dalga boyunu, φ x-düzlemine göre hesaplanan yanca açısını, θ alçalış açısını ve (x_i, y_i, z_i) ilgili anten elemanın koordinat sistemindeki konumunu belirtmektedir.

Radar sisteminde, anten elemanlarından sonra uyumlu filtreleme ve demodülasyon işlemleri gerçekleştirilir. Bu işlemlerin ardından elde edilen sinyal (3)'te ifade edilmiştir.

$$s_r(R_s, x_i, y_i, z_i) = A \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} ((x_i \cos \varphi + y_i \sin \varphi) \cos \theta - z_i \sin \theta) \right] \quad i=1\dots N \quad (3)$$

(3)'te, R_s yansıtıcının referans anten dizisi elemanına olan uzaklığıdır.

2.2. Çevre yankısı

Çevre yankısı, radar anteninin ufka kadar görebildiği yeryüzü kesitinde bulunan hedef dışındaki tüm yansıtıcılardan geri dönen toplam sinyali belirtmektedir.

Her bir yansıtıcıdan dönen sinyal, uzay ve zaman uzamında faz kaymasına uğramaktadır. Zaman uzamında gerçekleşen faz kayması, platformun ve yansıtıcının hareketiyle ilintili olan Doppler kaymasına bağlıdır. Doppler kaymasının matematiksel ifadesi (4)'de verilmiştir.

$$f_D = \frac{2}{\lambda} (v_p \cos \varphi \cos \theta + v_c) \quad (4)$$

(4)'te, v_p platformun hızını ve v_c ise yansıtıcının platforma göre bağlı hızını belirtmektedir. Doppler kaymasına bağlı olarak zamanda gözlemlenen faz kayması (5)'te ifade edilmiştir.

$$\Phi(\varphi, v_p, v_c) = \exp \left(j \frac{2\pi}{\lambda} f_D m T \right) \quad m=1\dots M \quad (5)$$

Uzamsal faz kayması ise (6)'da gösterilmektedir:

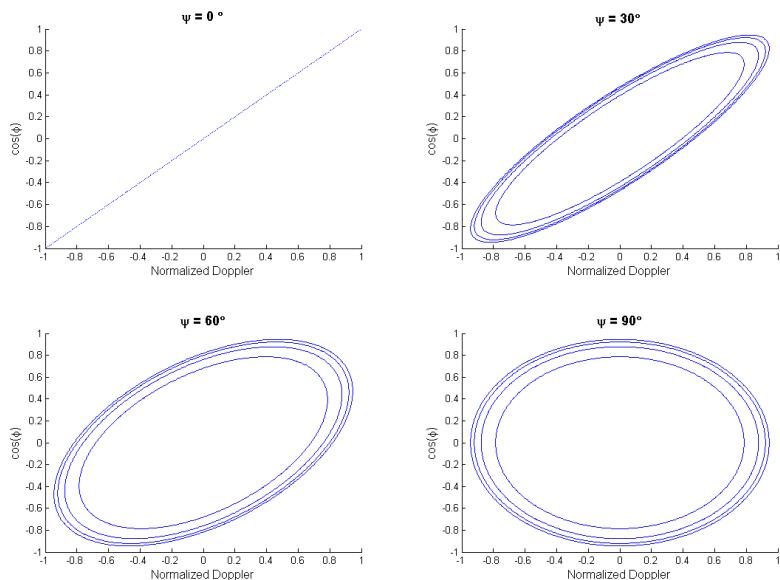
$$\Psi(\varphi) = \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} ((x_i \cos \varphi + y_i \sin \varphi) \cos \theta - z_i \sin \theta) \right] \quad (6)$$

Anten dizisinin i 'nci elemanın m 'inci darbe gönderildikten sonra aldığı çevre yankısı sinyalinin ifadesi (7)'de belirtilmektedir.

$$c_{im} = \int_{\varphi=0}^{2\pi} A \Phi(\varphi, v_p, v_c) \Psi(\varphi) d\varphi \quad (7)$$

(7)'de, A dairesel karmaşık Gauss dağılımına sahip bir ilintisiz değişkendir.

Sinyal ifadesi (7)'de verilen çevre yankısı sinyali, STAP sayesinde Doppler kayması – yanca düzleminde işlenerek süzülebilmektedir. Radar sistemine sabit uzaklıktaki yansıtıcılarından dönen çevre yankısı sinyali, belirtilen düzlem üzerinde belli geometrik eğriliere karşılık gelmektedir. Bu eğrilerinin şekilleri, anten dizisinin platform hız vektörü ile yaptığı açıya (ψ) bağlı olarak farklılık göstermektedir. Şekil 3'de bu eğriler gösterilmiştir.



Şekil 3. Çevre yankısı eğrileri (içeriden dışarıya doğru: $R_s/H = 1.5, 2, 2.5, 3$)

Şekil 3'te verilen gösterimlerde, hızı sabit olan ve yerden belli bir yükseklikte düz uçuş yapan bir hava platformunda farklı anten yerleşimlerine bağlı olarak ortaya çıkan çevre yankısı eğrileri verilmiştir. Verilen gösterimlerde, ψ açısı anten dizisi düzleme ile platform hız vektörü arasındaki açıyı belirtmektedir. $\psi=0^\circ$ gösterimi yana bakan anten dizisi yerleşimine ve $\psi=90^\circ$ grafiği öne bakan anten dizisi yerleşimine karşılık gelmektedir. Öne bakan anten dizilerinde, çevre yankısının Doppler kayması – yanca düzleminde daha geniş bir alanı kaplayacağı bu gösterimlerden açıkça görülmektedir.

2.3. Geniş bantlı elektronik karıştırıcı

Bu bölümde, sürekli dalga gürültü karıştırması yapan geniş bantlı elektronik karıştırıcının uzay – zaman uzamındaki matematiksel sinyal gösterimi üzerinde durulmuştur.

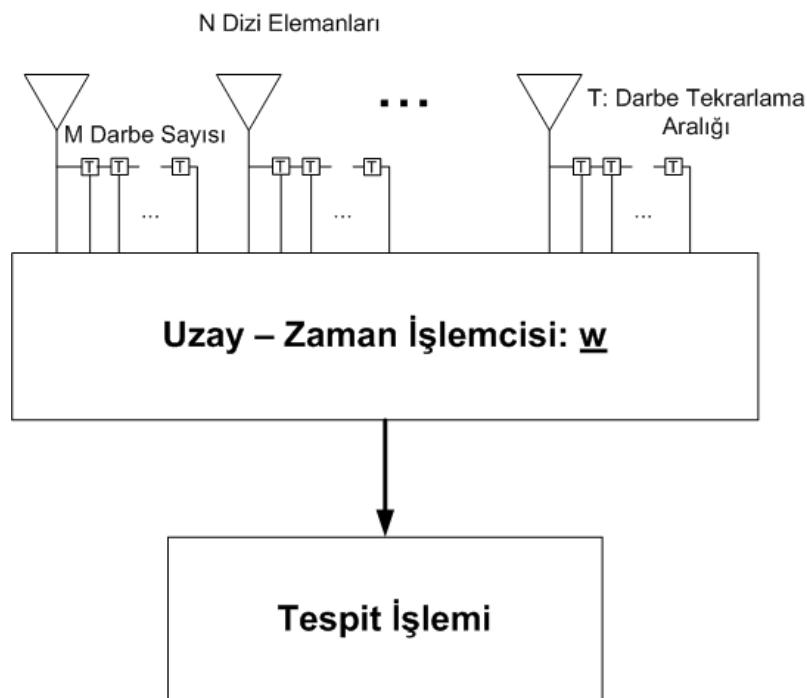
Bu matematiksel gösterime göre, anten dizisinin i 'inci elemanın m 'inci darbe gönderildikten sonra aldığı karıştırma sinyalinin ifadesi (8)'de verilmiştir.

$$c_{im}^{(j)} = \sum_{j=1}^J A_j(m) \exp \left(j \frac{2\pi}{\lambda} \left((x_i \cos \varphi_j + y_i \sin \varphi_j) \cos \theta_j - z_i \sin \theta_j \right) \right) \quad (8)$$

(8)'de A_j elektronik karıştırıcının genliğini φ_j ve θ_j sırasıyla karıştırıcının bulunduğu yanca açısı ile alçalış açısını belirtmektedir.

3. STAP SÜZGEÇ AĞIRLIKLARININ HESAPLANMASI

Bu bölümde, uzay – zaman işlemcisinin süzgeç katsayılarının nasıl hesaplanacağı açıklanmaktadır. Hesaplanan süzgeç katsayıları, gönderilen her darbe için tüm dizi elemanlarının çıkışında gözlemlenen sinyaller üzerine uygulanır ve toplama yapılarak karşılaştırması yapılacak değer bulunur. Şekil 4'te uzay – zaman işlemcisinin genel mimarisi gösterilmektedir [1].



Şekil 4. Uzay – zaman işlemcisinin genel mimarisi

Bu bildiride en uygun değer (optimum) uyarlamalı süzgeç katsayılarının ve dik izdüşüm süzgeç katsayılarının nasıl hesaplanması gereği gösterilmiştir. Her iki süzgeç katsayılarının hesaplanması için de girişim eşdeğişinti (covariance) matrisine ihtiyaç vardır. Değişen yüzey özelliklerinden ötürü gerçek sistemlerde girişim eşdeğişinti matrisinin kestirimi yapılmaktadır.

3.1. En uygun değer uyarlamalı süzgeç

En uygun değer uyarlamalı süzgeç kaynaklarda Wiener süzgeç olarak da bilinmektedir. Belirtilen uyarlamalı süzgeçin katsayıları (9)'da gösterildiği gibi hesaplamaktadır [6].

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = \gamma \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{s} \quad (9)$$

(9)'da Q girişim eşdeğeri matrisini, s anten dizi elemanlarından alınan sinyal vektörünü belirtmektedir.

3.2. Dik izdüşüm süzgeç

Dik izdüşüm süzgeç katsayıları, ıslı gürültü dışında kalan girişim kaynaklarının eşdeğeri matrisi kullanılarak hesaplanmaktadır [7].

$$\mathbf{w}_{izd} = \left(\mathbf{I} - \mathbf{E}^{(i)} \left((\mathbf{E}^{(i)})^H \mathbf{E}^{(i)} \right)^{-1} (\mathbf{E}^{(i)})^H \right) \mathbf{s} \quad (10)$$

(10)'da, E matrisinin sütunları, eşdeğeri matrisinin ıslı gürültü dışında kalan girişim kaynaklarının öz vektörlerine karşılık gelmektedir.

4. BENZETİM SONUÇLARI

Bu bölümde, yana bakan anten dizili hava konuşlu bir radar sistemi için yapılan benzetimler verilmiştir. Belirtilen radar sisteminde, uzay – zaman işlemcisi olarak en uygun değer uyarlamalı süzgeç kullanılmıştır. En uygun değer uyarlamalı süzgecin tercih edilmesinin sebebi “ortalama kare hatasını” (Mean Square Error) minimize ediyor olmasıdır. Gürültü sıcaklığı olarak ideal ortam sıcaklığı olan 25°C kabul edilmiştir. Gürültü gücü hesaplanırken (11)'den yararlanılmıştır.

$$N = kTB \quad (11)$$

(11)'de, k Boltzmann sabitini, T gürültü sıcaklığını, B ise sistemin bant genişliğini belirtmektedir. Darbe sıkıştırma işlemi yapılmadığı için bant genişliği olarak darbe genişliğinin tersi kullanılmıştır. Yapılan benzetimlerde, sabit çevre yankısı modeli kullanılmıştır [8].

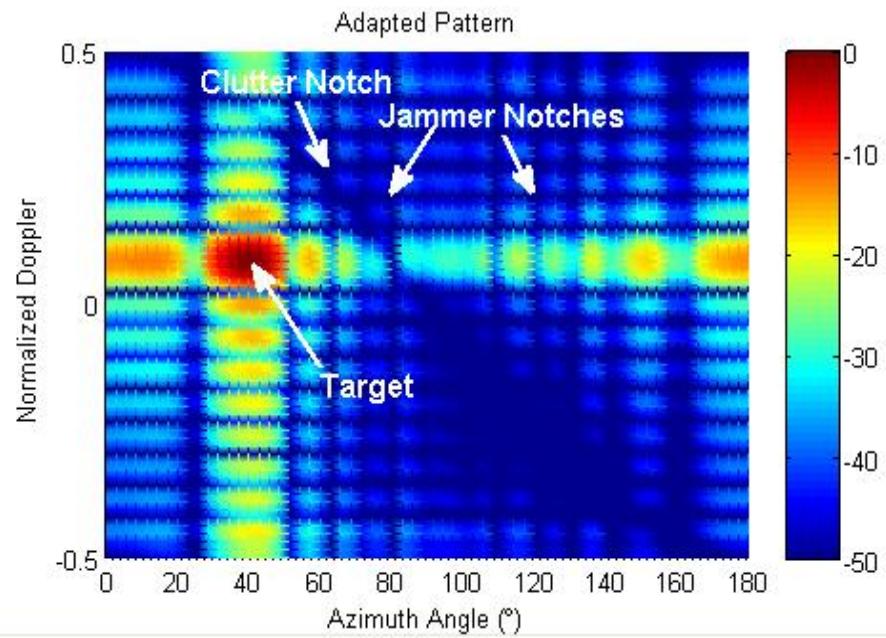
Benzetimde modellenen sistemlerin parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1 Benzetim Parametreleri

Platform Parametreleri	
Yükseklik (H)	1000 m
Hız (v_p)	90 m/s
ψ açısı	0°
Anten Dizisi Parametreleri	
Eleman sayısı	14
Hedef Parametreleri	
Menzil	10 km
Yanca	40°
Bağıl Hız	20 m/s
Radar kesit alanı (RKA)	10 dBm ²
Radar Sistem Parametreleri	
Çalışma frekansı	10 GHz
Tepe gücü	10 kW
Darbe tekrarlama sıklığı (PRF)	12 kHz
Görev çevrimi	% 1
Evre uyumlu işlenen darbe sayısı (M)	16
Elektronik Karıştırıcı Parametreleri	
Menzil	9 km, 7 km
Yanca	80°, 120°
Karıştırıcı / Gürültü oranı (JNR)	90dB, 120 dB

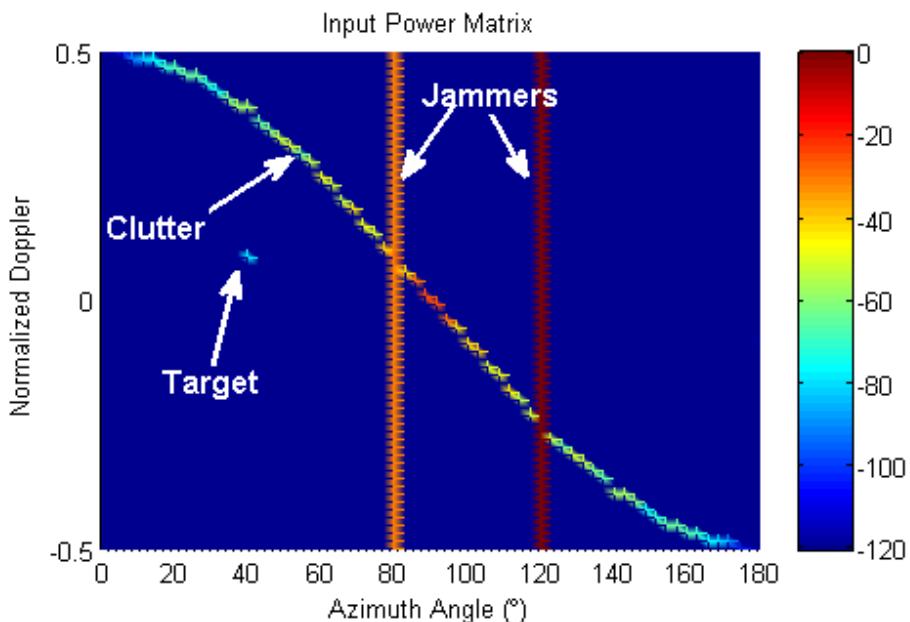
Tablo 1'de verilen sistemlere bağlı olarak yapılan benzetimin sonuçları sırasıyla Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmektedir.

Şekil 5'te Doppler kayması – yanca ekseninde hesaplanan uyarlanmış anten görüntüsü gösterilmektedir. Şekilden anlaşılabileceği üzere uyarlanmış anten görüntüsünün ana huzmesi, hedefin bulunduğu yanca açısı ve Doppler kayması frekansına yerleşmiştir. Uyarlanmış anten görüntüsünde çentikler (notches) oluşturulularak girişim kaynaklarının etkisi bastırılmıştır.



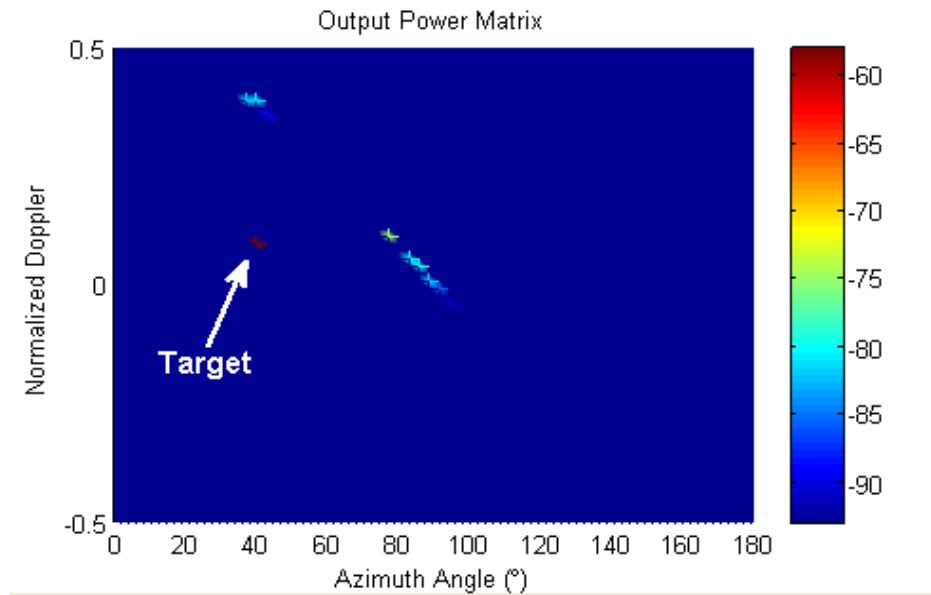
Şekil 5. Uyarlanmış anten örüntüsü

Şekil 6'da işlemcinin girişinde gözlemlenen sinyal gücünün Doppler kayması – yanca eksenindeki dağılımı gösterilmektedir. Girişim sinyallerinin gücü, hedef sinyal gücünden fazla olduğu belirtilen şekilde açıkça görülmektedir. Bu sebeple, uzay – zaman işleme yapılmadığı durumda hedef sinyalinin tespiti gerçekleşmeyecektir.



Şekil 6. İşlemci girişinde görülen sinyal gücü

Şekil 7'de işlemci çıkışında gözlenen sinyal gücünün Doppler kayması – yanca eksenindeki dağılımı gösterilmektedir. Görüldüğü üzere, uzay – zaman işlemesi sonucunda hedef tespit edilmiş ve girişim sinyalleri büyük ölçüde bastırılmıştır.



Şekil 7. İşlemci çıkışında görülen sinyal gücü

Şekil 7 incelendiğinde işlemci çıkışında karıştırıcılar tamamen yok edildiği halde, çevre yankısı sinyalinin etkilerinin sürdüğü düşünülebilir. Ancak, uzay – zaman uyarlamalı işlemci çevre yankıları ve elektronik karıştırıcı sinyalleri üzerinde eşit oranda etkilidir, bu etkiyi Şekil 6 ve Şekil 7 birlikte incelenerek görülebilir.

Şekil 7'de çevre yankısı etkisinin gözükmeye sebebi uyarlanmış anten görüntüsünde bulunan yan loblardır. Bu etkinin azaltılması için uyarlanmış anten görüntüsü pencereden (Hamming, Hanning, Kaiser, vb.) geçirilerek yan lob seviyesi düşürülebilir. Ancak, bu işlem uygulandığında ana huzme genişleyeceği için hedef tespit çözünürlüğünde kayıp olur.

5. SONUÇ

Bu çalışmada, uzay – zaman işleme yeteneğine sahip radar yapısı modellenerek, bu modelin çevre yankısı ve elektronik karıştırıcılara karşı bastırma yetenekleri benzetimler aracılığıyla incelenmiştir. Uzay – zaman işlemde uygun süzgeçlerin kullanımı sayesinde belirtilen girişim kaynaklarının etkin şekilde bastırıldığı bu benzetimlerde gösterilmiştir.

Geleceğe yönelik çalışmalarımız üç noktada yoğunlaşmaktadır:

- Çevre yankısı etkilerinin daha gerçekçi şekilde modellenebilmesi için yeryüzü yükselti verilerinde yararlanması planlanmaktadır.
- Bilinen girişim eşdeğer matrisi yerine hesaplanan çevre yankısı ve elektronik karıştırma sinyalleri kullanılarak girişim matrisinin kestirilmesi üzerine çalışılmaktadır.
- Tek boyutlu anten dizileri yerine iki boyutlu anten dizilerinin modellenmesi düşünülmektedir.

6. KAYNAKÇA

- [1] Ward, J. (1994), Space Time Adaptive Processing for Airborne Radar, *Technical Report 1015*, MIT Lincoln Laboratory.
- [2] Melvin, W. L. (2004), A STAP Overview, *IEEE A&E Systems Magazine*, Vol. 19 No. 1, 19 - 35.
- [3] Guerci, J.R. (2003), *Space – Time Adaptive Processing for Radar*, Artech House: Boston, MA, ABD.
- [4] Klemm, R. (Şubat 1999), Introduction to Space – Time Adaptive Processing, *IEE Electronics & Communication Engineering Journal*, 5 – 12.
- [5] Klemm, R. (2006), *Principles of Space – Time Adaptive Processing 3rd Edition*, IET Radar, Sonar and Navigation Series 21, İngiltere.
- [6] Therrien, C.W. (1992), *Discrete Random Signals and Statistical Signal Processing*, Prentice Hall.
- [7] Haimovich, A.L. ve Bar-Ness, Y. (1991), An Eigenanalysis interference canceler, *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 39, No. 1, 76-84.
- [8] Barton, D.K. (2005), *Radar System Analysis and Modeling*, Artech House, Boston, MA, A.B.D.

BÜYÜK ÖLÇEKLİ AĞLAR İÇİN SANAL SINAMA ORTAMI

Kerem KAYNAR ^(a), Mehmet Özer METİN ^(b)

^(a) AnelArge, Hacettepe Teknokent 2. Arge Binası Çankaya/ANKARA,
kerem.kaynar@anelarge.com

^(b) AnelArge, Hacettepe Teknokent 2. Arge Binası Çankaya/ANKARA,
ozer.metin@anelarge.com

ÖZ

Büyük ölçekli ağlar veya sistemlerin operasyonel ve performans testleri için gerçegine uygun sınama (testbed) ortamlarının kurulması zor ve maliyetli olduğundan sanal sınama ortamlarını kullanmak en etkin yöntemdir. Bu bildiride büyük ölçekli ağları simüle eden ve gerçek sistemler ile birlikte çalışabilen bir sanal sınama ortamı sunulmuştur. Gerçek zamanda çalışabilme ve ölçeklenebilirlik kriterleri gözönüğe alınarak gerçek sistemlerin oluşturduğu trafik paket seviyesinde simüle edilirken, sanal ağ düğümlerinin oluşturduğu trafik akışkan modeliyle modellenmiş ve iki modelin birlikte çalışması sağlanmıştır. Oluşturulan sanal sınama ortamı için dağıtık çalışabilen ajan temelli bir simülasyon çekirdeği tasarlanmış ve simüle edilen ağ düğümlerinin veri yüklerine göre dağıtık ajanlar üzerinde paylaştırılmasıyla kesintisiz ve gerçek zamanlı çalışmayı destekleyen bir yük dağıtımını elde edilmiştir. Bu ortam, gerçek ağ cihazlarının, algoritmalarının ve uygulamalarının ağ simülasyon ortamına entegre edilmesine izin vererek bunların geçerliliğinin ve performansının simülasyon senaryolarına göre değerlendirilebilmesine imkan vermektedir. Bu sanal sınama ortamı, korunaklı omurga ağı (PCN) gibi büyük ölçekli ağlar üzerinde birbirinden farklı cihaz ve algoritmaların denenmesine ihtiyaç duyan sistemler için, servis kalitesine duyarlı yönlendirme, trafik düzenleme algoritmaları ve ağa giriş tespit cihazları gibi güvenlik cihaz ve algoritmalarının etkinliğinin denenebileceği gerçek zamanlı çalışma prensibine uygun bir ortam sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dağıtık Simülasyon, Güvenlik ve Ağ Simülasyonu, Sanal Sınama Ortamı, Simülasyon ve Gerçek Sistem Birlikte Çalışabilirliği

VIRTUAL TESTBEDS FOR LARGE-SCALE NETWORKS

ABSTRACT

Since it is difficult and expensive to build real network testbeds for operational and performance tests of large-scale networks, using virtual testbeds for this purpose is the most effective method. In this paper, a virtual testbed allowing to simulate large-scale networks and cooperating with real systems is presented. Considering real-time operation and scalability criteria, traffic generated by real systems is simulated in packet-level and traffic generated by virtual nodes is simulated with fluid model. The testbed allows the fluid and packet models cooperate. A distributed agent-based simulation core is designed for the testbed and continuous load distribution supporting real-time operation is obtained via sharing of simulated nodes' workload among distributed agents. By allowing the integration of real network devices, algorithms and applications into a simulation environment, the virtual testbed provides opportunity for testing the validity and performance of these network entities according to specific simulation scenarios. The virtual testbed provides a real-time environment to assess QoS routing and traffic engineering mechanisms and the effectiveness of security boundary protection devices such as firewalls and intrusion detection systems used in large-scale networks such as protected core networks (PCN) where it is necessary to test various network devices and algorithms.

Keywords: Distributed Simulations, Cyber Security and Network Simulations, Virtual TestBeds, Interoperability of Simulated and Real Environments

1. GİRİŞ

İletişim altyapıları canlı sistemler olup olası ağısal operasyonların veya performans ölçümlerinin denenmesi riskli olduğu için çoğu zaman tercih edilen bir yöntem değildir. Bu sebeple büyük ölçekli ağların anahtar öğelerini içinde barındıran küçük ölçekli sınama ortamları hazırlanarak yapılacak operasyonun denenmesi ve sonuçlarının izlenmesi sınama ortamı üzerinden gerçekleştirilir. Fakat sınama ortamlarının oluşturulması ve sürekli olarak gerçek sisteme benzer olmasının sağlanması pahalı ve sürdürülebilmesi zor bir işlemidir. Bu sebeple daha verimli bir yöntem olan simülasyon sistemlerinin kullanıldığı sanal sınama ortamları geliştirilmeye başlanmıştır[1].

Sanal sınama ortamlarının asıl önemli avantajı gerçek sistemlerle beraber kullanıldığında ortaya çıkar. Gerçek cihaz ve uygulamalar ile gerçek zamanlı olarak entegre olabilen sanal sınama ortamları ile cihaz ve uygulamaların testleri yapılabileceği gibi simüle edilen büyük ölçekli ağlarla beraber çalışma kapasiteleri ve bilgi sistemleri ve iletişim altyapılarına etkilerinin değerlendirileceği bir ortam kazanılmış olur.

Daha önce gerçek-zamanlı sanal sınama ortamları üzerine akademik düzeyde birçok çalışma yapılmıştır. Büyük ölçekli ağlar için kullanılabilen, gerçek-zamanlı simülasyon ortamı sunan RINSE bunlardan biridir [2]. RINSE C++ tabanlı SSF ağ simülatörünü temel alan, hibrit trafik modelleri kullanan, ağ cihazlarının CPU ve hafiza kullanımını da modelleyen paralel ortamlarda çalışmayı destekleyen gerçek-zamanlı bir ağ simülatöridür [2].

MAYA simüle edilen ağlarla fiziksel ağları entegre eden, hibrit trafik modelleri kullanan ve bu yolla büyük ölçekli ağlar için gerçek zamanlı simülasyonu destekleyen bir başka çalışmадır [3]. MAYA, QualNet ağ simülatörünü temel alır [3]. Bir başka çalışma da PlanetLab ağ simülatörü üzerinde geliştirilen VINI dır [4]. VINI da daha çok fiziksel cihazları simülasyon ortamına entegre etme teknikleri üzerinde geliştirmeler yapılmış, ayrıca simüle edilen cihazlar arasındaki yönlendirme işlemi işletim sistemi çekirdeği içine gömülerek simülasyon hızlandırılmaya çalışılmıştır [4]. Son olarak, MaSSF adı verilen bir başka çalışmada daha çok yönlendirme algoritmalarını geliştirerek ve hiyerarşik profil bazlı yük dengeleme algoritmalarıyla gerçek zamanlı simülasyona yaklaşmaya çalışmaktadır [5].

MAYA ve VINI çalışmalarında gerçek zamanlı çalışabilmeyi sağlamak amacıyla sadece hibrit trafik modellerinden yararlanılmıştır [3,4]. RINSE çalışmasında ise gerçek zamanlı işleyişin gerçek cihazlardan gelen olayların (events) önceliklendirilmesi ve simülasyon işleyişinin hızlandırılması (sanal saatin duvar saatine göre ilerleyiş hızının arttırılması) ile sağlandığından bahsedilmektedir [2]. Ancak, simüle edilen cihazların oluşturduğu trafiğinde kritik noktalardan geçebileceği ve gerçek cihazlardan gelen trafiği etkileyebileceği RINSE çalışmasında hesaba katılmamıştır [2]. Bu açıkça RINSE

bildirisinde belirtilmektedir [2]. MaSSF çalışmasında da yukarıda bahsedildiği üzere yönlendirme algoritmalarının geliştirilmesi üzerinde durulmuştur [5].

Bu çalışmaların aksine bu bildiride yer alan çalışmada Berlin Teknik Üniversitesi tarafından geliştirilen dağıtık ajan-temelli JIAC (Java Intelligent Agent Componentware) altyapısı temel alınmıştır. JIAC altyapısında, ajanların ağ düğümlerini iletişim ihtiyaçlarına göre belirlenen gerçek-zamanlı öncelik değerlerini dikkate alarak yönetmesini sağlayacak şekilde değişiklikler yapılmıştır. Gerçek-zamanlı öncelik değerlerine göre ajanlara yük dağıtıımı yapılmıştır. Bu öncelik değerleri hem gerçek cihazların ürettiği trafik hem de sanal cihazların ürettiği trafik için hesaplanmaktadır. Bu bildiride sunulan çalışmanın temel katkısı, dağıtık ajan temelli Java ortamında geliştirilmiş simülasyon çekirdeği kullanılarak hem ajan temelli mimari ve Java ortamının faydalarından yararlanmak hem de diğer çalışmalarda hesaba katılmayan (sanal trafik öncelikleri gibi) faktörleri de dikkate alarak gerçek-zamanlı işleyişe daha çok yaklaşmaktadır.

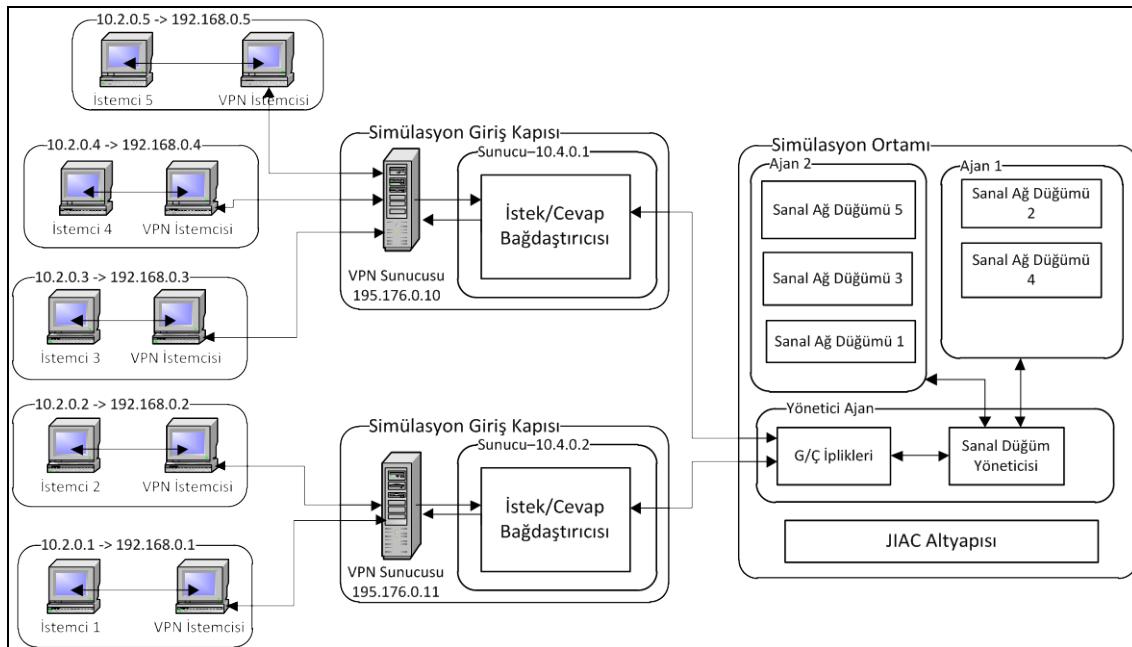
Bu bildiride ağ altyapıları için gerçek sistemler ile beraber çalışabilen bir sanal sınama ortamı sunulmuştur. Gerçek sistemler ile beraber çalışmanın getirdiği entegrasyon ve gerçek zamanlı simülasyon problemleri adreslenmiş ve simülasyon giriş kapıları ve ajan tabanlı dağıtık simülasyon çekirdeği yaklaşımıyla çözüm yolları anlatılmıştır. Sanal sınama ortamı üç temel kısımdan oluşmaktadır. Bunlar, emülasyon altyapısı, hibrit TCP/IP modeli ve gerçek zamanlı dağıtık simülasyon çekirdeğidir. Bu bildirinin 2., 3. ve 4. bölümlerinde sırasıyla bu kısımlar hakkında detaylı bilgi verilmektedir.

Genel olarak, sanal sınama ortamı bir veya daha fazla sunucu bilgisayar üzerinde dağıtık ve gerçek zamanlı olarak çalışabilmektedir. Emülasyon altyapısı, simülasyon ortamı ve gerçek ağ cihazları arasındaki iletişimini sağlamaktadır. Sınama ortamı büyük ölçekli ağların simülasyonunda da kullanılmak üzere tasarlandığı için, gerçek zamanlılık ve ölçülebilirlik kriterleri göz önüne alındığında tamamen paket seviyesinde kesikli olay modeline göre çalışan bir simülasyon modeli kullanmak doğru olmayacağından, sınama ortamının geliştirilmesinde akışkan ve paket modelini birleştiren hibrit bir ağ modeli kullanılmıştır. Kullanıcılarla ağ topolojisi ve senaryo tasarımları için bir grafiksel kullanıcı arabirimini sağlanmıştır. Buna ek olarak, simülasyon senaryolarının yürütülmesi esnasındaki önemli olayların kaydedilmesi, analizi ve raporlama maksadiyla bir analiz ve raporlama modülü sanal sınama ortamına entegre olarak sunulmaktadır.

2. EMÜLASYON ALTYAPISI

Emülasyon altyapısı, simülasyon ortamı ve gerçek cihazlar arasında köprü vaziyeti görmektedir. Bu emülasyon altyapısı güvenli, esnek ve ölçülebilir olmak durumundadır. Bu nedenle, emülasyon altyapısı Virtual Private Network (VPN)

teknolojisini temel almaktır ve bir VPN gerçeklemesi olan OpenVPN aracını kullanmaktadır. Emülatyon altyapısı aşağıdaki şekilde detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 1: Emülatyon altyapısı

Simülasyon ortamıyla veri alış-verişinde bulunmak isteyen herbir gerçek cihaz bir VPN istemcisine bağlanmak zorundadır. Bu VPN istemcisi, simülasyon giriş kapılarında bulunan VPN sunucularına bağlanmakta ve bu sunucularda kimlik belirleme, yetkilendirme gibi güvenlik kontrolleri yapılmakta ve sadece bu kontrolleri başarıyla geçen cihazlara erişim hakkı verilmektedir. Ayrıca, VPN gereği VPN istemcisi ve sunucuları arasındaki iletişim şifrelenmiş olarak gerçekleşmektedir. Sistemde bir veya daha fazla simülasyon giriş kapısı olabilmekte, ancak her simülasyon giriş kapısı bir VPN sunucusu içermektedir. Herbir giriş kapısı bir istek/cevap bağıdaştırıcı modülü içermektedir. Bu modülün görevi gerçek cihazlardan simülasyon ortamına giden istekleri simülasyon ortamındaki giriş/çıkış ipliklerine ve ters yöndeki cevapları hedef gerçek cihazlara yönlendirmektir.

Simülasyon ortamı dağıtık ajan mimarisi üzerinde çalışmaktadır ve herbir ajan bir veya daha fazla sanal ağ düğümünün operasyonlarını yürütürmektedir. Herbir sanal ağ düğümü bir ağ adresine sahiptir. Ayrıca, simülasyon ortamına bağlı olan herbir gerçek cihaz için bir sanal ağ düğümü oluşturulmaktadır. Bir gerçek cihazdan gelen trafik ona karşılık gelen sanal ağ düğümüne yönlendirilmektedir. Bu işlem herbir giriş/çıkış ipliğiyle bağlantılı olan sanal düğüm yönetici tarafından yapılmaktadır. Bir giriş/çıkış iplığıne gelen paketlerin hangi sanal ağ düğümüne yönledirileceği paket üzerindeki adres bilgilerinden anlaşılmakta, o sanal ağ düğümünün operasyonlarını yürüten ajan bilgisi ise sanal düğüm yönetici vasıtasiyla elde edilmektedir. Simülasyon ortamından bir

gerçek cihaza yönelen trafik de aynı şekilde yürütülmektedir. Bu kez, sanal ağ düğümü ilgili gerçek cihaza ulaşabilmek için sanal düğüm yönetici ve giriş/çıkış ipliklerini kullanmaktadır. Bu emülasyon altyapısının tasarımda [6] deki sonuçlardan yararlanılmıştır.

3. HİBRİT TCP/IP MODELİ

Geliştirilen sanal sınıma ortamında ölçülebilirlik ve gerçek zamanlılık kriterlerini sağlamak amacıyla yüksek seviye detay içeren paket modelinin yanısıra daha az detay içeren fakat yüksek performans değerleri sunan akışkan modeli kullanılmıştır. Trafik modellerinin geliştirilmesinde Java programlama dili kullanılmıştır. Berlin Teknik Üniversitesi tarafından geliştirilen Nessi 2 ağ simülatöründe gerçekleştirilen paket modelinden program parçacıkları alınmıştır. Akışkan modeli ise yazarlar tarafından geliştirilmiştir. Gerçek cihazların oluşturduğu trafik (ön plan trafik) paket seviyesinde modellenirken, simüle edilen cihazların oluşturduğu trafik (arka plan trafik) akışkan modelleriyle yürütülmekte ve simülasyon ortamında paket ve akışkan modeli bir arada yürüten hibrit model kullanılmaktadır [10, 11, 12, 13]. Hibrit model de Java tabanlı olarak yazarlar tarafından geliştirilmiştir. Akışkan modelinin analitik çözümü [7, 8, 9] de detaylı olarak verilmiş olup akışkan modelinin simülasyon ortamında çözüm metodları ikiye ayrılmaktadır. Bunlar ayrik olay (discrete-event) modeli çözüm metodu ve zaman adımlı (time-stepped) çözüm metodlarıdır. Her iki metodun da kendine özgü avantaj ve dezavantajları vardır.

Ayrik olay modelini kullanan çözüm metodu akışkan modelinin çok kolay bir şekilde yine ayrik olay modelini kullanan paket seviyesindeki simülasyon ortamına entegre edilmesine izin verir. Bu metod, herhangi bir akıştaki veri hızının her değişimi için bir olay oluşturma prensibine dayanmaktadır. Bu metod, “ripple effect” denilen bir veya daha fazla akıştaki veri hızı değişiminin birçok akışta zincirleme şeklinde veri hızı değişimleri yaratması ve herbir hız değişimi için simülasyon ortamında ayrı bir olay yaratılması sonucu meydana gelen sistem yükündeki ani artış sorunundan etkilenir.

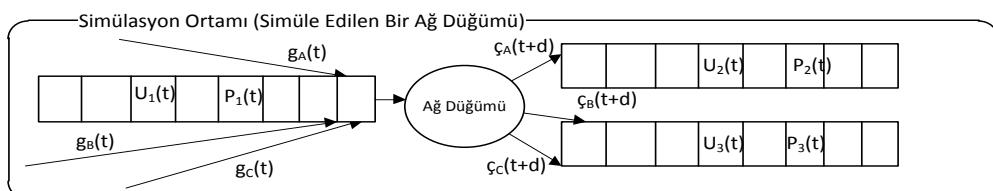
Zaman adımlı çözüm metodu sabit bir zaman adımı seçilmesi ve akışkan modelini tanımlayan diferansiyel denklemlerin bu zaman adımı kullanılarak Runge-Kutta metoduyla sayısal olarak çözülmesini esas alır [7, 9]. Bu metod ayrik olay modelini kullanan ve paket seviyesinde işlem yapan simülasyon ortamına entegre etmek zordur, fakat bu metod “ripple effect” denilen zincirleme akış hız değişimlerinin yarattığı olay patlaması sorunundan etkilenmez. Bu bildiride geliştirilen sanal sınıma ortamı akışkan modelinin çözümü için simülasyon ortamında zaman adımlı çözüm metodunu kullanmaktadır. Zaman adımlı akışkan modeli çözüm metodu, bu sanal sınıma ortamında ayrik olay prensibine göre işleyen paket modeliyle entegre edilmiştir.

Sanal sınama ortamında akışkan modeli için sabit bir zaman adımı seçilmektedir. Bu zaman adımı ne kadar küçük olursa o kadar yavaş, fakat elde edilen sonuçlar da bir o kadar net ve gerçeğe uygun olacaktır. Simüle edilen herbir ağ düğümünün herbir arayüzü için bir kuyruk yapısı kullanılmıştır. Herbir zaman adımda sisteme mevcut herbir akışın simüle edilen ağ düğümlerinin ağ arayuzlerine giriş ve çıkış hızları hesaplanmaktadır. Bu hızlar hesaplanırken ilgili ağ düğümlerinin veri işleyiş hızı, ilgili ağ arayuzlerinin veri transfer hızı (arayüzün bağlı olduğu bağlantıının bant genişliği hesaba katılacak) dikkate alınmaktadır. Ayrıca, gerçek cihazlardan gelen paket trafiği de sabit hızlı akış olarak akışkan modeline entegre edilmektedir. Paket trafiği herbir zaman adımda aşağıdaki denklemle sabit hızlı akışa dönüştürülmektedir:

$$A(t) = (N((k+1)s) - N(ks)) / s, \text{ öyle ki } ks \leq t < (k+1)s \text{ ve } k=0,1,2,\dots$$

Yukarıdaki denklemde $N(t)$ simülasyonun başlangıcından t anına kadar ilgili gerçek cihazın oluşturduğu paket miktarını vermektedir. $A(t)$ ise t anında cihazın ürettiği paket trafiğinin oluşturduğu sabit hızlı akışı temsil etmektedir.

Aşağıdaki şekilde herbir zaman adımı için hesaplanan bazı değerler gösterilmektedir. Şekildeki ağ düğümünün üç tane ağ arayüzü bulunmaktadır olup herbir arayüz için bir kuyruk oluşturulmuştur. Düğümden A, B ve C akışları geçmektedir. $g_x(t)$, x akışının t anında ağ düşümüne giriş hızını, $c_x(t+d)$ ise x akışının $t+d$ anında ağ düşümünden çıkış hızını göstermektedir. d birinci kuyruğun içinde bekleme zamanını göstermektedir. $U_x(t)$ x kuyruğunun t anında bayt cinsinden uzunluğunu, $P_x(t)$ ise x kuyruğunun t anında paket düşürme ihtimalini göstermektedir.



Şekil 2: Simüle edilen bir ağ düğümü için hesaplanan değerler

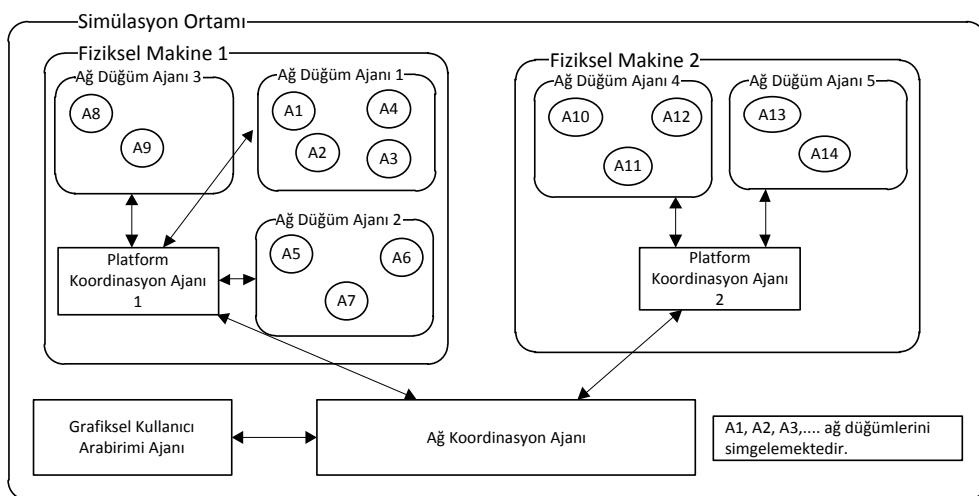
Gerçek cihazlar tarafından üretilen paket trafiğinin akışkan modeline etkisi yukarıda (denklemdeki gibi) belirtildiği şekilde hesaplanmakla birlikte, herbir paketin bir ağ cihazına gelişinin bir olay oluşturulmakta, akışkan modelinin pakete olan etkisi olayın oluşturulduğu ana göre gerçekleşmekte ve bu etkiye göre paketin o ağ cihazında düşürülüp düşürülmeyeceğine karar verilmektedir.

4. GERÇEK ZAMANLI DAĞITIK SİMÜLASYON ÇEKİRDEĞİ

Geliştirilen sanal sınama ortamının en önemli özelliği gerçek zamanlı olarak çalışabilmesidir. Bu özelliğin sağlanmasıyla sınama ortamının üzerinde çalıştığı simülasyon çekirdeğinin dağıtık ortamlarda çalışabilmesi büyük önem taşımaktadır.

Burada amaç simülasyon çekirdeğinin üzerinde çalıştığı sınırlı sayıda makine üzerinde sayıları bu sayının çok çok üstünde olan ağ cihazlarını gerçek zamanlı olarak simüle edebilmektir. Yani, belirli bir zaman aralığında gerçek ağ ortamında hangi operasyonlar gerçekleşiyorsa, bu operasyonların önemli etkilerini o zaman aralığı içerisinde simülasyon ortamında elde edebilmektir. Bu amacı gerçekleştirmek için simülasyon çekirdeğinin üzerinde çalıştığı makineleri olabildiğince etkin ve gerçek trafiğin hızına göre yük paylaşımı olacak şekilde kullanmak gerekmektedir.

Sanal sınama ortamı yukarıda belirtildiği gibi belirli aralıklarla (zaman adımları) herbir akışın yolu üzerindeki ağ düğümlerinde oluşturduğu giriş ve çıkış veri hızlarını hesaplamaktadır. Paket trafiği de sabit hızlı akışlara çevrilerek bu akışlara dahil edilir. Sanal sınama ortamı gerçek zamanlı dağıtık simülasyon çekirdeği üzerinde işlemektedir. Bu simülasyon çekirdeği dağıtık, ajan temelli Java Intelligent Agent Componentware (JIAC) altyapısı üzerine kurulmuştur [14, 15, 16]. Simülasyon çekirdeği dört tip ajan içermektedir. Bunlar, grafiksel kullanıcı arabirimini ajanı, ağ koordinasyon ajanı, platform koordinasyon ajanı ve ağ düğümü ajanlarıdır. Simülasyon çekirdeğinin ajan yapısı aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 3: Simülasyon çekirdeği ajan yapısı

Grafiksel kullanıcı arabirimini ajanı yalnız bir tane olup kullanıcı arayüzü kontrolünü ve simülasyon sonuçlarının kullanıcı arayüzüne aktarılmasını sağlamaktadır. Simülasyon çekirdeğinin üzerinde çalıştığı herbir fiziksel makinede bir tane platform koordinasyon ajanı ve bir veya daha fazla ağ düğümü ajanı bulunmaktadır. Bir ağ düğümü ajanı bir veya daha fazla ağ düğümünün operasyonlarının simülasyon ortamında yürütülmesinden sorumludur. Platform koordinasyon ajanı ise üzerinde çalıştığı fiziksel makinedeki ağ düğüm ajanlarının yönetilmesinden sorumludur. Bunlara ek olarak, simülasyon çekirdeği yalnızca bir tane ağ koordinasyon ajanı içermektedir. Ağ

koordinasyon ajanı ise, simülasyon çekirdeğinin üzerinde çalıştığı fiziksel makinelerde bulunan platform koordinasyon ajanlarının yönetiminden sorumludur.

Sanal sinama ortamı, ağ düğüm ajanlarına statik olarak öncelik değeri atamakta ve bu öncelik değeri o ağ düğüm ajanına ayrılacak olan kaynak miktarını (işlemci zamanını vb.) belirlemektedir. Ayrıca, ağ düğümlerine de iletişim ihtiyaçlarına ve durumuna (ağ düğümüne gelen trafik yoğunluğu, düğümün veri işleyiş hızı ve kuyruk uzunluğu vb.) göre operasyonel öncelik değerleri atanmaktadır. Bir ağ düğümünün operasyonel önceliği arttığında içinde bulunduğu ağ düğümü ajanından kendisine daha çok kaynak ayrılabilcek başka bir ağ düğümü ajanına transfer olması mümkündür. Bu durumda ağ düğümleri operasyonel önceliğine göre bir fiziksel makineden diğerine aktarılabilir.

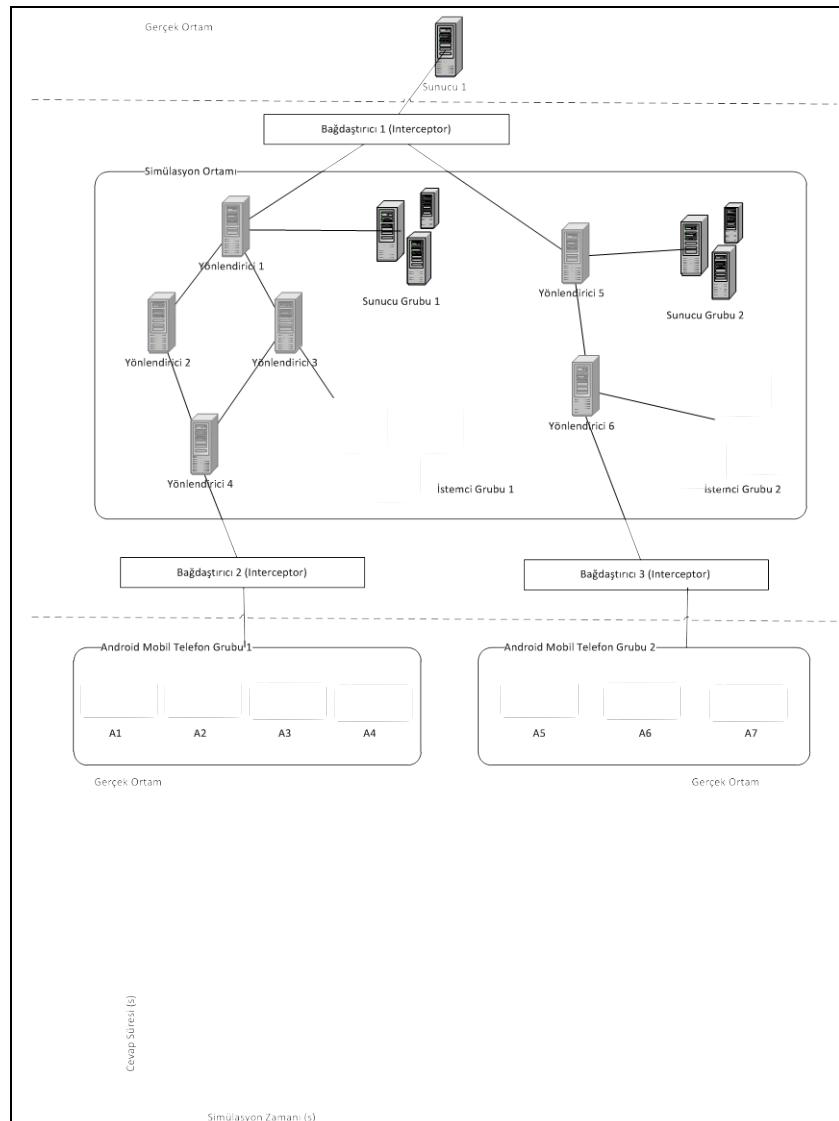
5. ÖRNEK SENARYO

Geliştirilen sanal sınama ortamı bir proje kapsamında Android mobil telefonları ve bir sunucu arasındaki iletişimini modellemek ve sunucunun mobil telefonların isteklerine cevap süresinin zamana göre değişimini elde etmek amacıyla kullanılmıştır. Aşağıdaki şekilde ağ deney ortamı gösterilmiştir.

Proje kapsamında iki grup Android mobil telefonu bir sunucuya (Sunucu 1) iletişim kurmaktadır. Mobil telefon grupları ve sunucu arasındaki ağ elemanları sanal sınama ortamında simüle edilmektedir. Simülasyon ortamında bir grup yönlendirici, istemci ve sunucu grupları bulunmaktadır. (Şekilde simülasyon ortamındaki her cihaz gösterilmemiş, sadece küçük bir kısım gösterilmiştir.) Simülasyon ortamındaki istemci grubu 1 deki istemciler sunucu grubu 1 deki sunucularla, istemci grubu 2 deki istemciler sunucu grubu 2 deki sunucularla 5. saniyeden sonra iletişime geçmekte ve bu iletişim 17. saniyeye kadar sürmektedir. Bu iletişim akışkan modeliyle simüle edilmiştir. Gerçek cihazlar arasındaki iletişim (mobil telefonlar ve Sunucu 1 arasındaki iletişim) ise simülasyonun başlangıcından sonuna kadar devam etmektedir ve paket seviyesinde yürütülmektedir.

Android mobil telefonlarının Sunucu 1 e gönderdiği isteklere gelen cevap süreleri yine aşağıdaki şekildeki grafikte gösterilmiştir. Sonuç olarak simülasyon ortamındaki istemciler ve sunucular arasındaki iletişim başladığını andan itibaren (5. saniye), her iki mobil telefon grubuna Sunucu 1 den gelen cevap süreleri artmaya başlamaktadır. Simülasyon ortamındaki istemci grubu 1 de istemci grubu 2 ye göre daha çok istemci bulunduğu ve istemci grubu 1 – sunucu grubu 1 arasındaki iletişimden istemci grubu 2 – sunucu grubu 2 arasındaki iletişimden daha yoğun olduğu için, Android mobil telefon grubu 1 e gelen cevap süresi Android mobil telefon grubu 2 ye gelen cevap süresine göre 5. saniyeden sonra daha çok artış göstermektedir. 17. saniyeden sonra ise simülasyon ortamındaki istemciler ve sunucular arasındaki trafik sona erdiğinden,

Android mobil telefon gruplarının Sunucu 1 den aldığı cevap süresi yavaş yavaş 5. saniyeden önceki haline dönmektedir.



Şekil 4: Android mobil telefonları ve sunucu arasındaki iletişim

6. GELECEK ÇALIŞMALAR

Geliştirilen sanal sınama ortamı Korunaklı Omurga Ağlarının (Protected Core Network – PCN) simülasyonunda ve bu ağlar için geliştirilen ürünlerin testlerinde kullanılabilir. Bu ağlar güvenlik önlemlerinin en üst düzeyde olduğu, ağa sızma girişimlerine karşı yüksek direnç sağlayan omurga ağlarıdır. Korunaklı omurga ağında paket trafiği şifrelenmiş halde dolaşır. Ağdaki herhangi bir cihaza bağlanabilmek kimlik belirleme ve yetkilendirme protokollerini başarıyla geçmeyi gerektirir. Ayrıca, omurga ağının sınırlarında ağa sızmayı önlemek amacıyla ateş duvarları (firewall) ve ağa sızma tespit

cihazları (intrusion detection systems) gibi cihazlar bulunur. Korunaklı omurga ağları için güvenlik cihazları, protokoller, servis kalitesine duyarlı yönlendirme algoritmaları ve trafik düzenleme algoritmaları büyük önem taşır. Bu ürünlerin geliştiricileri sanal sınama ortamını kullanarak bu ürünlerin tek tek performansını test edebileceği gibi, ürünlerin birbirleriyle olan etkileşimini de test edebilir. [17]

Sanal sınama ortamı kablosuz ağ protokollerini desteklemek suretiyle geliştirilebilir. Çeşitli kablosuz ağ, radyo ve düğüm hareket modelleri (node mobility models) geliştirilip mevcut ağ yığınının belirli noktalarına entegre edilebilir. Ayrıca, simüle edilen ağa, belirli ölçütler baz alınarak trafik sıkışıklığı olmayan yüksek bant genişliğine sahip bazı kısımlarının sadeleştirilmesiyle (bu kısımlardaki akış hesaplarının basitleştirilmesiyle) daha küçük ölçekli bir ağ elde edilebilir.

7. SONUÇ

Geliştirilen sanal sınama ortamı gerçek cihazların ağ simülasyon ortamına entegre edilmesine izin vererek, gerçek zamanlı çalışma ve ölçeklenebilirlik kabiliyeti sağlayarak kullanıcılarla geliştirdikleri ağ cihaz, uygulama ve protokollerini net bir biçimde sınama imkanı sunmaktadır. Geliştirilen gerçek zaman kriterli dağıtık ajan altyapısıyla, simülasyon çekirdeği gerçek zaman kriterleriyle çalışabilir hale getirilmiş ve yük dağılımı kesintisiz olarak yapılmıştır. Hibrit modeller kullanması sayesinde büyük ölçekli ağlarda da güçlü bir performans sunmakla beraber gerçek cihazlarını test etmek isteyen geliştiriciler için gerekli detay seviyesini paket bazında sağlamaktadır. Büyük ölçekli ağların simülasyonunda ve bu ağlara entegre edilecek yeni cihaz, uygulama ve protokollerin geçerlilik ve performans testinin yapılmasında çok değerli bir ortam sağlamaktadır. Kazanılan bu altyapı ile ağ sistemleri için simülasyon tabanlı tedarik ihtiyacı karşılanabilir.

8. KAYNAKÇA

- [1] J. L. Bastos, J. Wu, N. Schulz, R. Liu, A. Monti, (2007), “Distributed simulation using the virtual test bed and its real-time extension”, <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1358027>, *Proceedings of the 2007 Summer Computer Simulation Conference*
- [2] Michael Liljenstam, Jason Liu, David Nicol, Yougu Yuan, Guanhua Yan, Chris Grier, (2006), “RINSE: the Real-time Immersive Network Simulation Environment for Network Security Exercises”, *Journal Simulation*
- [3] Junlan Zhou, Zhengrong Ji, Mineo Takai, Rajive Bagrodia, “MAYA: Integrating Hybrid Network Modeling to the Physical World”, *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*

- [4] Andy Bavier, Nick Feamster, Mark Huang, Larry Peterson, Jennifer Rexford, (2006), “In VINI Veritas: Realistic and Controlled Network Experimentation”, *SIGCOMM ACM*
- [5] Xin Liu, Andrew A. Chien, (2004), “Realistic Large-Scale Online Network Simulation”, *Proceedings of the 2004 ACM/IEEE conference on Supercomputing*
- [6] Jason Liu, Scott Mann, Nathanael Van Vorst, Keith Hellman, (2007), “An Open and Scalable Emulation Infrastructure for Large-Scale Real-Time Network Simulations”, *26th IEEE International Conference on Computer Communications*
- [7] Yong Liu, Francesco Lo Presti, Vishal Misra, Don Towsley, Yu Gu, (2003), “Fluid Models and Solutions for Large-Scale IP Networks”, *Proceedings of the 2003 ACM SIGMETRICS International Conference*
- [8] Benyuan Liu, Yang Guo, Jim Kurose, Don Towsley, Weibo Gong, (1999), “Fluid Simulation of Large Scale Networks: Issues and Tradeoffs”, *ACM Technical Report*
- [9] Yong Liu, Francesco Lo Presti, Vishal Misra, Don Towsley, Yu Gu, (2004), “Scalable Fluid Models and Simulations for Large-Scale IP Networks”, *Journal on ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*
- [10] Cameron Kiddle, Rob Simmonds, Carey Williamson, Brian Unger, (2003), “Hybrid Packet/Fluid Flow Network Simulation”, *Proceedings of the 17th Workshop on Parallel and Distributed Simulation (PADS)*
- [11] Yu Gu, Yong Liu, Don Towsley, (2004), “On Integrating Fluid Models with Packet Simulation”, *23th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*
- [12] Jason Liu, (2006), “Packet-Level Integration of Fluid TCP Models In Real-Time Network Simulation”, *Proceedings of the 38th Conference on Winter Simulation*
- [13] George F. Riley, Talal M. Jaafar, Richard M. Fujimoto, (2002), “Integrated Fluid and Packet Network Simulations”, *Proceedings of the 10th IEEE International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunications Systems*
- [14] Ralf Sesseler, Sahin Albayrak, (1998), “JIAC IV – An Open, Scalable Agent Architecture for Telecommunications Applications”, DAI-Labor, TU Berlin
- [15] DAI-Labor, TU Berlin, (2010), “JIAC – Java Intelligent Agent Componentware Version 5.1.0 Manual”, DAI-Labor, TU Berlin
- [16] Stephan Schmidt, Rainer Bye, Joël Chinnow, Karsten Bsufka, Ahmet Camtepe, Sahin Albayrak, (2008), “Application-level simulation for network security”, *Proceedings of the 1st International Conference on Simulation Tools and Techniques for Communications, Networks and Systems & Workshops*
- [17] Roland Schutz, (2006), “Protected Core Networking – Concepts and Challenges”, Thales Group

FÜZE SİSTEMLERİ İÇİN GELİŞTİRİLECEK BENZETİMLERDE TAKTİK ÇEVRE BENZETİMİ KULLANIMI

Hüseyin KUTLUCA ^(a), Turgay ÇELİK ^(b), Günay ÖZKAN ^(c)

^{(a) (b)(c)} MilSOFT Yazılım Teknolojileri A.Ş., 06531, Teknokent ODTU,

{ hkutluca tcelik, ,gozkan }@milsoft.com.tr

ÖZ

Benzetim sistemleri günümüzde tedarik öncesi ve sonrası analiz, gerçek sistemlerin eğitim ihtiyaçlarını karşılama, görev sonrası analiz gibi çeşitli amaçlarla risk ve maliyet azaltımı için kullanılmaktadır.

Günümüzde orta ve yüksek irtifa füze sistemlerinin geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Bu kapsamda füze sistemleri için benzetim sistemlerine ihtiyaç duyulacağı aşikardır. Benzetim kabiliyeti füze geliştirme aşamasında etkinlik analizi, gerçek atışlar sonrası kaydedilen verilerin görsel ortamda analizi amacıyla kullanılabilir Ayrıca taktik eğitim simülatörü olarak tek bir taşınabilir bilgisayarda ya da dershane ortamında kurulu olarak karşılıklı veya bilgisayara karşı eğitim olanağı sağlayabilir.

Bir sistem için geliştirilecek benzetim sistemi, modelleme perspektifiyle incelendiğinde üst seviye iki temel bileşene ayrılabilir. İlk bileşen odaklanılan unsurun ve alt parçalarının modellerini içerirken ikinci bileşen unsurun etkileştiği dış ortam ve ortamdaki unsurların modellerini içerir. Odaklanılan unsurun modelini içeren ilk bileşen, yüksek çözünürlüklü modeller içerir ve farklı sistemler için yeniden geliştirilmek zorundadır. İlk bileşenin tersine, genellikle daha düşük çözünürlüklü modeller içeren, çevresel ortamı sağlayan ikinci bileşenin her sistem için yeniden geliştirilmesi teknik ve ekonomik açıdan anlamlı değildir.

Bu makalede yüksek çözünürlüklü bir füze sistemi benzetiminin HLA uyumlu mevcut bir taktik çevre benzetimi ile entegrasyonu konusunda kavram ve öntasarım seviyesinde bilgi verilecektir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek Seviye Mimari, Birlikte Çalışabilirlik, Tekrar Kullanılabilirlik, Kavramsal Birlikte Çalışabilirlik Seviyeleri, Referans Nesne Modelleri, Taktik Çevre Benzetimleri, Benzetim Sistemlerinde DDS Kullanımı

USING TACTICAL ENVIRONMENTS IN MISSILE SYSTEM SIMULATIONS

ABSTRACT

Simulation systems are being used for acquisition, design, analysis and training of real systems to reduce risk and cost.

Nowadays, development of medium and high altitude missiles has been accelerated. In these concepts, simulation systems are necessary. Simulation capability can be used for efficiency analysis and visualization of recorded data. Furthermore, simulation systems can be used as training of missiles in laboratory environment or single laptop solution.

There are two components for simulation: The focus object including its sub-parts and environment that focus object will interact with. Focused objects model should be high resolution. However, the environment and interacting objects don't need to be as high resolution in terms of technical and cost parameters.

This paper presents concepts and design for use possibility of existing tactical environment simulation with high resolution missile system simulation.

Keywords: Multi-resolution Modeling, Reusability and Interoperability, High Level Architecture, Tactical Environment Simulation

1. GİRİŞ

Benzetim sistemleri günümüzde tedarik öncesi ve sonrası analiz, gerçek sistemlerin eğitim ihtiyaçlarını karşılama, görev sonrası analiz gibi çeşitli amaçlarla risk ve maliyet azaltımı için kullanılmaktadır.

Günümüzde orta ve yüksek irtifa füze sistemlerinin geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar hız kazanmıştır. Bu kapsamda füze sistemleri için benzetim sistemlerine ihtiyaç duyulacağı aşikardır. Füze benzetim sistemlerinde, esas füze modelinin yanı sıra, füzeyle etkileşimi olabilecek hedeflerin, Elektronik Harp cihazlarının, coğrafi ortamın ve hava koşullarının da modellenmesine ihtiyaç vardır. Füze sistemlerinin ihtiyaç duyduğu bu ortamlar Taktik Çevre Simülatörleri ile karşılanmaktadır[1][2].

Taktik Çevre Benzetimleri, benzetim sistemlerinde modellenen ana unsurlar dışındaki unsurlar ve çevre için jenerik modeller sağlamak için kullanılırken, gerçek sistemlerde, sistemin etkileştiği çevre ve diğer sistemler için sınama ve eğitim amaçlı benzetim modelleri sağlamak için kullanılır[3][4].

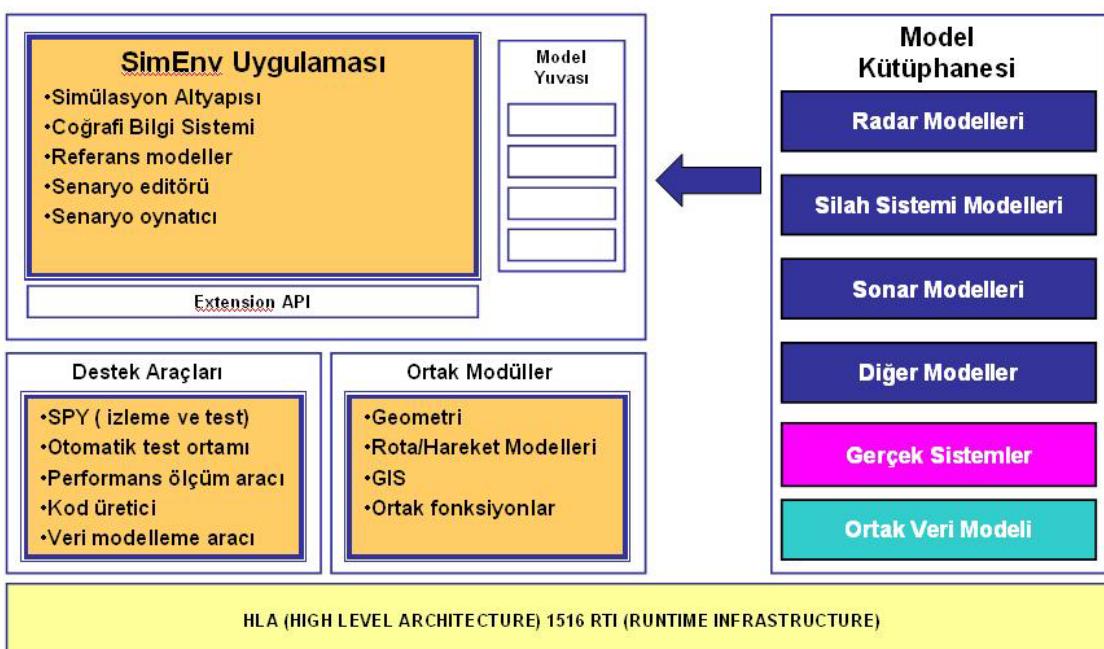
Benzetim kabiliyeti füze geliştirme aşamasında etkinlik analizi, gerçek atışlar sonrası kaydedilen verilerin görsel ortamda analizi amacıyla kullanılabilir.

Ayrıca taktik eğitim simülörü olarak tek bir taşınabilir bilgisayarda ya da dershane ortamında kurulu olarak karşılıklı veya bilgisayara karşı eğitim olağrı sağlayabilir.

Bu makalede daha önce Müşterek Elektronik Harp simülasyonlarında kullanmak amacıyla geliştirilmiş altyapının füze geliştirme aşamasında nasıl kullanılabileceği ve bu kullanımın getireceği faydalar anlatılacaktır.

2. TAKTİK ÇEVRE BENZETİMİ UYGULAMA ÇATISI

MilSOFT tarafından geliştirilmiş yeniden kullanılabilir Taktik Çevre Benzetimi Uygulama Çatısı [5] Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1 MilSOFT Taktik Çevre Benzetimi Altyapısının Genel Görünümü

Geliştirilmiş olan Taktik Çevre Benzetimi Uygulama Çatısı, HLA 1516 uyumlu olup bunun üzerine Model kütüphanesi, simülasyon altyapısı, coğrafi bilgi sistemi, referans modeller, senaryo editörü ve senaryo oynatıcı gibi modüller içermektedir.

Simülasyon altyapısı, uygulama çatısı kullanıcılarak geliştirilmiş uygulamaların modülerliğinin sağlanması ve başka mimarilere entegrasyonun kolaylaşması için, HLA RTI arayüzü bir soyutlama katmanı ile geliştirilen uygulamadan ayırmaktadır.

Simülasyon Altyapısı üzerinde çalışan uygulamalar, HLA RTI'a özel herhangi bir kesim içermez. Uygulamaların farklı bir mimariye entegrasyonu için sadece Simülasyon Altyapısının uyarlanması yeterli olacaktır.

Simülasyon Altyapısı, bir Simülasyon Motoru ve Dağıtık Nesne katmanından oluşur. Simülasyon Altyapısı, benzetim modeli geliştirmek için jenerik bir temel oluşturur. Uygulama çatısı, Simülasyon Altyapısı kullanılarak, taktik çevre ve sentetik ortam sağlama, birlikte çalışma gibi amaçlarla TENA[6], DIS[7], DDS[8] gibi diğer mimarilere kolayca entegre edilebilir.

Uygulama çatısı, değişik coğrafi koşullarda çalışmaya olanak sağlamak için bir Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) kullanır. CBS yardımıyla harita allığı desteği de geleceğinden daha iyi ve ifade gücü yüksek bir görsel ortam sağlanması hedeflenmektedir. CBS, görüş hattı sorgulama, yükseklik sorgulama, standartlara uygun sembol gösterimi, taktik şekil, hava sahası, kaplama alanı gösterimi gibi yetenekleri sağlar.

Referans Modeller uygulamasıyla, veritabanı destekli olarak yeni unsur modelleri oluşturulabilir, mevcut unsur modellerinin parametreleri güncellenebilir veya modeller silinebilir

Senaryo editörü, CBS destekli harita allığı yardımıyla referans modellerde tanımlanan unsur modelleri kullanılarak senaryolar oluşturulup veritabanı veya dosya sisteminde saklanmasına olanak sağlar. Senaryo oluşturulurken senaryo ortamı olarak değişik coğrafi ortamlar ve atmosferik koşullar seçilebilir. Senaryo editöründe hava durumu, bulut durumu, gün zamanı(gece/gündüz), rüzgar şiddeti ve yönü belirlenebilmektedir.

Senaryo oynatıcı, gereksinimler kısmında sıralanan senaryo oynatma gereksinimlerini karşılayan modüldür. Senaryo koşumu esnasında tüm haberleşme HLA 1516 standardına uygun olarak benzetim altyapısı üzerinden yapılır. Dağıtık senaryo koşumunda veri alışverişi RTI üzerinden yapılır. Senaryo sadece tek bilgisayarda koşturulduğunda veri iletişimi için RTI kullanılıp kullanılmayacağı konfigüre edilebilir.

Senaryo oynatıcı uygulamasının bir parçası, sistemler için skop ekranlarını sağlayan 2B Skop görüntüleme modülüdür. 2B Skop görüntüleme modülü, model kütüphanesindeki modeller gibi HLA 1516 standardına uygun olarak geliştirilmiş kendi SOM'u olan bir modeldir.

Senaryo oynatıcının bir diğer parçası, 3 boyutlu görselleştirmeyi sağlayan 3B görüntüleme modülüdür. 3B görüntüleme modülü de diğer modeller gibi HLA 1516 standardına uygun olarak geliştirilmiş, kendi SOM'u olan bir modeldir.

Taktik çevre simülatörü altyapısının diğer bir unsuru model kütüphanesidir. Modeller, model kütüphanesinde saklanır, oluşturulan senaryolara göre model kütüphanesinden çekilerek simülasyon motoru üzerinde bir federede veya daha çok federeye dağıtılarak

çalıştırılırlar. Gerektiği durumda bir federe sadece bir modeli çalıştıracak şekilde ayarlanabilir.

Jenerik unsur modelleri geliştirmek amacıyla tasarlanan model kütüphanesindeki modeller, ortak bir veri modeli aracılığıyla bilgi alışverişinde bulunurlar. Bu ortak veri modeli, HLA Federasyon Veri Modeli (Federation Object Modeli – FOM) biçiminde tanımlanır.

3. FÜZE GELİŞTİRME AŞAMALARI

3.1. Kavramsal Tasarım

Bu aşamada geliştirilmesi hedeflenen füzenin ihtiyaç analizini yapılmaktadır. Bu aşamada füze sisteminin kullanım alanları, potansiyel hedefleri, mevcut radar sistemleri, ESM sistemleri ve hard-kill soft-kill karşı tedbirlerin incelenmesi gerekmektedir. Bu aşamada Taktik Çevre Benzetimi kullanılarak uluslararası piyasada mevcut radarlar, ESM sistemleri ve hard-kill soft-kill karşı tedbirler ile senaryolar oluşturulup geliştirilecek füzenin etkinliğinin artırılması için tasarım geri bildirimleri alınabilir. Hatta geliştirme aşamasındaki diğer unsurlar bile modellenerek gelecekteki etkinlik analizleri yapılabilir.

3.2. Geliştirme Aşaması

Bu aşamada ön tasarım ve detaylı tasarımında alınan kararların füze etkinliğine etkileri analiz edilebilir. Tasarımdaki farklı alternatiflerin karşılaştırılması, seçilen alternatifin potansiyel güçlü yanları ya da zaaflarının analizi için simülasyon modelinin geri bildirimleri olacaktır.

3.3. Test ve Doğrulama

Bu aşamada gerek ilk prototip çıkmadan önce füze kontrol algoritmaları simülasyon ortamında test edilebilir ve doğrulama yapılabilir.

Ayrıca ilk prototip üretilip testler yapıldıktan sonra test senaryoları mevcut simülasyon altyapısı kullanılarak oluşturulur ve beklenen sonuçlar belirlenir.

Test atışlarından sonra gerçek veriler simülasyon ortamına yüklenerek verilerin analizi yapılabilir. Bu aşamada beklenen değerlerden sapmalar incelenir ve gerekirse mevcut simülasyon modeli güncellenir.

3.4. Kullanım ve Eğitim

Geliştirilen füze sisteminin etkinliğinin yanında bu füzenin kullanım eğitiminin verilmesi ve taktik ortamda etkin kullanılması son derece önemlidir. Bu aşamada Taktik Çevre Benzetimi kullanıcının bilgisayara karşı ya da karşı savunma yapan Elektronik Harp kabiliyetleri olan bir unsura karşı saldırı teknikleri geliştirmesi açısından

önemlidir. Ayrıca sınıf ortamında savunma kuvvetlerine karşı mevcut füzenin kullanımı senaryosu yine Taktik Çevre Benzetiminin yetenekleriyle ile etkin bir şekilde sağlanabilir.

MEHSIM ürününde Taktik Çevre Benzetiminin yanı sıra, teorik eğitim için kullanılan bir e-öğrenme uygulaması mevcuttur. Bu uygulamanın altyapısı geliştirilecek füze sistemi için teorik eğitim uygulaması sağlamak için kullanılabilir.

4. TAKTİK ÇEVRE BENZETİMİ İLE ÇÖZÜM YAKLAŞIMI

Bir sistem için geliştirilecek benzetim sistemi, modelleme perspektifiyle incelendiğinde üst seviye iki temel bileşene ayrılabilir. İlk bileşen odaklanılan unsurun ve alt parçalarının modellerini içerirken ikinci bileşen unsurun etkileştiği dış ortam ve ortamdaki unsurların modellerini içerir. Odaklanılan unsurun modelini içeren ilk bileşen, yüksek çözünürlüklü modeller içerir ve farklı sistemler için yeniden geliştirilmek zorundadır. İlk bileşenin tersine, genellikle daha düşük çözünürlüklü modeller içeren, çevresel ortamı sağlayan ikinci bileşenin her sistem için yeniden geliştirilmesi teknik ve ekonomik açıdan anlamlı değildir.

Bu aşamada MilSOFT Taktik Çevre Benzetiminde dış ortam ve dış ortamdaki unsurlar için yeterli çözünürlükte modellerin olduğu değerlendirilmektedir.

MilSOFT Taktik Çevre Benzetimi Uygulama çatısı kullanılarak geliştirilecek füze için detaylı bir füze modelinin geliştirilmesi ve bu modelin mevcut Taktik Çevre Benzetimiyle entegre edilmesi füze sistemi için benzetim yeteneği sağlanması için yeterli olacaktır. Burada geliştirilecek modelin bir defada geliştirilmesi yerine spiral bir döngü ile aşamalı olarak iyileştirilmesi ve modelle gerçek füzenin davranışlarının belirli hata limitleri içersinde aynı olması sağlanabilir.

5. SONUÇ

Gerçek sistemlerin geliştirilmesi uzun zaman ve maliyet gerektiren bir faaliyettir. Bu süreçte erken aşamalarda alınan tasarım kararlarının sonraki aşamalarda değiştirilmesi yüksek maliyetlere sebep olacaktır. Bu sebeple böyle sistemlerin Taktik Çevre Benzetimleri desteğiyle projenin ilk aşamasından itibaren modellenmesi önemlidir. Daha önceden geliştirilmiş olan mevcut altyapının füze geliştirme için yeniden kullanımı hem mevcut kabiliyetlerin yeniden kullanımı hem de geliştirilecek ürüne sağlayacağı katkı açısından önemlidir.

6. KAYNAKÇA

- [1] T. Çelik, G. Gökdögan, HLA Uyumlu Taktik Çevre Uygulama Çatısı İçin Sistem Analiz Çalışması, USMOS 2009
- [2] Lockheed Martin, NxTES Tactical Environment Simulation, www.lockheedmartin.com/data/assets/sts/ProductCards/NxTES_PC.pdf.
- [3] H Kutluca, İ. E. Çetin, E. Deniz, B. Bal, MilSOFT DDS Arakatmanı ve DDS'in Savaş Yönetim Sistemlerinde Simülasyon Amaçlı Kullanımı, USMOS 2007.
- [4] T.Celik, A.Ç.Çavdar, (2010), "A Case Study On Interoperability Between Simulation And Command Control Systems", SAVTEK 2010, 5th Defense Technologies Conference.
- [5] T.Celik, G.F.Gokdogan, K.Ozturk, B.Sarıkaya, (2011), "An HLA Based Tactical Environment Application Framework", Journal of Defense Modeling and Simulation (Kabul edildi, 2011 Eylül'de yayınlanması beklenmektedir.)
- [6] J.R. Noseworthy, (2008), "The Test and Training Enabling Architecture (TENA) Supporting the Decentralized Development of Distributed Applications and LVC Simulations", Proceedings of the 2008 12th IEEE/ACM International Symposium on Distributed Simulation and Real-Time Applications.
- [7] D.L. Neyland, (1997) "Virtual Combat: A Guide To Distributed Interactive Simulation", Stackpole Books.
- [8] H. Kutluca İ. E. Çetin, M. Kilic, U. Cakir, (2007), "Developing MilSOFT DDS Middleware "OMG Real-time And Embedded Systems Workshop, Arlington, VA USA.

ÜÇ BOYUTLU VE DAĞITIK MİMARİLİ BİR ATEŞ DESTEK BENZETİMİ

Ahmet Turan DEĞERLİ^(a), Remzi AKDAĞ^(b)

^(b) Deniz Kuvvetleri Komutanlığı, ANKARA, degerli.a1318@dzkk.tsk.tr

^(a) Deniz Eğitim ve Öğretim Komutanlığı, YALOVA, akdagremzi@hotmail.com

ÖZ

Deniz Topçu Ateş Desteği (DTAD), amfibi harekâti öncesi düşman tesislerini imha etme, düşman harekât kabiliyetini azaltma ve çıkarmayı müteakip sahile yapılan kara harekâtını desteklemede hayatı bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, DTAD eğitimlerinin kalitesinin, güncel bilişim teknolojilerinden en üst seviyede faydalananarak, düşük maliyetli bir benzetim yazılımı ile nasıl geliştirilebileceği üzerinde durulmuştur. Üzer birlikler tarafından icra edilen direkt ve endirekt kara bombardımanı görevlerine hazırlık maksadıyla yapılan eğitimlerde kullanılabilecek, bilgisayar destekli, gerçek görüş şartlarının, coğrafi bölgelerin, yer şekillerinin ve harp araçlarının üç boyutlu olarak modellendiği ve ağ alt yapısında birden fazla bilgisayar üzerinde çalıştırılabilen bir benzetim yazılımının temel özellikleri anlatılmıştır. Gerçekleştirmekte kullanılan yöntemler detaylandırılmış ve uygulanan algoritmalar örneklerle açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bezier Eğrileri, Deniz Topçu Ateş Desteği, Dağıtık Mimari, Yapay Sinir Ağları, Yüksek Seviye Mimari (HLA).

A DISTRIBUTED 3-DIMENSIONAL SIMULATION FOR

GUNFIRE SUPPORT

ABSTRACT

Naval Gunfire Support plays a vital role before amphibious assault to destroy enemy's facilities, to reduce enemy's operational reaction and to support ground operation. In this work, ways to improve the effectiveness of the trainings for Naval Gunfire Support Operation, by harnessing current technologies in informatics with low-cost simulation software, are elaborated. The main features of a simulation software, which can be utilized in trainings in order to provide readiness for direct and indirect ground bombardment missions conducted by navy units, which runs in a distributed computing environment, and in real visual conditions, geographic areas, landforms and military

vehicles are modeled in 3D. Realization methodologies are given in detail, and algorithms employed are exemplified.

Keywords: Artificial Neural Networks, Bezier Curves, Distributed Architecture, High Level Architecture, Naval Gunfire Support.

1. GİRİŞ

Bilişim teknolojileri alanında son dönemde meydana gelen gelişmeler, askeri alanlarda faydalansabilecek benzetim olanaklarını da geçmişe nazaran artırmıştır. Ülkemiz ve çeşitli gelişmiş ülkelerin silahlı kuvvetleri, birliklerinin harbe hazırlık seviyelerini belirlemede benzetim uygulamalarından faydalananmaktadır.

Bir amfibi harekâtın, çıkışma ön kuvvet harekâtı, kıyıya hücum ve kıyı başının ele geçirilmesi sahalarının başarıya ulaşması için hayatı öneme haiz konulardan biri, Deniz Topçu Ateş Desteği (DTAD)'nın sağlanmasıdır. Bu desteğin sağlanması için icra edilen direkt/endirekt (sütre gerisi) kara bombardımanı görevinde yer alan personelin, yeni teknolojilerden (örneğin görsel ve ağ destekli yeteneğe sahip benzetim teknolojileri) istifade edilerek eğitilmesi önem arz etmektedir.

Fili olarak icra edilen kara bombardımanı eğitimleri haricinde, kitaplar üzerinden verilen eğitimlerin, eğitilen personelde gerçeklik hissi uyandırmadığı değerlendirilmektedir. Bu nedenle, yapılacak fili eğitimler öncesinde, gerçeğe yakın görsel öğeler içeren bir benzetim yazılımı ile eğitim verilmesi, bahse konu fili eğitimden elde edilecek verimi artıracaktır.

DTAD, çıkışma öncesinde düşman tesislerini imha etmede ve düşman harekât kabiliyetini azaltmada, çıkışma esnasında yapılan hücumu koruma ve desteklemede, çıkışma saatini müteakip sahile yapılan kara harekâtını desteklemede hayatı rol oynamaktadır. Dolayısıyla DTAD'ın müessir bir şekilde kullanılması, oldukça iyi koordine edilmiş bir planlama ve icra gerektirmektedir. Kurulacak koordinasyonun yapı taşlarından bir tanesi, Deniz İleri Gözetleyici (DİG) personel ile atış yapacak gemiler arasında yapılacak muhaberendir. Bu nedenle, DTAD sürecinde görev alacak personelin gerçek şartlarda karşılaşabileceği durumlar konusunda müstereken eğitilebilecekleri bir eğitim ortamı oluşturulması ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu çerçevede, üç boyutlu gelişmiş bir benzetim uygulaması ile söz konusu ihtiyacın etkin olarak giderilebileceği değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme neticesinde; DİG personelinin hedef tespiti, atış isteği hazırlaması, göndermesi, atış gözlemi konusunda eğitilebilmesi ve atışı gerçekleştiren personel ile DİG'lerin müsterek görev icra edebilme ünsiyetlerini pekiştirmek maksatlarıyla bir benzetim yazılımı geliştirilmiştir.

Bu bildirinin kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir. İkinci bölümünde kullanılan yöntemler ve uygulanan algoritmalar detaylandırılmıştır. Üçüncü bölümde, geliştirilen

benzetim yazılımının mimarisi anlatılmış ve benzetimin başarılmış çözümlemesi yapılmıştır. Dördüncü bölümde ise bu çalışmada elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. KULLANILAN YÖNTEM VE ALGORİTMALAR

Bu çalışma çerçevesinde oluşturulan benzetim geliştirme ortamı ile kullanılan yöntem ve algoritmalar, müteakip maddelerde açıklanmıştır.

2.1. Geliştirme Ortamı

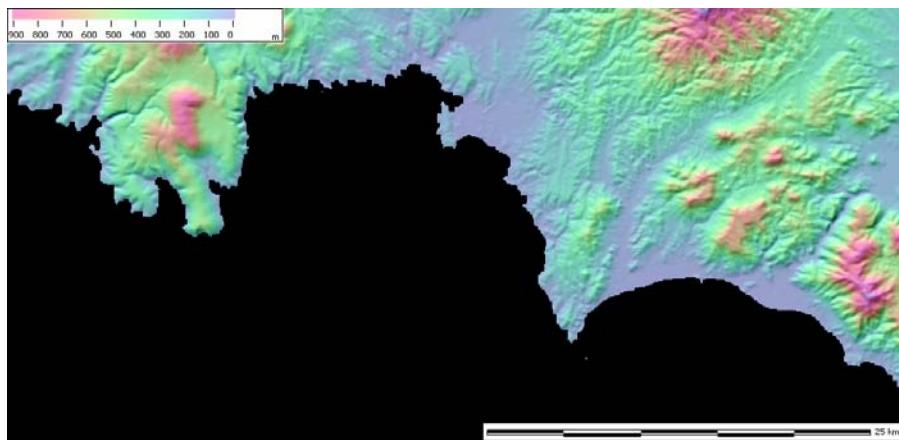
DTAD benzetiminin geliştirilmesinde, kamu kaynaklarının maliyet-etkin kullanımı, firma/marka bağımlılığı olmaması ve güvenlik gerekçeleriyle, açık kaynak kodlu yazılım ve kütüphanelere öncelik verilmiştir.

Bu kapsamda, Java 1.6 yazılım geliştirme dili, Netbeans 6.7 [1] bütünsel geliştirme ortamı, jMonkeyEngine 2.0.1 [2] üç boyutlu oyun motoru, Neuroph 2.2 [3] yapay sinir ağı kütüphanesi ve poRTIco 1.0.1 [4] Yüksek Seviye Mimari (HLA) koşum zaman altyapısı, temel araçlar olarak kullanılmıştır. Ayrıca, Blender [13] modelleme ve canlandırma yazılımı, GIMP[5] grafik/görüntü işleme yazılımı ve MicroDEM[6] coğrafi bilgi sistemi yazılımı, benzetimin geliştirilmesinde faydalanan yardımcı araçlardır.

2.2. Gerçek arazi ve yer şekillerinin benzetim içerisinde modellenmesi

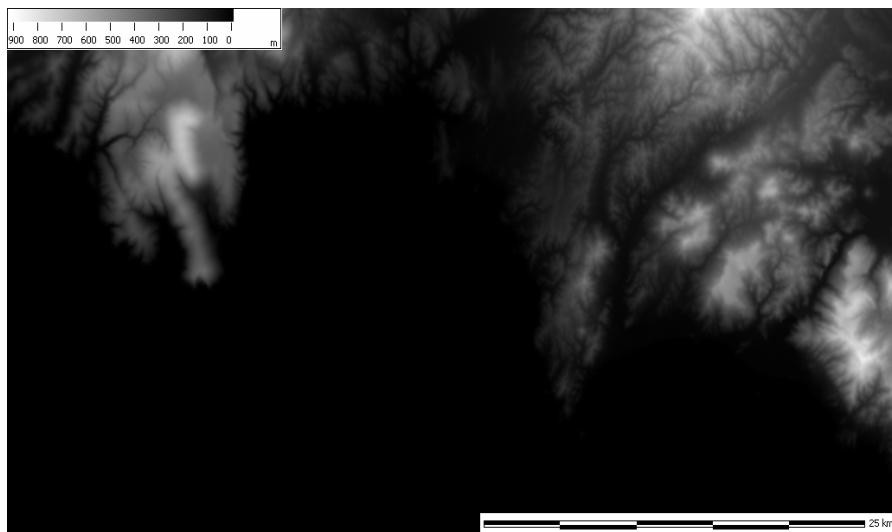
DTAD Harekâti'nın icra edileceği coğrafi bölgenin benzetime eklenmesi işlemi, ABD Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA)'nden temin edilen ve harekât bölgесine ait enlem-boylam ve yükseklik verilerinin, MicroDEM yazılımında haritaya dönüştürülmesi ile sağlanmaktadır. (Şekil 1) [10] Bu çalışmada, örnek olarak Ege Bölgesi'nde bulunan bir coğrafya modellenmiştir. Söz konusu coğrafyanın yükseklik haritasının benzetim içerisinde üç boyutlu olarak sergilenebilmesi için uygun formata dönüştürülmesi (gri tonlamalı olarak düzenlenmesi), MicroDEM yazılımı ile sağlanmıştır. (Şekil 2) [6]

NASA'nın resmi sitesinden elde edilen yükseklik verileri, SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) formatında ve 90'ar metre aralıklıdır. [11] Elde edilen bu yükseklik verilerinin üç boyutlu gösterimde sert iniş-çıkışlara sebebiyet vermemesi maksadıyla, GIMP görüntü işleme yazılımı kullanılarak gerekli görüntü yumuşatma işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. NASA'dan elde edilen veriler kullanılarak oluşturulan harita.

Bu işlemin ardından, kullanılan yükseklik haritasının üç boyutlu görüntü haline getirilmesi, jMonkeyEngine oyun motoru kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. Seçilen bölgenin gri tonlama ile düzenlenmiş görüntüsü.

Seçilen bölgenin benzetim içerisinde üç boyutlu olarak görüntülenmesi ve bitki örtüsünün oluşturulması, üç boyutlu modelleme teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. (Şekil 3)



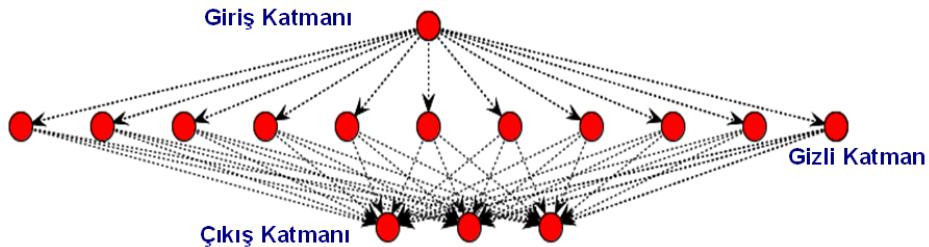
Şekil 3. Seçilen bölgenin üç boyutlu modellenmiş görünümü.

2.3. Top mermisinin menzilinin, irtifasının ve hedefe ulaşma süresinin hesaplanması

Top mermisinin ateşleme sonrasında davranışı, namlunun irtifasına (yükseklik açısı) göre merminin doğru noktaya düşmesi ve hedefe ulaşma süresi, benzetimin gerçekliğini ve eğitimin verimliliğini artırmasından önem arz etmektedir. Hâlihazırda kullanılan menzil cetvelleri, belirli aralıklardaki mermi davranış değerlerini vermektedir. Ancak ayrıntılı hesaplama ihtiyacı ve cetvelde bulunmayan değerlerin de doğru olarak elde edilmesi gerekliliği nedeniyle, benzetimde yapay zekâ konusunun alt disiplini olan Yapay Sinir Ağları kullanılmıştır.

Yapay sinir ağları (YSA), insan beyninin özelliklerinden olan öğrenme yolu ile yeni bilgiler türetebilme, yeni bilgiler oluşturabilme ve keşfedebilme gibi yetenekleri, herhangi bir yardım almadan otomatik olarak gerçekleştirmek amacıyla geliştirilen bilgisayar sistemleridir. [7] Bu ağlar öğrenme, hafızaya alma ve veriler arasındaki ilişkiyi ortaya çıkarma kabiliyetleri ile çeşitli problemlere çözüm üretmektedirler.

Bu çalışma çerçevesinde Neuroph YSA Kütüphanesi [3] kullanılarak, çok katmanlı, ileri beslemeli ve geriye yayılmış bir yapay sinir ağının (Multi Layer Feed Forward Back Propagation Perceptron) oluşturulmuştur. Oluşturulan ağda giriş katmanı (input layer), gizli katman (hidden layer) ve çıkış katmanı (output layer) olmak üzere 3 katman yer almaktadır. Giriş katmanında 1, gizli katmanda 11 ve çıkış katmanında 3 sinir hücresi (neuron) yer almaktadır. (Şekil 4)



Şekil 4. Oluşturulan çok katmanlı, ileri beslemeli ve geriye yayılımlı YSA.

YSA'nın eğitimi maksadıyla, standart Geriye Yayılım Algoritması (Back Propagation Algorithm) kullanılmıştır. Böylelikle her bir eğitim adımımda (iteration) meydana gelen hatanın düzeltme miktarı, önceki katmanlara doğru (geriye) aktarılmıştır. YSA'nın eğitimi neticesinde, ağıın toplam hatasının kabul edilebilir asgari seviyeye indirilmesi sağlanmıştır. Oluşturulan yapay sinir ağında transfer fonksiyonu olarak Tanjant Hiperbolik (tanh) fonksiyonu kullanılmıştır.

YSA girişi olarak Top Namlusu İrtifa bilgisi, çıkışlar olarak da Top Mermisinin Menzili, Top Mermisinin Ulaşacağı Azami İrtifa ve Top Mermisinin Hedefe Ulaşma Süresi belirlenmiştir. Giriş ve çıkışlara ilişkin verileri içeren Eğitim Seti, örnek top menzil cetvelinde yer alan bilgilerden elde edilmiş ve oluşturulan yapay sinir ağının eğitilmesinde kullanılmıştır.

Eğitim setinin çok katmanlı ileri beslemeli ve geriye yayılımlı ağa uygulanması neticesinde 14379 yinelemede (iteration) 0.01 azami hata (max. error) oranı ile öğrenme gerçekleştirılmıştır.

Örneğin, eğitilmiş yapay sinir ağına eğitim setinde olmayan örnek bir Top Namlı İrtifası bilgisi (56,1821 derece) verildiğinde, topun ateşlenmesi sonucunda;

Top Mermisi Menzili: 24545,37 yarda

Top Mermisi Azami İrtifası: 35361,18 feet

Top Mermisinin Hedefe Ulaşma Süresi: 94.20 saniye bilgileri elde edilmiştir.

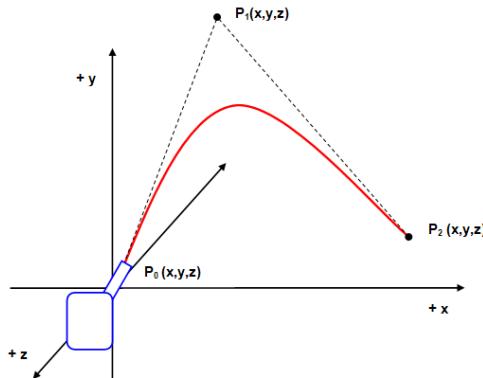
2.4. Top mermisi yolunun çizimi

Bu çalışmada top mermisine ait mermi yolunun çizilmesi işlemleri Bezier Eğrileri kullanılarak gerçekleştirılmıştır. Bezier eğrilerine ait kontrol noktalarının 3 boyutlu ortamındaki koordinatları yapay sinir ağından elde edilen bilgilerle (merminin düşeceği mesafe ve azami mermi irtifası) belirlenmiştir.

Bezier eğrileri ilk olarak 1962 yılında Pierre Bezier tarafından otomobil tasarımlarında kullanılmıştır. Sonraki yıllarda birçok alana uygulanan bu eğriler, bilgisayar grafikleri alanında da yaygın olarak kullanılmaktadır. [8]

DTAD görevinde, topun namlusundan çıkan mermi, eğri bir mermi yolu izleyip hedefe düşmektedir. Geliştirilen benzetim içerisinde de, topun dirisa (istikamet/yön) ve irtifa

(yükseklik) bilgileri değiştirildiğinde, söz konusu mermi yolunun değişmesi (mermi irtifası ve mermi menzilinin artıp azalması) karesel (quadratic) bezier eğrileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. (Şekil 5)



Şekil 5. Üç boyutlu ortamda bezier eğrisi ile mermi yolunun çizdirilmesi.

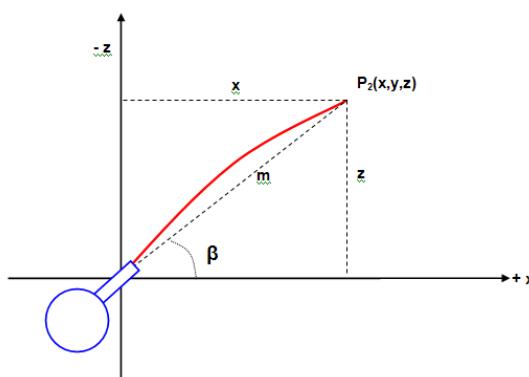
Karesel bezier eğrilerinde 3 adet kontrol noktası bulunmaktadır. Bahse konu kontrol noktaları değiştirilerek eğriye istenilen form verilebilmektedir.

$$B(t) = (1 - t)^2 P_0 + 2(1 - t)t P_1 + t^2 P_2 \quad t \in [0,1] \quad (1)$$

$B(t)$: Eğriyi oluşturan fonksiyon, P_0, P_1, P_2 : Eğri kontrol noktaları

2.5. Top mermisinin gidiş yönünün hesaplanması

Benzetim yazılımı içerisinde top mermisinin gidiş yönünün üç boyutlu ortamda hesaplanması trigonometri formülleri kullanılarak hesaplanmıştır. Top namlusunun dirisa açısının elde edilmesini müteakip, top mermisinin gidiş yönü ve merminin menziline göre varacağı noktanın koordinatları tespit edilmiştir. (Şekil 6)



Şekil 6. Topun dirisa açısına göre mermi gidiş yönünün belirlenmesi.

$$P_2 \text{ noktası } x \text{ koordinatı} = m * \sin(\beta) \\ (2)$$

$$P_2 \text{ noktası } z \text{ koordinatı} = m * \cos(\beta) \quad (3)$$

m = Yapay sinir ağından elde edilen mermi menzili.

3. ÜÇ BOYUTLU VE DAĞITIK MİMARILI DENİZ TOPÇU ATEŞ DESTEĞİ BENZETİMİ

Geliştirilen benzetim yazılımı, kolay kod yazma, dinamik olarak genişleyebilme ve görev yönünden ayrı bileşenlerden meydana gelmiştir.(Şekil 7-8) Söz konusu tüm bileşenler, ana bileşen olan Harekât Ortamı Bileşeni tarafından yönetilmektedir.

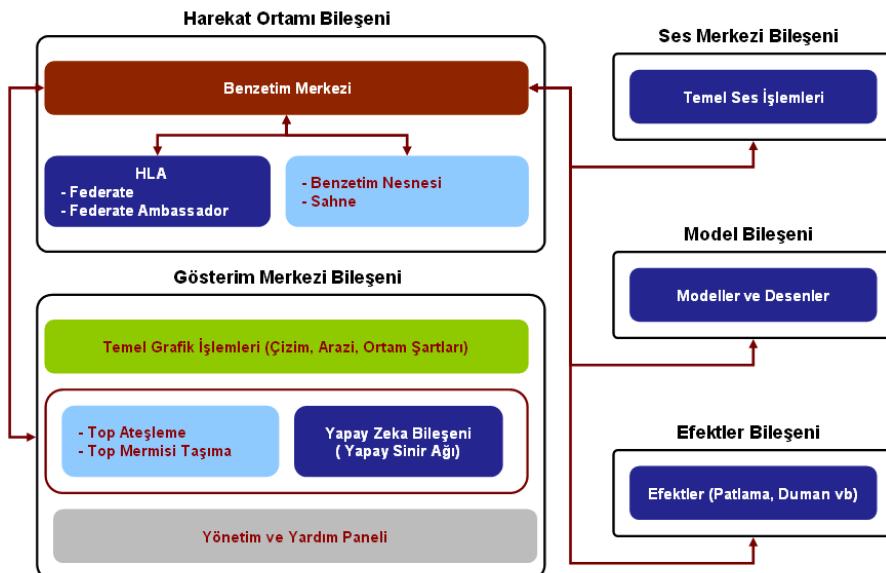


Şekil 7. DTAD Benzetimi

Harekât Ortamı bileşeni içerisinde bulunan Benzetim Merkezi alt bileşeni, benzetimin başlatılmasından itibaren ilklendirme işlemlerini yapar ve diğer bileşenlerin yönetimini gerçekleştirir. Benzetim ana döngüsünün her bir devrinde, sahne, gösterim merkezi ve benzetim de yer alan diğer nesneler sırayla benzetim merkezi tarafından güncellenmektedir. Yüksek Seviye Mimari (HLA) alt bileşeni ise, koşum zaman altyapısının tesis edilmesi, federenin oluşturulması ve dağıtık olarak çalışacak olan federeler ile koşum zaman altyapısı arasında veri alışverişinin sağlanması işlemleri gerçekleştirmektedir. Benzetim Nesnesi sınıfı, benzetime dahil olan her nesnenin bu

sınıftan kalıtım alacağı temel nesnedir. Sahne ise, benzetime dâhil olan nesnelerin takibinin yapılip, son durumlarının güncellendiği birimdir.

3 Boyutlu, Dağıtık Mimarili ve Akıllı Algoritmalar İçeren Deniz Topçu Ateş Desteği Benzetimi



Şekil 8. Benzetimin yazılım mimarisı

Gösterim Merkezi bileşeni, benzetim içerisinde grafik işlemlerinin yapıldığı işlem yükü en fazla olan birimdir. İçerisinde Top Atışı, Yapay Zekâ ve Yönetim Paneli alt bileşenleri bulunmaktadır. Arazi, yer şekilleri ve gökyüzünün oluşturulması işlemleri, deniz ortamının meydana getirilmesi ile ışık ve kamera işlemlerinin tamamı gösterim merkezi içerisinde gerçekleştirilmektedir. Top Atışı alt bileşeninde topun ateşlenmesi ile mermi yolunun çizdirilmesi, top mermisinin o mermi yolu üzerinde hareketi ve hedef üzerinde patlatılması işlemleri gerçekleştirilmektedir. Tüm bu işlemler için gerekli bilgiler, Yapay Zekâ alt bileşeninden elde edilmektedir. Yapay Zekâ alt bileşeni, içerisinde bulunan yapay sinir ağısı ile top mermisinin davranış modelini taklit edebilmekte ve atılan merminin doğru şekil (mermi yörüngesi/yolu) ve sürede hedefe ulaşması için gerekli hesaplamaları yapmaktadır.

Yönetim Paneli alt bileşeni, benzetime ait ortam şartları, ses ve gün ışığı ayarlamalarının yapıldığı, çeşitli kamera özelliklerinin değiştirildiği ve top atışı bilgilerinin izlenebildiği arayüzdür. Ses Merkezi bileşeni, gerekli tüm seslerin benzetime dâhil edildiği ve ilklendirildiği bileşendir. Özel efekt sesleri de bu bileşen içerisinde yer almaktadır.

Benzetim içerisinde kullanılacak modellerin ve bu modellere ait desenlerin bulunduğu birim Model Bileşeni'dir. Efektler Bileşeni ise, benzetim içerisinde oluşturulacak efektlerin (ses efektleri hariç diğer patlama, ateş vb. görsel efektler) oluşturulduğu ve özelliklerinin düzenlendiği birimdir.

3.1. Benzetimin başarım çözümlemesi

Benzetim içerisinde atış yapan topun ve top mermisinin davranışlarının, menzil cetvellerinde yer alan gerçek değerlerle karşılaştırılması neticesinde, % 0.01 hata ile gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Hâlihazırda kullanılan menzil cetvelleri, üreticiler tarafından yapılan testler ve kazanılan tecrübelerden elde edilen verilerle hazırlanmaktadır. Oluşturulan yapay sinir ağı modeli, bu veriler ile eğitildiğinden menzil cetvellerine yansyan bazı fiziki etkileri (örneğin hava sürtünmesi nedeniyle sapma) de içermektedir. Ancak yapılan bu çalışmada deniz durumunun sıfır (dalga yüksekliği 0.5 feet'ten az, rüzgar hızı saatte 3-4 knots ve ortalama dalga boyu 1.5 feet) [9] olduğu ve platformun ortam şartlarından etkilenmediği (geminin meyil, trim vb. yapmadığı) varsayılmıştır. Ortam şartları söz konusu modele yansıtıldığında, benzetimin sadakat seviyesinin artacağı değerlendirilmektedir.

Coğrafi bölgelerin oluşturulmasında kullanılan verilerin (enlem-boylam ve yükseklik) daha hassas seçilmesi, benzetimin gerçekliğini artıracaktır. Ancak, bu durumda artacak çokgen sayısı nedeniyle, benzetimin işletim performansında düşüş meydana geleceği değerlendirilmektedir. Ayrıca, gerçek eğitimlerden elde edilen top atışı ve patlama sesleri ile ülkemizin sahip olduğu gemilere ait üç boyutlu modellerin benzetim içerisinde kullanılmasının, benzetimin gerçekliğini artttığı görülmüştür.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çıkarma harekâtı öncesinde düşman tesislerini imha etme, düşmanın harekât kabiliyetini azaltma, çıkışma hücumunu koruma ve destekleme ile çıkarmayı müteakip yapılan kara harekâtını destekleme görevlerinde DTAD, hayatı rol oynamaktadır

Bu çalışmada, üzer birlikler tarafından icra edilen direkt ve endirekt (sütre gerisi) kara bombardımanı eğitimlerinde kullanılabilecek, bilgisayar destekli, gerçek görüş şartlarının, coğrafi bölgelerin, yer şekillerinin ve harp araçlarının üç boyutlu olarak modellendiği, ağ alt yapısında birden fazla bilgisayar üzerinde çalıştırılabilen bir benzetim yazılımı geliştirilmiştir.

Dünya üzerindeki herhangi bir coğrafi bölge, benzetim içerisinde üç boyutlu olarak modellenemektedir. Bu yetenek, normal şartlarda tatbikat icra edilmesi mümkün olmayan, ancak ülke alâka ve menfaatleri doğrultusunda harekât icra edilmesi muhtemel sahalar üzerinde, kara bombardımanı tecrübelerinin yapılabilmesine olanak verebilecektir. Gerçek şartlara uygun modellenmiş üç boyutlu bir harekât ortamında

askeri personele eğitim verilmesi, olası bir harekât durumunda reaksiyon seviyesini artıracaktır.

Hâlihazırda, sütre gerisi atışları, benzetim içerisinde, topun menzil cetvellerinden elde edilen verilerin yapay zekâ yöntemleriyle işlenmesi suretiyle gerçekleştirilmektedir. Yazılımın geliştirilmesine devam edildiği takdirde, alan uzmanlarından ve diğer bilimsel çalışmalarдан elde edilecek veri, formül, kaynak ve bilgilerle, balistik hesaplamaları da içerecek şekilde, sütre gerisi atışlarının çözümlenmesi mümkün olabilecektir. Ayrıca, değişik hava ve deniz durumu şartları da modellenerek eğitilen personele değişik ortam şartlarında eğitim imkânı sağlanmış olacaktır.

5. KAYNAKÇA

- [1] Netbeans Integrated Development Environment (IDE), www.netbeans.org, (Son Erişim: 19 Ocak 2011)
- [2] JMonkeyEngine, 3-Dimentional Game Engine, <http://jmonkeyengine.org>, (Son Erişim: 19 Ocak 2011)
- [3] Neuroph, Java Neural Network Framework, <http://neuroph.sourceforge.net> (Son Erişim: 19 Ocak 2011)
- [4] The poRTIco Project, Open Source HLA RTI Implementation, <http://porticoproject.org> (Son Erişim: 19 Ocak 2011).
- [5] GNU Image Manipulation Program, www.gimp.org (Son Erişim: 19 Ocak 2011)
- [6] Guth, P., Micro Digital Elevation Models (MicroDEM) Software, U.S. Naval Academy.
- [7] Öztemel, E. (2003), *Yapay Sinir Ağları*, Papatya Yayıncılık, İstanbul, 29.
- [8] Güdükbay, U., Sinop, A.K.,(2006), Hesaplamaya Dayalı Geometri, *Türkiye Bilişim Ansiklopedisi*, Papatya Yayıncılık, İstanbul, 445-448.
- [9] Pierson - Moskowitz Sea Spectrum (Sea State Table), http://www.eustis.army.mil/WEATHER/Weather_Products/seastate.htm (Son Erişim: 10 Nisan 2011).
- [10] NASA Shuttle Radar Topography Mission, www2.jpl.nasa.gov/srtm (Son Erişim: 13 Nisan 2011)
- [11] Reuter, H.I, Nelson, A., Jarvis, A., (2007), An Evaluation of Void Filling Interpolation Methods for SRTM Data, *International Journal of Geographic Information Science*, 983-1008.
- [12] Blender, Open Source 3D Content Creation Suite, www.blender.org (Son Erişim: 13 Nisan 2011)

DAĞITIK SİMÜLASYON SİSTEMLERİNDE PERFORMANS ANALİZ ALTYAPISI

Cemil Akdemir^(a), Cüneyt Ay^(b), Hüsnü Karakucuk^(c), Yasemin Timar^(d)

(a) (b) (c) (d) TÜBİTAK BİLGE BTE, P.K. 21 41470 Gebze / Kocaeli,
cemil.akdemir@bte.tubitak.gov.tr
cuneyt.ay@bte.tubitak.gov.tr
husnu.karakucuk@bte.tubitak.gov.tr
yasemin.timar@bte.tubitak.gov.tr

ÖZ

Dağıtık simülasyon sistemlerinin önemli özelliklerinden biri tekrarlanması zor veya imkansız olan durumların simülasyonunu gerçekleştirmeleridir. Simülasyon gerçekleştirken bu durumların kayıt edilmesi, bu durumların simülasyon sonrası pek çok kez tekrarlanabilmesini, incelenmesini ve sistemin performansının analiz edilebilmesini sağlamaktadır. Simülasyon sonrası oluşturulan analiz verileri karar destek sistemleri için önemli girdiler oluşturmaktadır. Bu bildiri kapsamında HLA1516 tabanlı dağıtık simülasyon sistemlerinde kullanılabilen senaryo koşumu boyunca simüle edilen platform bilgilerinin ve gerçekleşen önemli olayların, senaryo koşumu sonrasında analiz edilmesi için geliştirdiğimiz performans analiz altyapısı anlatılmaktadır. Performans analiz yazılım altyapısının öne çıkan özelliklerinden biri senaryo koşumu esnasında gerçek zamanlı olarak iletlenen mesajları simülasyon ortamının performansını olumsuz yönde etkilemeyecek, sistem yükünü artırmayacak şekilde kayıt işlemini gerçekleştirmesidir. Alt yapının önemli bir modülü olan kayıt veritabanı ise, ham halleri ile sayısallaştırma, grafik çizimi ve karşılaştırma işlemlerine uygun olmayan kayıt verilerini, analize uygun biçimde yapılandırmak için kullanılan veriyapılarını ve fonksiyonları içermektedir. Yazılım altyapısının grafik modülünde ise, yapılandırılan verilerin 2 boyutlu grafiklerinin çizilmesi ve karşılaştırılması sağlanmaktadır. Geliştirdiğimiz performans analiz altyapısı tanımlanan özelliklerin tümünü birleştirmesi ile benzer eylem sonrası gözden geçirme (After Action Review, AAR) sistemlerinden büyük farklılık göstermekle birlikte dağıtık tabanlı simülasyon sistemlerine uyarlanabilir olmasıyla geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Eğitim Simülasyonu, HLA1516, Kayıt ve Oynatma, Performans Analizi, Simülasyon Veritabanı.

PERFORMANCE ANALYSIS FRAMEWORK FOR DISTRIBUTED SIMULATION SYSTEMS

ABSTRACT

One of the most important properties of the distributed simulation systems is to provide simulating systems and situations which hardly reoccur. Recording of the simulation data during an exercise makes it possible to inspect and analyze the system performance repeatedly after the simulation. Analysis of the collected simulation data produces important inputs for After Action Review and Decision Support Systems. Within the scope of this paper, the after action review software framework ,which we have developed for the purpose of recording platform information and important events occurring within a scenario-run in an HLA1516-based simulation system, is explained in detail. One important feature of our framework is collecting simulation data in real-time during an exercise without causing any performance penalty or affecting the overall system. The essential data subsystem has a relational database system which contains the data structures and functions suitable for analytical comparison and graphical statements , since with their initial format, the recorded data is not ready for use analytical drawing and comparison operations. Within the graphics subsystem user interfaces for drawing 2D graphics of the processed data for analyzing operations are developed in the framework. Our performance analysis framework is distinguished from the similar works in AAR by combining all of those features and it has a wide range of application area as being customizable to be used in distributed simulation systems.

Keywords: After Action Review (AAR), HLA1516, Performance Analysis, Simulation Database, Training Simulation.

1. GİRİŞ

Özellikle eğitim amaçlı kullanılan benzetim uygulamalarının önemli bir özelliği, eğitim seansının ardından önemli bir değerlendirme safhası içermesidir. Değerlendirme safhası eğitim boyunca gerçekleşen durumların, olayların, tepkilerin ve etkileşimlerin gözden geçirilmesini, bunların analiz edilmesini ve sayısal olarak eğitimin değerlendirilmesini içerir. Dağıtık simülasyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılan HLA/RTI altyapılarında değerlendirme süreci üç ana adımda yapılmaktadır; (1) Eğitim boyunca kayıt yapılması , (2) Kayıt verilerinin veritabanına aktarılması, (3) Veritabanından kayıtların analiz ve tekrar oynatma amacıyla okunması. Varolan eğitim sonrası değerlendirme sistemlerine örnek olarak, General Dynamics tarafından geliştirilmiş olan S2Focus “Analyzer”[1], MAK tarafından geliştirilmiş olan MAK Data Logger[2] ve Pitch firması tarafından geliştirilmiş olan Pitch Recorder[3] sayılabilir. Bu araçların tümü eylem sonrası gözden geçirme (After Action Review, AAR) amacıyla

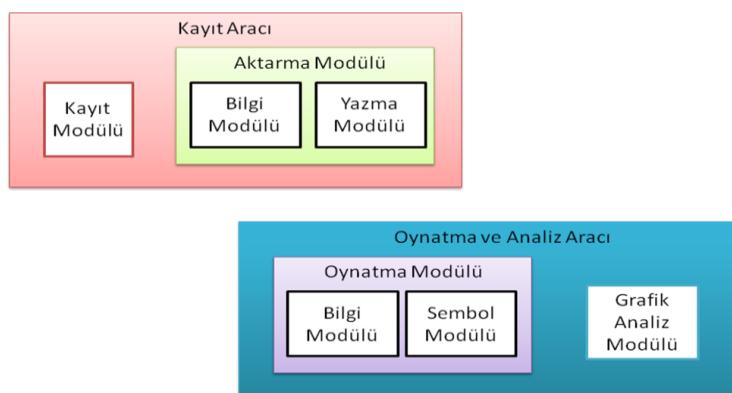
geliştirilmişlerdir. Her birinde kayıt edilen simülasyonun yeniden oynatılması sağlanabilir. Ancak bu yazılımlar, sayısal verilerin analitik değerlendirilmesini sağlayacak 2 boyutlu grafikler içermemektedirler. Veritabanı kullanım imkanları kısıtlıdır. Performans analizinde temel kriterlere göre sayısal verilerin incelenmesi, karşılaştırılması ve analitik çıkarımların yapılması esastır. Veritabanı kullanımı S2Focus'ta mümkün değilken MAK Data Logger uygulaması ise sadece verileri veritabanına aktarma yeteneğine sahiptir. Yapılan çalışmada diğer AAR yazılımlarından farklı olarak tüm kayıt, oynatma ve analiz imkanlarını beraber içeren bir yazılım altyapısı geliştirilmiştir.

Bu bildiride tanıtılan eğitim sonrası değerlendirme altyapısının ayırt edici teknik özellikleri; (1) HLA/RTI altyapısında kullanılan Federate Object Module (FOM) da tanımlı veriyapıları ile otomatik veritabanı şeması oluşturulması, (2) veritabanından analiz işlemlerinde kullanılacak C++ sınıflarının otomatik oluşturulması, ve (3)analiz işlemlerinde faydalı olan grafiksel gösterim olanaklarının sunulması, olarak sıralanabilir.



Şekil 1. Kayıt ve Analiz İşlemleri

Performans analiz altyapısında kayıt, veri aktarma , oynatma ve analiz işlemlerini gerçekleştiren 2 ana yazılım geliştirilmiştir; (1) Kayıt Aracı ve (2) Oynatma ve Analiz Aracı. Bu yazılımların alt modülleri Şekil 2.,de görülmektedir.



Şekil 2. Performans Analiz Araçları

2. VERİ YAPILARI

Dağıtık simülasyon alt yapılarında kullanılan HLA, 90'lı yılların ortasında geliştirildi ve 1998'de HLA 1.3[4] olarak standard haline getirildi. Bu standart, 2 önemli revizyon geçirdi: IEEE 1516-2000[5] ve IEEE1516-2010[6]. HLA standartlarında, birlikte çalışacak simülasyon sistemlerinin veri alış verisi için kullanacakları veri yapıları ve modellerin standartları Nesne Modeli Şablonu (Object Model Template - OMT) tanımlamaları ile belirlenmiştir[7]. HLA içinde Federasyon Nesne Modeli (Federate Object Model - FOM) olarak adlandırılan bu model, HLA federasyonuna dahil olan federeler tarafından ortaklaşa kullanılır. Federasyonun alt yapısı için yapısal bir obje modelinin bulunması ve bu modelin FOM standardına uygun olarak tanımlanması;

- Federasyona dahil federelerin birbirleri ile iletişimini ve veri alış verisinde ortak ve anlaşılır bir yapı içerdiği,
- Federelerin yayındıktarı ve aldıktarı bilgiler nazarında yeteneklerinin tanımlanmasını sağladığı,
- HLA nesne modelleri yaratılması için yazılım araçları geliştirmesine olanak verdiği için vazgeçilmez bir önem taşımaktadır[7].

Federasyon geliştirme sürecinin (FEDEP) kavramsal modeli geliştirme safhasında FOM oluşturulmaya başlanır. Kavramsal modelleme sürecinde kullanılabilen pek çok araç arasında Temel Nesne Modeli (Base Object Model) de sayılabilir[8].

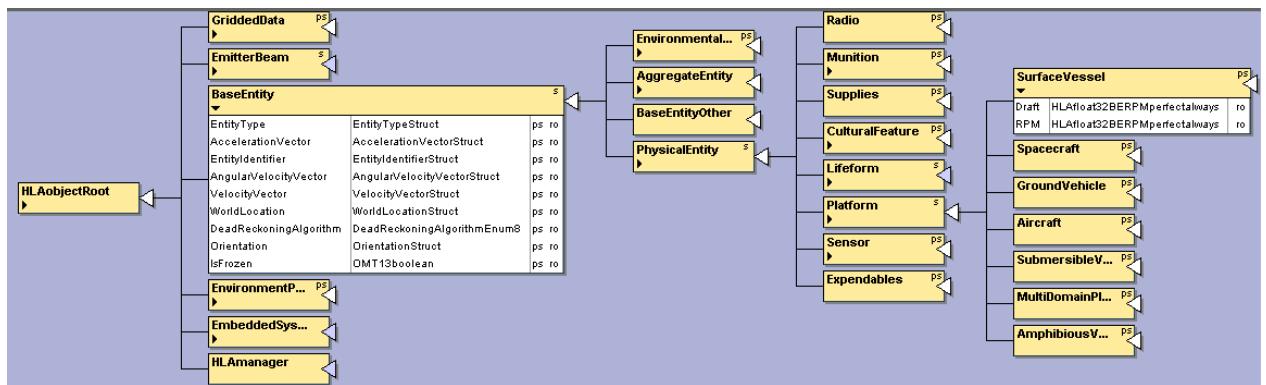
Simülasyon koşumu esnasında HLA federasyonunda kullanılan veri yapıları, koşum sonrası yapılacak değerlendirmeler için esas veri yapılarını oluşturmaktadır. Bu veri yapılarının değerlendirme altyapısına en uygun formatlardan biri olan veri tabanı yapılarına aktarılması analiz olanaklarını büyük ölçüde geliştirmekte ve zenginleştirilmektedir.

2.1. FOM Nesne ve Mesaj Tanımları

HLA federasyonuna katılan federeler simülasyon koşumu boyunca yayinallyayacakları ve abone olacakları (publish/subscribe) nesne ve etkileşim sınıfları ile ilişkilendirilirler. Bir federe için oluşturulan nesne modeline Simülasyon Nesne Modeli (Simulation Object Model) adı verilirken tüm federelerin ilişkilendirildikleri nesne ve etkileşim modelleri FOM'da sınıf tanımlaması olarak bulunmaktadır. HLA1516 FOM tanımlaması nesne tabanlı modellerle uyumlu olan XML formatında yapılmaktadır.

FOM oluşturmada varolan FOM'ların temel olarak kullanılması ve geliştirilmesi yöntemi tercih edilebilir. Bu yöntem federasyonun ve/veya simülatörlerin birlikte çalışabilirlik ve tekrar kullanılabilirlik özelliklerini pekiştirmektedir. Özellikle askeri benzetim projelerinde Realtime Platform Reference FOM (RPR FOM) [9] yaygın olarak kullanılmaktadır. Aşağıdaki şekillerde RPR-FOM'un geliştirilmiş bir durumunu içeren bir FOM'un bir bölümü görülmektedir. Şekil 3'de görülen nesnelerin hiyerarşik

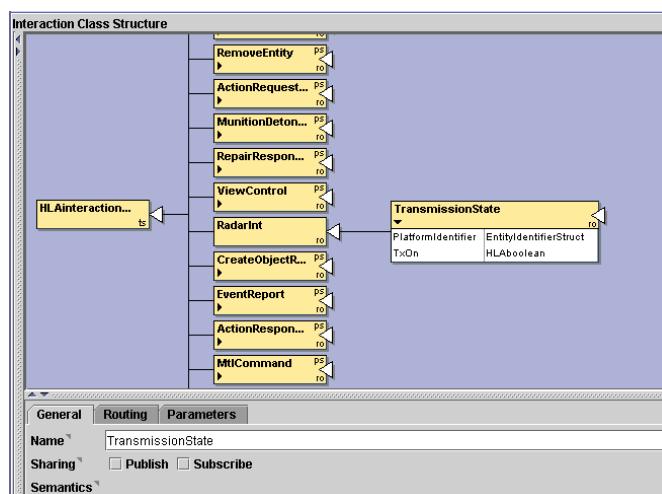
olarak tanımlanması ile alt sınıfların, üst sınıfların tüm özniteliklerine sahip olması sağlanmıştır. SurfaceVessel nesnesi, BaseEntity'de bulunan WorldLocation, VelocityVector, Orientation vb. bilgileri içermektedir.



Şekil 3. FOM Nesne Tanımları

Şekil 4'de görülen etkileşim tanımlamalarında hiyerarşinin yanında nesnelerle ilişkili parametrelerin nasıl tanımlandığına örnek verilmektedir. SurfaceVessel nesnesinin radarının transmisyon durumu bu etkileşim ile ifade edilmektedir.

Nesnelerin öznitelikleri ve etkileşimlerin parametrelerinin veri tipleri temel basit veri tipleri (doğal sayı, gerçek sayı, boolean vb.) olabildiği gibi, diziler veya birkaç basit veri tipinin birlikte bulunduğu karmaşık veri tipleri de olabilir. Karmaşık veri tiplerinin kayıt, oynatma ve analiz işlevlerinde basit tiplere indirgenerek yapılmaktadır.



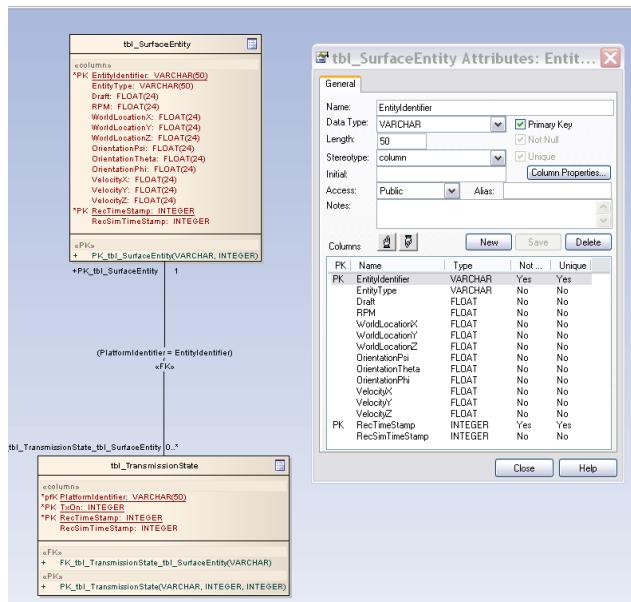
Şekil 4. FOM Etkileşim Tanımları

2.2. FOM-Veritabanı Eşlemesi ve Veritabanı Oluşturulması

Analiz işlemleri için veritabanı kullanmanın çok daha verimli olduğu açıktır. FOM'da tanımlı nesne ve etkileşimlerin veritabanına aktarılması için ilk adım her nesne ve etkileşim için tablo tanımlamaktır. Bu tablonun sütunları kayıt edilecek, oynatılacak ve

analiz adilecek öznitelikleri içerecek biçimde tanımlanır. Tüm tablolarda kayıt zamanı ve simülasyon zamanı bilgilerini içerecek sütunların bulunması önemlidir. Bölüm 2.1'de örnek olarak verilen nesne ve etkileşim için örnek veritabanı şablonu Şekil 5'deki gibidir. Bu tanımlamalar Unified Modelling Language (UML) tabanlı yazılımlar kullanılarak yapılmıştır. UML aracının otomatik olarak veritabanı şeması oluşturma özelliği ile güncelleme ve tekrar kullanılabilirlik özellikleri sağlanmıştır. Karmaşık tipler basit tiplere indirgenerek tablolarda ifade edilmektedir. Benzetimi yapılan nesnenin koşum esnasında birden fazla örneği olmuş ise her bir varlık için benzer yapıda tablolar otomatik olarak oluşturulabilmektedir. Karmaşık tiplerin yapısına göre her karmaşık tip için ayrı tablo tanımlanarak birincil ve yabancı anahtar (Primary Key-Foreign Key) ilişkisi ile tablolar arası bağlantı sağlanabilmektedir.

Veritabanı şemasının belirlenmesinden sonra analiz amaçlı sorgular için gerekli prosedürler (Stored Procedure) veritabanına eklenir. Her koşum için ayrı bir içerik tanımlıdır. İllerleyen bölümlerde anlatılacağı gibi kayıt yükleme işlemleri esnasında tablolar temizlenmekte ve kayıt verileri ile doldurulmaktadır.



Şekil 5. Veritabanı şeması

3. KAYIT

3.1. Kayıt Edilecek Verilerin Belirlenmesi

Kayıt uygulaması tarafından performans ve analiz işlemlerinde değerlendirilmek üzere simülasyon ortamından hangi nesne ve etkileşim sınıflarının kayıt edileceği bir

konfigürasyon dosyası ile belirtilmektedir. Bu dosyada nesne sınıflarına özellik düzeyinde abone olunurken, etkileşim sınıflarına sınıf düzeyinde abonelik söz konusudur. Özellikle kayıt edilen verinin veritabanına aktarımından sonra veriler arasında ilişkisel sorguların yapılabilmesi amacıyla, nesne ve etkileşimler içerisinde yer alan bu tipte özellik ve parametrelerin bu konfigürasyon dosyasında belirtilerek kayıt edilmesi önem taşımaktadır.

Şekil , kayıt uygulaması tarafından kayıt edilen bir etkileşim ve nesne sınıfı bilgisini içermektedir. Bu örnekte SampleObject sınıfının primaryKey özniteligi ile SampleInteraction etkileşiminin foreignKey parametresi simülasyon ortamında aynı tip veri ile temsil edilip veri, veritabanına aktarıldıkten sonra da bu iki tablo arasındaki sorgular içerisinde ilişki kurulması amacıyla kullanılan alanları temsil etmektedir.

```
<Interaction FullName="HLAinteractionRoot.SampleInteraction">
    <Parameter ParamName="foreignKey" />
    <Parameter ParamName="parameter2" />
</Interaction>

<Object FullName=" HLAobjectRoot.SampleObject">
    <Attribute AttribName="primaryKey" />
    <Attribute AttribName="attribute2" />
</Object>
```

Şekil 6. Nesne ve Etkileşim Tanımı

3.2. Kayıt İşlemi

Kayıt federesinin dahil olduğu federasyon tarafından ihtiyaç duyulan yaşam döngüsü akışını sağlaması önemlidir. Bu akış simülasyonda belirli bir işlemin devam edebilmesi amacıyla federasyona dahil olan tüm federelerden bir yanıt alınmasını bekleyen işlemleri içernektedir. Kayıt federesi, bu tip işlemler için gerekli olan nesne ve etkileşimleri alarak, çevrimin uygun şekilde tamamlanabilmesi amacıyla gerekli etkileşim ve nesneleri simülasyon ortamına gönderebilme yeteneğine sahiptir.

Simülasyon verilerinin analizlerinin düzgün şekilde yapılabilmesi düzgün sırada ve şekilde etiketlenmelerini gerektirmektedir. Simülasyon sisteminde zaman işletimi, sistem gereksinimlerine bağlı olarak gerçek zamandan farklı bir şekilde olabilmektedir. Örneğin, koşum esnasında hızlı şekilde gerçekleşmesi istenen aksılarda simülasyon zamanı gerçek zamana göre daha büyük ölçekte işletilebilmektedir. Bazı sistemlerde, simülasyon akışı durdurulup kaldığı yerden tekrar işletme devam etme olanağı sunulduğu gibi daha karmaşık sistemler etiketlenen önemli olay anlarına koşum esnasında ileriki bir zamanda tekrar dönüşü de mümkün kılmaktadır. Simülasyon zamanı olarak bahsedilen bu zaman yukarıda belirtilen olaylar gözönüne alınarak işletilmektedir.

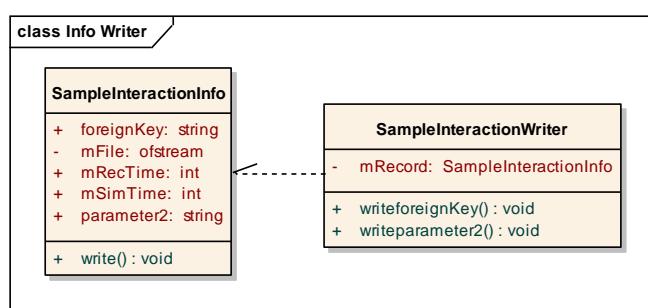
Simülasyon zamanından bağımsız olarak veriler gerçek zaman değerlerine göre analiz edilmek istenebilir. Bu durumda simülasyon saatinin durdurulması ya da geri alınması

gibi işlemlerin analiz zaman etiketlerini etkilememesi gereklidir. Bu amaçla kayıt federesi simülasyon zamanının yanında ayrı bir zaman ileşterek kayıtları hem simülasyon zamanı ile hem de gerçek zamanlı olarak etiketlemektedir. Analiz esnasında ise kayıtlar için hem gerçek zaman etiketi hem de simülasyon zamanı etiketi sergilenmektedir. Örnek olarak ilk 10 dk. boyunca koşturulup sonraki 5dk. boyunca durdurulan bir koşum için, toplam kayıt zamanı 15 dk. olacak ve analiz sırasında ilk 10 dk. boyunca gerçek zaman ve simülasyon zamanı etiketleri aynı seyredenken 10.dk'dan itibaren simülasyon zamanı değeri 00:10:00 üzerinde kalırken gerçek zaman etiketi 00:15:00 değerine kadar ilerleyecektir.

Kayıt federesi konfigürasyon dosyasında belirtilen tüm nesne ve etkileşimleri herhangi bir çözümleme (decode) işlemi yapmadan belirtilen iki zaman etiketi ile birlikte bir dosyaya aktararak kayıt etmekte ve koşumun sonlanması ile birlikte kayıt işlemini de sonlandırmaktadır.

3.3. Kayıt Verilerinin Veritabanına Aktarılması

Kayıt edilen her nesne ve etkileşim sınıfı için bu sınıfların veritabanındaki ilgili tabloya aktarılmasını sağlayacak C++ sınıfları otomatik kod üretme teknikleri ile üretilmektedir. Her bir nesne ve etkileşim sınıfı tipi için 2 ayrı sınıf üretilmektedir. Bu sınıflardan ilki nesne veya etkileşimin sahip olduğu özniteliklere karşı gelen alanları içeren bilgi sınıfı olup bu sınıf ayrıca kaydın zaman etiketlerini de saklayacak alanları içerir. Bu sınıf sahip olduğu alanları bir dosyaya virgül ayrımlı olarak yazar ve üretilen bu dosya daha sonra veritabanındaki ilgili tabloya veri olarak aktarılır. Üretilen diğer sınıf olan çözücü sınıf ise, kayıt dosyasından okunan her bir çözümlenmemiş simülasyon verisini çözümleyip her bir parametrenin bilgi sınıfı içindeki karşı gelen alana atanmasını sağlar.



Şekil 7. Bilgi ve Çözücü Sınıfları

Çözümlenen ve dosyalara aktarılan veriler bu halleri ile veritabanında karşı gelen tablolara aktarılmaya hazır hale gelmiş olurlar.

Çözümlenen ve dosyalara aktarılan verilerin analiz amaçlı veritabanına aktarılmasından önce veritabanında bu verileri tutacak olan tablolar ve bu tablolar üzerinde çalıştırılacak olan sorgular hazır hale getirilmelidir. UML tasarım aracı kullanılarak eşleştirilmesi

yapılan nesne ve etkileşimlerin aktarılacağı tablo scriptleri bu araç kullanılarak oluşturulur. İhtiyaca uygun olarak yazılmış olan saklı yordamlar da ayrı bir script dosyasında saklanmaktadır. Veri çözümleme işlemini bitiren kayıt uygulaması daha sonra bu scriptler vasıtasisile analiz veritabanının sunucuda yapılandırmasını, tabloların ve prosedürlerin oluşturulması işlemlerini gerçekleştirir. Kayıt uygulaması son olarak hazır hale getirdiği veritabanı içerisinde kayıt dosyasından oluşturduğu verileri içeren virgül ayrımlı dosyaları aktarır. Böylece kayıt edilen verilerin analiz amacıyla veritabanına aktarımı tamamlanmış olur.

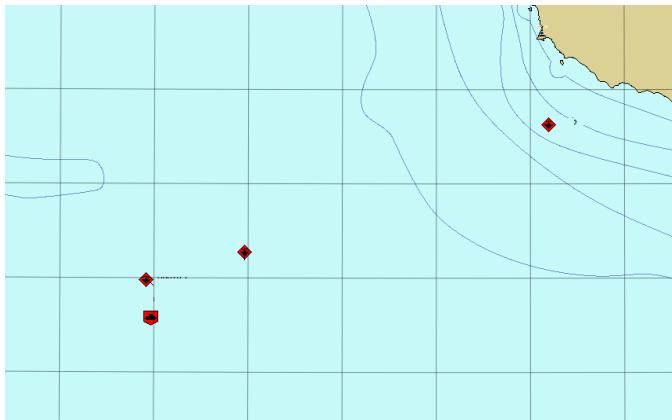
Kayıt edilen ve veritabanına aktarılmış olan veriler üzerinde performans ve analiz işlemlerine başlanmadan önce bazı işlemlerin yapılması gerekebilir. Bu işlemler, koşum esnasında bazı zamanlarda geçersiz değer alabilen kayıtların temizlenmesi, sorguların hızlandırılması amacıyla belirli tablolarda yer alan belirli alan değerlerinin başka tablolarda yer alan değerler ile değiştirilmesi ya da geçiş amacıyla yeni tablolardan/görünümlerin üretilmesi gibi işlemleri içermektedir. Bahsedilen tüm bu işlemler, ihtiyaçlar doğrultusunda yazılmış bir script dosyasının veri tabanı aktarma işleminden hemen sonra uygulama tarafından çalıştırılması ile sağlanmaktadır. Bu işlem sırasında güncellenen ya da silinen tüm veriler kullanıcıya işlem sonrasında raporlanarak kayıt edilen veri üzerindeki değişikliklerin takip edilebilmesi sağlanmıştır. Bu işlemin uygulama tarafından yapılması kullanıcı seçimine bağlı olup, kayıt dosyası üzerinde değil de aktarılmış veri üzerinde işlem yapıldığı için istenen herhangi bir zamanda orjinal kayıt tekrar kullanıma alınabilmektedir.

4. TEKRAR OYNATMA

Çalışma kapsamında kayıt edilen ve veritabanına aktarılan verilerin koşum sonrasında tekrar oynatılması ve analiz edilebilmesi amacıyla Tekrar oynatma ve analiz uygulaması da geliştirilmiştir. Bu uygulama temel olarak hareketli platformların harita alanı üzerinde sergilenmesi ve belirlenen olay ve bilgilerin yine zaman eksenini üzerinde 2 boyutlu grafikler olarak analiz edilmesi yeteneklerini içermektedir. Platform hareketlerinin harita üzerinde görsellenmesi amacıyla S57 harita formatını destekleyen bir harita kütüphanesi geliştirilmiş ve platformlar bu kütüphane kullanılarak oluşturulan taktik saha üzerinde görsellenmiştir.

S57 harita kütüphanesi, S-57 veri formatındaki dosyaların katmanlarını okumak, coğrafi koordinat piksel, piksel coğrafi koordinat dönüşümlerini yapmak ve harita verilerini iki boyutlu grafiksel olarak gösterime hazır hale getirmek amacıyla hazırlanmış bir yazılım kütüphanesidir. S57 kütüphanesi birden fazla S-57 dosyası okuma imkanı sağlar. Ayrıca kuzey batı ve güney doğu köşe coğrafi koordinatları verilerek S-57 harita verilerini alt parçalara bölebilir. Bundan başka haritayı istenilen çözünürlükte ve koordinat aralığında resim olarak da çıktı verebilme yeteneklerini içermektedir.

Veritabanında bulunan her bir platform haritada tipine göre değişik semboller ile ifade edilir. Ayrıca kayıt oynatma arayüzü kaydı ileri, geri sarma ve kayıttı istenilen zamana gitme olanağı verir.



Şekil 8. Harita Alanı

Sergilenen her platform tipi için gereken C++ sınıfları, otomatik kod üreten bir şablon ile yaratılır. Şablon konfigürasyon dosyası varlıkların haritada gösterilecek simbol resmi, veritabanı ilişkilendirilmesi (sorgu, tablo ismi vb.) gibi parametrelerini içerir. Otomatik kod üretme sayesinde kayıttaki yeni bir platformun verilerinin arayüzde gösterimi oldukça basit hale gelir. Üretilen bu platform simbol sınıfları veri tabanından çekilen kayıt verisini tutmak için ikili buffer mekanizması kullanırlar. Sembol sınıfları içerisinde tutulan bu bilgi sınıfları kayıt sırasında üretilen bilgi sınıfları ile benzerlik gösterir ve yine otomatik kod üretme teknikleri kullanılarak üretilirler.

Kayıt oynatımı esnasında veritabanından sürekli olarak veri çekilmesi süreksizlige ve performans problemlerine neden olabilir. Bu yüzden veritabanından parametrik olarak belirlenen sayı kadar platform verisi çekilmekte ve bu veriler platform simbol sınıflarındaki ikili buffer mekanizmasına aktarılmaktadır. Böylelikle bir yandan belirli bir ana ait kayıtlar harita alanında sergilenirken diğer buffer kullanılarak ileriki zamana ait veriler veritabanından çekilebilmektedir. Görsellenen platform sayısı fazla olabileceği için sorgulama işlemleri bir thread havuzu tarafından yapılır. Bu havuzdaki yeralan thread sınıfları platform nesnelerinden gelen sorgu ve zaman bilgisini kullanarak platform sembollerini içerisinde kullanımında olmayan buffer'ın güncellenmesini sağlarlar.

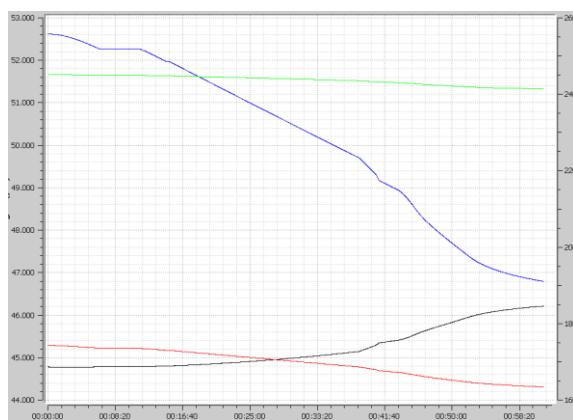
Kayıt oynatma arayüzünde bulunan harita alanı üzerine çeşitli şekilleri çizilerek saha alanları belirlenebilir. Oluşturulan bu şekiller ayrı bir katman olarak kayıt edilebilme ve tekrar harita alanı üzerine yüklenemezliklerine sahiptirler.

Ayrıca analiz işlemlerini kolaylaştmak amacıyla harita alanı içerisinde bulunan bir platformun başka bir platforma veya sabit bir noktaya göre mesafe ve kerteriz ölçümü

yapılabilir. Kerteriz ve mesafe bilgisi kayıt süresince anlık olarak güncellenerek kullanıcıya sergilenmektedir.

5. GRAFİKSEL ANALİZ

Kayıt edilen verilerin harita alanında tekrar oynatma amacıyla görsellenmesinden başka bu verilerin zaman içerisindeki değişimlerinin 2 boyutlu grafiklerle de sergilenmesi mümkündür. Verilerin grafiksel olarak görsellenmesi için kullanımı kolay bir parametre seçme arayüzü oluşturulmuştur. Arayüz ile görsellenmek istenilen platformlar ve bu platformlara ait görsellenebilir bilgiler seçilerek grafiksel analiz yapılabılır. Analiz edilecek verinin zaman aralığını belirlemek için zaman çizelgesi kullanılır. Uygulama seçilen zaman aralığı için seçilen platformların seçili özelliklerini kullanıcıya sergiler.



Şekil 9. Mesafe – Kerteriz Grafiği

Grafiksel Analiz ekranlarında, platformların birbirlerine göre durumları değerlendirilebilir. Parametre seçim arayüzü kullanılarak seçilen iki platformun birbirlerine göre mesafe ve kerteriz bilgisinin görsellenmesine olanak sağlanır. Benzer olarak analiz amaçlı simülasyonlarda gerçek verinin sistem tarafından üretilen bir çözüm ile kıyaslanması gibi işlemler amacıyla da grafiksel analiz pencereleri kullanılabilir. Grafiksel Analiz ekranları, yaklaşma, gezinme gibi analiz işlemlerini kolaylaştıracak işlevselligi sahiptir.

Grafik Analiz kapsamında ayrıca S57 kütüphanesi kullanılarak verilerin belirlenen zaman aralıklarında belirlenen askeri formlara uygun olarak istenilen ölçekte çıktılarının alınması ya da farklı resim formatlarında kayıt edilmesi imkanı da kullanıcıya sunulmaktadır.

6. SONUÇ

Eğitim amacıyla kullanılan dağıtık simülasyon uygulamalarının da dahil olduğu pek çok sistemde simülasyon sonrası değerlendirme ve analiz önemli bir yere sahipdir. Mevcut

eylem sonrası değerlendirme sistemleri simülasyonun tekrarlanmasını sağlarken gerekli olan analiz işlemlerini tam anlamıyla içermemektedirler. Bu eksikliği kapatmak amacıyla geliştirdiğimiz performans analiz aracı, kayıt, veritabanına aktarma ve oynatma ve grafiksel işlemlerinde yüksek bir performans göstermektedir.

Simülasyon koşumu esnasında gerçekleşen kayıt işleminin varolan iletişim trafiğine minimum yük getirmesi sadece gerekli bilgilerin kayıt edilmesiyle önemli ölçüde sağlanmıştır. Saatlerce süren bir senaryonun kayıt verilerin veritabanına aktarılması sadece dakikalar sürmektedir. Kayıtların oynatılması, ileri-geri alınabilmesi ve istenilen zamana atlaması işlemlerinin verimli biçimde gerçekleştirilmesi kullanılan veritabanı ve sorguların yüksek performanslı çalıştığını göstermektedir. Veritabanı kullanımı ile analiz imkanları genişletilmiş ve grafiksel analiz imkanı istenen öznitelikler bazında olduğu gibi hesaplanabilir büyüklükler (mesafe,kerteriz) bazında da yapılabılır duruma getirilmiştir.

Geliştirilen performans analiz altyapısı, diğer AAR yazılımlarından farklı olarak tüm kayıt, oynatma ve analiz imkanlarını beraber içeren yüksek performanslı bir analiz yazılımı alt yapısı sunar.

7. KAYNAKÇA

- [1] S2Focus “Analyzer”, General Dynamics C4 Systems, <http://www.gdc4s.com/>
- [2] MAK Data Logger, MAK Technologies,
<http://www.mak.com/products/datalogger.php>
- [3] PITCH Recorder, Pitch Technologies (Pitch),
<http://www.pitch.se/products/recorder>
- [4] “High Level Architecture Version 1.3”, DMSO, www.dmso.mil
- [5] IEEE: "IEEE 1516, High Level Architecture (HLA)", www.ieee.org, March 2001.
- [6] IEEE: "IEEE 1516-2010, High Level Archi-tecture (HLA)", www.ieee.org, March 2010.
- [7] IEEE: IEEE Std 1516.2-2000, “IEEE Standard for Modelling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA)- Object Model Template (OMT) Specification”, www.ieee.org
- [8] Timar Y., Bıkmaç İ., Taşdelen İ., Akgün S., Dikenelli O. (2007), “Dağıtık Simülasyon Projelerinin kavramsal Modelini Geliştirme çalışmalarında BOM Kullanımı”, USMOS 2007 Bildiriler Kitabı.
- [9] Simulation Interoperability Standards Organization (SISO), (2003) “Guidance, Rationale, and Interoperability Manual for the Real-timePlatform reference Federation Object Model (RPR FOM).

BİR HARP OYUNU SİMÜLASYONUNDА AMFİBİ HAREKÂT UYGULAMASI

Koray Başbilen ^(a), Serdar Çetinkaya ^(b), Levent Kandiller ^(c)

^(a, b) Meteksan Savunma Sanayii A.Ş., Beytepe Köyü Yolu No:3 Bilkent-Ankara,
 {kbasbilen, scetinkaya}@meteksansavunma.com.tr

^(c) Çankaya Üniversitesi, Öğretmenler Cad. No:14 Yüzüncüyıl-Ankara,
kandiller@cankaya.edu.tr

ÖZ

Bu bildiride, geliştirilmekte olan bir harp oyunu simülasyonunda bir harp nevi olarak tanımlanmış olan amfibi harekâta yönelik bilgi verilmektedir. Amfibi harekâtın, kıyıbaşındaki her birliğin sayısal zayıflarını çıktı olarak veren Lanchester benzeri bir model tanımlanmaktadır. Modelin nasıl geliştirildiği, sisteme nasıl entegre edildiği ve simülasyonda nasıl koşturulduğu anlatılmaktadır. Ayrıca, yüksek sadakat seviyesine sahip harp oyunu simülasyonunda genel hatları ile amfibi harekâtın modellenmesi değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Amfibi Harekât, Harp Oyunu, Kara-kara Muharebesi, Muharebe Modeli

AN AMPHIBIOUS WARFARE CASE STUDY

IN A WARGAME SIMULATION

ABSTRACT

In this paper, amphibious warfare, defined as a special warfare as part of a war-game simulation being developed, is discussed. A model, similar to the classical Lanchester model, is defined to calculate the causalities of amphibious units on coast. How the model is developed, how it is integrated in the system and how it is run are explained. Furthermore, this model is evaluated under the amphibious warfare executed within a high confidence level war-game simulation.

Keywords: Amphibious Warfare, Wargame, Land Combat, Combat Modeling

1. GİRİŞ

Bu çalışmada, geliştirilmekte olan bir harp oyunu simülasyonunda bir harp nevi olarak tanımlanmış olan amfibi harekâta ait çıkışma zayıflığı modeli anlatılmaktadır. Amfibi çıkışma zayıflığı modelinin modellenmesi, sisteme entegre edilmesi ve simülasyonda koşturulması için yapılan geliştirme faaliyetlerinde edinilen tecrübeler paylaşılmakta, harp oyunu simülasyonuna sağladığı katkılar irdelenmekte ve kullanılan modelleme ve simülasyon altyapısı sayesinde tekrar kullanılabilirliği değerlendirilmektedir.

Geliştirilmekte olan harp oyunu simülasyonu, stratejik seviye bir simülasyon sistemi olup, farklı tip kullanıcılarla hitap edebilecek uygulamalar içermektedir. Amfibi harekâti, kullanılan platform, silah ve sensörlerin özellikleri, harekât nevi uygulamasının takibi ve sonuçlarının elde edilmesi açısından bu uygulamalardan yararlanmaktadır. Amfibi harekâtının sisteme dâhil edilmesindeki amaç, amfibi birliklerin de sistemde modellenen diğer unsurlar (örneğin gemiler) gibi kullanılarak kontrol edilebilmesini sağlamak değil, bir bölgeye birliklerin çıkarılması, çıkışma birliklerinin zayıflıklarının ortaya konulması, sonrasında ise kalan kuvvetlerin tekrar alınarak (geri yükleme) deniz harekâtının genel gidişatının sekteye ugratılmamasıdır.

2. AMFİBİ HAREKÂT

Amfibi harekât, özel olarak eğitilmiş ve teçhiz edilmiş Kara, Deniz ve Hava Kuvvetleri unsurları tarafından desteklenen bir Müşterek Özel Görev Kuvveti (MÖGK) tarafından, düşman elinde veya kontrolünde bulunan bir kıyıya denizden ve gerektiğinde havadan icra edilen, her komuta seviyesinde detaylı bir planlama ve koordinasyon gerektiren müşterek bir harekâttır. Amfibi harekâtın safhaları aşağıda sunulmuştur:

- **Yükleme ve bindirme safhası**, personel, araç, teçhizat ve ikmal maddelerinin kendilerine tahsis edilmiş olan çıkışma gemi ve araçlarına yüklenikleri ve bindirildikleri safhadır.
- **Deniz geçiş safhası**, yükleme ve bindirilmesi tamamlanmış çıkarılacak olan tüm birliklerin yükleme ve bindirme noktalarından Amfibi Hükum Bölgesi (AHB)'ne kadar denizden intikalini kapsar.
- **Ön kuvvet harekâti**, çıkışma öncesi amfibi hücum bölgesinin tescrit edilmesi, bölgedeki düşman birlikleri hakkında istihbarat edinilmesi, bu birliklerin havadan ve denizden yıpratılması, mayın avlama harekâtı ve SAT/SAS'lar ile çıkışma gemi ve araçları için kıyıya yaklaşma kanalları açılması ve sahildeki mani ve engellerin temizlenmesini içerir.
- **Kıyıya hücum ve kıyibaşının ele geçirilmesi safhası** ise kuvvetlerin amfibi hücum bölgesine varışı ile başlar, önce Kıyı Hücum Hattı (KHH)'nın, sonra Kıyibaşı Hattı (KH)'nın ele geçirilmesi ve kıyibaşının emniyete alınması ile son bulur.

3. HARP OYUNU SİMÜLASYONUNDA AMFİBİ HAREKÂT

Bahse konu harp oyunu simülasyonunda model ağacında yer alan ana modellerden birisi olan unsurlar altında sualtı, suüstü, hava, kara, sabit ve birlik modelleri geliştirilmektedir. Bunlardan suüstü, sualtı, hava ve sabit (kara) unsarlar yüksek bir sadakat seviyesinde modellenmektedir. Oyuncular kendi kontrollerine atanan unsurları, unsurların kabiliyetleri doğrultusunda birebir yöneterek, harp sahası içinde yönlendirmekte ve konumlandırmaktı, sensör yeteneklerini kullanarak kendi taktik resimlerini oluşturabilmekte, muhabere ve link yeteneklerini kullanarak, komuta kontrol, taktik resim ve istihbarat paylaşımı faaliyetlerini gerçekleştirebilmekte, silah yeteneklerini kullanarak düşmana karşı taarruzda bulunabilmekte ve karşı tedbir yeteneklerini kullanarak tehditlere karşı kendini savunabilmektedirler.

Harp oyununda birlik unsurları ise daha düşük bir sadakat seviyesinde modellenmektedir. Birlikler diğer unsurlar gibi yüksek sadakat seviyesine sahip silah, sensör, muhabere ve karşı tedbir kabiliyetlerine sahip değil ancak sadece bünyelerinde bulunan personel, silah ve mühimmat tipleri ve sayılarını içermektedirler. Birliklerin karada ve denizde hareket, istihbarat toplama ve saha kirletme/temizleme kabiliyetleri gibi davranışları nispeten daha basit ve kısıtlı bir şekilde tasarlanarak modellenmektedir. Ayrıca, birliklerin suüstü ve hava unsurlarına bindirilebilmesi, bu unsurlarca taşımaları, taşıma esnasında unsurun aldığı hasar oranında birliklerin zayıfları, kalan birliklerin indirilebilmesi ve bir unsur üzerinde bulunmayan birliklerin unsurlarca tespit edilerek imha edilebilmesi gibi dolaylı kabiliyetler de bu kapsamında modellenmektedir.

Harp oyununda birlikler takım seviyesine kadar kontrol edilebilmekte ve içinde bulundukları askeri hiyerarşiye göre gruplanarak daha üst seviye birlik unsurları oluşturulabilmesi sağlanmaktadır. Yani takımlar gruplanarak bölükler, bölükler gruplanarak taburlar ve taburlar gruplanarak tugaylar oluşturulabilmektedir. Bir tugay, altında hiyerarşik olarak gruplanmış yüzlerce takım birliği ile birlikte bir oyuncu yani tugay komutanının kontrolüne verilebilmektedir. Oyuncu bu sayede kontrolündeki birlikleri, istediği seviyeden yönetebilmektedir. Tüm bu kabiliyetler ile bir amfibi harekâtın yükleme ve bindirme, deniz geçiş, ön kuvvet harekâtı safhaları bu harp oyunu simülasyonunda oyuncularca oynanabilmektedir:

- Birliklerin unsurlara bindirilebilmesi, taşınabilmesi ve indirilebilmesi yetenekleri, unsur üzerindeki birliklerin zayıflık modelleri ile yükleme bindirme ve deniz geçiş safhaları,
- Hava veya suüstü unsurlarının, yükleme bindirme bölgesinde veya kara mevzilerinde bulunan birlikleri sensörleri ile tespit ve silahları ile imha yetenekleri ile yükleme bindirme ve ön kuvvet harekâtının yardımcı safhaları,

- Mevcut mayın harekât nevileri, birliklerin istihbarat toplama, saha kirletme/temizleme ve hava unsurlarının diğer yetenekleri ile kapsamlı bir ön kuvvet harekâti oynanabilmektedir.

Amfibi harekâtın en "can alıcı" aşaması olan kıyıya hücum ve kıyı başının ele geçirilmesi safhası ise oldukça ayrıntılı ve sonuçları birçok etkene dayalı olarak oldukça değişken olan bir safhadır. Bu safha özetle; hava, suüstü ve dost kıyılardaki sabit unsurlarca düşman birliklerinin ateş altına alınmasını, Deniz Unsur Komutanlığı (DUK.lığı) komutasındaki çıkışma gemi/araçları ve helikopterler ile Amfibi Görev Birliği'nin (AGB) kıyıya intikali ve KHH'nın ele geçirilmesi, Kara Unsur Komutanlığı (KUK.lığı) komutasındaki Çıkarma Birliği'nin (CB) kıyıya intikali ve Kıyı Hattı'nın (KH) ele geçirilerek emniyetinin sağlanması içerir. Bu safhaların ana teması, karadaki birlikler arasında geçen büyük bir taktik muharebedir.

Bu kara-kara muharebesinin taktik seviyede birliklerin birebir yönetilerek oynanması çok kapsamlı ve detaylı modelleme faaliyetlerini gerektirmekte ve harp oyunu simülasyonunun amacı dâhilinde değildir. Harp oyununda amfibi harekâtın oynanmasındaki amaç, amfibi harekâtının doğasındaki etmenleri belli bir ölçüde dâhil ederek, karadaki birlikler arasında gerçekleşen kara-kara muharebesinde birliklerin zayıflarının ortaya koyulması ve sonrasında ise kalan kuvvetlerin tekrar alınarak (geri yükleme) deniz harekâtının genel gidişatının sekteye uğratılmamasıdır.

Bu amaçla amfibi ve kara birliklerinin sahip olduğu personel, silah ve mühimmat sayı ve tipleri ile birlikte tanımlanması, bir Amfibi Harekât Bölgesi'ndeki (AHB) birliklerin geliştirilecek bir zayıflık modeline girdi olarak verilmesi ve modelin çıktı olarak verdiği silah, personel ve mühimmat zayıflarının yine birliklere işlenmesi tasarlanarak gerçekleştirılmıştır.

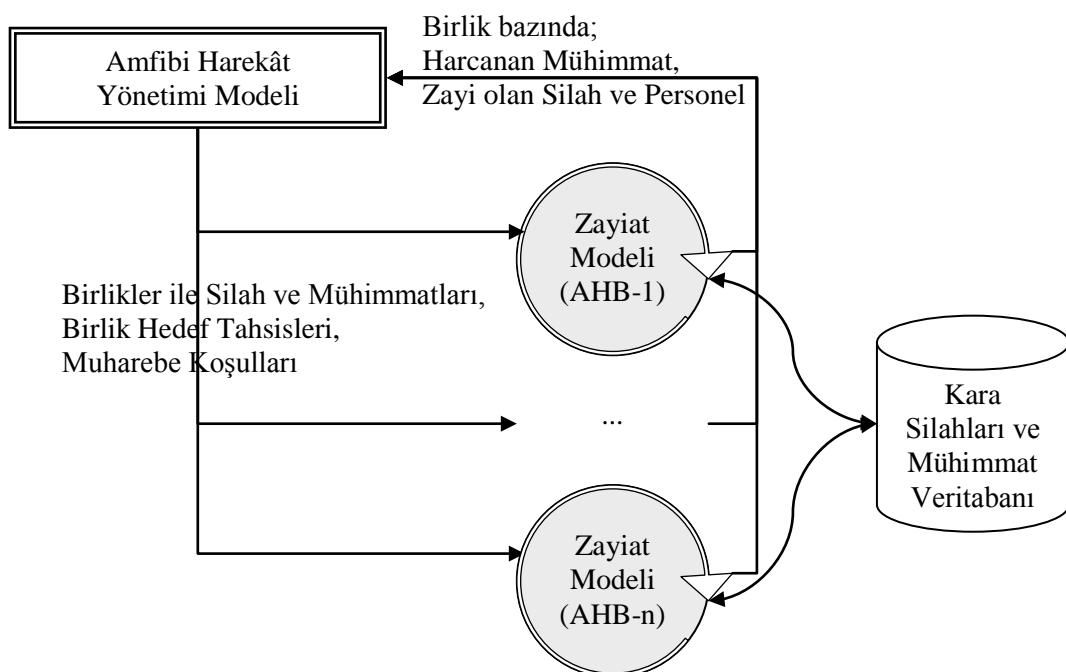
4. AMFİBİ ÇIKARMA ZAYİAT MODELİ

Amfibi Çıkarma Zayıflık Modeli geçerliliğini kanıtlamış kesikli zamanlı simülasyon modelini (EDSM) [1,2,3] baz almaktadır. Bu model, salvo (bir silahın tek bir atışı) bazlı çalışan ve Lanchester Modeli benzeri bir modeldir. AHB'ne çıkarılan birlikler (bundan sonra mavi birlikler olarak anılacaktır) ve aynı bölgedeki karşı kuvvet birlikleri (bundan sonra kırmızı birlikler olarak anılacaktır), üzerlerindeki silah sistemleri, silahlar ve mühimmatlar ile birlikte zayıflık modeline girdi oluşturmaktadırlar. Her bir AHB için farklı bir zayıflık modeli çalışır. Zayıflık modeline çevresel faktörler ve her birlik için hedef birlik tahsislerinin de girilmesi ile birlikte model, bir salvo sonunda her bir birliğin zayıflığını ve mevcut durumunu çıktı olarak vermektedir. Zayıflık modeli genel yapısı Şekil 1'de verilmektedir. Kullanılan zayıflık modelinin yukarıda verilen referanslarda tasarılanan modelden temel farkı ek zayıflık bileşkesi olup, ayrıntılar Bölüm 4.4'te verilmiştir.

4.1. Hedef Tahsisleri ve Alt Muharebeler

Zayiat Modeli, her bir silah sistemi veya silah'ın karşı kullanıldığı silah veya silah sistemine verdiği zayıyatın, salvolar bazında hesaplanması esasına dayanmaktadır. Bunun için öncelikle hangi silah sisteminin veya silahın hangi silah sistemine veya silaha karşı hangi oranda kullanılacağını belirlemek yani hedef tahsisini yapmak gerekmektedir. Her bir silahın belli bir oranının bir silaha karşı tahsisine bir alt muharebe adı verilir.

Hedef tahsisini veya alt muharebelerin oluşturulması probleminin bir çok farklı çözüm yöntemi mevcuttur. Harp oyunu kapsamında kullanılacak zayıyat modelinde, kullanıcıları simülasyona karar vericiler olarak belli bir oranda dâhil etmek amacıyla hedef tahsisleri kullanıcılarından alınacaktır. Kullanıcıların silah bazında hedef tahsisini yapmaları kullanıcılarla büyük bir yük bindireceğinden, hedef tahsislerinin bir üst seviyede birlik bazında yapılması sağlanmaktadır. Birbirine tahsis edilen birliklerin silah tahsisleri ise silahların birbirlerine karşı etkinliklerine göre önceden belirlenmiş oranlarda yapılmaktadır. Örnek olarak eğer tamamen piyadeden oluşan bir birlik, piyade ve top takımlarından oluşan bir birliğe tahsis edilmiş ise, piyadenin topa karşı bir etkinliği olmayacağı için tüm piyadeler piyadelere tahsis edilir. Top takımından oluşan bir birlik, piyade ve top takımından oluşan bir birliğe tahsis edilir ise, toplar önceden belirlenmiş belli oranlarda top ve piyade takımlarına tahsis edilir.



Şekil 1. Amfibi Zayıat Modeli Genel Yapısı

Zayıat simülasyonu hedef tahsisinin tekrar yapılması için şu koşullarda otomatik olarak durdurulur:

- Amfibi harekât boyunca, amfibi harekât bölgesine her bir birlik çıkartılması,
- Bir birliğin hedefinin tamamen zayı olması ya da bir alt muharebenin sona ermesi.

4.2. Silah Sistemleri, Silahlar ve Mühimmatlar

Silah direkt ateş gücüne sahip bir sistemdir (makineli tüfek ya da top gibi). Silah sistemi ise birden çok ateş gücüne sahip alt silahları içeren bir sistemdir (kendi topu ve makineli tüfeği bulunan tank gibi). Bir silahın ateş gücünün tam olarak tanımlanabilmesi için silah kavramı mutlaka mühimmat kavramı ile birlikte ele alınmalıdır. Bu sebeple zayıat modeli, her bir silah sistemi, silah ve mühimmat kombinasyonunun, her bir hedef silah sistemine olan SSKP (Single Shot Kill Probability) yani tek atımda imha olasılığı değerlerini esas almaktadır. Normal koşullardaki SSKP değerleri kara silahları için elde edilebilen değerlerdir.

Silahların etkinlikleri menzile bağlı değişebilmektedir. Bu kapsamda SSKP değerleri farklı menzil aralıkları için birden fazla tanımlanmak durumundadır. Kara silahları ateş tekniklerine göre direkt ateş yapan ve alan ateş yapan silahlar olarak ikiye ayrılabilirler. Alan ateş yapan her bir silah ve mühimmat kombinasyonunun etkinliğini tanımlamak için için SSKP değerleri yanısıra etkili alan yarıçapı değerlerine ihtiyaç duyulur.

SSKP ile ilgili bir diğer önemli bilgi ise SSKP'yi etkileyen muharebe koşullarını tanımlayan faktörlerdir. Zayıat modelinde baz SSKP değerlerine ($SSKP_b$), muharebe koşullarının etkileri dahil edilerek etkili SSKP değeri ($SSKP_e$) elde edilir.

$$SSKP_e = SSKP_b (E_m E_g E_t E_p E_k) \quad (1)$$

Muharebe koşullarını tanımlayan ve 0 ile 1 arasında tanımlanabilen faktörler şunlardır:

- E_m , Meteorolojik koşulları
- E_g , Arazi koşulları
- E_t , Gece/gündüz farkı
- E_p , Personel eğitim ve moral durumu
- E_k , İstihbarat

4.3. Zayıat Modeli

Zayıat modeli kabaca, birbirlerine karşı etkinlikleri, SSKP, etkili alan yarıçapı, muharebe koşulları ve aralarındaki mesafe ile belirlenen, alt muharebelerde tanımlanmış silah sistemlerinin zayıatlарının salvolar bazında hesaplanması içerir. Alt muharebeler birbirlerinden bağımsız olduklarından herhangi bir sırada çalıştırılması yeterlidir.

Zayiat modelinin temel varsayımları, atışlarda hem atan silahın hem de hedefin birbirinden bağımsız seçilmesi, direkt atışta atış dağılımının koordineli yapılması (atış yapacak aynı tipten silahların hedeflerine eşit sayıda dağıtılması) ve direkt ve alan atışlarında aynı salvo içinde “overkill” varken, bir salvodan diğerine “overkill” olmamasıdır. Buna göre, aynı salvoda bir silah tarafından yok edilmiş bir hedefe başka silahlar da atış yapar (ve mühimmat harcar), ancak bir salvoda yok edilmiş bir hedefe sonraki salvoldarda atış yapılmaz.

Zayiat modeli her salvo için oldukça hızlı işletebilmektedir. Zayiat modelinin temel mantığını bir muharebe durumunda göstermeye çalışalım.

X_{eikf}^t , t 'inci salvoda, e mavi silah sistemi üzerinde bulunan ve k mühimmatını kullanan i silahının, f kırmızı silah sistemine tahsis edilen miktarı, Y_f^t kırmızı silah sisteminin miktarı, p_{eikf} ise aynı mavi silahın aynı kırmızı silah sistemine karşı SSKP'si (muharebe koşulları etkisi dâhil edildikten sonraki değer) olsun. Mavi silahın kırmızı silah sistemine direkt atış yaptığı düşünürsek, kırmızı hedeflerden herhangi birine atış yapan ortalama mavi silah sayısı X_{eikf}^t / Y_f^t olarak bulunur. Bir kırmızı hedefin bu mavi silahların hiç biri tarafından yok edilmeyerek sağ kalma olasılığı $(1 - p_{eikf})^{X_{eikf}^t / Y_f^t}$ olur. Bu durumda, sadece bu mavi silah tipinin atışı altında, kırmızı silah sisteminin bir sonraki salvoda kalan miktarı $Y_f^{t+1} = Y_f^t (1 - p_{eikf})^{X_{eikf}^t / Y_f^t}$ olur. Kırmızı silah sistemine ateş eden birden fazla mavi silah tipi bulunması durumunda, sağ kalan miktar hesaplanırken, farklı mavi silah tiplerinden kaynaklanan sağ kalma olasılıkları çarpılır.

Yukarıdaki örnekte, mavi silahın kırmızı silah sistemine direkt atış yerine alan atışını düşünelim. ξ_{eikf} , f kırmızı silah sisteminin, e mavi silah sistemi üzerinde bulunan ve k mühimmatını kullanarak alan atışı yapan i silahının etki alanına girme olasılığı olsun. Bu durumda, bir kırmızı hedefin bu mavi silahların hiç biri tarafından yok edilmeyerek sağ kalma olasılığı $(1 - \xi_{eikf} p_{eikf})^{X_{eikf}^t}$ olur. Dolayısıyla, kırmızı sistemin bir sonraki salvoda kalan miktarı $Y_f^{t+1} = Y_f^t (1 - \xi_{eikf} p_{eikf})^{X_{eikf}^t}$ olarak bulunur.

Denklemleri genişletmek için öncelikle denklem notasyonumuza bir göz atalım.

- t : Salvo sayısı, $t = 0, \dots, T$
- ED_f : f kırmızı silah sistemine tahsis edilen ve direkt atış yapan mavi silah sistemi, silah ve mühimmatların endeksleri kümesi. (e, i, k) üçlülerinden oluşur.
- EA_f : f kırmızı silah sistemine tahsis edilen ve alan atışı yapan mavi silah sistemi, silah ve mühimmatların endeksleri kümesi. (e, i, k) üçlülerinden oluşur.
- w_e : e mavi silah sisteminin, alt muharebede kullanılmak üzere elde bulunan miktarı.

- ξ_{eikf} : f kırmızı silah sisteminin, e mavi silah sistemi üzerinde bulunan ve k mühimmatını kullanarak alan atışı yapan i silahının etki alanına girme olasılığı.
- p_{eikf} : e mavi silah sistemi üzerinde bulunan ve k mühimmatını kullanan i silahının, f kırmızı silah sistemini tek atışta imha olasılığı (SSKP).
- ρ_{eik} : e mavi silah sistemi üzerinde bulunan ve k mühimmatını kullanan i silahının bir salvoda angajman olasılığı.
- r_f : f kırmızı silah sisteminin bir salvoda muharebe dışı kayıp verme olasılığı.
- X_{eikf}^t : e mavi silah sistemi üzerinde bulunan ve k mühimmatını kullanan i silahının, t salvosu başında f kırmızı silah sistemine tahsis edilen miktarı.
- X_e^t : e mavi silah sisteminin t salvosu sonunda kalan miktarı.

Salvo $t+1$ 'de kalan silah sistemi miktarlarının belirlenmesi için ise (2) numaralı denklem ortaya çıkmaktadır.

$$Y_f^{t+1} = Y_f^t \left[\left(1 - r_f\right) \prod_{(e,i,k) \in ED_f} \left(1 - p_{eikf}\right)^{\rho_{eik} X_{eikf}^t / Y_f^t} \prod_{(e,i,k) \in EA_f} \left(1 - \xi_{eikf} p_{eikf}\right)^{\rho_{eik} X_{eikf}^t} \right] \quad (2)$$

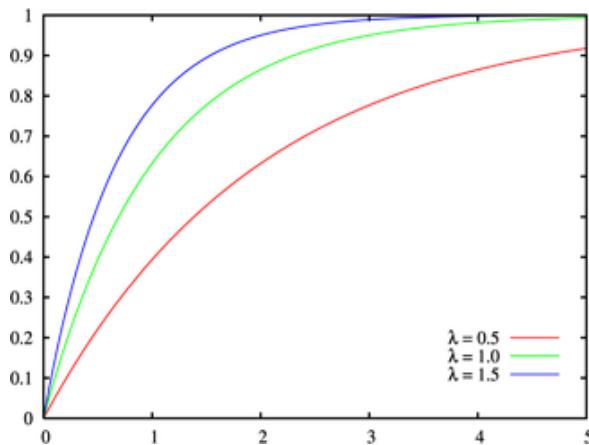
Kırmızı silah sisteminin kalan seviyesinin hesaplandığı (2) numaralı denklemde, direkt atış yapan bir mavi silah seviyesinin ($\rho_{eik} X_{eikf}^t$) kırmızı hedef seviyesinden (Y_f^t) küçük olduğu durumda, Y_f^t adet hedefin sadece $\rho_{eik} X_{eikf}^t$ adetinin birer kere atış olması mümkündür. Birer atış alan $\rho_{eik} X_{eikf}^t$ adet hedeften sağ kalan miktar $\rho_{eik} X_{eikf}^t (1 - p_{eikf})^1$ olacaktır. Geri kalan $Y_f^t - \rho_{eik} X_{eikf}^t$ adet hedef atış almayacak ve bu mavi silah tarafından zayıf edilmeyecektir. Bu durumda sağ kalan hedef seviyesi $\rho_{eik} X_{eikf}^t (1 - p_{eikf}) + (Y_f^t - \rho_{eik} X_{eikf}^t) = Y_f^t [1 - (\rho_{eik} X_{eikf}^t / Y_f^t) p_{eikf}]$ olarak bulunur. Dolayısıyla (2) numaralı denklemde bu durumdaki bir kırmızı hedefin direkt atış altında sağ kalma olasılığı $(1 - p_{eikf})^{X_{eikf}^t / Y_f^t}$ yerine $[1 - (\rho_{eik} X_{eikf}^t / Y_f^t) p_{eikf}]$ olarak hesaplanır.

4.4. Ek Zayıat

Amfibi harekâtin özelliğinden dolayı, klasik kara-kara muharebe zayıat modellerinde yansıtılmayan ek bir zayıati modellemek gerekmektedir. Bu zayıat, mavi kuvvetlerin kırmızı tarafından beklenen bölgelerden sahile çıkışları, ilk dalgalarda sahile çıkar çıkmaz yoğun bir ateş baskısı altında mevzilenmemeleri, düşmanın yerini tam olarak kestirememeleri, sahil şeridineki ilerleme kanalında sıkışmaları gibi birçok nedene bağlıdır. Maviye verilen bu ek zayıat, mavinin sayısı sahilde arttıkça, mavi sahile yerleşikçe ve mevzilendikçe yani hem hücum dalgaları boyunca hem de bir dalga içerisinde zaman ilerledikçe azalmalıdır.

Zayıat modelinde önerilen, bu ek zayıatın (EZ) Şekil 2'de verildiği gibi üstel bir yiğmalı dağılım fonksiyonunun gösterdiği biçimde 0 ila 1 arasında bir çarpan olarak zayıat

modeline eklenmesidir. Şekildeki örnekte, 1. dalga için $\lambda=0.5$, 2. dalga için $\lambda=1.0$ ve 3. dalga için $\lambda=1.5$ grafikleri önerilmektedir. Bu çarpan değerleri salvolar ilerledikçe hızla 1.0 değerine yakınsamaktadır. Bu yakınsama 1. dalga için daha uzun olmakta, dolayısıyla ilk dalgadaki EZ daha fazla olmaktadır.



Şekil 2. Ek zayıat fonksiyonu

$$Y_f^{t+1} = Y_f^t \left[\left(1 - r_f\right) \prod_{(e,i,k) \in ED_f} \left(1 - p_{eikf}\right)^{\rho_{eik} X_{eikf}^t / Y_f^t} \prod_{(e,i,k) \in EA_f} \left(1 - \xi_{eikf} p_{eikf}\right)^{\rho_{eik} X_{eikf}^t} \right] [EZ^{t-1}] \quad (3)$$

öyle ki

$$EZ^t = 1 - e^{-\lambda t} \quad (4)$$

Örnek olarak, başlangıç durumları 100'e 100 olan basit bir piyade-piyade zayıat simülasyonunu için ek zayıatlı ve ek zayıtsız, önerilen modelin uygulanması ile Şekil 3'deki zayıat grafikleri elde edilmiştir. Buna göre, amfibî harekat uzmanlarıyla yapılan bir toplantıda dağılımın tipi ve parametre değerleri sezgisel yöntemlerle değerlendirilmiş ve dalga d için $\lambda=0.5(1+d)$ kullanmanın uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

4.5. Salvodan Zaman Adımına

Harp oyunu simülasyonu zaman adımlı çalışan bir simülasyon sistemidir. Bir model koşturma motoru, simülasyonun ilerlemesine paralel olarak, tüm modellere kendilerini ne kadar süre (Δt) ileri almaları gerektiğini bildirir ve tüm modeller o süre bazında işlemlerini paralel olarak gerçekleştirerek çıktılarını geri dönerler. Şekil 1'de gösterilen Amfibî Harekât Yönetim Modeli de aynı şekilde her zaman adımdında kendini Δt kadar ilerletir. Kendini bu kadar ilerletmesi demek, mevcut amfibî harekât bölgelerindeki birliklerin mevcut bilgilerini zayıat modeline geçmesi, Δt süre içinde alacakları zayıatları zayıat modeline hesaplatması ve sonuçları ise birlik verileri üzerinde

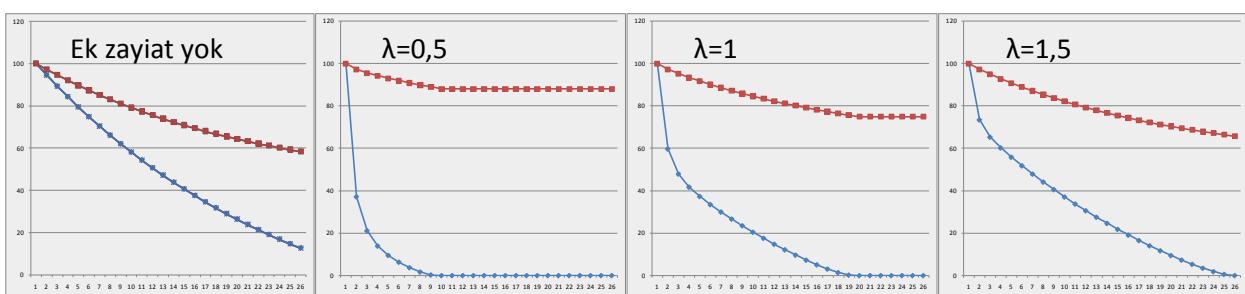
güncellemesi anlamına gelmektedir. Bunun için zayıat modelinin Δt bilgisini, alt muhaberelerin salvo bilgisine dönüştürmesi gerekmektedir.

Bunun için silah veritabanında bulunması gereken bir diğer bilgi olan normal koşullardaki angajman süresine ihtiyaç duyulmaktadır. Angajman süresi (v_{ei}) normal koşullar altında ele alınmalıdır çünkü muhabere koşullarının etkisi zaten etkili SSKP değeri ile modele katılmıştır. Buna göre her zaman adımında çalıştırılması gereken salvo sayısı yani atım oranı $\Delta t/v_{ei}$ olarak bulunur. Ancak atım oranı her zaman tam sayı olmayabildiği gibi 1'den küçük bir değerde olabilir.

Atım oranının birden küçük olduğu durumlarda, atım oranı angajman olasılığına bir çarpan olarak eklenecek çok basitçe ele alınabilir. Ayrıca atım oranı 1'den küçük olan silahların atış yaptığı tüm alt muharebelerde yalnızca bir salvo koşturulmuş olur.

Atım oranının 1'den büyük olduğu silahların atış yaptığı muharebelerde 2 yöntem uygulanabilir; atım oranı angajman oranına çarpan olarak eklenebilir veya atım oranı kadar salvo koşturulabilir. İki arasındaki fark birden fazla salvo koşurma durumunda her salvo sonunda karşı silah sisteminin zayıatı dikkate alınarak bir sonraki salvonun koşturuluyor olmasıdır.

Normal koşullarda simülasyon zaman adımları 1sn. en hızlı oynatma durumunda ise 20sn.dir. Ancak amfibi harekat gibi uzun harekatlarda sonuçların görülmESİ için zaman adımlarının daha büyük olabileceği değerlendirilmelidir. Zaman adımlarının saniyeler ile belirtildiği durumlarda salvolararası kararlılık durumuna göre angajman yapılamayacağı açıktır. Bu durumlarda atım oranı yine angajman olasılığına bir çarpan olarak eklenebileceği görülmektedir.



Şekil 3. Örnek ek zayıat grafikleri

5. SONUÇ

Bu bildiride, amfibi harekâtın yüksek sadakat seviyesinde modellere sahip bir harp oyunu simülasyonunda nasıl ele alındığı anlatılmakta ve amfibi harekâtın kıyıya hücum ve kıyıbasının ele geçirilmesi safhasında birliklerin sayısal zayıatlarını elde etmek için

geliştirilmiş Lanchester benzeri bir model tanımlanmaktadır. Yüksek sadakat seviyeli modeller ile daha düşük sadakat seviyesine sahip matematiksel bir muharebe modelinin entegrasyonunun birlik modeli ve amfibî harekât yönetimi modelleri sayesinde kademeli olarak sadakat seviyesinin düşürülmesi ile gerçekleştirilebilediği görülmektedir. Yapılan çalışmanın sonuçları, Silahlı Kuvvetlerimizin Bilgisayar Destekli Harp Oyunu (BDHO) ihtiyaçlarını karşılamak üzere geliştirilmekte olan bir harp oyunu simülasyonunun amfibî harekât oyununa entegre edilmektedir.

6. KAYNAKÇA

- [1] Akgün, İ., Kandiller, L., Molyer, O., Özdemirel, N.E., ve Toroslu, İ.H. (2005), Taktik seviyede tehdite dayalı mühimmat planlaması için modelleme ve simülasyon, *USMOS 2005 Konferansı Bildiri Kitabı*, 19-28.
- [2] Aydın N. M., Baydoğan M. G., Kandiller L., Özdemirel N.E., Kolsuz H. (2007), Taktik Seviyede Tehdide Yönelik Mühimmat Planlaması Simülasyonu Sistemi (Kammos) Ömür Dönemi Yönetimi, *Teknik Rapor, SSM Müsteşarlığı, Ankara*
- [3] Kandiller L, Özdemirel N. E., Toroslu İ.H., Klınç F., Arslanoğlu Y., Demir E. (2005), Taktik Seviyede Tehdide Dayalı Mühimmat Planlaması Modelleme ve Simülasyonu Projesi (Kammos-2), *Proje Sonuç Raporu, Modsimmer, O.D.T.Ü.*

AMFİBİ HAREKÂTTA YÜKLEME BİNDİRMENİN OPTİMİZASYONU

İpek SEYRAN TOPAN ^(a), Levent KANDİLLER ^(a), Haluk AYGÜNEŞ ^(a)

^(a) Çankaya Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara,
ipeks@cankaya.edu.tr, kandiller@cankaya.edu.tr, aygunes@cankaya.edu.tr

ÖZ

Bu çalışmada, Amfibi Harekâttâ yükleme ve bindirmenin optimizasyonu ele alınmıştır. Yükleme işi “Tek Boyutlu/Heterojen Kutu Kapasiteli/Öndelik Kısıtlı Kutu Paketleme Problemi” şeklinde, literatürden bildiğimiz kadarıyla özgün olarak modellenmiş ve çözümü için optimal arayan bir dal-sınır algoritması ve sezgisel yöntemler kurgulanmıştır. Ayrıca, alt sınır ve erken olurluluk/olursuzluk algılama yaklaşımları geliştirilmiş, kurgulanan algoritmaların çözüm zamanları iyileştirilmiş, performansları yaratılan örnek problemler bazında incelenmiş ve elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Amfibi Harekât, Dal-Sınır Algoritması, Kutu Paketleme Problemi

OPTIMIZATION OF LOADING IN AMPHIBIOUS OPERATIONS

ABSTRACT

In this study, optimization of loading in amphibious operations is modeled as one dimensional heterogeneous bin packing problem with precedence constraints which is, to the best of our knowledge, an original problem. To solve the problem we propose a branch and bound algorithm and some heuristic procedures. Also, lower bounds and early feasibility/infeasibility detections are proposed to decrease the CPU time of algorithms. The performances of all of the algorithms are tested using some developed benchmark problems and then the solutions are reported.

Keywords: Amphibious operations, Bin Packing Problem, Branch and Bound Algorithm

1. GİRİŞ

Amfibi harekât kısaca kara, deniz ve hava kuvvetlerinin müşterek ve koordineli bir şekilde düşmanın elinde veya kontrolünde bulunan bir kıyıya, gerekiğinde bu harekâtlâ koordineli olarak, dost kıyıdan icra edilecek olan hava indirme ve hava hücum harekâti

ile birlikte denizden taarruz edilmesi anlamına gelmektedir. Barış zamanında ise doğal afet durumunda acil yardım ulaştırmak üzere gerçekleştirilebilir. Amfibi harekâtın beş adet safhası vardır. Bu çalışmada amfibi harekâtın ilk safhası olan yükleme ve bindirme safhasına odaklanılmıştır. Yükleme ve bindirme safhası personel, araç, teçhizat ve ikmal maddelerinin çıkarma gemi ve araçlarına yüklenikleri ve bindirildikleri safhadır. Bu safhadaki yükleme işi “Tek Boyutlu/Heterojen Kutu Kapasiteli/Öndelik Kısıtlı Kutu Paketleme Problemi” olarak, literatürden bildiğimiz kadarıyla tarafımızca özgün olarak, modellenmiş ve çözüm için optimal arayan bir dal-sınır algoritması (DSA) ile sezgisel yöntemler kurgulanmıştır. Ayrıca, alt sınır, üst sınır ve erken olurluluk/olursuzluk algılama yaklaşımları geliştirilmiş, algoritmaların performansları yaratılan örnek problemler bazında incelenmiş ve elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

2. YÜKLEME VE BİNDİRME SAFHASININ MODELLENMESİ

Amfibi harekâtın ilk safhası olan yükleme ve bindirme safhası, birbirleri arasında öndelik ilişkileri bulunan nesnelerin (askeri birlik, araç, silah-mühimmat vb.) dost kiyisındaki birbirinden farklı kullanım maliyetlerine ve alanlara sahip olan amfibi vasıtalarına yüklenmesi ve bindirilmesi problemidir. Bu problemin modellenmesi aşamasında aşağıdaki varsayımlardan yararlanılmıştır:

V1: Pratikte çıkarmada öncelik küçük alanlı gemilerin düşman kıyısına çıkması şeklidendir.

V2: Amfibi gemilerin alanı arttıkça kullanım maliyeti de artar.

V3: Amfibi gemilerin kapasiteleri ve yüklenecek nesneler alan cinsindendir.

V4: Yüklenecek gemilerin ve nesnelerin alanları belirlidir.

Yukarıda belirtilen varsayımlar altında amfibi harekâtın yükleme ve bindirme safhası “Bir Boyutlu/Heterojen Kutu Kapasiteli/Öndelik Kısıtlı Kutu Paketleme Problemi” olarak tanımlanmış ve aşağıdaki gibi modellenmiştir. Modelde kullanılan parametreler ve karar değişkenleri aşağıda gösterilmiştir:

Nesne kümesi: $i = 1, \dots, I$ ve Vasıta kümesi: $j = 1, \dots, J$

Parametreler: t_i : i nesnesinin alanı (m^2), C_j : j deniz vasıtاسının alanı (m^2), D_j : j deniz vasıtاسının kullanım maliyeti

Karar Değişkenleri:

$$y_j = \begin{cases} 1, & j \text{ deniz vasıtası kullanılırsa} \\ 0, & \text{diğer;} \end{cases} \quad x_{ij} = \begin{cases} 1, & i \text{nesne } i \text{ j deniz vasıtasına atanırsa} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$$

Yukarıda belirtilen parametreler ve karar değişkenleri kullanılarak aşağıdaki tamsayılı doğrusal programlama modeli oluşturulmuştur:

$$\min \sum_{j=1}^J D_j y_j \quad (1)$$

$$\text{öyle ki } \sum_{i=1}^I t_i x_{ij} \leq C_j y_j \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, I \quad (3)$$

$$x_{vb} \leq \sum_{k=1}^b x_{uk} \quad b = 1, 2, \dots, J \quad \text{ve } (u, v) \in IP \quad (4)$$

$$y_j = 0 / 1 \quad j = 1, 2, \dots, J$$

$$x_{ij} = 0 / 1 \quad i = 1, 2, \dots, I; \quad j = 1, 2, \dots, J$$

$IP = \{(u, v) : u \text{ nesnesi } v \text{ nesnesinden önce yüklenmelidir.}\}$

Yukarıdaki model araçların kullanım maliyetlerini göz önüne alarak kullanılacak araç sayısını en aza indirecek şekilde araçlara nesnelerin en uygun atamasını bulmak amacıyla geliştirilmiştir. Modelin amaç fonksiyonu (1) yüklenecek gemilerin kullanım maliyetini en aza indirmektedir. Amaç fonksiyonu silah sistemleri açısından OLI [3] veya TASKFORM [4] gibi toplam etkinlik değeri düşük olan gemilerin önce kullanılmasını sağlamaktadır. Birinci kısıt (2) her araca yerleştirilecek olan nesnelerin toplam hacminin aracın toplam kapasitesini geçmeyeceğini göstermektedir. İkinci kısıt (3) ise her bir nesnenin yalnızca bir araca yerleştirileceğini göstermektedir. Son kısıt (4) ise nesnelerin gemilere yerleştirilirken birbirlerine göre öndeliklerini gözeten öndelik kısıtıdır.

3. DAL-SINIR YÖNTEMİ

Oluşturulan modelin çözümü için hem kesin çözüm (optimum) bulan Dal-Sınır yöntemi, hem de sezgisel yöntemler kullanılmıştır. İlk olarak DSA için alt sınır ve üst sınır çalışmalarına başlanmıştır. Bulunan sezgisel yöntemler aynı zamanda modelin üst sınırı olarak kullanılmıştır. Alt sınır elde etmek için ise modelin doğrusal programlama gevşetmelerinden yararlanılmıştır. Doğrusal programlama gevşetmeleri aşağıdaki şekilde yapılmıştır.

- G1)** Her iki değişken kümesinin gevşetmeleri ($0 \leq x_{ij} \leq 1$ ve $0 \leq y_j \leq 1$) yapılmıştır.
- G2)** Sadece x değişkeni kümesinin gevşetmesi ($0 \leq x_{ij} \leq 1$) yapılmıştır.
- G3)** Sadece y değişkeni kümesinin gevşetmesi ($0 \leq y_j \leq 1$) yapılmıştır.

Yukarıdaki doğrusal programlama gevşetmeleri test edildikten sonra, **G2** doğrusal programlama gevşetmesinin diğer gevşetmelere göre yüzde fark cinsinden daha düşük değerler verdiği gözlenmiştir. Bölüm 2'de geliştirilen modele **G2** gevşetmesi uygulandığında modeldeki (3) numaralı ve (4) numaralı kısıtin gevşetilmesiyle, (2)

numaralı kısıtin da kısmen gevşediği, bu kısıtta bulunan j adet kısıtin taraf tarafa toplanmasıyla modelin, aşağıdaki “Kapsama Problemi”ne (KP) dönüştüğü görülmektedir:

$$\min \sum_{j=1}^J D_j y_j \quad (5)$$

$$\text{öyle ki } \sum_{j=1}^J C_j y_j \geq T = \sum_{i=1}^I t_i \quad (6)$$

$$y_j = 0 / 1 \quad j = 1, 2, \dots, J$$

Alt sınır ve üst sınır çalışmaları tamamlandıktan sonra modelin optimum çözümünü elde etmek için bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritmanın Başlangıç Çözümü, En Erken/En Geç İstasyona Atama Yöntemi, Sezgisel Yöntemler ve Dal-Sınır Algoritması (DSA) başlıklarını altında aşağıda adımları verilmiştir:

Adım 1. Başlangıç Çözümü

DSA'nın başlangıç çözümü ve aynı zamanda alt sınırı olarak Kapsama probleminin optimum çözümü ile başlangıç çözümü bulunarak hem amaç fonksiyonu değeri hem de hangi kutuların doldurulacağı bilgileri alınır.

Adım 2. En Erken/En Geç İstasyona Atama Yöntemi

- a. İlk önce En Erken/En Geç İstasyon yöntemi kullanılarak, belirlenen nesneler kutulara yerleştirilir (ilerleyen kısımda anlatılacaktır).
- b. En Erken/En Geç İstasyon yöntemi başlangıç çözümünün, olurlu bir çözüm olup olmadığıın ilk tespiti yapılır.
 - i. Başlangıç çözümünün olursuz bir çözüm olduğu belirlenmişse başlangıç çözümüne geri dönülür, başlangıç çözümü en iyi ilk çözüm esaslı arama metodu ile güncellenir ve Adım 2-a'ya gidilir.
 - ii. Başlangıç çözümü olurlu bir çözüm gibi gözükyorsa Adım 3'e geçilir.

Adım 3. Sezgisel Yöntemler

En Erken/En Geç İstasyon atama yöntemi sonunda yerleşemeyen nesneler Bölüm 4'te anlatılan sezgisel yöntemle boş kalan kutulara yerleştirilmeye çalışılır.

- i. Elde edilen çözüm olurlu bir çözüm ise algoritma sonlanır ve optimum çözüm elde edilir.
- ii. Elde edilen çözüm olursuz bir çözüm ise Adım 4'e geçilir.

Adım 4. Dal-Sınır Algoritması

- a. DSA öndelik diyagramı baştan sona doğru tarayan derinlik öncelikli arama yöntemi kullanan iç içe iki döngü ile çalışır:

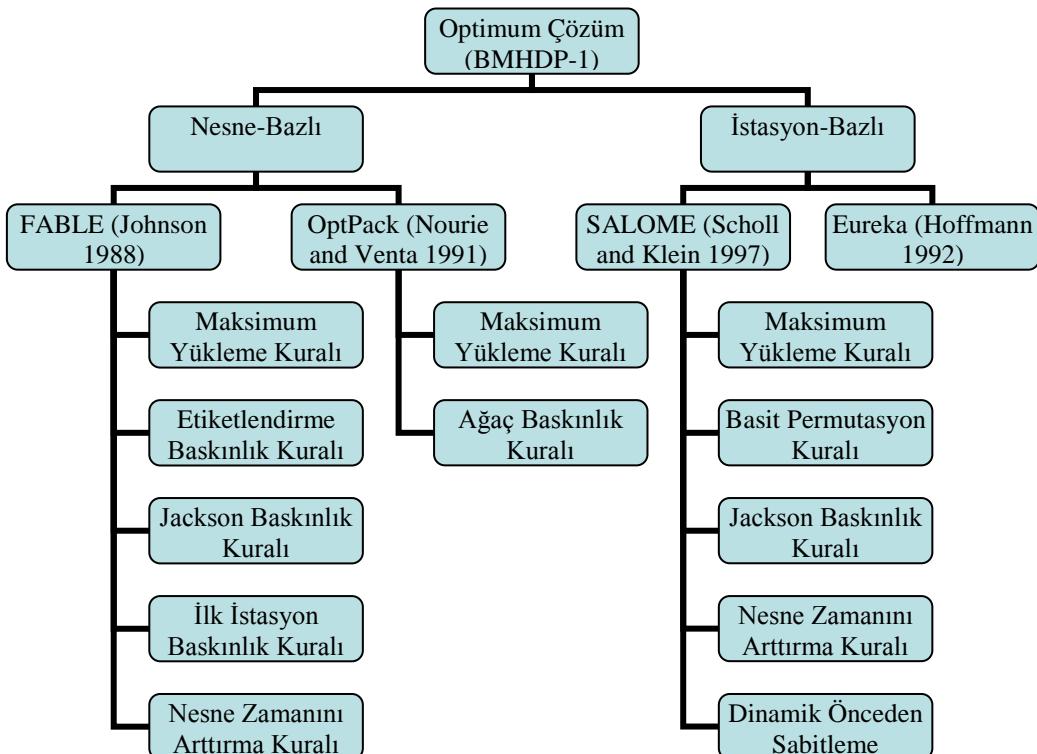
- “İç Döngü” ile seçilen ilk istasyona atanabilecek aday nesneler ortaya çıkarılır.
 - “Dış Döngü” ile “İç Döngü”de kullanılan istasyon için atanabilecek aday nesnelerin arasından seçim yapılarak istasyon doldurulur ve kapatılır. Yeni bir istasyon seçileceği zaman “İç Döngü”ye geri dönülür, aynı işlemler bu yeni istasyonlar için tekrar edilir. Açılan tüm istasyonlar kullanıldıktan sonra;
 1. Olurlu çözüm elde edilmişse DSA sonlanır.
 2. Olursuz çözüm elde edilmişse geri izleme yapılır. Adım 4-a’ya dönülür. Geri izlemede takip edilecek tüm alternatifler denenmişse (olursuz çözüm yakalanırsa) Adım 2-b-i’ye gidilir.
- b.** Tüm nesneler modelin kısıtlarına uygun olarak yerleştiyise DSA sonlanır.

Adım 2’de belirtilen En Erken/En Geç İstasyona Atama Yönteminde her bir nesnenin yerleşebileceği en erken (E_j) ve en geç (L_j) kutular belirlenir. Bu belirleme sonucunda üç farklı seçenek ile karşılaşılabilir. Bunlar;

1. $E_j = L_j$ olduğu durumlarda nesneler o kutuya yerleştirilir ve Adım 2-b-ii’deki kurallar uygulanır.
2. $E_j < L_j$ olduğu durumlarda nesneler herhangi bir kutuya yerleştirilmmez ve Adım 2-b-ii’deki kurallar uygulanır.
3. $E_j > L_j$ olduğu durumlarda seçilen çözümün olursuz çözümüdür ve Adım 2-b-i’deki kurallar uygulanır.

E_j ve L_j değerleri kullanılarak i nesnesinin en erken ve en geç hangi kutulara atanacağı tespit edilir. Bir kutuya atama yapıldığında kutunun alanı atanınan nesnenin alanı kadar düşürülür, diğer atamalar yeni alanlar üzerinden yapılır.

Literatürde Basit Montaj Hattı Dengeleme Tip-1 (BMHDP-1) problemine optimum çözüm bulan algoritmaların hepsi dal sınır algoritmalarında birerleme yöntemi kullanmaktadır [1], [2], [5], [7]. Birerleme yöntemi problemin çözümü esnasında oldukça zaman kaybettirmektedir. Birerlemeleri azaltmak için baskınlık kurallarından yararlanılmaktadır [7]. Literatürdeki BMHDP-1 problemini optimum çözen bazı algoritmaların kim tarafından ne zaman geliştirildikleri ve algoritmalarla hangi baskınlık kurallarının kullanıldığı Şekil 1’de gösterilmektedir. Uygulanabilecek tüm baskınlık kuralları incelendikten sonra DSA algoritmasında Maksimum Yükleme, Basit Permutasyon, Dinamik Önceden Fiksleme ve Jackson Baskınlık Kuralının kullanılması kararlaştırılmıştır.



Şekil 1- BMHDP-1 için literatürde kullanılan baskınlık kuralları

Geliştirilen dal ve sınır algoritması (DSA-4) testleri sonucunda (Bölüm 5.2) nesneleri atamak için daha fazla iyileştirme yapılamayacağı anlaşılmıştır. Bunun üzerine gemi seçimi için yapılan dal ve sınır algoritmasının geliştirilebileceği düşünülmüş, yeni bir gemi seçimi arama yöntemi “Atlamalı Arama Yöntemi” (DSA-AY) geliştirilmiştir.

“Atlamalı Arama Yöntemi” Tablo 1’de anlatılan örnekte olduğu gibi başlangıç düğümünün (düğüm 1) olursuz çözüm olmasından sonra sadece bir geminin açılıp açılmayacağına karar vererek büyük atlamalarla (alan çok büyütülerek) bir olurlu çözüm yakalamaya (düğüm 3) çalışmaktadır. Olurlu çözümden (düğüm 3) sonra bu çözümün atasına (düğüm 1) geri dönülerek daha önce bulunan olursuz çözüm ile olurlu çözüm arasında amaç fonksiyon değeri daha küçük olan başka bir olurlu çözüm olup olmadığı küçük atlamalarla (alan az büyütülerek) yeni dallar (düğüm 4) yaratılarak aranır. Olurlu çözümlerdeki en küçük değere sahip olan amaç fonksiyonu değeri (düğüm 3) probleme üst sınır olarak kullanılır. Üst sınır bilgisi sayesinde açılan dallar arasında gereksiz olanları çözülmeden budanır. Amaç fonksiyon değeri daha düşük olan olurlu bir çözüm (düğüm 4) bulununca üst sınır güncellenir. Açılan bütün dallar kapanıncaya kadar arama tekniğine devam edilir.

DSA-AY algoritmasında yukarıda bahsedilen 4 baskınlık kuralı da uygulanmıştır. DSA-AY algoritması DSA-4 gibi test edilerek sonuçları Bölüm 5.2’de sunulmuştur.

Tablo 1 – “Atlamalı Arama Yöntemi” örneği

Düğüm#	Düğüm Atası	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	Olurlu/Olursuz	z
1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	Olursuz	73
2	1-2	1	0	0	1	0	0	1	1	Olursuz	77
3	1-3	0	0	1	1	1	0	0	1	Olurlu	79
4	1-3-4	0	1	0	1	1	0	0	1	Olurlu	76

4. SEZGİSEL YÖNTEM

Sezgisel yaklaşımalarla elde edilen olurlu çözüm hem modelin üst sınırı olarak hem de problemin sezgisel çözümü olarak kullanılmaktadır. Sezgisel yöntem için literatürde bulunan montaj hattı dengeleme problemi sezgisellerinden [6] dokuz öncelik kurallının kullanılmasına karar verilmiştir: **i)** En büyük iş zamanı olan adayı önce yerleştir (1, 2 ,3), **ii)** Konumsal ağırlığı en büyük olan adayı önce yerleştir (4, 5, 6), **iii)** En çok takip edilen işi önce yerleştir (7, 8, 9), **iv)** Rasgele yerleştir (10,11, 12), **v)** Birikimli konumsal ağırlığı en büyük olan adayı önce yerleştir (13, 14, 15), **vi)** En çok hemen sonra gelen işi önce yerleştir (16, 17, 18), **vii)** En küçük iş zamanı olan adayı önce yerleştir (19, 20, 21), **viii)** Öncesinde en çok iş olan adayı önce yerleştir (22, 23, 24), **ix)** Hemen öncesinde en çok iş olan adayı önce yerleştir (25, 26, 27) olarak düşünülmüştür.

Öndelik diyagramı baştan sona doğru (önce en düşük alanlı kutular yerleştirilsin), sondan başa doğru (önce en yüksek alanlı kutular yerleştirilsin) ve hem baştan sona hem de sondan başa doğru iki yönlü aynı anda taranarak (en yüksek alanlı ve en düşük alanlı kutular aynı anda yerleştirilsin) yukarıda belirtilen dokuz sezgisel yöntemin kullanılması sonucunda elde edilen yirmi yedi (9×3) amaç fonksiyonundan en düşük olanının üst sınır (ÜS1) olarak kullanılması düşünülmektedir. Öncelik kurallarının yanında parantez içerisinde yazan sayılar öndelik diyagramının sırasıyla baştan, sondan ve iki yönlü taranmasıyla (B, S, BS) bulunan amaç fonksiyon değerlerini vermektedir.

Yukarıda bahsedilen dokuz öncelik kurallarının kullanılması üst sınır için iyi performans vermediğinde sezgiseller geliştirilmiştir. KP'nin optimum çözümü ve yukarıda bulunan ilk üç öncelik kuralları (baştan ve sondan olmak üzere) kullanılarak iyileştirme yapılmıştır. Açılan gemilerin değiştirilmesi için üç farklı yöntem belirlenmiştir:

İyileştirme 1: KP optimum çözümü ile ilk açılan gemiler belirlenir. Açılan gemilere tüm nesneler atanmıyorsa yeni bir gemi kombinasyonu Bölüm 3'te Dal-Sınır algoritması adımlarında anlatıldığı gibi oluşturulur. Olurlu çözüm bulunduğuanda elde edilen amaç fonksiyonu üst sınır 2 değeri (ÜS2) olarak kaydedilir.

İyileştirme 2: KP optimum çözümü ile ilk açılan gemiler belirlenir. Açılan gemilere tüm nesneler atanmıyorsa yeni bir gemi kombinasyonu Bölüm 3'te anlatılan “Atlamalı

Arama Yöntemi” kullanılarak oluşturulur. Olurlu çözüm bulunduğuanda elde edilen amaç fonksiyonu üst sınır 3 değeri (ÜS3) olarak kaydedilir.

İyileştirme 3: KP optimum çözümü ile ilk açılan gemiler belirlenir. Açılan gemilere tüm nesneler atanmıyorsa yeni bir gemi kombinasyonu “İkili Arama” yöntemi kullanılarak oluşturulur. “İkili Arama” yöntemi Tablo 2’de anlatılan örnekte olduğu gibi ilk önce KP optimum çözümüyle (düğüm 1) başlar. Bu çözümün olursuz bir çözüm çıkması durumunda en sondaki açılan gemi sayısı kadar (bu örnekte 3) gemi açılarak yeni bir gemi kullanım kombinasyonu (düğüm 2) elde edilir. Her iki gemi kombinasyonunun (düğüm 1 ve 2’nin) onluk sistemdeki değerleri hesaplanır. Bu değerlerin ortalaması en büyük tamsayı değerine yuvarlanır. Elde edilen yeni onluk sistem değeri ikilik sisteme çevrilerek açılan gemi sayısı kadar yeni bir gemi sıralaması (düğüm 3) elde edilir. Elde edilen yeni sıralama (düğüm 3) olursuz bir çözümse aynı işlemler düğüm 3 ile düğüm 2 arasında tekrar edilirken, yeni sıralama (düğüm 3) olurlu bir çözümse aynı işlemler düğüm 1 ile düğüm 3 arasında devam edilir. Adım atacak yeri kalmadığında “İkili Arama” yöntemi sonlanır ve bulunan amaç fonksiyonu üst sınır 4 değeri (ÜS4) olarak kaydedilir.

Tablo 2 – “İkili Arama Yöntemi” örneği

Düğüm#	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	Olurlu/Olursuz	Onluk değeri
1	0	1	0	0	1	1	0	0	Olursuz	50
3	0	1	0	1	0	0	0	1	?	136
2	0	0	0	0	0	1	1	1	Olurlu	221

Problemin üst sınır değeri ise ÜS1, ÜS2, ÜS3 ve ÜS4 değerlerinden elde edilen en iyi (en düşük) değer olarak bulunur. Test aşaması ve sezgisel yöntemlerin performansları ilerleyen bölümlerde (5.3) anlatılmıştır.

5. DENEY TASARIMI VE SONUÇLAR

Modelin çözümü için geliştirilen dal-sınır algoritmalarının (DSA-4 ve DSA-AY) ve sezgisel yöntemlerin (ÜS1, ÜS2, ÜS3 ve ÜS4) performanslarının test edilmesi gerekmektedir. Testlerin yapılabilmesi için ilk etapta veri setleri oluşturulmuştur.

5.1 Deney Tasarımı

Kutu paketleme problemi literatüründe bulunan Armin Scholl ve Robert Klein tarafından türetilen bir boyutlu kutu paketleme problemi test verileri, web sitesinden [8] alınarak uyarlanmıştır. Bu test verilerinden nesne sayısı ve nesne alanları alınarak, bazı belirlenen kurallar çerçevesinde problemler için kutu alanları ve maliyetleri, öndelik diyagramları ve kaç tane kutu kullanılması gerektiğine karar verilmiştir. Nesne sayısı 50 ve 100 olan ve nesne alanları [1-100] ve [20-100] arasında düzgün dağılan test

problemlerinden 10 farklı problem verisi için düşük (DV) ve Yüksek varyanslı (YV) olmak üzere iki farklı kutu alanı ve maliyeti, üç farklı öndelik diyagramı yoğunluğu (%4.5, %6.5 ve %8.5) ve her bir öndelik diyagramı yoğunluğu için beş farklı öndelik diyagramı rasgele olarak oluşturulmuştur. Böylece 50 nesnelik problem veri setinden [1-100] arasındaki nesne alanından $10 \times 2 \times 3 \times 5 = 300$ adet ve [20-100] arasındaki nesne alanından $10 \times 2 \times 3 \times 5 = 300$ adet olmak üzere toplamda 600 adet problem elde edilmiştir. 100 nesnelik problem veri setinden de 600 adet problem elde edilmiştir. Toplamda 1200 test problemi oluşturulmuş ve bu problemler MATLAB 7.0 kullanılarak kodlanmış ve testler 40 adet Pentium 4 3.00 GHz işlemci 1.24 RAM'e sahip olan bilgisayarlar tarafından DSA'da 50 nesnelik problem için üç saat, 100 nesnelik problemler için ise altı saat çalıştırılarak gerçekleştirilmiştir.

5.2 Dal-Sınır Algoritması Deney Sonuçları

DSA-4 ve DSA-AY algoritmaları için yapılan testler sonucunda Tablo 3'de 300'er problem içinden verilen süre içerisinde yüzde kaç problemin ortalama ne kadar CPU sn içerisinde çözülebildiği raporlanmıştır. Tablo 3'teki sonuçlara göre 50 nesnelik [1-100] nesne alanına sahip problemlerin [20-100] nesne alanına sahip problemlere göre verilen süre içerisinde daha az miktarda çözülebildiği gözlemlenmiştir. Benzer bir gözlem 100 nesnelik problemler içinde fark edilmiştir. Ayrıca 100 nesnelik problemlerin çözümme sayıları 50 nesnelik problemlere göre daha az olduğu saptanmıştır. DSA-AY algoritması, DSA-4 algoritmasına göre verilen süre içerisinde problem sayısında daha çok çözüme ulaşması beklenirken, algoritma içerisinde defalarca olurlu çözüm kontrolü yapılmasından dolayı çok zaman kaybederek daha az sayıda problemi verilen süre içerisinde çözebilmektedir.

Tablo 3'te sunulan DSA-4 tarafından çözülebilen problemlerin yüzde kaçının birinci düğümde (KP optimumu) optimum sonuca ulaştıkları Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'te 50 nesnelik [1-100] nesne alanına sahip problemlerin [20-100] nesne alanına sahip problemlere göre daha fazla sayıda problemin birinci düğümde optimum sonuca ulaştığı fark edilmiştir. Benzer bir gözlem 100 nesnelik problemler içinde fark edilmiştir. Ayrıca 100 nesnelik problemlerin birinci düğümde çözümme yüzdeleri 50 nesnelik problemlere göre daha fazla olduğu saptanmıştır.

Tablo 3 – 50 ve 100 nesnelik problemlerin belirli saat diliminde çözülebilen problem yüzdesi ve ortalama CPU zamanı

	[1-100]	50 nesne	[1-100]	100 nesne	[20-100]	50 nesne	[20-100]	100 nesne
	DSA-4	DSA-AY	DSA-4	DSA-AY	DSA-4	DSA-AY	DSA-4	DSA-AY
Toplam %	86,33	85,67	66,00	34,33	97,33	97,00	70,90	68,14
Ort.CPU	2301,56	2620,87	9811,20	12243,71	769,75	1500,56	7863,34	8598,45

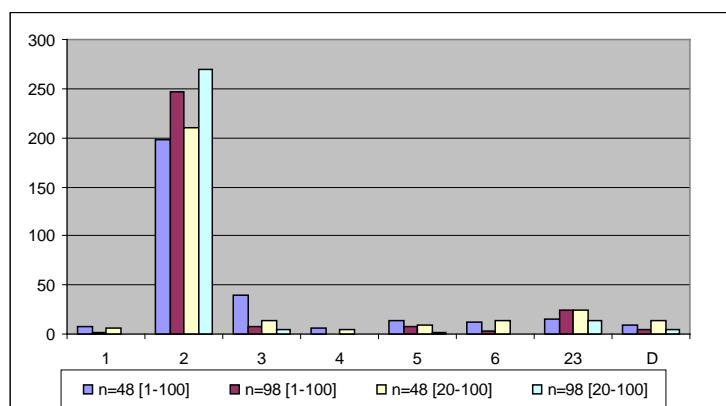
Sonuç olarak hem çözüm zamanları karşılaştırıldığında hem de verilen süre içerisinde ortalama daha fazla sayıda probleme çözüm bulabildiğinden DSA-4'ün DSA-AY'ye göre performansının daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. [20-100] nesne alanına sahip problemlerin [1-100] nesne alanına sahip problemlere göre daha hızlı ve daha çok sayıda problemin verilen süre içerisinde çözülebildiği gözlemlenmiştir.

Tablo 4 – 50 ve 100 nesnelik problemlerin birinci düğümde çözülme yüzdeleri

	[1-100] 50 nesne		[1-100] 100 nesne		[20-100] 50 nesne		[20-100] 100 nesne	
	YV	DV	YV	DV	YV	DV	YV	DV
Düğüm=1 %	24,00	24,00	45,33	42,67	10,67	20,00	52,00	59,73

5.3. Sezgisel Yöntemlerin Deney Sonuçları

Dal-sınır algoritmasının performansının test edilmesinden sonra Bölüm 4'te anlatılan ÜS1, ÜS2, ÜS3 ve ÜS4 sezgisel yöntemlerinin test edilmesine geçilmiştir. 1200 problem içerisinde her bir problem ÜS1 sezgisel yönteminde kullanılan dokuz öncelik kuralı için 27 farklı amaç fonksiyonu değeri bulunmuş, minimum değer problemin ÜS1 sezgisel yöntem sonucu olarak kabul edilmiştir. Kullanılan 27 öncelik kuralından hangisinin daha iyi olduğunu anlamak amacıyla Şekil 2'deki çubuk grafikten yararlanılmıştır. 2 numaralı sezgisel yöntemin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Bu yöntem “Öndelik diyagramını sonda tarayarak en büyük iş zamanı olan adayı önce yerleştir” sezgiselidir. Bu sebeple Bölüm 3'te anlatılan DSA adımları içerisinde Adım 3'te bulunan sezgisel yöntemler için Bölüm 4'te bahsedilen öncelik kuralı 1, 2, 4, 5, 7 ve 8 tercih edilmiştir.



Şekil 2- En iyi amaç fonksiyonu değeri veren öncelik kuralı sezgisellerinin öndelik diyagramı yoğunluğuna göre çubuk grafikleri

Sezgisel yöntem sonuçları optimum çözümü bilinen problemler için optimum çözüm ile, bilinmeyen problemler için ise KP'nin optimum çözümü ile karşılaştırılarak yüzde fark değerleri bulunmuştur. Bulunan yüzde fark değerleri ana efektlere göre ayrılarak Tablo 5'te gösterilmiştir. Bunun sonucunda öndelik diyagramı yoğunluğu azaldıkça,

yüksek varyanslı gemi alanları kullanıldıkça, nesne sayısı arttıkça ve nesne alanları [20,100] arasında alındıkça yüzde fark değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Tablo 5 – 1200 problemin sezgisel yöntemler kullanılarak elde edilen çözüm ile optimum çözüm arasındaki yüzde fark

		ÜS1		ÜS2		ÜS3		ÜS4	
		Ort. Fark	Maks. Fark	Ort. Fark	Maks. Fark	Ort. Fark	Maks. Fark	Ort. Fark	Maks. Fark
Yoğunluk	4.50%	6.01%	14.71%	1.56%	3.81%	2.26%	4.57%	13.30%	24.93%
	6.50%	6.09%	18.22%	1.91%	4.08%	2.53%	4.08%	13.80%	24.93%
	8.50%	6.38%	18.26%	2.27%	3.83%	2.57%	3.83%	13.87%	24.93%
Kapasite	YV	5.89%	12.07%	2.16%	4.08%	2.53%	4.57%	15.02%	24.93%
Varyans	DV	6.44%	18.26%	1.51%	3.48%	2.26%	3.48%	12.24%	19.76%
Nesne Sayısı	50	7.02%	18.26%	2.34%	4.08%	2.50%	4.57%	12.68%	20.47%
	100	5.24%	9.92%	0.45%	1.77%	1.91%	2.65%	14.69%	24.93%
Nesne Alanı	[1-100]	6.00%	18.26%	1.57%	3.48%	2.20%	3.64%	12.80%	20.47%
	[20-100]	6.34%	11.76%	2.46%	4.08%	2.70%	4.57%	14.60%	24.93%

Sonuç olarak öncelik kuralları kullanılarak elde edilen sezgisel yöntemlerin (ÜS1) her ne kadar diğerlerine nazaran en hızlı çözülen sezgisel yöntem olma özelliğine sahip olsalar da, diğer sezgisel yöntemlere göre ortaya çıkan ortalama ve maksimum farklar daha fazla çıkmıştır. Bunun yanı sıra ÜS2 sezgiselinin çözüm süresinin diğer iyileştirmelere göre daha yüksek olduğu fakat ortalama ve maksimum farklara bakıldığından daha düşük değerler verdiği görülmüştür. ÜS3 sezgiseli ise ÜS2 sezgiseliyle ortalama ve maksimum fark değerlerine bakıldığından yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda ÜS3 sezgiseli daha hızlı çözüme ulaşmaktadır. İyileştirme 4'ün kullanıldığı ÜS4 sezgiseli ise ÜS2 ve ÜS3'e nazaran daha hızlı çözüme ulaşırken, çözüm kalitesinin diğerleri kadar iyi olmadığı gözlemlenmiştir.

6. SONUÇ

Bu çalışmada, Amfibi harekâtın beş safhasından ilki olan yükleme ve bindirme safhasına odaklanılmıştır. Yükleme ve bindirme safhası “Tek Boyutlu/Heterojen Kutu Kapasiteli/Öndelik Kısıtlı Kutu Paketleme Problemi” olarak, literatürden bildiğimiz kadariyla tarafımızca özgün olarak, modellenmiştir. Geliştirilen modelin optimal çözümü için dal-sınır algoritması, yaklaşık çözümü için ise sezgisel yöntemler kurgulanmıştır. Ayrıca alt sınır ve üst sınır yaklaşımları geliştirilmiş, yaratılan 50 nesnelik ve 100 nesnelik örnek problemler bazında algoritmaların performansları incelenmiş ve raporlanmıştır. 50 nesnelik problemlerin ortalama %91,83'ü üç saatlik limit içerisinde çözülebilirken bunların ortalama 0,5 saatte çözüldüğü görülmüştür. Benzer biçimde, 100 nesnelik problemlerin ise ortalama %68,45'i altı saatlik limit

îçerisinde çözülebilirken bunların ortalama 2,45 saatte çözüldüğü gözlemlenmiştir. En iyi performansı olan sezgisel yöntemler (ÜS2 ve ÜS3) uygulandığında, 50 nesnelik problemlerin optimum çözüme göre ortalama % farkı 2,06, 100 nesnelik problemlerin optimum çözüme göre ortalama % farkı ise 2,76 olarak bulunmuştur. Her ne kadar bu % farklar kabul edilebilir limitlerin altında da olsa ilerideki çalışmalarında öncelik sezgisel yöntemlerin geliştirilmesi olacaktır. Bunun için Hoffmann sezgiseli ile Tabu arama ya da Genetik gibi bazı meta sezgisellerin geliştirilmesi düşünülmektedir. Bu çalışmalardan sonra, problemin iki boyutlu olarak incelenmesi planlanmıştır. Alan boyutunun yanı sıra birde ağırlık boyutu eklenerek problemin tekrar modellenmesi, optimum arayan ve/ya sezgisel çözüm yöntemlerinin kurgulanması, alt sınır çalışmalarının yapılması ve nihayetinde bunların örnek problemler bazında karşılaştırılması planlanmaktadır.

7. KAYNAKÇA

- [1] Becker, C. ve Scholl, A., (2006), “A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing ”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 168, pp. 694-715.
- [2] Boysen, N., Fliedner, M. ve Scholl, A., (2007), “A classification of assembly line balancing problems ”, *European Journal of Operational Research*, Vol. 183, pp. 674-693.
- [3] K.K.K, (2001), KKYY 190-7(A) “Birlik Etkinliklerinin Değerlendirilmesinde Harekât Etkinliği Metodu”, Ankara, 8.
- [4] Regan M.J. ve Downey F.M.. (1993) “A Technique For Assessing Comparative Force Modernization” (6th Edition), Virginia, USA.
- [5] Rekiek, B., Doigui, A., Delchambre, A. ve Bratcu, A. (2002), “State of art of optimization methods for assembly line design”, *Annual Reviews in Control*, Vol. 26, pp. 163-174.
- [6] Scholl, A., ve Vob, S., (1996), “Simple Assembly Line Balancing—Heuristic Approaches”, *Journal of Heuristics*, Vol. 2, pp. 217-244
- [7] Scholl, A., ve Klein, R., (1999), “Balancing assembly lines effectively - A computational comparison”. *European Journal of Operational Research*, Vol. 114, pp. 50-58.
- [8] <http://www.wiwi.uni-jena.de/Entscheidung/binpp/>, Bin Packing, son ulaşım tarihi: 29.03.2011

SİMKİT KÜTÜPHANESİ KULLANILARAK GELİŞTİRİLMİŞ ÖRNEK BİR AYRIK OLAY SİMÜLASYONU

Ömer ARSLAN^(a), Ernur KEMİK^(b)

^(a)Genelkurmay Bilkardem Başkanlığı, ANKARA, omarslan@hotmail.com

^(b)Hava Kuvvetleri Komutanlığı Kurmay Başkanlığı, ANKARA,
ernurkemik@gmail.com

ÖZ

Keşif filosu basitleştirilmiş iş akışı döngüsü keşif isteklerinin keşif filosuna geliş, keşif uçuşlarının planlanması, planlanan uçuşların icrası, elde edilen film veya görüntülerin kıymetlendirilmesi ve yazılan raporların dağıtılması olaylarını içermektedir. Bu döngü herhangi bir keşif filosuna uygulanabilecek genel ve kuramsal bir yapıdadır. Keşif döngüsü, dört farklı senaryo (A ve B tipi uçaklar için barış ve savaş senaryoları) için modellenmiştir. Bu makalede özellikle A tipi uçakların barış durumunda kullanılması senaryosu üzerinde durulmuştur.

Simülasyon modülleri, her bir senaryoya ait ayrıntılı olay grafiği bileşenleri ışığında Simkit simülasyon kütüphanesi kullanılarak Java programlama dilinde geliştirilmiştir. Geliştirilen grafiksel kullanıcı arayüzü programı aracılığıyla simülasyonlarda kullanılan karar ve parazit faktörlerinin değerleri değiştirilebilmekte ve simülasyonlar koşturulabilmektedir.

Keşif filosu iş akışı döngüsüne ait iki önemli bakış açısı bulunmaktadır. Bunlar keşif isteklerini yapanlarla keşif filosu komutanlarının bakış açılarıdır. İstekleri yapanlar, bir istek yapmadan önce isteklerinin eldeki kaynaklara ve diğer faktörlere bağlı olarak ortalama ne kadar süre içerisinde cevaplanacağını bilmek isterler. Keşif filosu komutanları ise mümkün olduğu kadar fazla keşif isteği cevaplamak isterler. Bu istekleri karşılamak için tanımlanan etkinlik ölçüleri koşum sonrası kullanıcıya gösterilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Askeri Simülasyon Uygulamaları, Ayrık Olay Simülasyonu, Grafiksel Kullanıcı Arayüzü, Modelleme, Keşif Filosu İş Akışı, Simkit, Simülasyon.

A DISCRETE EVENT SIMULATION EXAMPLE CREATED BY USING SIMKIT LIBRARY

ABSTRACT

Simplified workflow cycle of reconnaissance squadron includes the arrival of reconnaissance requests, planning of reconnaissance flights, flying the mission and exploitation of the taken films or images, and then dissemination of the reports. This workflow has a generic and notional structure which can be applied to any reconnaissance squadron. The reconnaissance cycle is modeled for four different scenarios (peace and war scenarios for A, B type aircrafts). Especially the peace scenario which uses the A type aircrafts is explained in this article.

Based on detailed event graph components of each scenario, simulation modules are developed in Java programming language by using Simkit. Via developed graphical user interface noise and decision factors' values for each simulation can be changed and each simulation can be run.

Regarding this cycle there are two points of view: reconnaissance requesters' and the reconnaissance squadron commanders' view. Requesters want to know the estimated time it would take for a request to be answered, based on the resources and other factors, before an actual request was made. Commanders want to respond as many reconnaissance requests as possible. To satisfy these needs measures of effectiveness were declared and shown to the user at the end of each run.

Keywords: Discrete Event Simulation, Graphical User Interface, Military Simulation Applications, Modeling, Simkit, Simulation, Reconnaissance Squadron Workflow.

1. GİRİŞ

Keşif görevleri daha çok uydulara, uçaklara veya insansız hava araçlarına monte edilen film tabanlı veya elektro-optik sensörler yardımıyla toplanan bilgiler sayesinde karar vericilerin muharebe alanını en ince ayrıntıları ile görmesini sağlayarak muharebenin kazanılmasına etki etmektedir.

Uçaklar diğer platformlara göre daha hızlı görevlendirilebildiğinden muharebe alanı hakkında daha hızlı bilgi toplayabilmektedir. Uçaklarda film tabanlı sensörler kullanıldığında; elektro-optik sensörlerden farklı olarak filmler kıymetlendirilmeden önce banyo işlemine tabi tutulmakta ve bu yüzden rapor yazma süreci uzamaktadır. Elektro-optik sensörler kullanıldığında ise; uçağın yere inmesi beklenmeden daha uçak havada iken hedeflere ait görüntüler veri hattı üzerinden kıymetlendirme istasyonlarına

gönderilebilmektedir. Bu yetenekle sayısal görüntülerin ağ üzerinden yaygınlaştırılması sağlanarak raporların daha hızlı bir şekilde yazılabilmesine imkan verilmektedir. [1]

Yaptığımız çalışma için geliştirdiğimiz modellerde film tabanlı sensörlerin monte edildiği A tipi uçaklarla, elektro-optik sensörlerin monte edildiği B tipi uçaklar iki farklı durum için (barış ve savaş) kullanılmıştır. Bu makalede özellikle A tipi uçakların barış durumunda kullanılması senaryosu üzerinde durulmuştur.

Bu çalışmada kullanılan metodolojiye ait iş basamakları şunlardır:

- Herhangi bir keşif filosuna uygulanabilecek genel, kuramsal ve basitleştirilmiş iş akışının modellenmesi.
- Modelde kullanılacak ayrıntılı olay grafiği bileşenlerinin çizilmesi.
- Çizilen olay grafiği bileşenleri ve Simkit simülasyon kütüphanesi kullanılarak Java programlama dilinde ayrık olay simülasyonu modüllerinin geliştirilmesi.
- Simülasyonlarda kullanılacak parametrelerin (parazit ve karar faktörleri değerleri, v.s.) değiştirilerek simülasyonun koşumuna imkan sağlayan kullanıcı arayüzü programının geliştirilmesi.
- Simülasyonun doğrulanması (test edilerek hatalardan arındırılması) ve geçerlenmesi (problemin çözümünü yansıtacak kapsamda).

2. KEŞİF FİLOSU BASITLEŞTİRİLMİŞ İŞ AKIŞI MODELİ

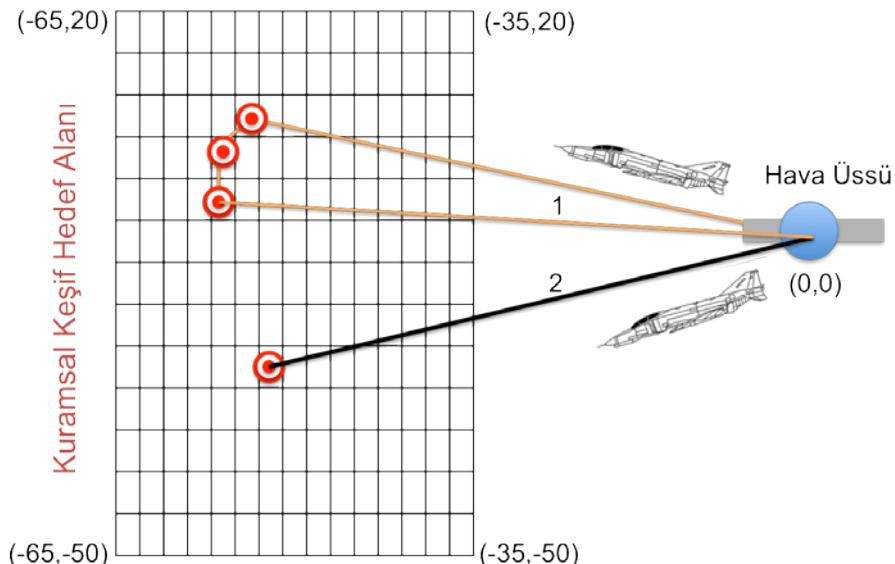
2.1. Senaryo

Keşif filosu basitleştirilmiş iş akışı döngüsünde bulunan iş basamakları şunlardır:

- Bir sonraki güne ait keşif isteklerinin grup halinde keşif filosuna gelmesi.
- Bir sonraki gün için keşif uçuşlarının planlanması. Bu planlama keşif isteklerinin özellikleri göz önünde bulundurularak (öncelik, miat, görüntü ve açı tipleri gibi) geçici uçak, pilot, kamera ve uçuş saatı atamalarını içermektedir.
- Planlanmış keşif uçuşlarının icrası. Keşif uçuşlarının başarılı bir şekilde icra edilmesini etkileyen belirli faktörler vardır. Bu faktörlerin başlıcaları uçak/kamera arızaları, kötü hava koşulları ve pilot hataları şeklinde sıralanabilir.
- Uçağın inmesiyle beraber elde edilen film veya görüntülerin kıymetlendirilmesi (işlenmesi ve yorumlanması) ve keşif isteğinin özelliklerine göre yazılan raporların kullanıcılarına gönderilmesi.

A tipi uçakların barış durumunda kullanılması senaryosuna ait uçuş bacakları planlaması Şekil 1'de görülmektedir. Kuramsal hava üssü (0,0) koordinatına konumlandırılmıştır. Kuramsal keşif hedef alanı, basite indirgenip dikdörtgen şeklinde bir alanı kapsayacak şekilde konumlandırılmıştır. Her bir koordinat, tek bir hedefi göstermektedir. Her bir keşif isteğinde de tek bir hedef bulunmaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi hedefleri birbirine yakın ve kamera ihtiyaçları aynı olan keşif istekleri

birleştirilmekte ve bu istekler için tek bir uçuş planlanmaktadır. Böylece zaman ve kaynak tasarrufu yapılmaktadır.



Şekil 1. Uçuş bacakları planlaması

2.2. Varsayımlar

Bütün modellere ait ortak kuramsal varsayımlar şunlardır:

- Sonraki günlere uçuş planlaması yapılan, grup halinde gelen keşif istekleri her gün saat 17.00'de keşif filosuna ulaşmaktadır.
- Uçuş planlaması yapılrken miadi erken olan keşif isteklerine öncelik verilmektedir. Toplam uçuş mesafesi (üs-hedef, hedef-hedef arası mesafeler) Pisagor teoremi [2] kullanılarak hesaplanmaktadır. Her bir hedef ait görüntülerin elde edilmesi için geçen süre eşit olup 10 dakikadır. Uçuş süresi, toplam uçuş mesafesinin mil başına geçen ortalama süreyle çarpılması ve bu süreye hedeflere ait görüntülerin çekilmesi için geçen sürenin eklenmesi sonucu bulunmaktadır.
- Uçaklar, bir mili ortalama 0.3 dakikada katetmektedir.
- Uçuşlar arasında en az 15 dakika süre vardır.
- Özel kamera gereksinimlerinden dolayı (optik veya kızılıötesi) gündüz ve gece uçuşları ayrı, kısıtlı zaman dilimlerinde yapılmaktadır. Film veya görüntülerin analizcisi tarafından yorumlanarak değerlendirilmesi, herhangi bir kısıt olmaksızın her zaman yapılabilmektedir.

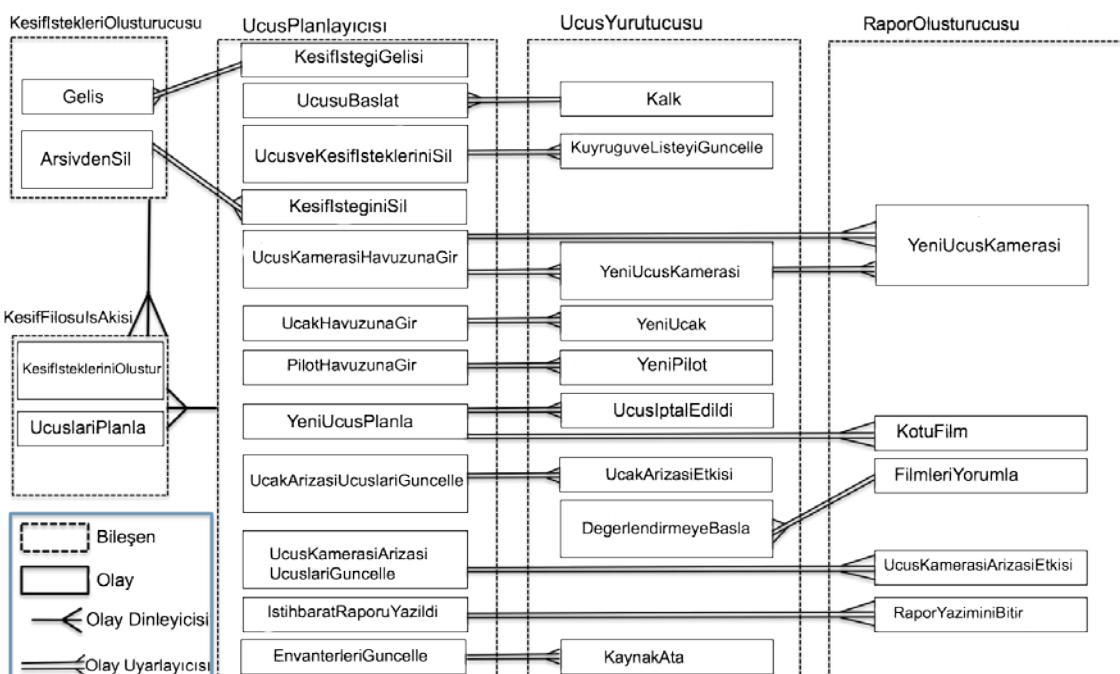
A tipi uçakların barış durumunda kullanılması modeline ait ek kuramsal varsayımlar şunlardır:

- Uçuşlarda iki pilot görev almaktadır.
- Filmlerin yorumlanarak değerlendirilmesi içinde her hedef için iki kıymetlendirme personeli atanmaktadır.

- Uçakların üzerine yedek kamera konulmaktadır.
 - Her bir keşif isteği için yeni uçuş planlanmaktadır. Önceki keşif istekleri için yazılan keşif raporlarının tutulduğu arşiv kullanılmamaktadır.
 - Optik kamera gereksinimi olan gündüz uçuşları, 10.00 – 16.00 saatleri arasında icra edilmektedir.
 - Kızılıötesi kamera gereksinimi olan gece uçuşları, 18.00 – 24.00 saatleri arasında icra edilmektedir.
 - Ana uçuş planlaması her gün saat 03.00'te yapılmaktadır. Uçak/kamera arızaları veya pilotun çekim hatası gibi sebeplerden dolayı yeniden yapılması gereken ilave uçuşlar otomatik planlanmaktadır.
 - Pilotlar her başarılı uçuştan sonra iki saat dinlenmektedir.
 - Uçağın inişinden sonra on dakika içerisinde bakım için uçak hangara çekilmekte ve motoru durdurulmaktadır. Uçağın arıza harici rutin bakımı yetmiş beş dakika sürmektedir.
 - Keşif isteklerine önceliklerine uygun olarak miat verilmektedir.

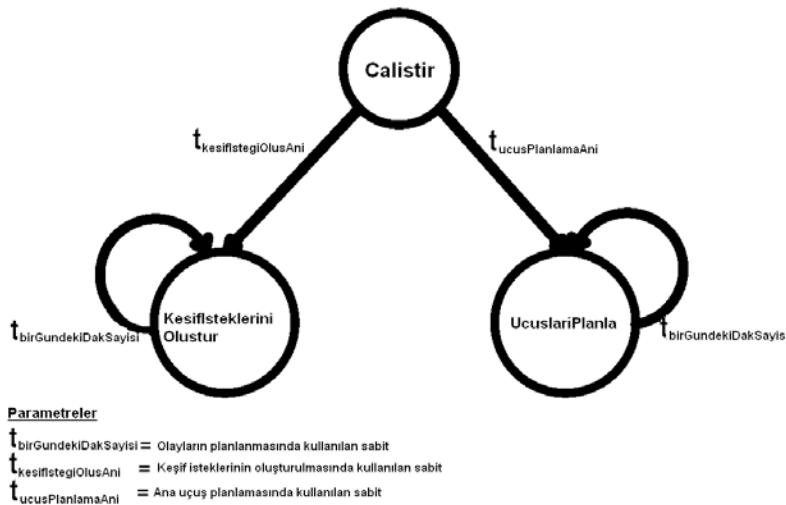
2.3. Olay Grafikleri

A tipi uçakların barış durumunda kullanılması modeline ait bileşenler, Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu beş bileşen birbirinden olay dinleyici ve uyarlayıcılarıyla birbirine bağlanmıştır. Dinleyici ve uyarlayıcı ilişki ve yapıları hakkında bilgi [3]'te bulunmaktadır. Her bir bileşen aşağıda kısaca açıklanmıştır. Olay grafiklerinde parametreler ve durum değişkenleri (durum değişkeni geçişleri hariç) gösterilmiştir.



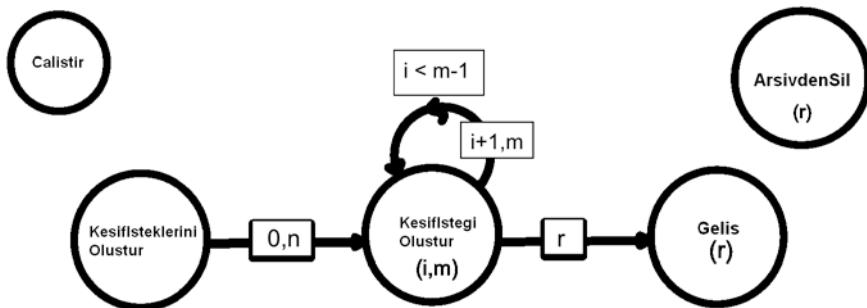
Sekil 2. A tipi uçakların barış durumunda kullanılması modeli bileşenleri

Sekil 3'te gösterilen KesifFilosuIsAkisi bileşeni simülasyon saatı gibi çalışmaktadır.



Şekil 3. Keşif filosu iş akışı bileşeni

Şekil 4'te gösterilen KesifIstekleriOlusturucusu bileşeni grup halinde gelen günlük keşif isteklerinin oluşturulması, başarılı keşif istek sonuçlarında bulunan hedeflerin hedef arşivine kaydedilmesi ve cevaplanmayan keşif isteklerinde bulunan hedeflerin hedef arşivinden silinmesi işlerini yapmaktadır.



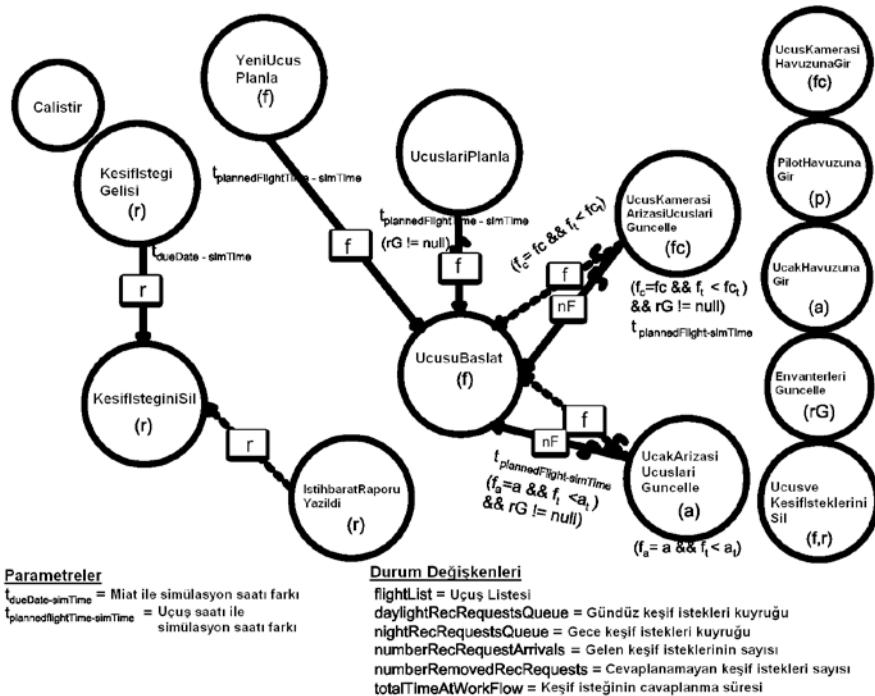
Şekil 4. Keşif istekleri oluşturucusu bileşeni

Şekil 5'te gösterilen UcusPlanlayicisi bileşeni elde bulunan kaynaklara (uçak, pilot ve uçuş kamerası) göre keşif uçuşlarını dinamik bir şekilde planlar. Uçuş planlaması sırasında hedefleri birbirine yakın ve kamera ihtiyaçları aynı olan keşif isteklerini birleştirir ve bu istekler için tek bir uçuş planlar. Uçuş sürelerinin hesaplandığı bu bileşende aşağıda listelenen birimlerin kaydı tutulur:

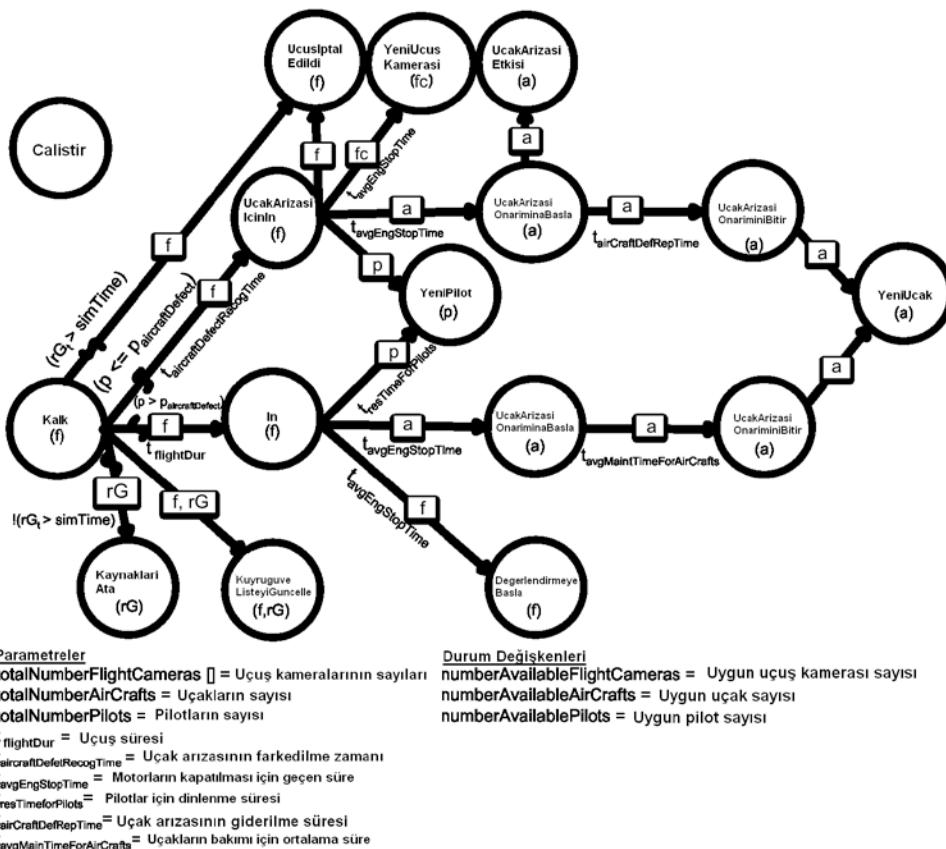
- Uçak, pilot ve uçuş kamerası envanterleri.
- Planlanmış uçuş listesi.
- Gündüz ve gece keşif isteklerinin tutulduğu iki ayrı kuyruk.

Şekil 6'da gösterilen UcusYurutucusu bileşeni, keşif uçuşlarının icrası ve uçuş sonrası olan işleri yapar. Tüm modeldeki durum değişkenlerinin birçoğu bu bileşende tutulmaktadır.

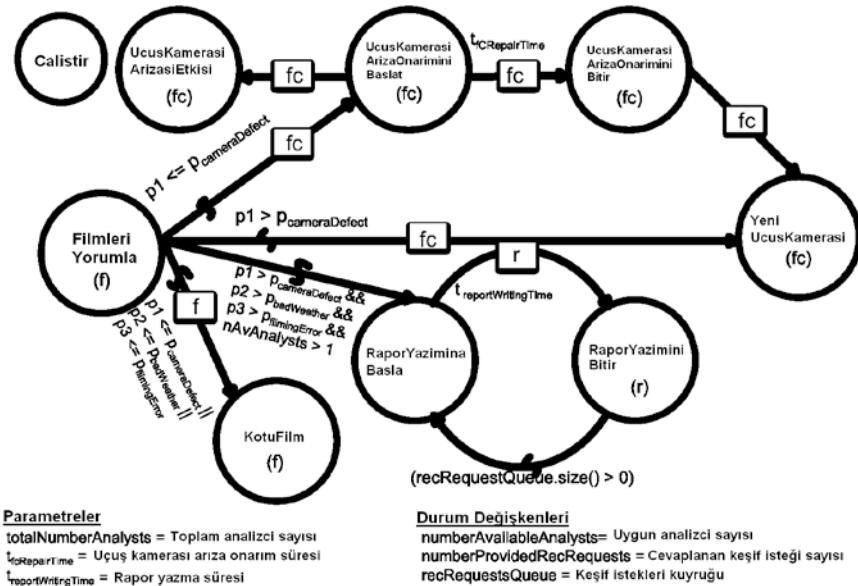
Şekil 7'de gösterilen RaporOlusturucusu bileşeni başarılı bir keşif uçuşu sonrası yapılan filmlerin yorumlanması ve keşif raporlarının yazılması işlerini yürütmektedir.



Şekil 5. Uçuş planlayıcısı bileşeni



Şekil 6. Uçuş yürütücüsü bileşeni



Şekil 7. Rapor oluşturucusu bileşeni

2.4. Modellerde Kullanılan Faktörler

Modellerde kullanılan karar ve parazit faktörleri Şekil 8'de listelenmiştir.

S.No	Faktörler	Başlı durumu	Savaş durumu	Başlı durumu	Savaş durumu
		A tipi uçaklar	A tipi uçaklar	B tipi uçaklar	B tipi uçaklar
1	T1 tipi podların sayısı			+	+
2	T2 tipi podların sayısı			+	+
3	T1 tipi kameraların sayısı	+	+		
4	T2 tipi kameraların sayısı	+	+		
5	T3 tipi kameraların sayısı	+	+		
6	T4 tipi kameraların sayısı	+	+		
7	T5 tipi kameraların sayısı	+	+		
8	Uçak sayısı	+	+	+	+
9	Pilot sayısı	+	+	+	+
10	Analizci sayısı	+	+	+	+
11	Kesif isteği sayısı orta noktası	+	+	+	+
12	Kesif isteği sayısı yarı uzaklığ	+	+	+	+
13	Yüksek öncelikli kesif isteği miadi için gün sayısı orta noktası	+		+	
14	Yüksek öncelikli kesif isteği miadi için gün sayısı yarı uzaklığ	+		+	
14	Yüksek öncelikli kesif istek sayısının düşük öncelikli kesif istek sayısına oranı	+		+	
16	Optik resim tipi olasılığı	+	+	+	+
17	T1 tipi kameraların arıza yapma olasılığı	+	+		
18	T2 tipi kameraların arıza yapma olasılığı	+	+		
19	T3 tipi kameraların arıza yapma olasılığı	+	+		
20	T4 tipi kameraların arıza yapma olasılığı	+	+		
21	T5 tipi kameraların arıza yapma olasılığı	+	+		
22	T1 tipi podların arıza yapma olasılığı			+	+
23	T2 tipi podların arıza yapma olasılığı			+	+
24	Uçakların arıza yapma olasılığı	+	+	+	+
25	Pilotun film çekimi hatası yapma olasılığı	+	+		
26	Hava durumunun kötü olma olasılığı	+	+	+	+
27	Güncel istihbarat raporu isteme olasılığı			+	+
28	Veri bağlantısının arıza yapma olasılığı			+	+
29	Keşif isteğinde diken ağını belirtmesi olasılığı			+	+
30	Gecegörüş isteğinin gündüz veya gece ucuşması olasılığı			+	+
31	Uçağın hedef bölgesinde düşürülmeye olasılığı			+	+
32	Uçak arızası giderilme süresinin orta noktası	+	+	+	+
33	Uçak arızası giderilme süresinin yarı uzaklığ	+	+	+	+
34	Pod arızası giderilme süresinin orta noktası			+	+
35	Pod arızası giderilme süresinin yarı uzaklığ			+	+
36	Taktik kamera arızası giderilme süresinin orta noktası	+	+		
37	Taktik kamera arızası giderilme süresinin yarı uzaklığ	+	+		
38	Stratejik kamera arızaları giderilme sürelerinin taktik kamera arızaları giderilme sürelerine oranı	+	+		

Şekil 8. Modellerde kullanılan faktörler

3. SONUÇ

Keşif filosu basitleştirilmiş iş akışı döngüsü keşif isteklerinin keşif filosuna geliş, keşif uçuşlarının planlanması, planlanan uçuşların icrası, elde edilen film veya görüntülerin kıymetlendirilmesi ve yazılan keşif raporlarının dağıtılması olaylarını içermektedir. Bu döngü herhangi bir keşif filosuna uygulanabilecek genel ve kuramsal bir yapıdadır. Keşif döngüsü, dört farklı senaryo (A ve B tipi uçaklar için barış ve savaş senaryoları) için modellenmiştir. Bu makalede özellikle A tipi uçakların barış durumunda kullanılması senaryosu üzerinde durulmuştur.

Modellerin geliştirilmesinde temel modelleme süreci ve ayrık olay simülasyonu teknikleri kullanılmıştır. Modellerdeki varsayımlar mantıklı fakat tamamen kuramsaldır. Simülasyon modülleri, her bir senaryoya ait ayrıntılı olay grafiği bileşenleri ışığında Simkit simülasyon kütüphanesi kullanılarak Java programlama dilinde geliştirilmiştir.

Keşif filosu iş akışı döngüsüne ait iki önemli bakış açısı bulunmaktadır. Bunlar keşif isteklerini yapanlarla keşif filosu komutanlarının bakış açılarıdır. İstekleri yapanlar, bir istek yapmadan önce isteklerinin eldeki kaynaklara ve diğer faktörlere bağlı olarak ortalama ne kadar süre içerisinde cevaplanacağını bilmek isterler. Keşif filosu komutanları ise mümkün olduğu kadar fazla keşif isteği cevaplamak isterler. Bu istekleri karşılamak için tanımlanan etkinlik ölçüleri koşum sonrası kullanıcıya gösterilmektedir.

Analizci için geliştirilen grafiksel kullanıcı arayüzü sayesinde simülasyonlarda kullanılacak karar ve parazit faktörlerinin değerleri değiştirilerek simülasyonlar kolayca koşturulabilmektedir. Bu sayede gerçekçi değerler simülasyona girilebilmekte, doğru ve geçerli analizler yapılabilmektedir. Analizciye sunulan etkinlik ölçüleri kaynak planlama ve karar verme süreçlerinde kullanılabilir.

4. KAYNAKÇA

- [1] Gething, M. J., Hewish, M., & Lok, J. J. (1 Ekim 2003). Hava keşfinde yeni podların faydası. *Jane's uluslararası savunma dergisi*.
- [2] Purple Math, G. (2010). Uzaklık formülü. 22 Mayıs 2010'da <http://www.purplemath.com/modules/distform.htm> adresinden alınmıştır.
- [3] A.H.Buss, P.J. Sanchez (2002 Simülasyon Konferansı. Kışın kazançları, 1. Kitap). *Kompleks modellerin LEGOs (Dinleyici olay grafiği nesneler) kullanılarak oluşturulması*.

İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN ÇOK KRİTERLİ GÜZERGAH PLANLAMA MODELİ

Halil Cicibaş, Kadir Alpaslan Demir, Nafiz Arıca

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Deniz Harp Okulu, Tuzla/İSTANBUL

{ hcicibas,kademir,narica}@dho.edu.tr

ÖZ

Bu bildiride Orta İrtifalarda Uçuş ve Uzun Havada Kalış İmkanına Sahip İnsansız Hava Araçları (Medium Altitude Long Endurance Unmanned Aerial Vehicles-MALE UAVs) için geliştirilen çok kriterli güzergah planlama (multi-criteria path planning) modeli anlatılmaktadır. Önerilen model yardımıyla insansız hava araçlarının uçuş kabiliyetlerini, temel havacılık kurallarını, ortam dinamiklerini dikkate alarak insansız hava araçları için mesafe, süre, yakıt tüketimi açısından optimal güzergahlar planlanabilmektedir. Ayrıca model, uçuş öncesi (offline) ve uçuş esnasında (online) güzergah planlamalarının dinamik olarak yapılabilmesine imkan tanımaktadır. Bu çalışmanın diğer güzergah planlama çalışmalarından farkı, operasyonel ortam faktörlerini de içine alan daha fazla sayıda uçuş kriterinin planlamada dikkate alınmasıdır. Geliştirdiğimiz model sayesinde İHA'larının otonom ve operatör kullanımlı uçuşlarında temel havacılık kurallarına uygun, etkin ve emniyetli güzergahlar planlanabilmesine olanak sağlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İnsansız Hava Araçları, Çok kriterli güzergah planlama, Modelleme, Simülasyon

MULTI-CRITERIA PATH PLANNING MODEL FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

ABSTRACT

In this paper, we present a multi-criteria path planning model for Medium Altitude Long Endurance Unmanned Aerial Vehicles (MALE-UAVs). The model aids in offline and online planning of optimal paths in terms of time, distance and fuel consumption, while considering UAV performance limitations, basic aviation rules and dynamics of operational environments. In addition, our model enables dynamic path planning. Compared to other studies, our model consists of more flight criteria including operational environment factors. With the help of proposed model, autonomous and operator controlled flights may be planned effectively, and safely.

Keywords: Path planning, Unmanned Aerial Vehicles, Multi criteria planning, Modeling, Simulation

1. GİRİŞ

İnsansız hava araçları (İHA), yakın zaman içerisinde gerek sivil gerekse askeri kullanım alanlarındaki en gelişmiş sistemler arasında yerlerini almışlardır. Bu araçların üretilmesi ve teknolojilerinin geliştirilmesi yönünde birçok çevreler tarafından önemli mühendislik atılımları gerçekleştirilmektedir. Yapılan çalışmaların birçoğunun ana hedefi bu sistemlerin daha emniyetli otonom uçuşlar gerçekleştirmelerini sağlamak üzerinedir.

Literatürde, İHA'larının otonomluk alanındaki çalışmalar hiyerarşik olarak birbirinden ayrılabilir [24]. Bu çalışmalar, [24]'de yer alan İHA'larda Akıllı Karar Verme Mimarisi (*UAS Intelligence Decision Making Architecture*) ile gruplanabilir. Belirtilen mimari yapı, temel olarak 4 ana katmana ayrılmaktadır. İlk katmanda yer alan çalışmalar uçuş sırasında oluşabilecek hataların en aza indirilmesini ve giderilmesini hedeflemektedir. İkinci katmandaki çalışmalar ise aviyonik alanındadır. Bu çalışmaların ana hedefi uçağın 3 boyutlu uzayda anlık hareketlerini planlamaktır. Üçüncü katmanda yer alan çalışmalar ise otonom güzergah planlama üzerindedir. Bu katmandaki çalışmaların amacı başlangıç ve varış noktaları arasında İHA'nı etkin şekilde yönlendirmektir. Son katmandaki çalışmalar ise İHA'nın görev amaçları ve kısıtları, diğer unsurların hareketleri ve durumsal farkındalık bilgilerine istinaden daha üst seviyede yapılan planlamalara yönelikdir. Bildiride anlatılan çalışma ise üçüncü katmanda bulunan otonom güzergah planlama (Autonomous Path Planning) alanındaki hususlara odaklanmaktadır. Ancak, geliştirdiğimiz model, dördüncü katmanda yer alan daha üst seviyedeki bazı uygulamalar (görev planlaması gibi) için de kullanılabilir.

İHA'larda güzergah planlama, uçuş başlangıç noktasından varış noktasına erişene dek çeşitli kısıtlar altında üzerinden geçilecek noktaların belirlenmesi olarak nitelendirilebilir. Otonom güzergah planlama alanındaki yapılan çalışmalarla İHA'nın performans kabiliyetleri, operasyonel ortam şartları, temel uçuş kuralları ve görev nitelikleri gibi kriterleri dikkate almak, İHA'larının kendilerine verilen görevleri etkinlikle icra etmelerine katkı sağlayacaktır. Gerçekçe yakın faktörlerin güzergah planlamalarına dahil edilmesiyle İHA'larının daha emniyetli ve daha güvenilir otonom uçuşlar gerçekleştirebilecekleri öngörmektedir. Ayrıca bu faktörlerin dikkate alınması, uçuş öncesinde daha gerçekçi planlamaların yapılmasını sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Literatürde yer alan güzergah planlama çalışmalarında [6-22] yer alan kriterler ve maliyet kısıtları, problem alanındaki hususlar dikkate alınarak belirlenmektedir. Tehdit faktörü, hareketli engeller, coğrafi yapı gibi kriterler ile mesafe, süre gibi maliyet kısıtları bu çalışmaların birçoğunda yer almaktadır. Bu çalışmalar arasında, [6]'da yapılan çalışma, İHA'ların sivil amaçlarla kullanılabilmesini sağlayacak gerçek zamanlı ve çok kriterli güzergah planlama yaklaşımı sunmaktadır.

Bu çalışmanın diğer güzergah planlama çalışmalarından farkı, operasyonel ortam faktörlerini de içine alan daha fazla sayıda uçuş kriterinin planlamada dikkate alınmasıdır. Benzer çalışmalarda yer alan kriterler ve maliyet kısıtları ile çalışmamızda yer alan kriterler ve maliyet kısıtları Tablo 1'de karşılaştırılmaktadır.

Bildiride yer alan model, İHA'ların kullanım konseptlerinin [23] analiz edilmesi ile geliştirilebilirlik prensiplerine uygun olarak oluşturulmuştur. Araştırma sonuçlarının diğer araştırmalarda da rahatlıkla tekrar edilebilmesi maksadıyla çalışma esnasında açık kaynaklardan erişilebilecek yazılım geliştirme ortamlarının ve verilerinin kullanılmasına özen gösterilmiştir.

Tablo 1: Uçuş Kriterleri ve Maliyet Kısıtları

Uçuş Kriterleri (Flight Criteria)	[11]	[13]	[21]	[9]	[20]	[6]	Geliştirilen Model
Coğrafi yapı	Var	Yok	Var	Var	Var	Var	Var
Mimari yapılar	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Var
Tehlikeli bölgeler	Yok*	Yok*	Yok*	Yok*	Yok*	Yok*	Var
Emniyet irtifaları	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Var	Var
Hava Sınıf Ayırmaları	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Var	Yok***
Rota-irtifa ayırmaları	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Var	Var
Hareketli Unsurlar	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var
Bulut	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Var
Hareketli Hedefler	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Var
Yerdeki Hareketli Tehditler	Yok*	Yok*	Yok*	Yok*	Yok*	Yok*	Var
Rüzgar	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Var	Var
3-Boyut	Var	Yok	Var	Var	Var	Var	Var
Uçuş Maliyet Kısıtları (Flight Objectives)							
Uçuş Mesafesi	Var	Yok	Var	Var	Var	Var	Var
Uçuş Süresi	Yok	Var	Yok	Yok	Yok	Var	Var
Yakıt Tüketimi	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Var	Var
Risk/Tehdit/Gizlilik	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Yok**
Güzergah Düzlüğü	Yok	Yok	Yok	Var	Yok	Yok	Yok

* Uçuş maliyetlerine etki edecek şekilde modellenmiştir.

** Uçuş kriteri olarak modellenmiştir. Tehditli alanlara kesinlikle İHA girmemektedir.

*** Çalışmamızdaki operasyonel ortamda İHA'nın herhangi bir hava sınıfı ayrimına uymasına gerek yoktur.

Bildirinin ikinci bölümünde, çok kriterli güzergah planlama modeline; üçüncü bölümde, modelin geliştirilmesinde kullanılan araçlar ve simülasyon sonuçlarına ilişkin hususlara; son bölümde ise sonuç ve değerlendirmelere yer verilmektedir.

2. ÇOK KRİTERLİ GÜZERGAH PLANLAMA MODELİ

Modelimizde İHA'nın uçuşunu gerçekçi ve emniyetli bir şekilde tamamlayabilmesi için çeşitli uçuş kriterleri kullanılmıştır. Bu kriterler [6]'da belirtilen kriterler ile çalışma kapsamında belirlediğimiz kriterlerin birleşiminden oluşmaktadır. Ayrıca bulut ve hareketli hedefler İHA alanında ilk defa bu çalışmada uçuş kriteri olarak kullanılmıştır. Modelin amacı çeşitli uçuş kısıtları altında en az maliyetli güzergahları planlamaktır. Çalışma kapsamında dikkate aldığımız uçuş kriterleri şunlardır:

<ul style="list-style-type: none"> • Sabit Kriterler <ul style="list-style-type: none"> ◦ Coğrafi yapı ◦ Mimari yapılar ◦ Tehditli bölgeler ◦ Emniyet irtifaları ◦ Rota-irtifa ayırmaları 	<ul style="list-style-type: none"> • Dinamik Kriterler <ul style="list-style-type: none"> ◦ Hareketli Unsurlar ◦ Bulut ◦ Hareketli Hedefler ◦ Yerdeki Hareketli Tehditler ◦ Rüzgar
--	---

Güzergah planlama esnasında dikkate alınan bu kriterler sabit ve dinamik olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Sabit kriterlerin değerlerinde uçuş boyunca değişiklik olmadığı kabul edilir. Bu kriterlerin değerleri veya mevkileri hesaplama öncesinde belirlenir ve hesaplama süresince değiştirilmeden kullanılır. Dinamik kriterler ise zamana bağlı olarak değerlerinde veya mevkilerinde ölçülebilir değişimler yaşanan kriterlerdir. Bu tip kriterlerin değerleri veya mevkilerindeki değişimler gerçek zamanlı olarak güncellenmektedir. Güzergah planlama hesabı 3 boyutlu arama uzayında yapılmaktadır. Arama uzayının yaratılmasında ızgara (grid) yapısı kullanılmıştır.

Güzergah planlamada, kriterler ve temel uçuş gereksinimleri belirlendikten sonra hesaplamaya geçilmektedir. Çalışma kapsamında kolay uygulanabilirliği, bütünlüğü (*completeness*) ve optimal sonuçlar üretmesi nedeniyle A* sezgisel arama algoritması tercih edilmiştir.

2.1. Uçuş Kriterleri

Bu kısımda modelde kullanılan uçuş kriterleri inceleneciktir. Bildiride yer alan kriter modellerinin uçuş öncesi planlama safhasında İHA yer kontrol istasyonları tarafından; uçuş safhasında ise İHA'nın sensör ve cihazları ile oluşturulabildiği kabul edilmiştir. Bu varsayımda, İHA'larının günümüz ve gelecek teknolojik gelişimleri göz önüne alındığında geçerli bir varsayımdır.

2.1.1. Sabit Uçuş Kriterleri

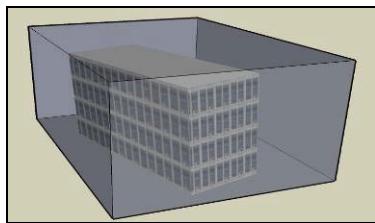
Sabit uçuş kriterlerinin maliyetleri zamana bağlı olarak değişmez. Bu nedenle kriter maliyetlerinin sadece bir defa hesaplanması yeterli olacaktır. Tüm uçuş süresince dikkate alınan kriter maliyeti aynıdır.

Coğrafi Yapı: Coğrafi yapı, eş yükselti eğrilerinin bulunduğu sayısal haritalardan faydalananarak 3 boyutlu uzaya aktarılmıştır [5]. Arama uzayında coğrafi yapılar erişilemez alanlar olarak tanımlanmaktadır.

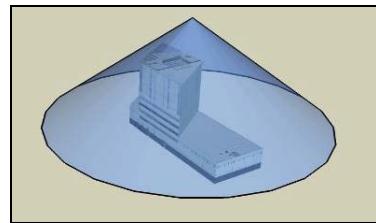
Mimari Yapılar: Uçuş öncesinde bu yapılar, varsa veritabanlarından yoksa kullanıcı tarafından arama uzayına dahil edilmektedir. Uçuş esnasında ise bu yapıların İHA tarafından algılanarak sayısal verilere otomatik çevrildiği varsayılmaktadır. Çalışmada, mimari yapılar özelliklerine bağlı olarak kübik veya konik alanlar olarak temsil edilmiştir (Şekil 1 ve Şekil 2).

Tehditli Bölgeler: Tehdit kriteri, insansız hava aracının uçuşunu ya da görevin etkinlikle icrasını engelleleyebilecek her türlü unsuru kapsamaktadır. Bu kriterin hesaplanması

tehdit oluşturabilecek unsurların mevki bilgilerinin daha önceden tespit edildiği kabul edilmektedir. Tehditli bölgeler küresel alanlar ile temsil edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 1: Mimari Yapının Kübik Gösterimi



Şekil 2: Mimari Yapının Konik Gösterimi

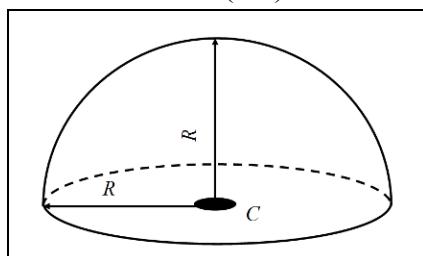
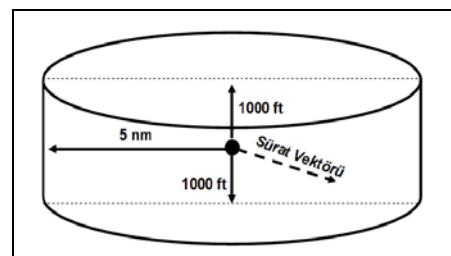
Emniyet İrtifası: Emniyet irtifası, İHA'nın herhangi bir coğrafi engele çarpmasını engellemek amacıyla belirlenen asgari uçuş yüksekliğini belirtmektedir. Açık kaynaklardan elde edilen İHA kullanım konseptlerine göre emniyet irtifası 5000ft. olarak belirlenmiştir.

Rota-İrtifa Ayrımı: Bu kriter, havada farklı yönlere ilerleyen hava araçları arasında oluşturabilecek çatışmaları önlemek maksadıyla havacılıkta kullanılan temel kurallardan biridir. Bu kriter kapsamında rotası 0° ile 179° arasında olan araçların tek sayı ile başlayan irtifalarda (Ör. 1000ft, 3000ft, 5000ft..); rotası 180° ile 359° arasında olanların ise çift sayı ile başlayan irtifalarda (e.g. 2000, 4000, 6000ft ...) uçmasına izin verilmektedir.

2.1.2. Dinamik Uçuş Kriterleri

Bu kriterlerin maliyetleri ve mevkileri zamanla değişmektedir. Her bir kriterin maliyeti ve mevkisi İHA varışa gelene kadar güncellenir. Güncelleme işlemi, sensör verileri ya da geçmiş bilgilere göre yapılır.

Hareketli Unsurlar: Operasyonel ortamdaki diğer unsurlar ile İHA arasındaki çatışmayı önlemek amacıyla *Rota-İrtifa Ayrım* kuralına ilave tedbirler kullanılmalıdır. Bu yaklaşımda, diğer hava araçları silindirik yapılar olarak modellenmektedir (Şekil 4). Hava ayırmalarının belirlenmesi dikey ve yatay ayırm mesafeleri ile ilerleme vektörüne bağlı olarak yapılmaktadır. Modelde dikey ayırm mesafesi 2000 ft, yatay ayırm mesafesi 5 deniz mili (nm) olarak belirlenmiştir.

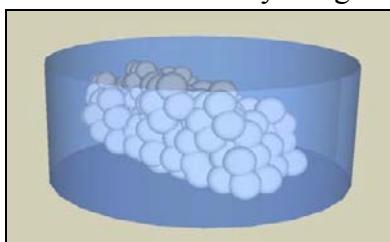
Şekil 3: Tehditli alanlar (R =menzil, C =tehdit merkezi)

Şekil 4: Hava unsurlarına ait hava ayırm alanı

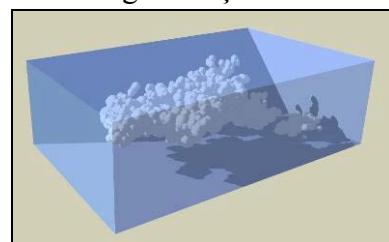
Hareketli Hedefler: İHA'nın tespit edeceği hedeflerin hareketli olması, yapılan hesaplamaların çeşitli öngörlere dayanması ve sürekli güncellenmesi zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır. Bildiride yer alan modelde İHA, hedefe ait bilgiler değişikçe güzergahını güncelleyebilmektedir. Modelde, İHA'larının hedef mevkisinde değişimleri

takip edebildiği kabul edilmiştir. İHA, güzergah planlama esnasında hedefin mevcut mevkisi yerine hedef ile buluşma anındaki hedefin muhtemel mevkisini dikkate alır. Böylece İHA, kendisi ile hedefi buluşturan en az maliyetli güzergahı hesaplayarak gereksiz uçuş güzergahları izlememiş olur.

Bulut: Bulutlar, İHA'larının görevlerini icra etmelerini kısmen engelleylebilecek yapıda yada mevkide olabilirler. Modelde, tespit edilecek hedef mevkisi üzerinde bulut mevcutsa İHA'nın hedefin bulunduğu bölgeye yaklaştığında bulutun altına inmesi sağlanmaktadır. Diğer bölgelerde ise İHA'nın bulut içinden geçmesine izin verilebilmektedir. Bulutların tespiti, yer kontrol istasyonu ya da İHA'nın sensörleri ile yapılabılır. Bulutların 3 boyutlu gösterimi Şekil 5 ve 6'da sergilenmiştir.



Şekil 5: Bulutun silindirik olarak gösterimi



Şekil 6: Bulutun kübik olarak gösterimi

Yerdeki Hareketli Tehditler: Sabit kriterlerde açıklanan tehditler kriteri ile benzer şekilde modellenen ancak hareketli olup İHA'nın uçuşunu tehdit edebilecek yerdeki unsurlardır.

Rüzgar: Rüzgar kriteri İHA'nın yere göre olan anlık sürat vektörünün hesaplanması için kullanılmaktadır. Rüzgara bağlı olarak İHA'nın süratı ve harcanan yakıt miktarı değişebilmektedir. Rüzgarın maliyetlere etkisi sonraki bölümde detaylandırılmıştır.

2.1.3. Uçuş Maliyetleri

Uçuş maliyetleri, yukarıdaki kriterler göz önüne alınarak hesaplanan güzergahın izlenmesi sonucunda ortaya çıkan toplam maliyet değeridir. Uçuş maliyetleri görev nitelikleri, kullanıcı gereklilikleri gibi faktörlere bağlı olarak belirlenebilir. Amaç fonksiyonuna bu maliyetler tek olarak (1) ya da diğer maliyetler ile ağırlıklı olarak dahil edilebilirler (2). Amaç fonksiyonunun ağırlıklı olması halinde maliyetlerin sahip olduğu ağırlık değerlerinin belirlenmesi hassaslıkla yapılmalıdır. Çalışmamızda 3 adet uçuş maliyeti dikkate alınmıştır. Bu maliyetler bildirinin hazırlandığı dönemde tek olarak amaç fonksiyonuna ilave edilmektedir. Ancak, çalışmanın sonraki dönemlerinde çok maliyetli (multi-objective) olarak algoritmanın çalıştırılması planlanmaktadır. Bildiride yer alan maliyetleri mesafe, süre ve yakıt tüketimi gibi sıralayabiliriz:

$$F(x)=\min(f_{\text{mesafe}}(x)) \quad \text{veya} \quad F(x)=\min(f_{\text{süre}}(x)) \quad \text{veya} \quad F(x)=\min(f_{\text{yakıt}}(x)) \quad (1)$$

$$F(x)=\min(w_1 \cdot f_{\text{mesafe}}(x) + w_2 \cdot f_{\text{süre}}(x) + w_3 \cdot f_{\text{yakıt}}(x)) \quad (2)$$

$w_{1,2,3}$: Maliyet ağırlığı
 $f_{\text{mesafe}}(x)$: Mesafe maliyeti

$f_{\text{süre}}(x)$: Süre maliyeti
 $f_{\text{yakıt}}(x)$: Yakıt maliyeti

Mesafe: Literatürde yer alan güzergah planlama çalışmalarının çoğunda mesafenin amaç fonksiyonu olarak kullanılmasının nedeni mesafenin temel bir karşılaştırma ölçütü

olması ve diğer maliyet tiplerine temel oluşturmaktadır. Bu nedenle biz de çalışmamızda mesafeyi bir maliyet tipi olarak ele alındı. Çalışma kapsamında mesafe maliyeti, başlangıç düğüm ile varış düğümünü birleştiren en kısa hat üzerindeki düğümlerin belirlenmesine dayanmaktadır.

Süre: Bir düğümden diğer bir düğüme varış süresinin en aza indirilmesi zaman-kritik uçuşlarda önemli bir husustur. Süre maliyeti, rüzgar ve ilerleme vektörü ile düğümler arası mesafeye bağlı olarak hesaplanır. Rüzgar hızı ve yönü, İHA'nın rotası ve süratinde değişikliklere yol açarak uçuş süresini etkilemektedir. İHA'nın uçuşu boyunca motor süratının ortalama 60 mil/saat olduğu kabul edilmiştir. Bu varsayımlan uzmanlarıyla yapılan görüşmeler neticesinde elde edilen bilgiler ışığında yapılmıştır. Son faktör olan düğümler arası mesafeye ilişkin hususlar bir önceki kısımda anlatıldığı gibidir. Düğümler arasındaki uçuş süresi bahsedilen değişkenlere bağlı olarak (3) ile hesaplanır. İHA'nın toplam uçuş süresi ise (4) ile hesaplanır.

$$\tau(s, s') = \frac{d(s, s')}{|V_c + V_w|} \quad (3) \qquad t(s') = t(s) + \tau(s, s') \quad (4)$$

d : Düğümler arası mesafe,
 V_c : İHA motor süratı,
 V_w : Rüzgar süratı

$t(s)$: Varış düğümüne uçuş süresi
 $\tau(s, s')$: Düğümler arası uçuş süresi
 s' : Çocuk düğüm
 s : Ata düğüm

İHA'nın havaya göre olan süratının hesaplanması motor ve rüzgar süratının vektörel toplamı kullanılmaktadır. Ancak, rüzgarın sadece 2 boyutta İHA üzerine etki ettiği kabul edilerek dikey düzlemdeki bileşke vektörlerinin etkisinin yok sayılabileceği kabul edilmiştir. Yere göre olan hız vektörünün hesaplanması da kosinüs teoremi kullanılmıştır.

Yakit Tüketimi: Yakıt tüketimin oranını İHA'nın havada kalış süresini etkilemektedir. Birim zamandaki yakıt tüketimine irtifa ve sürat başta olmak üzere birçok faktör etki eder. Bu faktörleri şu şekilde sıralayabiliriz [6].

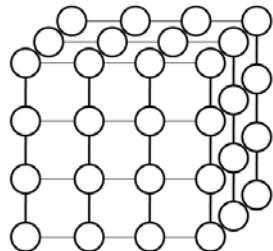
- İrtifa (Basınç)
- Sürat
- Sıcaklık
- İHA Ağırlığı
- Tırmanış ve Alçalış Açıları
- İHA motor özellikleri

Açık kaynaklardan MALE tipi İHA için herhangi bir yakıt modeline erişilememiştir. Bu nedenle geliştirilen model yapısında EngineSim [1] ortamında yer alan yakıt tüketim modellerinden dönüşüm yapılmıştır. EngineSim, NASA tarafından geliştirilmiş motor performans analizine imkan veren model tabanlı değerlendirme ortamıdır.

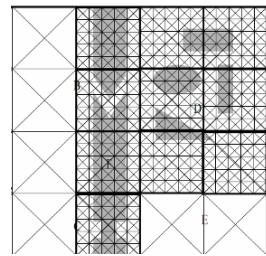
2.2. Ortam Benzetimi ve Arama Uzayı

Bu kısımda, İHA'nın faaliyet gösterdiği operasyon ortamının önceki bölümlerde belirtilen uçuş kriterleri de göz önüne alınarak 3 boyutlu arama uzayına dönüştürülmesi anlatılmaktadır. Arama uzayının oluşturulmasında uçuş kriterleri, İHA uçuş kabiliyetleri, temel görev nitelikleri, uçuş maliyetleri dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında oluşturulan 3 boyutlu arama uzayı çok-çözünürlüklü [25] olarak

tasarlanmıştır. Arama uzayı içinde bulunan düğümler arası mesafeler İHA'nın uçuş kabiliyetlerine istinaden belirlenmiştir. Arama uzayı olarak adlandırdığımız yapı, birçok düğüm ve düğümler arasındaki ilişkilerden oluşan 3 boyutlu ızgara modeline sahiptir (Şekil 7). Oluşturulan çok çözünürlüklu arama uzayının gösterimi Şekil 8'de yer almaktadır. Çok çözünürlüklu haritalar belirli oranda hesaplama karmaşıklığı ve zamanını azaltarak, gerekli hassasiyette güzergahların planlanmasılığını sağlamaktadır.

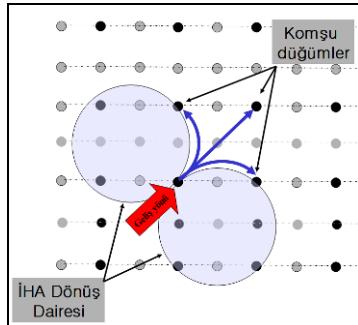


Şekil 7: Düğümlerden Oluşan Arama Uzayının Görünümü

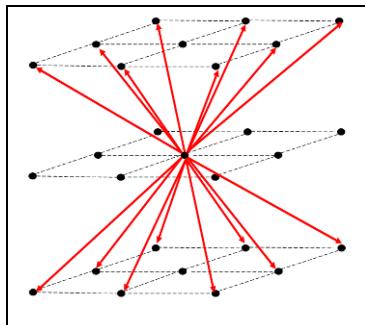


Şekil 8: Çok Çözünürlüklu Arama Uzayının 2 Boyutlu Görünümü

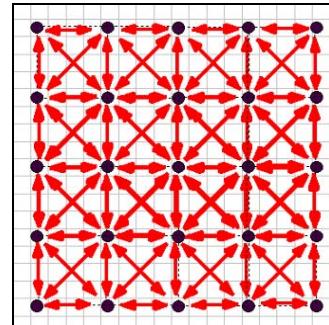
Düğümler arasındaki asgari mesafelerin belirlenmesinde İHA'nın dönüş çapı ile tırmanış ve iniş açıları dikkate alınmıştır. Dönüş çapı, yatay düğümler arasındaki; tırmanma ve iniş açısı ise dikey düğümler arasındaki mesafeyi etkilemektedir. Dönüş çapı 1 nm olarak kabul edilmiştir. Bu parametreler dikkate alınarak düğümler arasındaki mesafelerin seçilmesinde ve düğümler arasındaki komşulukların belirlenmesinde [7]'de belirtilen model kullanılmıştır (Şekil 9).



Şekil 9: İHA performans kabiliyetlerine göre komşulukların belirlenmesi [7]



Şekil 10: Dikey düğümler arasındaki komşuluk ilişkileri



Şekil 11: Yatay düğümler arasındaki komşuluk ilişkileri

Dönüş çapı dikkate alınarak yatay düğümler arasındaki asgari mesafe 1 nm; tırmanış ve iniş açısı dikkate alınarak da dikey düğümler arasındaki asgari mesafe 1000ft olarak belirlenmiştir. Arama uzayındaki her bir düğümün 3 boyutta toplam 24 adet komşusu bulunmaktadır. Şekil 10'da dikey düğümler arasındaki, Şekil 11'de ise yatay düğümler arasındaki ilişkiler gösterilmiştir.

2.3. İnsansız Hava Aracı Modeli

Model kapsamında kullanılan İHA'nın sahip olduğu cihazlar, sensörler, fiziksel kabiliyetler ve kısıtların belirlenmesinde, genel MALE tipi insansız hava araçlarının özellikleri baz alınmıştır. Modellenen İHA'na ait temel özellikler Tablo-2'de yer almaktadır.

Tablo 2: İHA Temel Özellikleri

Fiziksel Özellikleri			
Uzunluk	30 m	Kanat Genişliği	50 m
Ağırlık	2.500 lb	Yük Kapasitesi	500 lb
Performans Özellikleri			
Havada Kalış Süresi	24 saat	Max/İlerleme Süratı	120 kts, 60 kts
Azami Uçuş İrtifası	30.000ft	Kullanım çapı	200nm
İlerleme Süratinde Yakıt Tüketimi (60 kts - 20000 ft)	29,16 lb/saat	Timanma Yakıt Tüketimi İniş Yakıt Tüketimi	48,52 lb/saat 14,58 lb/saat
Dönüş Çapı	1 nm	Tırmanma Süratı	1000ft/dk

3. SİMÜLASYON

Bu bildirimizdeki odağımız İHA'ları için operasyonel ortamda dinamik güzergah planlama modeli geliştirilmesidir. Modelimizin geçerliliğini test etmek için simülasyonlar yapılmıştır. Bu bölümde yapılan simülasyonlara ilişkin genel hususlar kısaca anlatılmaktadır.

3.1. Kullanılan Araçlar

Modelin kodlanmasında Java programlama dili kullanılmıştır. Yapılan simülasyonlarda SimKit [3] kütüphanesi ve OpenMap [4] ortamından faydalanyılmıştır. Çalışma kapsamında yaratılan modellerin sonraki çalışmalarda tekrar kullanılabilirliğini ve çalışmanın sonraki dönemlerde hızlıca geliştirilebilmesine kolaylık sağlama maksadıyla Java dili seçilmiştir. SimKit kütüphanesi Naval Postgraduate School, A.B.D., tarafından geliştirilmiş ve Java dilinde yazılmış kütüphanelere sahip ayrık olay simülasyon aracıdır. OpenMap ise BBN Technologies tarafından geliştirilmiş, açık kaynak koduna sahip, çeşitli harita işlemlerine imkan tanıyan, Java platformu üzerinde çalışan ve görsel desteği bulunan bir ortamdır.

3.2. Simülasyon Altyapısı

Simülasyonlar Şekil-12'de belirtilen akış şemasını takip ederek çalışmaktadır. Bu akış şeması iki kısımdan oluşur. İlk kısımda statik ve dinamik kriterlerin değerleri ve konumları belirlenerek arama uzayına dönüştürülür ve arama işlemi gerçekleştirilir. İkinci kısımda ise dinamik kriterlerin değerleri ve konumları güncellenerek arama uzayı güncellenir. İkinci kısım sayesinde gerçek zamanlı olarak güzergah planlanmış olur. Dinamik kriterlerin ortamdaki hareketleri belirlediğimiz rota ve sürate bağlı olarak SimKit kütüphanesi yardımı ile kontrol edilmektedir.

3.3. Arama Algoritması

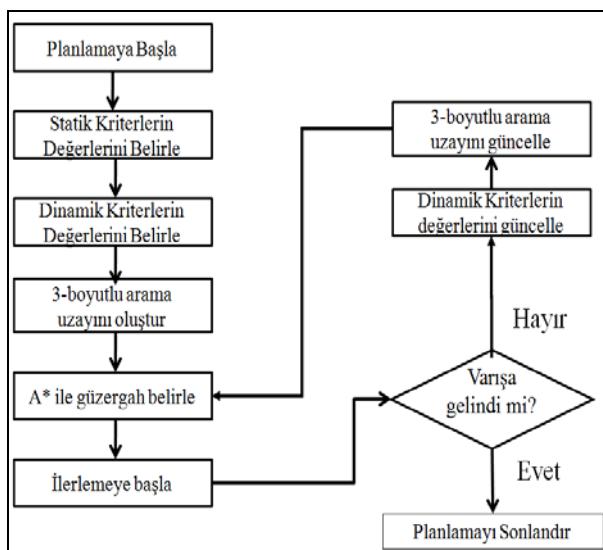
Uçuş öncesi planlama safhasında ve gerçek zamanlı uçuş esnasında güzergah, A* sezgisel arama algoritması ile hesaplanmıştır. Sezgisel arama algoritmaları birçok alanda kolay uygulanabilirliği nedeniyle güzergah planlamada sıkılıkla kullanılmaktadır [2]. A* arama algoritmasına ait amaç fonksiyonu $f(x)$, (5)'de belirtildmektedir. $g(x)$ başlangıç düğümünden o anki düğüme x , geliş maliyetini gösterirken $h(x)$ varışa olan sezgisel maliyeti ifade etmektedir.

$$f(x) = g(x) + h(x) \quad (5)$$

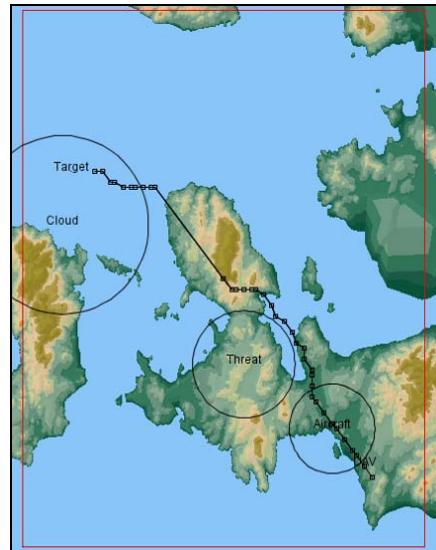
A^* algoritması, sezgisel arama algoritmaları arasında en yaygın kullanılan algoritmalar arasında yer almaktadır. A^* algoritması kabul edilebilir sezgisellerle çalıştırıldıklarında optimal sonuçlar bulmaktadır. Çalışmada, geniş bir kitle tarafından kullanılmış olması ve aramayı başlangıçtan varışa doğru (forward) yapmasından dolayı A^* arama algoritması tercih edilmiştir. A^* algoritması haricinde gerçek zamanlı planlama gerektiren ortamlarda kullanılabilen çeşitli sezgisel arama algoritmaları da bulunmaktadır. Ancak bu algoritmaların bir kısmı ($D^* Lite$ gibi) varıştan başlangıçta doğru (backward) çalışır. Bu nedenle söz konusu algoritmalarla modelimizdeki dinamik kriterler dikkate alınarak güzergah planlamak mümkün değildir. Sezgisel arama algoritmaları hakkında geniş bilgi [2]'de yer almaktadır.

3.4. Simülasyon Sonuçları ve Analiz

Model kriterleri dikkate alınarak statik ve dinamik olmak üzere 2 temel senaryo belirlenmiştir. Statik ortamda kriterlerin bir kısmı kullanılırken dinamik senaryoda ise tüm kriterler kullanılmıştır. Belirtilen senaryolar, varsayımlar ve altyapı kullanılarak mesafe, süre ve yakıt tüketimi maliyet kısıtlarına göre benzetim yapılmıştır. Simülasyona ilişkin ekran görüntüsü Şekil 13'de yer almaktadır.



Sekil 12: Simülasyon Akış Şeması



Sekil 13: Simülasyona İlişkin Ekran Görüntüsü

Simülasyonlar 2.93GHz Intel i5 işlemcili 3GB RAM ve 64-bit Windows 7 işletim sistemi yüklü bilgisayarda yapılmıştır. Simülasyonlar neticesinde güzergah hesaplama süresinin statik ortamlarda 10 saniyenin, dinamik ortalarda ise 40 saniyenin altında olduğu tespit edilmiştir. Ancak benzetim hesaplama süresi, arama uzayının boyutu, ortamdaki engel sayısı, arama algoritması gibi birçok faktöre bağlıdır. Aynı senaryo üzerinde benzetim yapılmadığı sürece diğer çalışmalarla sağlıklı bir karşılaştırma yapmak mümkün değildir. Modelimizin içерdiği kriter sayısı diğer çalışmalardan daha fazladır (Tablo 1).

Simülasyonlar neticesinde genel olarak elde edilen sonuçları aşağıdaki gibi:

- Modelin, İHA’larında çok kriterli güzergahlar planlama için kullanılabileceği,
 - Modelin çeşitli uçuş kriterlerini gözeterek beklenen uçuş maliyetlerini karşılayacağı,

- Ortam benzetimi ve arama uzayının kolayca geliştirilebilir ve değiştirilebilir şekilde tasarlanıp kodlanıldığı,
- Güzergah planlanma süresine çok çözünürlüklü yapının olumlu yönde etki ettiği,
- Kriter sayısının ve değerlerinin hesaplama süresini ve maliyetleri etkilediği tespit edilmiştir.

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bildiride, MALE tipi İHA'ları için geliştirdiğimiz çok kriterli güzergah planlama modeli anlatılmıştır. Bu modelde kullanılan uçuş kriterlerinin bir kısmı literatürdeki mevcut uçuş kriterlerinden seçilmiş bir kısmı ise bu çalışma kapsamında ilk defa belirlenmiştir. Çok kriterli güzergah planlama modeli sayesinde İHA için emniyetli ve daha gerçekçi kriterler kullanılarak güzergahların planlanması yapılmaktadır. Arama uzayının ızgara (grid) yapısında oluşturulması kriterlerin kolayca modele ilave edilmesini sağlamıştır. Bunun yanında arama uzayının çok çözünürlüklü yapıda kullanılması hesaplama zamanını önemli oranda azaltmaktadır. Ancak, operasyonel ortam genişledikçe arama uzayının büyülüğu artmakta ve ızgara yapısının yüksek bellek ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Arama algoritması olarak A* algoritmasının seçilmesi, optimal sonuçların elde edilmesini sağlamıştır. Ayrıca modelin Java platformu üzerinde geliştirilmiş olması açık kaynaklı araçlardan faydalananmasına imkan tanımıştir.

Önerilen modelin nesneye yönelik tasarım teknikleri ile üretilmesi, sonraki çalışmalarda modelin kolayca geliştirilmesine imkan sağlayacağı değerlendirilmektedir. Gelecek çalışmalarda uçuş kriterlerinin ihtiyaçlara bağlı olarak artırılması, gerçek İHA'lara ait yakıt tüketim modellerinin kullanılması, farklı arama algoritmaları ile aramanın yapılması ve farklı senaryolar kullanılarak modelin kullanılabilirliği ve limitlerinin analiz edilmesi planlanmaktadır. Ayrıca arama uzayının modellenmesinde bellek ihtiyacını en aza indirmek maksadıyla ızgara yapısı yerine çizge (graph) yapısının kullanılması üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

5. AÇIKLAMALAR

Bu bildirinin kapsamında olan direk veya dolaylı tüm fikir, yorum ve görüşler yazarların şahsi fikirleri olup, bağlı bulundukları hiçbir kurumun direkt veya dolaylı olarak resmi veya gayri resmi hiçbir görüşünü temsil etmezler. Bağlı bulundukları kurumlar bu bildiriden doğan her türlü sorumluluktan muafırlar.

6. KAYNAKLAR

- [1] EngineSim Version 1.7a <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/ngnsim.html>
Erişim Tarihi: 14 Mayıs 2011
- [2] D. Ferguson, M. Likhachev, and A. Stentz, “A guide to heuristic-based path-planning,” ICAPS Workshop on Planning under uncertainty for Autonomous Systems, 2005
- [3] A. Buss, “Component based simulation modeling with SIMKIT”, In Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2002.
- [4] OpenMapTM, BBN Technologies,<http://openmap.bbn.com>. Erişim Tarihi: 14 Mayıs 2011

- [5] NASA Jet Propulsion Laboratory. Shuttle radar topography mission, <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> Erişim Tarihi: 14 Mayıs 2011
- [6] P. Wu, P.Y. Campbell, A. Duncan, T. Merz, "On-board multiobjective mission planning for unmanned aerial vehicles", In IEEE Aerospace Conference Montana, 2009
- [7] L. Xia, X. Jun, C. Manyi, X. Ming ,W. Zhike, "Path Planning for UAV Based on Improved Heuristic A* Algorithm" , The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments, China, 2009
- [8] H. Jun, Z. Qingbao, "Multi-objective Mobile Robot Path Planning Based on Improved Genetic Algorithm", 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, , Nanjing China ,2010
- [9] Y. Kim, D. W. Gu, I. Postlethwaite,"Real-time path planning with limited information for autonomous unmanned air vehicles" Automatica Volume 44,Issue 3, Pages 696-712 2008
- [10] P. Wu, R. Clothier, D. Campbell, R. Walker, "Fuzzy Multi-Objective Mission Flight Planning in Unmanned Aerial Systems", Proceedings of the 2007 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multi-criteria Decision Making, 2007
- [11] I. K. Nikolos, K. P. Valavanis, N. C. Tsourveloudis, A. N. Kostaras, "Evolutionary algorithm based offline/online path planner for UAV navigation" IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 33, no. 12, pp. 898–912, 2003.
- [12] J.C. Rubio, J. Vagners, and R. Rysdykz, "Adaptive Path Planning for Autonomous UAV Oceanic Search Missions", AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference, Chicago, Illinois, 2004
- [13] B. Pfeiffer, R. Batta, K. Klamroth, R. Nagi,"Probabilistic modeling for UAV path planning in the presence of threat zones,"IEEE Transactions on Automatic Control, 2005.
- [14] C.Goerzen, Z.Kong, B.Mettler,"A Survey of Motion Planning Algorithms from the Perspective of Autonomous UAV Guidance",Journal of Intelligent Robotic Systems 2009
- [15] M. Kress, J.O.Royset, Aerial Search Optimization Model (ASOM) for UAVs in Special Operations“, Technical Reseach Report, Naval Postgraduate School, 2007
- [16] J.C.Rubio, J.Vagners, R.Rysdyk,"Adaptive Path Planning for Autonomous UAV Oceanic Search Missions" Proceedings of the AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference ,2004.
- [17] Tezcaner, D. and Köksalan, M., "Multi Objective Route Planning for Unmanned Air Vehicles". 20th International Conference on MCDM, Chengdu, China.
- [18] D. Myers, R. Batta and M. Karwan, "Calculating Flight Time for Unmanned Aerial Vehicles in the Presence of Obstacles and the Incorporation of Flight Dynamics," submitted to Military Operations Research
- [19] H. Jun, Z. Qingbao " Multi-objective Mobile Robot Path Planning Based on Improved Genetic Algorithm" International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2010.
- [20] Z. Qi, Z. Shao, Y. S. Ping, L. M. Hiot, Y. K. Leong, "An Improved Heuristic Algorithm for UAV Path Planning in 3D Environment", Second International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, 2010
- [21] G. B. Lamont, J. N. Slear, K. Melendez, "UAV Swarm Mission Planning and Routing using Multi-Objective Evolutionary Algorithms", IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multicriteria Decision Making, 2007
- [22] D. Rathbun, S. Kragelund, A. Pongpunwattana," An Evolution Based Path Planning Algorithm for Autonomous Motion of a UAV Through Uncertain Environments"
- [23] "Unmanned Systems Integrated Roadmap, 2009-2034", ABD Savunma Bakanlığı, 2009.
- [24] J.D. Boskovic, R. Prasanth, and R.K. Mehra. "A multilayer control architecture for unmanned aerial vehicles". American Control Conference, 2002.
- [25] S. Kambhampati and L.S. Davis. "Multiresolution path planning for mobile robots". IEEE Journal of Robotics and Automation, RA-2(3):135–145, 1986.

**YÜKSEK HIZLI MERMİ DARBESİNE MARUZ BIRAKILAN
DONATILI VE ÇELİK TEL KATKILI BETON PLAKLARIN
DENEYSEL VE NÜMERİK SONUÇLARI: MODELLEME,
SİMÜLASYON VE DOĞRULAMA**

Hasan Korucu^(a), Polat Gulkán^(b)

^(a) Dz.Dr.Müh.Yzb., Milli Savunma Bakanlığı, 06100, Ankara, korucu_h@yahoo.com

^(b) Prof. Dr., ODTÜ, İnşaat Müh. Böl., 06531, Ankara, a03516@metu.edu.tr

ÖZ

Ceşitli dayanım ve donatı tertipleriyle üretilen betonarme numunelere, 1485 m/s namlu hıza sahip 105 mm APFSDS-T tank mermileri ile atışlar yapılmış; krater ebatları ve hızlı kayıt yapabilen kameralar ile ölçülen mermi giriş-çıkış hızları tespit edilmiştir. Elde edilen bu veriler, ABAQUS-Explicit yazılımı ile modellenmiş ve hesabî olarak tekrar edilmiştir. Beton, "Hasar Görmüş Plastisite Modeli (Damaged Plasticity Model for Concrete)" ile, çelik çubuklar ise "Yükleme Hızından Bağımsız Plastisite Çelik Modeli (Rate-Independent Plasticity Model for Steel)" ile modellenmiştir. Deneysel verilerin doğrulanması maksadıyla yapılan hesaplarla krater ebatları ve mermi çıkış hızlarına ait sonuçlar karşılaştırılmış ve kabul edilebilir hata oranları elde edilmiştir. Sonuçta sesten hızlı mermi betonda yarattığı tahribatın tahmininin, doğru modellemeyle mümkün olabildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Sesten hızlı mermi, Beton, Çelik tel, Modelleme, Simülasyon

**EXPERIMENTAL AND NUMERICAL RESULTS OF CONCRETE
PLATES REINFORCED WITH STEEL BARS AND FIBERS
SUBJECTED TO HIGH VELOCITY PROJECTILE IMPACT:
MODELING, SIMULATION AND VALIDATION**

Hasan Korucu^(a), Polat Gürkan^(b)

^(a) Dz.Dr.Müh.Yzb., Milli Savunma Bakanlığı, 06100, Ankara, korucu_h@yahoo.com

^(b) Prof. Dr., ODTÜ, İnşaat Müh. Böl., 06531, Ankara, a03516@metu.edu.tr

ABSTRACT

Crater dimensions and entry-exit velocities obtained by high-speed cameras as a result of shots performed with 105 mm APFSDS-T tank projectiles that have a muzzle velocity of 1485 m/s on concrete specimens produced in various strengths and reinforcement configurations were determined. Specimens were modeled and the shots were simulated using ABAQUS/Explicit. Concrete was modeled using “Damaged Plasticity Model for Concrete”, while steel bars were modeled using “Rate-Independent Plasticity Model for Steel”. In the analyses, which were performed to validate the field experiments, comparison of the crater dimensions and projectile’s residual velocities resulted in acceptable error ratios. As a result, estimation of the destruction created by the supersonic projectile on the concrete is found to be possible by accurate modeling.

Keywords: Supersonic projectile, Concrete, Steel fiber, Modeling, Simulation

1. GİRİŞ

Bu bildiride, çelik tel ve/veya donatı içeren yüksek performanslı çimentodan müteşekkil beton plaklarla yapılan yüksek hızlı darbe deneylerinin modelleme ve simülasyonu anlatılmaktadır. Atışlar 5.57 kg ağırlığında tungsten çekirdeğine ve 1485 m/s namlu hızına sahip 105 mm APFSDS-T (Armor Piercing Fin Stabilized Discarding Sabot – Tracer) tank mermileri ile gerçekleştirılmıştır. Deney numunesi olarak hazırlanan beton plaklar dört grupta sınıflandırılmıştır. Birinci grupta geleneksel inşaatlarda kullanılan CEM I 42.5 R çimentosu ile üretilmiş donatılı betonarme plaklar yer almaktadır. İkinci ve üçüncü grup numuneler, sırasıyla CEM I 42.5 R ve CAC40 (Calcium Aluminate Cement) çimentosu, hacim bazında % 2 oranında çelik tel ve donatı ile imal edilmişlerdir. Dördüncü grupta ise % 12 oranında çelik tel içeren SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete) numuneler bulunmaktadır. Numunelere ait özellikler Çizelge 1'de sunulmuştur. Atışlar esnasında merminin numunelere giriş ve çıkış hızları yüksek hızda kayıt yapabilen kameralar ile tespit edilmiştir.

Çizelge 1. Numunelerin özellikleri

No	Ebat (m)			Beton Basınç Dayanımı (MPa)	Donatı Tertibi (mm)	Çelik Tel Oranı (%)	Çimento Türü
	Uzunluk	Genişlik	Kalınlık				
1-1	2.0	2.0	0.6	55	17 φ 22 - φ10/15	-	PC 42.5
1-2	2.0	2.0	0.6	30	17 φ 22 - φ10/20	-	PC 42.5
1-3	2.0	2.0	0.4	30	17 φ 18 - φ10/20	-	PC* 42.5
1-4	2.0	2.0	0.4	55	17 φ 18 - φ10/15	-	PC 42.5
2-1	2.0	2.0	0.6	61	17 φ 22 - φ10/20	2	PC 42.5
2-2	2.0	2.0	0.6	61	17 φ 22 - φ10/20	2	PC 42.5
2-3	2.0	2.0	0.6	61	17 φ 22 - φ10/20	2	PC 42.5
3-1	2.0	2.0	0.6	87	17 φ 22 - φ10/20	2	CAC
3-2	2.0	2.0	0.6	87	17 φ 22 - φ10/20	2	CAC
3-3	2.0	2.0	0.6	87	17 φ 22 - φ10/20	2	CAC
4-1	2.0	2.0	0.6	58	---	12	PC 42.5
4-2	2.0	2.0	0.6	58	---	12	PC 42.5
4-3	2.0	2.0	0.6	58	---	12	PC 42.5

İcra edilen deneyler, ABAQUS/Explicit Version 6.7-1 [1] ile modellenmiş ve deneyler benzeştirmeye tabi tutulmuştur. Buna ilave olarak deneye dayalı formüller ile yarı deneye dayalı yazılımlar ConWep [2] ve PS3D [3] ile de hesaplar yapılmış, ancak

tatmin edici sonuçlar elde edilememiştir. Bu analizlere ilişkin sonuçlar bu bildiri içerisinde sunulmayacaktır.

Burada deneylerin, hesaplar sonrası elde edilen nümerik sonuçlarla karşılaştırılması ve doğrulanması amaçlanmaktadır. Ana gösterge merminin numunelere giriş ve çıkış hızları olmuştur. Ayrıca numunelerin ön ve arka yüzlerinde meydana gelen kraterlerin şekil değiştirmiş model ile benzerliği ölçülmüştür. Bildiride birinci, ikinci ve dördüncü grupta yer alan birer numuneye ait hesaplara ilişkin sonuçlar sunulmaktadır. Üçüncü grup numunelere ait mermi giriş-çıkış hızları kaydedilemediğinden, bu numuneler için nümerik çalışma yapılmamıştır.

2. MODELLEME VE SİMÜLASYON

Modelleme ve hesaplama, çeşitli beton modelleri içeren ABAQUS/Explicit Version 6.7-1 ile gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplarda esas amaç, deneysel sonuçların doğrulanması ve donatı, çelik tel ve beton türünün, krater şekillenmesine ve merminin yavaşlatılmasına olan etkisinin belirlenmesi olmuştur.

Birinci grupta 1-2, 1-3 ve 1-4, ikinci grupta 2-2 ve 2-3, dördüncü grupta ise 4-2 ve 4-3 numaralı numuneler, aralarında 2 m mesafe bırakılarak ardarda yerleştirilmiş ve tek seferde atışa tabi tutulmuştur. Ancak bu numunelerin her birisi ayrı olarak modellenmiş ve hesaplanmıştır.

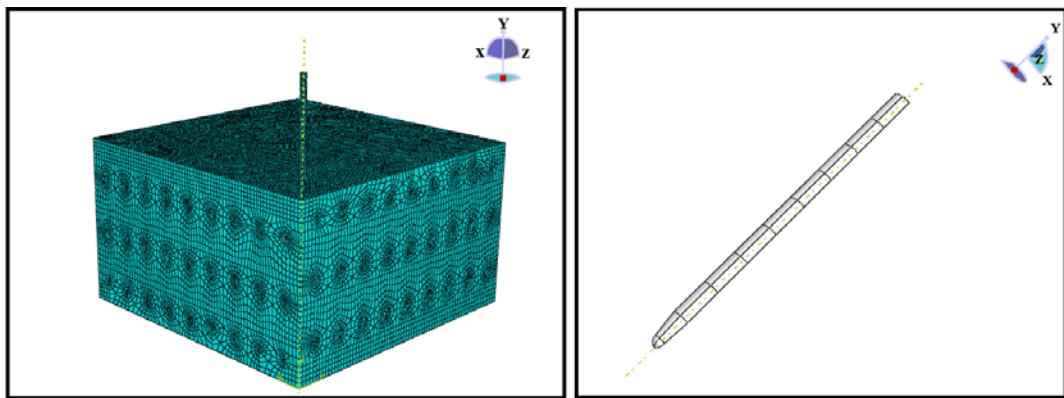
2.1. Modelleme

Betonarme plak ve mermi için üç boyutlu sonlu elemanlar modeli teşkil edilmiştir. Model, iki yönde simetri avantajı kullanılarak numunenin fiziksel ebadının $\frac{1}{4}$ 'ü ölçüğünde kurulmuştur. Bu şekilde analiz süresi, her bir analiz başına bir haftaya kadar indirilebilmiştir. $\frac{1}{4}$ 'luk modelin dış kenarları ankastre olarak tanımlanmıştır. Deneyler sırasında, yaklaşık 6 ton ağırlığındaki numuneler, herhangi bir dayanak ile sabitlenmemiş olmasına rağmen kütle oranından dolayı tamamen sabitlenmiş ve dört kenarı ankastre gibi davranış sergilemiştir.

Betonarme plak ve çelik çubuklar altı yüzlü elemanlar ile teşkil edilmiştir. Merminin burun kısmı, karmaşık şeklärden dolayı üç yüzlü elemanlar ile, kalan kısmı ise dört yüzlü elemanlar ile bölünmüştür. Eleman boyutları 10 mm ile 14 mm arasında değişmektedir. Her bir model yaklaşık 450.000 elemanla teşkil edilmiştir. Birim zaman adımı, Δt , merminin yüksek çarpma hızına bağlı olarak elemanlarda meydana gelen yüksek uzama oranları nedeniyle 10^{-9} s olarak alınmıştır.

Hesaplar, her biri 1.66 GHz olan çift çekirdeğe ve 2 GB RAM'e sahip PC'de gerçekleştirilmiş ve her bir analiz yaklaşık bir hafta sürmüştür. Donatı çubukları gerçeğe yakın olarak modellenmiş, bu durum sınırlı sayıda da olsa düzensiz elemanlar

çıkmasına sebebiyet vermiştir. Betonarme numune ve mermiye ait sonlu elemanlar modeli Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Betonarme plak ve mermiye ait modeller

2.2. Malzeme modeli

Hesaplarda betonun homojen olduğu kabul edilmiştir. Numunelerin üretimi sırasında icra edilen tek eksenli basınç deneyleri ile elde edilen betona ait gerilme-şekil değiştirmeye eğrileri ve tokluk deneyleri ile belirlenen eğilme dayanımı verileri yazılıma girdi olarak kullanılmıştır. Betonun çekme dayanımına yönelik testler, teknik imkânsızlık nedeniyle yapılamadığından, hasarlı plastisite modellerine ait sonuçların malzeme üretim geçmişiyle fazlasıyla bağımlı olduğu dikkate alındığında, kullanımlarında ihtiyatlı davranışılması gereği de dikkate alınarak, % 2 çelik tel içeren numuneler için Bhargava ve *dīg.*[4] ile Li ve *dīg.*[5], % 12 çelik tel içeren numuneler için ise Naaman [6] tarafından gerçekleştirilen test sonuçlarından yararlanılmıştır. Betonun modellenmesinde, ABAQUS/Explicit'in kütüphanesinde bulunan "Hasar Görmüş Plastisite Modeli (Damaged Plasticity Model for Concrete)", çelik çubukların modellenmesinde ise "Hızdan Bağımsız Plastisite Çelik Modeli (Rate-Independent Plasticity Model for Steel)" kullanılmıştır[1]. Bu iki malzeme modeli, beton ve çelik için gerekli kriterleri sağlamak konusunda yeterli oldukları için tercih edilmişlerdir. Beton ve çeliğin uzama hızı etkilerini (strain-rate effects) tespite yönelik testleri yapma imkanı bulunamadığı için, yüksek gerilme hızlarına neden olan bu tür darbe deneyleri için ehemmiyet arz etmesine rağmen, bu etkiler göz ardı edilmiştir. Merminin aşınmadığı kabul edilmiştir. Kullanılan malzeme parametreleri Çizelge 2-4'de sunulmuştur.

Çizelge 2. Betona ait malzeme parametreleri

	Grup 1			Grup 2			Grup 3		
	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3	4-1	4-2	4-3
σ_c^c , MPa	30	55		61			58		
σ_t^c , MPa	1.92	2.60		6.20			25		

Çizelge 3. Çelik cubuklara ait malzeme parametreleri

	Φ 10 mm	Φ 18 mm	Φ 22 mm
σ_y^s , MPa	600.5	480.4	477.2
σ_u^s , MPa	702.3	608.3	664.9
E_s , GPa	237.5	237.5	237.5
V_s	0.3	0.3	0.3

Çizelge 4. Tungstene ait malzeme parametreleri

E_t , GPa	411
V_t	0.3

2.3. Darbe modeli

Simülasyonlarda mermi, deneyler sırasında yüksek hızlı kamera kayıtlarından elde edilen hız ile betonarme plaklara çarptırılmıştır. Mermi ile plak arasındaki temas, programda yer alan “all with self” seçeneği işaretlenerek sağlanmıştır. Bu tercih sayesinde sürtünme etkilerinin hesaba katılması amaçlanmıştır. Her çarpma hadisesi ayrı modellenip simüle edilmiştir.

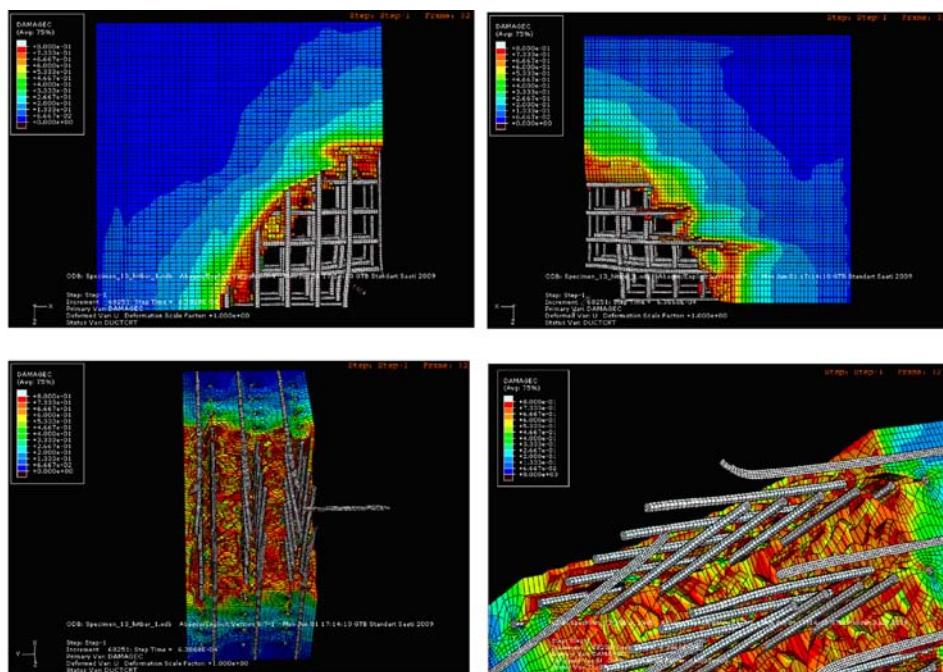
3. SİMÜLASYONLAR

Bu bölümde deneysel ve nümerik çalışmalarдан elde edilen krater ebatları ve giriş-çıkış hızları karşılaştırılmıştır. Birinci gruptan 1-3, ikinci gruptan 2-2 ve dördüncü gruptan 4-2 no'lu numunelere ait sonuçlar Şekiller 2-5 ve Çizelgeler 5-7'de sunulmuştur.

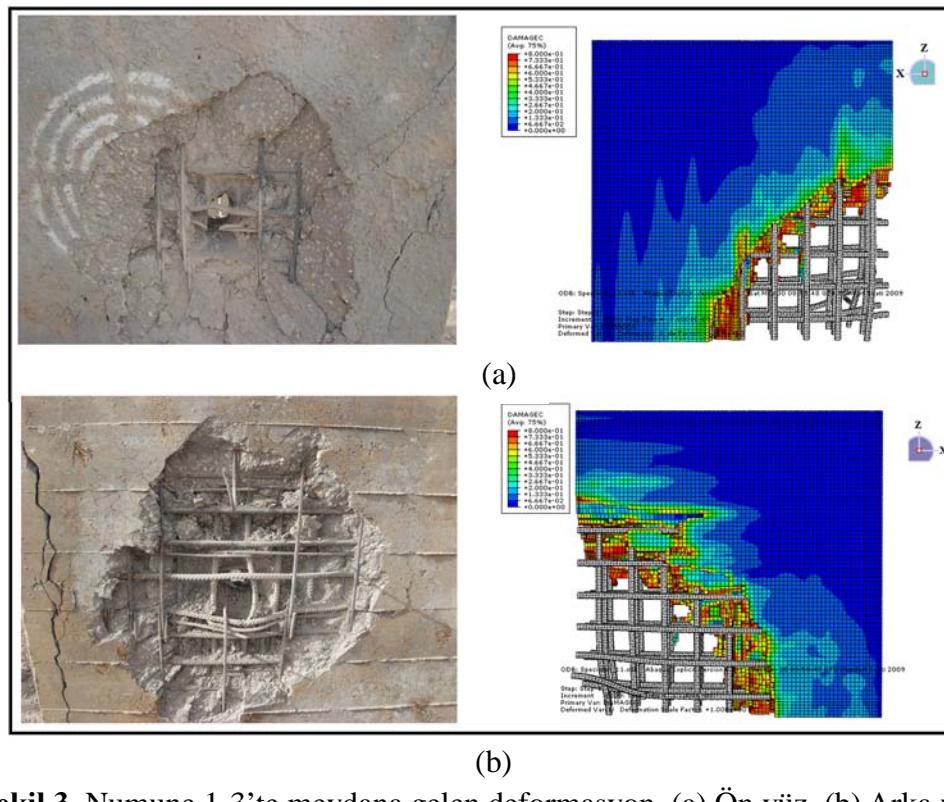
Burada simülasyon ve deneylerden elde edilen krater ebatlarının kıyaslamasında bir konuya dikkat çekmekte fayda mülahaza edilmektedir. Deneysel çalışmalarında merminin betona çarpması sonucu betonda teşkil ettiği kraterin sınırları içerisinde kalan bölgede, beton deformе olduğu ve taşıma kapasitesini yitirdiği halde, plaktaki yoğun donatı sebebiyle parçalanmamış bir görüntü sergilemiştir. Bu durum, hesaplar sonucu elde

edilen deform olmuş modelde daha net fark edilmektedir. Hesap girdilerinde, elemanların basınç ve çekme gerilmeleri açısından kapasitelerinin % 80'ine ulaşmaları durumunda, deform olan elemanın modelden silinmesi komutu verilmiştir. Bundan dolayı deform olmuş modelde merminin delip geçmesi sonucu oluşan delik, deneyde ortaya çıkan delikten daha büyük olarak görülmektedir.

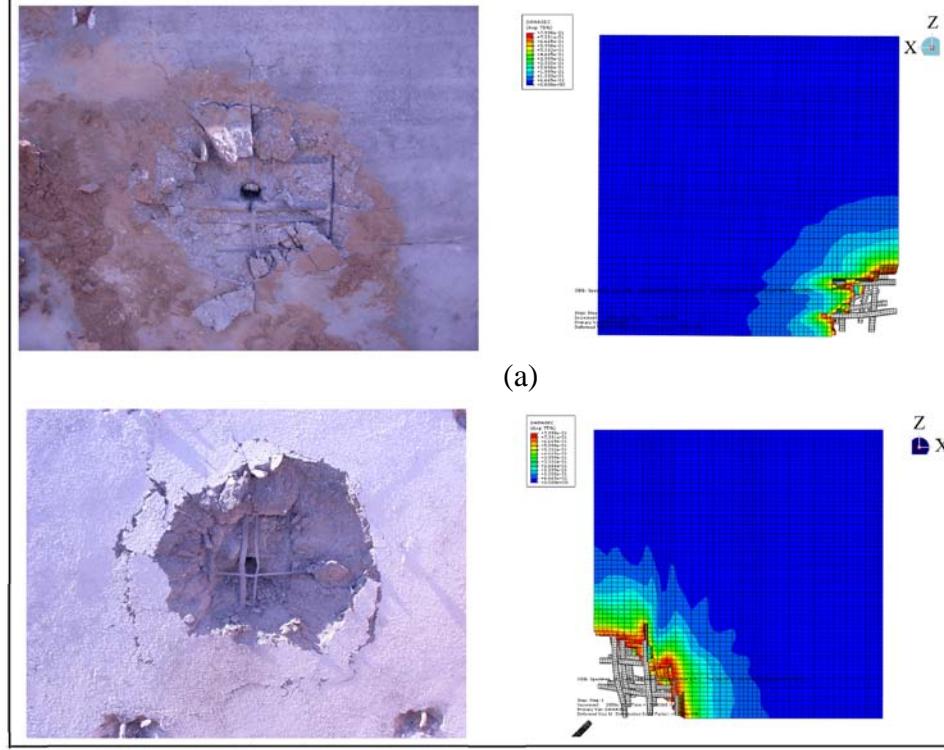
Explicit analizlerde, özellikle zaman adımı ve eleman boyutunun belirlenmesinde yakınsama analizi yapılması, optimum sonucun elde edilmesi açısından önem arz etmektedir. Ancak bu çalışmada, analizde kullanılan bilgisayarın yetersizliği gibi teknik nedenlerden dolayı bu tür bir analiz yapılmamıştır.



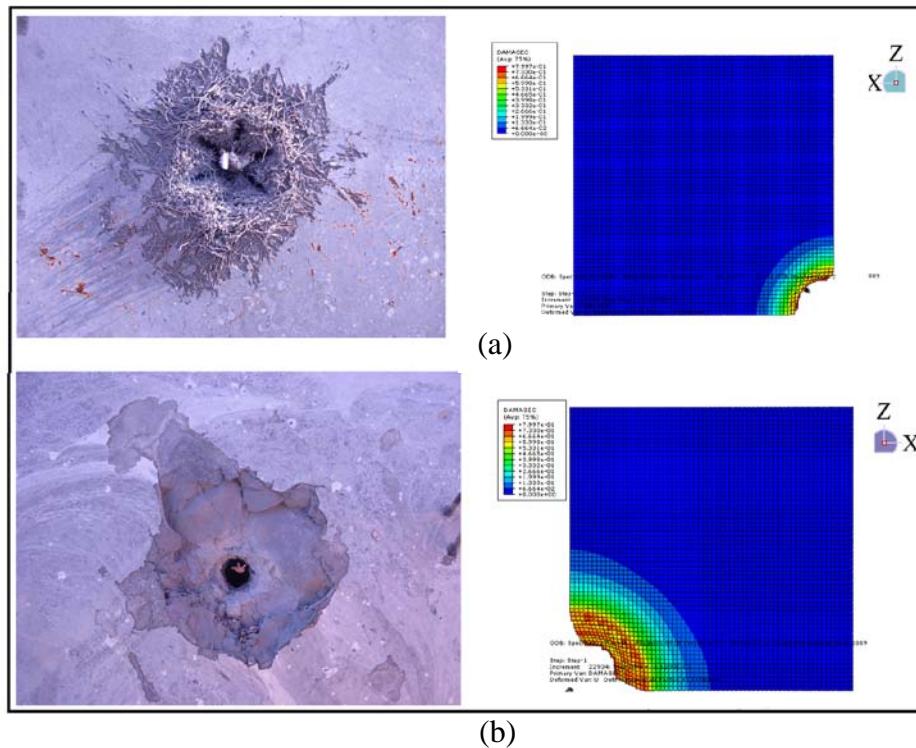
Şekil 2. Numune 1-3'e ait deform olmuş üç boyutlu model



Şekil 3. Numune 1-3'te meydana gelen deformasyon, (a) Ön yüz, (b) Arka yüz



Şekil 4. Numune 2-2'de meydana gelen deformasyon, (a) Ön yüz, (b) Arka yüz



Şekil 5. Numune 4-2'de meydana gelen deformasyon, (a) Ön yüz, (b) Arka yüz

Çizelge 5. Ön yüzde meydana gelen krater ebadı

No.	Deneysel (mm)		ABAQUS/Explicit (mm)		Hata Oranı (%)	
	Yatay	Düsey	Yatay	Düsey	Yatay	Düsey
1-3	840	900	1040	950	23.8	5.5
2-2	530	440	510	480	3.8	9.1
4-2	150	170	340	260	126.6	52.9

Çizelge 6. Arka yüzde meydana gelen krater ebadı

No.	Deneysel (mm)		ABAQUS/Explicit (mm)		Hata Oranı (%)	
	Yatay	Düsey	Yatay	Düsey	Yatay	Düsey
1-3	1080	950	1130	1080	4.6	13.6
2-2	810	670	580	640	28.4	4.5
4-2	460	480	540	520	17.3	8.3

Çizelge 7. Çıkış hızları

No.	Çarpma Hızı (m/s)	Perforasyon (m/s)		Hata Oranı (%)
		Deneysel	ABAQUS/Explicit	
1-3	1333	1143	1281	2.0
2-2	1450	1281	1380	7.7
4-2	1450	1325	1266	4.4

4. SONUÇ

Basınç dayanımı daha büyük olan betonarme numuneler çarpma hızının düşürülmesinde daha iyi performans sergilemiştir. Yüksek basınç dayanımı, betonun kırılganlığını artırmamasına ve krater çapının büyümesine sebep olmasına rağmen, dinamik zımbalama direncinde iyileşmeyi sağlamıştır. Burada çelik teller plakların darbeye karşı mukabelesini kontrol altına almış, krater ebadının düşürülmesine ve betonun parçalanma/dağılma oranının azaltılmasına neden olmuştur. Ancak çarpma hızının düşürülmesinde beklenen performansı sergileyememiştir.

ABAQUS/Explicit, krater ebadının ve çıkış hızının tahmininde kabul edilebilir sonuçlar vermiştir. Programa girdi yapılması gereken malzeme parametrelerinin tamamını elde edebilecek testleri gerçekleştirmek imkâni bulunmadığından, bu malzeme parametrelerinin bir kısmına yönelik girdi yapılamamış, bu sebeple de deney sonuçları ile birebir örtüşen sonuçlar elde edilememiştir. Daha iyi sonuçlar elde edilebilmesi için ısı etkilerini de içine alan basınç, çekme ve kayma gerilmelerinin, beton ile tungsten arasındaki sürtünme etkilerinin, malzemeler arasındaki etkileşimin, yüksek uzama hızı etkilerinin belirlenmesi zorunlu olmaktadır.

Bu çalışmada üzerinde durulması gereken bir diğer nokta da mermi ile hedef arasındaki uyumsuzluktur. 105 mm APFSDS-T tank mühimmatı, tank zırhını delmek üzere tasarlanmıştır. Hedef ise betonarme olarak inşa edilmiş koruyucu yapının bir parçasıdır. Yazarların, tahsis edilen mühimmatı seçme konusunda müdahale imkâni olamamıştır. Çarpma neticesinde daha fazla hız kayiplarının yaşanacağı türde mühimmatla yapılacak deneyler, simülasyon ile doğrulama konusunda daha sağlıklı sonuçlar verebilecektir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBÜTAK'ın 106M497 no.'lu proje kapsamındaki desteği ile gerçekleştirilmiştir. Deneylerin icrası için gerekli fiziki imkânlar TSK tarafından sağlanmıştır. Adı geçen kurumlara teşekkürlerimizi ifade ederiz.

6. KAYNAKÇA

- [1] ABAQUS Theory Manual (2007), Version 6.7, Simulia, Dassault Systemes, Providence, Rhode Island.
- [2] ConWep User's Guide (1993), Applications of TM 5-855-1, Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons, Department of the Army, Waterway Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi.
- [3] PS3D Theory Manual and Verification Examples (2005), Numerics GmbH, Petershausen, Germany.
- [4] Bhargava P., Sharma U.K. ve Kaushik S.K. (2006), Compressive stress-strain behavior of small scale steel fibre reinforced high strength concrete cylinders, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 4(1), 109-121.
- [5] Li F. ve Li Z. (2001), Continuum damage mechanics based modeling of fiber reinforced concrete in tension, *International Journal of Solids and Structures*, 38(5), 777-793.
- [6] Naaman A.E. (1992), SIFCON: Tailored properties for structural performance. In: High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, *RILEM Proceedings 15*, pp.18-38, E & FN Spon, London.

PATLAMA VE ŞOK DALGALARININ BENZETİMİ İÇİN GÜÇLÜ VE PRATİK BİR SAYISAL BENZETİM YÖNTEMİ

Bora Kalpaklı^(a), Hakan I. Tarman^(b), Yusuf Özyörük^(c)

^(a) ROKETSAN, ROKETSAN Roket Sanayi ve Ticaret A.Ş. Ankara Samsun Yolu 40.
Km 06780 Elmadağ, Ankara, bkalpakli@roketsan.com.tr

^(b) ODTÜ Mühendislik Bilimleri Bölümü, 06800 Çankaya Ankara/TÜRKİYE,
tarman@metu.edu.tr

^(c) ODTÜ Havacılık Mühendisliği Bölümü, 06800 Çankaya Ankara/TÜRKİYE,
yusuf@ae.metu.edu.tr

ÖZ

Farklı malzemelerin ve malzeme arayüzlerinin bulunduğu ortamlarda basınç dalgalarının ilerlemesi ve malzeme dinamiği oldukça karmaşık bir fizik içermektedir. Bu tür ortamların benzetiminde genelde arayüzlerin yeniden oluşturulması yöntemine dayanan arayüz izleme (interface tracking) yöntemleri kullanılmıştır. Fakat karmaşık arayüzler ve topolojiler söz konusu olduğunda bu tür yöntemler pratik olmaktan uzaklaşmaktadır. Son yıllarda arayüz izleme yöntemleri yerine arayüz yakalama (interface capturing) yöntemleri üzerine yapılan bazı çalışmalar oldukça ilgi toplamıştır. Bu çalışmada HLLC Riemann çözümüsünü adapte ederek geliştirilen bir arayüz yakalama yöntemini kullanan benzetim yazılımı ve su altı patlamalarında içeren bazı test uygulamaları sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Patlama dalgaları, şok dalgaları, dalgı yayılımı, çok fazlı akış, sıkıştırılabilir akış.

A ROBUST AND SIMPLE METHOD FOR NUMERICAL SIMULATION OF BLAST AND SHOCK WAVES

ABSTRACT

Wave propagation in multiphase/multi-material compressible medium is generally a very complex physical phenomena. Interface tracking schemes are most generally used methods for multiphase applications. For complex interfaces and material topologies interface tracking methods may not be practical for most cases. Recently interface capturing methods are studied by some researchers and these methods are becoming

more popular. In this study, an interface capturing method utilizing HLLC Riemann solver is presented.

Keywords: Blast waves, shock waves, wave propagation, multiphase flow, compressible flow.

1. GİRİŞ

Güçlü patlamalar sonucu oluşan şok dalgaları ve sıcak tepkime ürünleri can ve mal kaybına neden olabilmekte veya personelde çeşitli kalıcı hasarlara neden olabilmektedir [1]. Bu nedenle, oluşan infilak dalgalarının ve sıcak gazların yayılım tahmini özellikle askeri uygulamalarda ve patlayıcı malzemeler ile yapılan iş yerlerinin güvenlik ve risk analizlerinde büyük önem taşımaktadır. Bu konularda deneysel çalışmalar özel teçhizatlar ve özel güvenlik önlemleri gerekliliktedir. Deneysel çalışmalara destek olmak ve bu tür maliyetli ve tehlikeli çalışmaların sayısını azaltmak için sayısal benzetim yöntemleri kullanılmaktadır [2,3].

Karmaşık arayüz ve topolojilerin bulunduğu sıkıştırılabilir çok malzemeli akış problemlerinin çözümünde arayüz yakalama yöntemleri pratik bir alternatif oluşturmaktadır. Her faz için farklı hız ve basınç değerleri taşındığında, bu tür yöntemlerin modellenmesinde kullanılan denklem sistemleri genellikle hiperbolik olmamakta ve sayısal çözümünde zorluklarla karşılaşmaktadır. Saurel ve Abgral sıkıştırılabilir iki fazlı akışlar için bir Godunov yöntemi önermişlerdir [4]. Önerdikleri yöntem, modelleri içerisinde bulunan korunumsuz (non-conservative) terimleri uygun sayısal yöntemlerle çözülemeyi içermektedir. Korunumsuz terimlerin çözümünde kullanılan sayısal yöntem kullanılan Rieman çözümüsüne göre özelleşmektedir. Bu yaklaşımda malzeme arayüzü üzerinde faz hızlarının ve basınçlarının eşitlenmesi için bazı yöntemler önerilmiştir (relaxation procedures, gevşeme süreçleri). Bu yöntemler arayüz üzerinde, fazlar arasında bilgi taşınımı için gereklidir. Bu yaklaşım bir çok problemi çözmeye karşı güçlü bir sayısal yöntem üretmemektedir [5]. Bu zayıflık malzeme arayüzü üzerinde dalga yapısı için yapılan yaklaşımdan kaynaklanmaktadır. Çözülen denklem sisteminde bir malzeme arayüzü tanımlamanın tek yolu, ara yüzün bir tarafında fazlardan biri için ihmali edilebilir miktarda hacim kesiti vermektir. Bu küçük miktar arayüz boyunca bilginin taşınımı için kullanılır. Bilgi arayüz üzerine aynı fazlar ile taşınır daha sonra gevşeme süreçleri ile diğer fazlara aktarılır. Bunun nedeni çözülen denklem sisteminin temelde bir süreklilik denklemi olmasıdır. Bu durum özellikle şok dalgalarının arayüzler ile etkileşiminde sayısal zorluklar çıkarmaktadır. Sayısal zorluklar temelde fazlar için kullanılan hal denklemlerinin limitlerinden kaynaklanmaktadır. Ara yüz izleme yöntemlerinde bilgi aktarımı fazlar arasında bir gevşeme sürecine ihihiyaç duyulmadan yapıldığından bu tür bir sorun yoktur.

Saurel ve Abgral bu durumu çözmek için benzer fakat faz sürekliliğini temel alan denklemler kullanmayan yeni bir yaklaşım geliştirmiştir [5]. Bu yaklaşımın temelde bir kontrol hacim yüzeyinde, olası faz arayüzleri üzerinde çözülen Riemann problemi sonuçları kullanılarak akılar hesaplanmaktadır. Bu yöntem arayüz üzerinde fazlar arası bilgi aktarımını doğrudan sağlamaktır ve önceki modelde oluşan problemleri ortadan kaldırılmaktadır. Yöntemde kullanılan akı hesaplama yöntemi ile yazılan korunum denklemelerinde korunumsuz terimler kolayca modellenebilir bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bunlar gevşeme süreci gerektiren diğer terimlerle birlikte kaynak terimleri (source terms) olarak denklemlerin sağ tarafında kalırlar. Orijinal çalışmada tek boyutlu sistemler için çıkarılan ortalama alma operatörleri çok boyutlu sistemler için geçerli olmamakla birlikte, yöntem yine de çok boyutlu problemlere uygulanabilmektedir.

Bu çalışmada bir HLLC (Harten, Lax, Leer, Contact) çözümünü kullanarak ve fazik arayüzlerin bulunduğu bir kontrol hacim yüzeyinde ortalama akı hesabı yaparak benzer bir yaklaşım gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşımın temel avantajları,

- Tek boyutta geçerli bir ortalama alma operatörü kullanılmamakta ve çok boyutlu sistemler için geçerlidir.
- Korunumsuz terimleri modelleyen terimler, HLLC çözümünün içinde otomatik olarak çözülmekte ve kaynak terimlerin çözülmesine gerek kalmamaktadır.
- Akı hesabı hacim kesiti süreksizliğine dayandığından, şok arayüz etkileşimleri bir sorun yaratmamaktadır.
- Yöntem hem çok malzemeli arayüz içeren problemlere hem de çok fazlı karışım problemlerine uygulanabilmektedir.

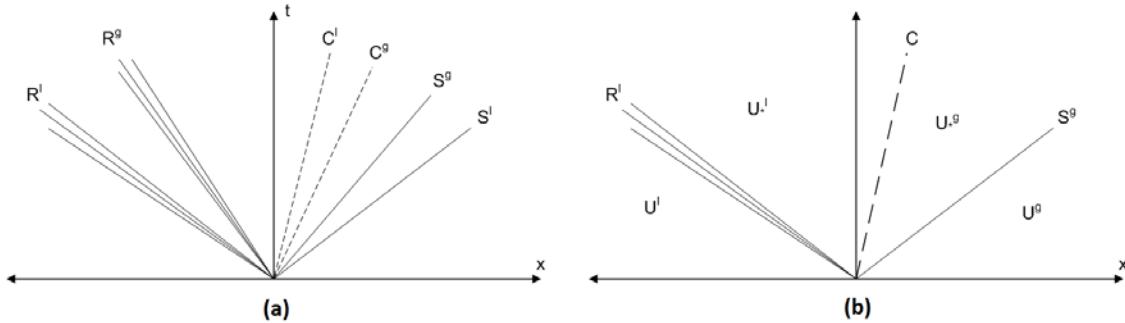
2. ÇOK FAZLI KARIŞIMLARDA DALGA ÖRÜNTÜSÜ

Bir çok fazlı karışım modelinde iki saf malzemeyi ayıran arayüz tanımı açık olarak yapılamaz. Bilgi aynı fazlar üzerinde taşınır ve daha sonra gevşeme süreçleri ile fazlar arası bilgi aktarımı gerçekleşir. Bunun bir yolu bir kontrol hacmi yüzeyinin iki tarafında ihtimal edilebilir miktarda hacim kesitleri tanımlamaktır. Şekil 1'de çok fazlı karışım modelinin Riemann problemi çözümü gösterilmiştir. Bu çözüm gevşeme sürecinden önceki durumu göstermektedir. Bu yaklaşımda tek fazlı Reimann çözümler kullanılabilmektedir.

3. İKİ SAF MALZEMEYİ AYIRAN BİR ARAYÜZ ÜZERİNDE DALGA ÖRÜNTÜSÜ

İki saf malzemeyi ayıran (sıvı “ l ” ve gaz “ g ”) arayüzde tanımlı bir şok tüp probleminin (Reimann problemi) olası çözümü Şekil 1'de gösterilmiştir. Temas dalgası “ C ” hareket eden arayüzü göstermekle birlikte, bu arayüz her iki saf malzemeyi ayırmaya devam

etmektedir. Olası dalga örüntüsü sayısı tek fazlı bir probleme aynıdır. Temas süreksizliği ile diğer dalgalar arasında kalan bölgeye yıldız bölgesi denilir.



Şekil 1. (a) Sıkıştırılabilir iki fazlı bir karışımında dalga örüntüsü. **(b)** Bir malzeme arayüzü üzerinde dalga örüntüsü. Seyrelme dalgası “R” (rarefaction), temas dalgası “C” (contact) ve şok dalgası “S” gösterilmiştir. “l” ve “g” sırasıyla sıvı ve gaz fazları göstermektedir.

4. GENEL ÇOK FAZLI AKIŞLARI ÇÖZMEK İÇİN BİR GODUNOV YÖNTEMİ

Ortalama alan operatörleri kullanılarak elde edilmiş denklem sistemlerini çözmek yerine daha temel bir yaklaşım yapılabilir. Burada anlatılan yaklaşım Saurel ve Abgral’ın [5] yaptığı yaklaşımı benzemekle birlikte yukarıda daha önce sözü edilen bazı avantajlara sahiptir. Yaklaşım bir arayüz yakalama yöntemi ortaya koymakla birlikte arayüz izleme yöntemlerinin doğruluğuna sahiptir.

4.1. Tanımlar ve Kabuller

Şema sonlu hacimler yöntemine dayanmaktadır ve hesaplama ağı kontrol hacimlerinden Ω_c (hücreler) oluşmaktadır. Her kontrol hacim içerisinde bütün fazlar için Euler denklemleri geçerlidir. Her saf malzeme Σ_i için akışkan durum değişkenleri ve akılar aşağıda gösterildiği gibi tanımlanır.

$$U^i = \begin{bmatrix} \rho^i \\ \rho^i u^i \\ \rho^i v^i \\ \rho^i E^i \end{bmatrix}, \quad F^i = \begin{bmatrix} \rho^i u^i \\ \rho^i (u^i)^2 + P^i \\ \rho^i u^i v^i \\ u^i (\rho^i E^i + P^i) \end{bmatrix}, \quad G^i = \begin{bmatrix} \rho^i v^i \\ \rho^i u^i v^i \\ \rho^i (v^i)^2 + P^i \end{bmatrix}. \quad (1)$$

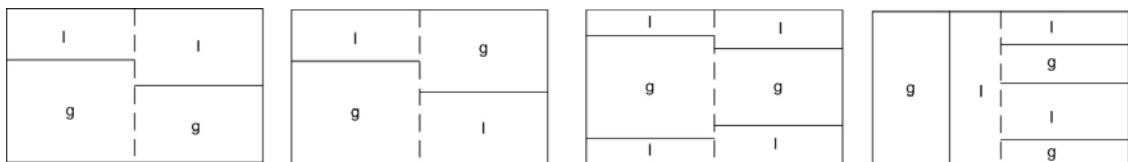
Godunov tipi bir sonlu hacimler yönteminde akışkan özelliklerini kontrol hacmi ortalamaları ile temsil edilir. Ortalama değerler ile ifade edilen akışkan özelliklerini içeren modeller [5] ve [6] nolu kaynaklarda anlatılmıştır. Ortalama değerleri bulmak

icin bir karakteristik X^i fonksiyonu kullanılır. X^i su şekilde tanımlanır: Eğer konum değişkeni \vec{x} , Σ^i fazının içinde ise $X^i = 1$, değilse $X^i = 0$ kabul edilir. Σ_i fazi için ortalama durum W_c^i aşağıda verildiği gibi hesaplanır.

$$W_c^i = \frac{1}{V_{\Omega_c}} \int_{\Omega_c} X^i U^i d\vec{x} \quad (2)$$

Bu işlemin sonucu $W^i = [\alpha^i \rho^i, \alpha^i \rho^i u^i, \alpha^i \rho^i v^i, \alpha^i \rho^i E^i]^t$ olarak bulunur. Çok fazlı karışımında ve arayüzler üzerinde fazların basınç ve hızları gevşeme süreçleri sonunda eşitlenmelidir. Fazlardan birinin parçacık formunda olduğu durumlarda hızlar eşit olmaya bilir. Bu durumda sürüklendirme momentum etkileşimleri sürüklendirme kuvetleri ile modellenebilir.

Kontrol hacimleri içerisinde faz arayüzleri bulunabilir. Kontrol hacimleri içerisinde toplam arayüz alanı bilinmemektedir ve hacim kesitleri (volume fractions) türünden yazılabilirler. Bu durum parçacık fazları için geçerli değildir. Kontrol hacmi yüzeylerinde toplam arayüz alanları, hacim kesitleri cinsinden yazılabilir. Godunov akılarının hesabında bu özellik kullanılacaktır. Kontrol hacmi yüzeylerinde farklı arayüz örüntüleri bulunabilir ve rasgele olduğu kabul edilir. Bazı olası arayüz durumları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Bazı olası arayüz kombinasyonları.

4.2. Bir Hesaplama Hücresi Yüzü Üzerinde Riemann Problemi Tanımı

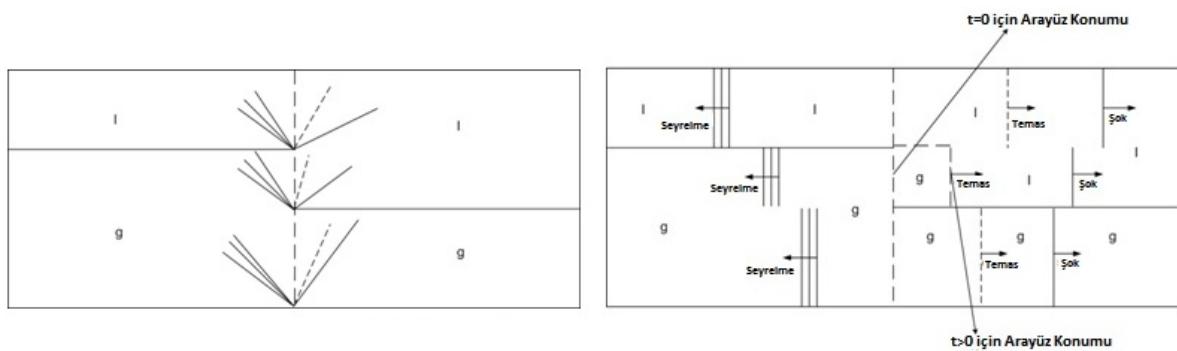
Faz arayuzlerinin bulunduğu bir hesaplama hücresi üzerinde aşağıda verilen başlangıç koşulları ile bir Riemann problemi tanımlanabilir. $t = 0$ anında;

$$\begin{aligned} U^i &= \begin{cases} U_L^i & \text{if } x \leq 0 \\ U_R^i & \text{if } x \geq 0 \end{cases} \\ P_L^1 &= P_L^j, \quad u_L^1 = u_L^j, \quad j = 2, \dots, N \\ P_R^1 &= P_R^j, \quad u_R^1 = u_R^j, \quad j = 2, \dots, N \end{aligned} \quad (3)$$

Yukarıda verilen problemin çözümü her faz için farklı basınç ve hız değerleri oluşturur, bu nedenle gevşeme süreçlerinden önce çok kısa bir süre geçerli olduğu kabul edilir. Bu durum olası bir Riemann problemi çözümü için Şekil 3'de gösterilmiştir.

5. RIEMANN PROBLEMİNİN HLLC ÇÖZÜCÜSÜ KULLANARAK ÇÖZÜMÜ

Godunuv yöntemini kullanmak için, hücre yüzeylerinde tüm arayüz ve dalga örüntüleri için akılar hesaplanmalıdır. Daha önce kabulü yapıldığı gibi, hücre yüzlerinin her iki tarafında tüm fazların mevcut olduğu ve tüm arayüz örüntülerinin eşit şansla bulunabileceği kabul edilmektedir. Solunda Σ_i fazının, sağında ise Σ_j fazının bulunduğu bir arayüz (Σ_i, Σ_j) ile gösterilir. Σ_i fazının bulunduğu tüm arayüzler şu üç durumda olabilir; 1. (Σ_i, Σ_i) 2. (Σ_i, Σ_j) , $i \neq j$ 3. (Σ_j, Σ_i) , $j \neq i$.



Şekil 3. Gevşme süreçleri ihmal edildiğinde $t = 0$ anından kısa bir süre sonra arayüz örüntüsü ve faz dağılımı.

Sonraki bölümlerde her olası arayüz ve dalgaörbüntüsü için Godunov akılarının hesaplanması gösterilecektir. Akılar döndürülmüş koordinat ekseninde eksiyi \hat{x} tarafında kalan sol hücre c_L için hesaplanmıştır. \hat{x} -Split Riemann çözümleri ile ilgili bilgi için okuyucu referans [7]'ye başvurabilir.

5.1. (Σ_i, Σ_i) Arayüzü

Bu arayüz bir tek faz problemi tanımladığından, akı değeri $F^i(\Sigma_i, \Sigma_i)$ bir değişikliğe gerek olmadan HLLC çözümü ile hesaplanabilir. Bu durum için geçerli akı formülü (5)'de verilmiştir. Sonraki denklemlerde (Σ_i, Σ_i) yerine (i, j) notasyonu kullanılmıştır.

$$F^i \left(U_L^i, U_R^i \right) = \begin{cases} F_L^i & 0 \leq S_L^{(i,i)} \\ F_L^i + S_L^{(i,i)} \left(U_{*L}^{(i,i)} - U_L^i \right) & S_L^{(i,i)} \leq 0 \leq S_*^{(i,i)}, \\ F_R^i + S_R^{(i,i)} \left(U_{*R}^{(i,i)} - U_R^i \right) & S_*^{(i,i)} \leq 0 \leq S_R^{(i,i)}, \\ F_R^i & 0 \geq S_R^{(i,i)} \end{cases} \quad (4)$$

Error! Reference source not found.'de S_L ve S_R sol ve sağ dalga hızları, S_* temas hızı olarak kullanılır. S_* aşağıdaki formül ile hesaplanabilir [8].

$$S_*^* = \frac{P_{s,1} - P_S, 0 + \rho_{s,0} u_{s,0} (S_{s,1} - u_{s,0}) - \rho_{s,1} u_{s,1} (S_{s,1} - u_{s,1})}{\rho_{s,0} (S_{s,0} - u_{s,0}) - \rho_{s,1} (S_{s,1} - u_{s,1})} \quad (5)$$

Diğer dalga hızları Roe ortalama yöntemine göre referanslar [9] ve [10]'da anlatıldığı gibi hesaplanabilir. $U_{s,K}^*$ vektörleri aşağıda verilmiştir.

$$U_{s,K}^* = \rho_K \left(\frac{S_{s,K} - u_{s,K}}{S_{s,K} - S_s^*} \right) \begin{bmatrix} 1 \\ S_s^* \\ v_K \\ w_K \\ \frac{E_K}{\rho_K} + (S_s^* - u_K) \left[S_s^* + \frac{P_K}{\rho (S_{s,K} - u_K)} \right] \end{bmatrix} \quad (6)$$

Yukarıda K sol L ve sağ R değerleri için kullanılmıştır. Gevşeme sürecinden önce Σ_i fazının hacim kesiti α^i , (Σ_i, Σ_i) arayüzü üzerindeki süreçlerden etkilenmez. Hacim kesiti bilgisi taşıyan akı $F_{\alpha^i}^{(i,i)}$ değeri tek fazlı arayüz üzerinde sıfırdır.

5.2. $(\Sigma_i, \Sigma_j), i \neq j$ Arayüzü

Arayüz bilgisini taşıyan temas dalgasının $S_*^{(i,j)}$ yönüne göre iki farklı durum vardır. Sağa giden temas dalgası durumunda tek fazlı HLLC çözümü Σ_i fazı için geçerlidir. Fakat sola giden temas dalgası durumunda, Σ_i fazı için taşınım (convection) ile bilgi taşınmaz. Taşınım terimleri çıkarıldığında bu akı aşağıda verildiği gibi yazılabılır.

$$F^{i,i \neq j} (U_L^i, U_R^j) = \begin{bmatrix} 0 \\ P_*^{i,j} \\ 0 \\ u_*^{i,j} P_*^{i,j} \end{bmatrix} \quad S_*^{(i,j)} \leq 0 \quad (7)$$

Aynı sonuç HLLC Riemann çözümü kullanılarak elde edilebilir. HLLC çözümü kullanıldığında temas dalgasının sağında kalan akı değeri aşağıdaki gibi yazılır;

$$F_{*R}^{i,j} = F_{*L}^{i,j} + S_*^{i,j} (U_{*R}^{i,j} - U_{*L}^{i,j}) \quad (8)$$

Taşınım terimi $S_*^{i,j} U_{*R}^{i,j}$, (9)'den çıkarıldığında,

$$F^{i,i \neq j} (U_L^i, U_R^j) = F_L^{i,j} - S_*^{i,j} U_{*L}^{i,j}, \quad S_*^{(i,j)} \leq 0 \quad (9)$$

Bu sonuç referans [5]'de yapılan yaklaşımla uyumludur. Bu sonuçları kullanarak $(\Sigma_i, \Sigma_j), i \neq j$ arayüzü için HLLC çözümüsü şu şekilde yazılır,

$$F^{i,i \neq j} (U_L^i, U_R^j) = \begin{cases} F_L^i & 0 \leq S_L^{(i,j)} \\ F_L^i + S_L^{(i,j)} (U_{*L}^{(i,j)} - U_L^i) & S_L^{(i,j)} \leq 0 \leq S_*^{(i,j)} \\ F_{*L}^{i,j} - S_*^{i,j} U_{*L}^{i,j} & S_*^{(i,j)} \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

Temas hızı bilgisi kullanılarak, hacim kesiti α^i için akı aşağıdaki biçimde uygulanır.

$$F_{\alpha^i}^{(i,j)} = \begin{cases} 0 & S_*^{(i,j)} \geq 0 \\ -S_*^{(i,j)} & \text{if } S_*^{(i,j)} \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

5.3. $(\Sigma_j, \Sigma_i), j \neq i$ Arayüzü

Bu arayüzde sağa giden temas dalgası $S_*^{(j,i)} \geq 0$ için $F^i (U_L^i, U_R^j)$ akı değeri sıfırdır. $S_*^{(j,i)} \leq 0$ ve $S^{(j,i)} \geq 0$ için temas dalgasının sağında kalan yıldız bölgesindeki akı değeri $S_*^{(j,i)} U_{*R}^{(j,i)}$ kullanılır. $S_R^{(j,i)} \geq 0$ (ses üstü) durumunda HLLC çözümü kullanılabilir. Bu durum için geçerli HLLC akısı aşağıda verilmiştir,

$$F^{i,i \neq j} (U_L^j, U_R^i) = \begin{cases} 0 & 0 \leq S_{*L}^{(j,i)} \\ S_*^{(j,i)} U_{*R}^{(j,i)} & S_{*L}^{(j,i)} \leq 0 \leq S_R^{(j,i)} \\ F_R^{(j,i)} - F_{*R}^{(j,i)} +_*^{(j,i)} U_{*R}^{(j,i)} & S_R^{(j,i)} \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

Bu arayüzde hacim kesiti α^i akısı aşağıda yazıldığı gibidir,

$$F_{\alpha^i}^{(j,i)} = \begin{cases} 0 & \text{if } S_*^{(j,i)} \geq 0 \\ S_*^{(j,i)} & \text{if } S_*^{(j,i)} \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

5.4. Godunov Akılarının Hesaplanması

Yukarıda çıkarılan akı hesaplama yöntemleri bir arayüz izleme yöntemi için kullanılabilir. Fakat bu çalışmanın amacı arayüz yakalamaya dayanan bir Godunov çözümüsü oluşturmak değildir. Yöntem hücreler içerisinde arayüzlerin bulunmasına izin verdiğiinden basınç ve hız için gevşeme süreçlerini de içermelidir. Referans [13] bu konuda ayrıntılı bilgi sağlamaktadır. Basınç için [13]'de sunulan yedinci yöntem kullanılmıştır.

Bir hücre yüzü ζ_f üzerinde (Σ_i, Σ_j) arayüzü olma olasılığı $P(\Sigma_i, \Sigma_j)$ ile gösterilir ve aşağıdaki gibi tanımlanabilir,

$$P(\Sigma_i, \Sigma_j) = \frac{1}{A_{\zeta_f}} \int_{\zeta_f} X_L^i X_R^j ds = \alpha_i \alpha_j \quad (14)$$

Bu integralin sonucu olarak Σ_i fazı için Godunov akısı şu şekilde hesaplanır.

$$F^i = \alpha_i \alpha_i F^i(U_L^i, U_R^i) + \alpha_i \alpha_j F^{i,i \neq j}(U_L^i, U_R^j) + \alpha_j \alpha_i F^{j,j \neq i}(U_L^j, U_R^i) \quad (15)$$

$$F_{\alpha^i} = \alpha^i \alpha^j F_{\alpha^i}^{i,j} + \alpha^j \alpha^i F_{\alpha^i}^{j,i} \quad (16)$$

5.5. Algoritma

Dört adımlı Runge-Kutta ile açık (explicit) yöntemle zaman bağlı çözüm yöntemi kullanılmıştır. Zaman adımı uzunluğu [12]’de anlatılan kararlılık kriterine göre hesaplanmıştır. Her zaman adımı dört alt adımla tamamlanmaktadır: 1. Önceki bölümde anlatılan akı formülleri kullanılarak kalan (residuals) değerleri hesaplanır, 2. Kalan değerleri kullanılarak yeni çözüm değişkenleri ve akışkan özelliklerini hesaplanır, 3. Hız gevşeme süreci uygulanır ve yeni enerji değerleri hesaplanır, 4. Basınç gevşeme süreci uygulanır ve yeni hacim oranları ile yeni enerji değerleri hesaplanır.

6. ÇOK AKIŞKANLI TESTLER

6.1. Su-Hava Şok Tüp Problemi

Bu test problemi [11]’de farklı basınç gevşeme yöntemlerini test etmek amaçlı tanımlanmıştır. Problemde bir metre uzunluğunda bir şok tüp, yüksek basınçlı sıvı solda $x < 0.7$ ve düşük basınçlı gaz sağda kalacak $x > 0.7$ şekilde tanımlanmıştır. Sıvı su için Stiffened gaz hal denklemi kullanılmıştır. Hava ideal gaz olarak modellenmiştir. Stiffened gaz hal denklemine göre suyun basıncı aşağıda verilen formülle hesaplanır.

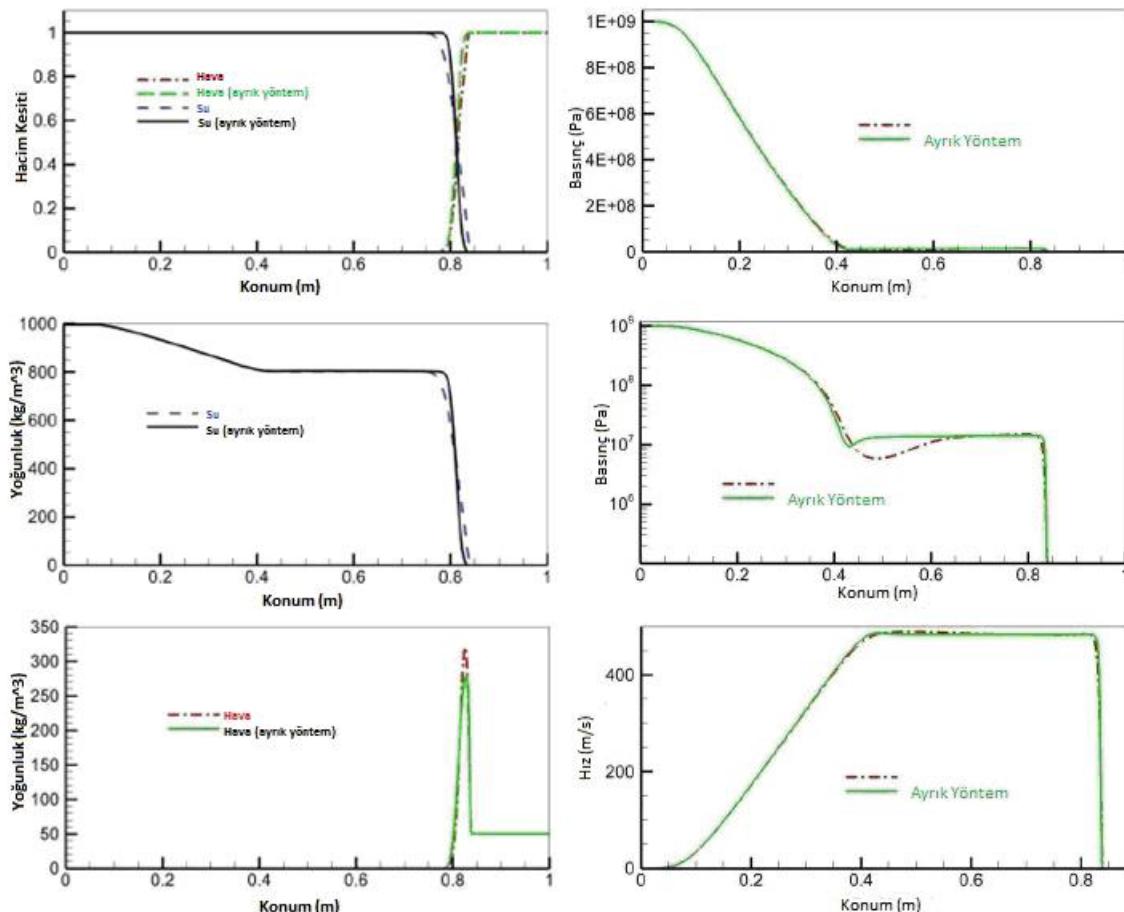
$$P = \rho(\gamma - 1)e - \gamma P_\infty \quad (17)$$

P_∞ bir sabit parametredir. Bu hal denkleminde ses hızı şöyle hesaplanır,

$$a = \sqrt{\frac{\gamma(P + P_\infty)}{\rho}} \quad (18)$$

Bu şok tüp problemini tanımlayan ilk değerler şöyledir: $x < 0.7$ için $\rho^l = 10^3$ kg/m³, $P^l = 10^9$ Pa, $u^l = 0$ m/s, $\gamma^l = 4.4$, $P_{l,\infty} = 6 \times 10^8$, $\alpha_L^l = 1 - 10^{-8}$ ve $x > 0.7$ için $\rho^g = 50$ kg/m³, $P^g = 10^5$, $u^g = 0$ m/s, $\gamma^g = 1.4$, $\alpha^g = 1 - 10^{-8}$.

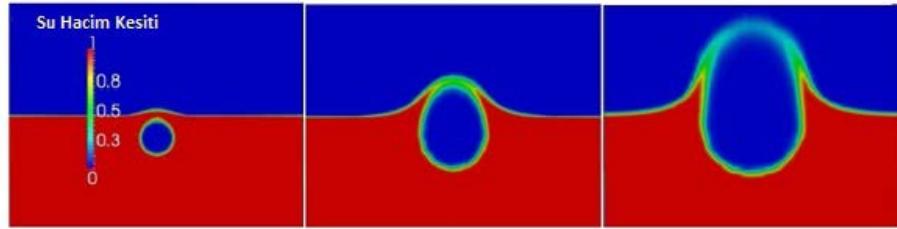
Bu test problemi için hem bu çalışmada sunulan ayrik (discrete) yöntem hemde [4]'de sunulan yöntemle (sureklilik kabulü) çözümler elde edilerek gösterilmiştir. Çözümlerde daha önce sözü edilen hız ve basınç gevşeme yöntemleri de kullanılmıştır. $t = 229 \times 10^{-6}$ anındaki çözümler Şekil 4'de gösterilmiştir. Bu çözümlerde tek boyutta 1000 hesaplama hücresi kullanılmıştır.



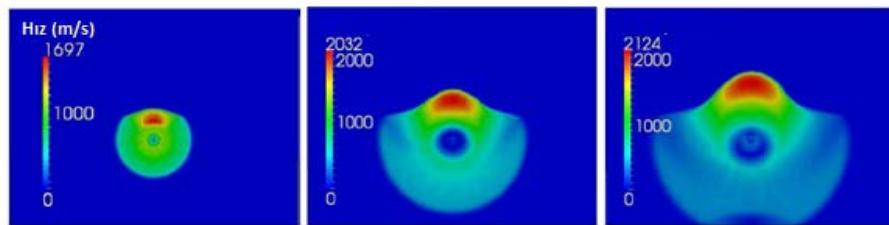
Şekil 4. $t = 229 \times 10^{-6}$ anında su/hava şok tüp probleminin çözümü.

6.2. Su Altı Patlaması Test Problemi

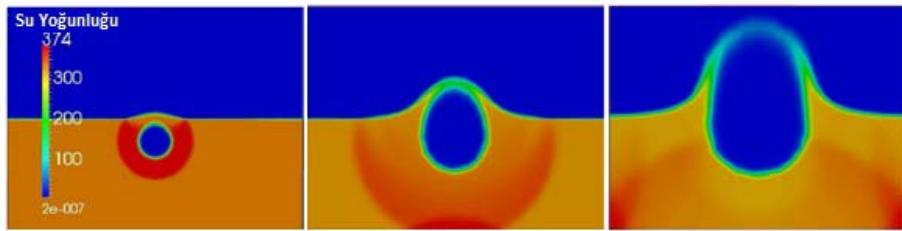
Bu testte iki boyutlu bir su altı patlaması modellenmiştir. Bu test daha önce [13], [14] ve [15]'de çalışılan probleme benzer bir problemdir. Problemde gaz fazındaki patlama ürünleri genleşmekte ve su içinde yayılan şok dalgası hava su arayüzüne etkileşerek harekete geçirmektedir. Bu çalışmada sunulan ayrik yöntemle birlikte hız ve basınç gevşeme süreçleri kullanılmıştır. Su daha önce verilen Stiffined gaz hal denklemi ile modellenmiştir. Hava ideal gaz olarak kabul edilmiştir. Yapısız çözüm ağının 129300 hesaplama hücresi içermektedir. Bazı sonuçlar Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'da gösterilmiştir.



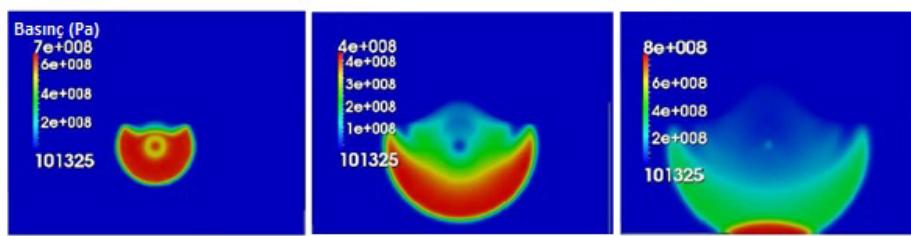
Şekil 5. $t = 100 \times 10^{-6}$, $t = 240 \times 10^{-6}$ ve $t = 680 \times 10^{-6}$ anlarında su hacim kesiti dağılımı.



Şekil 6. $t = 100 \times 10^{-6}$, $t = 240 \times 10^{-6}$ ve $t = 340 \times 10^{-6}$ anlarında karışım hızı dağılımı.



Şekil 7. $t = 100 \times 10^{-6}$, $t = 340 \times 10^{-6}$ ve $t = 680 \times 10^{-6}$ anlarında su yoğunluğu dağılımı.



Şekil 8. $t = 100 \times 10^{-6}$, $t = 240 \times 10^{-6}$ ve $t = 340 \times 10^{-6}$ anlarında basınç dağılımı.

7. SONUÇ

Çok fazlı ortamlarda güçlü dalgaların yayılımı ve malzeme etkileşimleri genellikle çözülmesi zor bir problem ortaya koyar. Bu çalışmada güçlü ve pratik bir sayısal yöntem sunulmuş ve bazı test problemleri ile uygulamaları gösterilmiştir. Anlatılan sayısal yöntemlere dayanan çok boyutlu bir simülasyon yazılımı geliştirilmiştir. Yazılım

polihedraller dahil olmak üzere her türlü karışık eleman içeren yapısız çözüm ağlarını desteklemekte ve paralel hesaplama yeteneğine sahiptir. Yüksek performanslı kodlama teknikleri kullanılarak yazılımın verimi arttırlılmıştır. Özellikle savunma sanayiinde uygulaması olabilecek bu tür sayısal benzetim çalışmaları paralel hesaplama tekniklerinin gelişmesi ile daha aktif kullanılmaya başlamıştır.

8. KAYNAKÇA

- [1] Z. Guoshun, Causes and lessons of five explosion accidents, *J. Loss Prevent. Process Ind.* 13 (2000) 439–442.
- [2] T.C. Chapman, T.A. Rose, P.D. Smith, Blast wave simulation using AUTODYN2D: a parametric study, *Int. J. Impact Eng.* 16 (1995) 777–787.
- [3] J.M. Powers, H. Krier, Attenuation of blast waves when detonating explosives inside barriers, *J. Hazard. Mater.* 13 (1986) 121–133.
- [4] R. Saurel, R. Abgral, A Multiphase Godunov Method for Compressible Multifluid and Multiphase Flows, *J. Comput. Phys.*, 150(1999) 425-467.
- [5] R. Abgral, R. Saurel, Discrete equations for physical and numerical compressible multiphase mixtures, *J. Comput. Phys.*, 186(2003) 361-396.
- [6] D.A. Drew, S.L. Passman, Theory of Multicomponent Fluids, 135(1998), Applied Mathematical Sciences. Springer.
- [7] Eleuterio F. Toro, Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics, 1997, Springer.
- [8] C. Lambert P. Batten, N. Clarke and D. M. Causon, On the choice of wave speeds for HLLC Riemann solvers, 18(1997), 1553-1570.
- [9] P. L. Roe, Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference schemes, *J. Comput. Phys.*, 90(1981), 141—160.
- [10] B. Einfeldt, On godunov-type methods for gas dynamics., *SIAM J. Numer. Anal.*, 25(1988), 294-318.
- [11] O. Le Metayer M. H. Lallemand, A. Chinnayya, Pressure relaxation procedures for multiphase compressible flows, *J. Numer. Meth. Fluids*, 49(2005), 1-56.
- [12] Y. Kallinderis P. Vijayan, A 3d finite volume scheme for the Euler equations on adaptive tetrahedral grids, *J. Comput. Phys.*, 113(1999), 249-267.
- [13] G. Iaccarino, X.Y. Hu, N.A. Adams, On the hllc riemann solver for interface interaction in compressible multi-fluid flow., *J. Comput. Phys.*, 228:6572--6589, 2009.
- [14] R. Manikoff, J. Grove., Anomalous reflection of shock wave at a fluid interface., *J. Fluid Mech.*, 219:313--336, 1990.
- [15] K.M Shyue., A wave-propagation based volume tracking method for compressible multicomponent flow in two space dimensions., *J. Comput. Phys.*, 215:219--244, 2006.

**KUVAZİ-STATİK ZAMAN UZAYI SONLU FARKLAR YÖNTEMİ
İLE DALGA DENKLEMİ TABANLI İKİ BOYUTLU
KARTEZYEN KOORDİNATLarda
DÜŞÜK FREKANSLI
METAL DETEKTÖRÜ BENZETİMİ**

Mehmet Burak Özakin, Serkan Aksoy

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Gebze, Kocaeli, Türkiye
bozakin@gyte.edu.tr, saksoy@gyte.edu.tr

ÖZ

Bu çalışmada, düşük frekanslı (dar-bantlı) bir metal detektörünün toprakta gömülü iletken bir cismin tespitindeki başarımı saçılıan elektromanyetik dalganın yatayda konuma göre değişim kapsamında Kuvazi-Statik Zaman Uzayında Sonlu Farklar yöntemi ile iki boyutlu Kartezyen koordinatlarda dalga denklemi tabanlı olarak incelenmiştir. Problem uzayı verici/alıcı, hava-toprak ve toprak içerisinde manyetik olmayan iletken kare kesitli bir cisimden oluşturulmuştur. İkinci mertebeden Mur türü sınır koşulu sayısal problem uzayını sonlandırmak için kullanılmıştır. Noktasal kaynak olarak modellenen alıcı ve verici (monostatik) toprak üzerinde belirli bir yükseklikte düz bir eksen boyunca hareket ettirilerek, alıcıda elde edilen zaman uzayı saçılıan dalga verileri frekans uzayına Hızlı Fourier Dönüşümü ile geçirildikten sonra, konuma göre değişimi elde edilmiştir. Sonuçlara göre, cismin bulunduğu dikey eksende saçılıan dalgaların genlikleri arasındaki farklılıklar belirgin bir düzeyde gözlemlenebildiğiinden, cisim tespiti yapılmamıştır. Başarım analizi için, metal detektör anteninin topraktan farklı yükseklikleri ve cismin bulunduğu farklı derinlikler göz önünde bulundurularak karşılaştırmalar yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Gömülü cisim, Kuvazi-Statik alanlar, Metal detektörü, Sayısal Elektromanyetik, Zaman Uzayı Sonlu Farklar Yöntemi.

**SIMULATION OF A LOW-FREQUENCY METAL DETECTOR
WITH WAVE EQUATION-BASED QUASI-STATIC FINITE-
DIFFERENCE TIME-DOMAIN METHOD IN TWO-
DIMENSIONAL CARTESIAN COORDINATES**

ABSTRACT

In this work, the detection performance of a low-frequency (narrow-band) metal detector by the horizontal spatial distribution of the scattered electromagnetic waves from a buried conducting object in the soil is examined with wave equation based Quasi-Static Finite-Difference Time-Domain method in two-dimensional Cartesian coordinates. The problem space is constructed with a transmitter/receiver, air-ground interface and a square cross-sectioned buried non-magnetic conducting object in the soil. Second order Mur type boundary condition is used to terminate the numerical problem space. The receiver and transmitter (monostatic) antennas are modeled as point sources. The received signals are obtained from the time domain scattered wave data by moving the antenna at a certain height above the ground along a straight line. Then Fast Fourier Transform is applied for passing through to the frequency space. The spatial distribution of the scattered wave is obtained along to the straight line. According to the numerical results, the detection of the buried object is successful, because of enough strong differences observed significantly over the scattered wave on the vertical axis of the buried object. For the performance analysis, the comparisons for different heights of the metal detector antenna and different depths of the buried object are investigated.

Keywords: Buried objects, Quasi-Static fields, Finite-Difference Time-Domain, Metal detectors, Numerical Electromagnetic.

1. GİRİŞ

Toprakta gömülü iletken (mayın, maden v.b.) cisimlerin tespiti için kullanılan metal detektörlerinin çalışma prensibi detektörün oluşturduğu ve toprağa nüfuz eden elektromanyetik dalgalar nedeni ile gömülü iletken cisimde Eddy akımlarının indüklenmesine dayanır [1]. Cisim üzerinde oluşan Eddy akımları kaynak özelliği göstererek ikincil elektromanyetik dalgalar oluşturur. Bu dalgaların metal detektörüyle algılanması ile gömülü cisim tespiti yapılmaktadır. Toprakta gömülü olan mayın, patlamamış bomba (Unexploded Ordnance - UXO) gibi çeşitli cisimlerin tespiti içinde metal detektörü askeri savunma alanında yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Bu sistemlerde meydana gelebilecek yanlış alarm sayısının azaltılması, daha derindeki cisimlerin doğru biçimde tespit ve teşhis edebilme yeteneklerinin geliştirilmesi ile askeri savunma alanında daha başarılı sonuçlar elde dilebilir. Bu sistemlerin daha az maliyetle geliştirilebilmesi amacı ile modelleme ve benzetim yöntemlerine başvurulması gerekmektedir.

Metal detektörü probleminin analizi için temelde analitik veya sayısal (numerical) yöntemler kullanılabilir, fakat metal detektörü probleminin kesin analitik çözümü hem toprağın durumunun (ıslak-kuru) ele alınması, hem de gömülü cisimden saçılan dalgaların tekrar toprak yüzeyindeki saçılımı gibi birçok detayın incelenmesinin gerekliliği nedeni ile zordur. Buna alternatif olarak sayısal yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada zamanda iteratif çözüme dayalı Kuvarzi-Statik Zaman Uzayında Sonlu Farklar (KS-ZUSF) yöntemi metal detektörü problemi çözümü için uygulanmıştır. Özel olarak gerçekte üç boyutlu olan problem uzayı, bir yönde değişim olmadığı varsayımlı ile iki boyuta indirgenmiştir. Metal detektörünün yaygın olarak kullanılan dairesel verici ve alıcı antenleri elektriksel olarak küçük halka anten yaklaşımı altında noktasal kaynak olarak modellenmiştir. Bu noktasal yapı belirli yüksekliklerde toprağa paralel doğrultuda belirli aralıklarla ilerletilerek zaman uzayında toplanan veriler, Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) ile frekans uzayına geçirilmiştir. Özel olarak frekans uzayındaki neticelerin genliklerinin maksimumları alınarak saçılan dalga konuma göre değişimi elde edilmiştir. Yatay doğrultuda ilerleyen metal detektörünün her bir konumu için bu işlem tekrarlanmaktadır. Bu aşamada saçılan dalgalar yine KS-ZUSF yöntemi ile elde edilen toplam alandan gelen alanın çıkarılması ile hesaplanmaktadır. Sonuçta cisim bulunduğu menzilde saçılan dalgaların belirgin bir biçimde farklılık göstererek, cisim tespitinin doğru bir biçimde yapılabildiği gösterilmiştir. Böylelikle düşük frekanslı bir metal detektörünün benzetimi tespit başarımı kapsamında KS-ZUSF yöntemi ile incelenmiştir.

2. ZAMAN UZAYINDA SONLU FARKLAR YÖNTEMİ

Problem uzayını izgaralama yöntemi ile uzaysal hücrelere bölün ve bu hücrelere dağılmış incelenen fonksiyonun zaman ve konumdaki analitik türevleri yerine Taylor serisinden yararlanarak elde edilen yaklaşık sayısal türevlerini kullanarak zamanda iteratif çözüm yapabilen yönteme Zaman Uzayında Sonlu Farklar (ZUSF) yöntemi denir [2], [3]. ZUSF yönteminin bir kere çalıştırılması (single run) ile geniş bir bantta frekans uzayı cevabının elde edilebilmesi ve doğruluğu kontrol edilebilir çözüm sunması v.b. nedenlerden dolayı elektromanyetik problemlerde kullanılması yaygınlaşmıştır [3].

2.1. İki Boyutlu Kartezyen Koordinatlarda Kayıplı Dalga Denklemi Tabanlı ZUSF Uygulaması

Elektromanyetizmanın temelini oluşturan Maxwell denklemlerinden dalga denklemi çıkarılabilir. Buna göre elektrik veya manyetik bileşenler için çıkarılan dalga denklemi kapsamında tek bir dalga bileşeni ele alınarak elektromanyetik bir problem incelenebilir. Buna göre iki boyutlu Kartezyen koordinatlarda kayıplı dalga denklemi

$$\Delta u(x, y, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(x, y, t)}{\partial t^2} - \sigma\mu \frac{\partial u(x, y, t)}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

olarak verilir [2]. Burada $u(x, y, t)$ incelenen elektromanyetik dalga bileşenini, c [m/s] elektromanyetik dalga hızını, σ [S/m] elektriksel iletkenliği, μ [H/m] ortamın manyetik geçirgenliği göstermektedir. Kayıplı dalga denklemi ZUSF çözümü için problem uzayı ayrık hale getirilerek, sonlu merkezi farklar ile elde edilen konumsal ve zamansal türevler zamanda en ileride olan bileşen üzerinden düzenlenip, ZUSF güncelleme denklemi

$$u_{i,j}^{n+1} = \frac{1}{2 + \sigma\mu c^2 \Delta t} \left[2 \left(\frac{c\Delta t}{\Delta x} \right)^2 (u_{i+1,j}^n + u_{i-1,j}^n) + 2 \left(\frac{c\Delta t}{\Delta y} \right)^2 (u_{i,j+1}^n + u_{i,j-1}^n) \right] \\ + \left[4 \left(1 - \left(\frac{c\Delta t}{\Delta x} \right)^2 - \left(\frac{c\Delta t}{\Delta y} \right)^2 \right) \right] u_{i,j}^n - (2 - \sigma\mu c^2 \Delta t) u_{i,j}^{n-1} \quad (2)$$

olarak bulunur. Burada Δt [s] birim zaman adımlama süresi, n zamanda adım sayısı, Δx [m] ve Δy [m] izgaralananmış problem uzayının sırasıyla x ve y yönündeki birim

hücre uzunlukları, i ve j ızgaralandırılmış problem uzayının sırasıyla x ve y yönündeki hücre numarasını gösterir. ZUSF çözümünün kararlı olması için zaman adımı Δt 'nin Courant-Friedrich-Levy (CFL) kararlılık koşulu özel olarak iki boyutlu problemler için $\Delta x = \Delta y$ olması halinde

$$\Delta t \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{\Delta x}{c} \right) \quad (3)$$

olarak uygulanmalıdır [2], [3].

2.2. Kuvazi-Statik Zaman Uzayında Sonlu Farklar Yöntemi

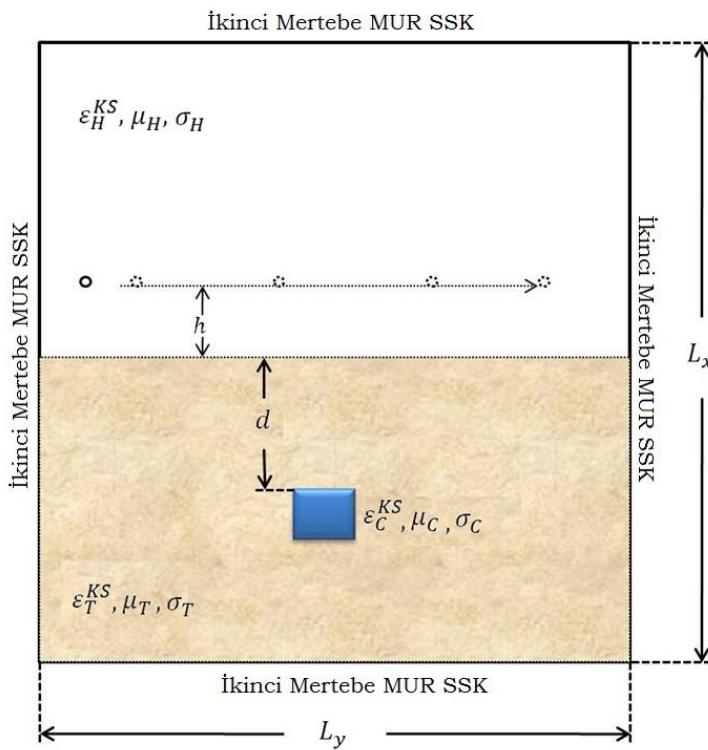
Düşük frekanslı elektromanyetik problemlerin klasik ZUSF yöntemi ile çözülmesi durumunda problem uzayının modellenmesi için oluşturulan hücrelerin boyutlarının dalga boyuna kıyasla çok küçük ($\lambda/10^5$ mertebelerinde) olması nedeniyle, ZUSF kararlılık koşulu ile belirlenen zaman adımı kullanılarak, sistemin en azından bir periyot işaret üretebilmesi için iteratif algoritmanın yüz binlerce kez çalıştırılması gerekmektedir. Bu durum hem günümüz bilgisayarları ile makul olmayan düzeyde hesap süresini uzatmaktadır, hem de yüksek sayıdaki iteratif hesaplamanın getirdiği hataları da çözüme eklemektedir. Dolayısıyla klasik ZUSF yöntemi ile düşük frekanslı sistemlerin incelenmesi pratik değildir. Bu problemin üstesinden gelinmesi için birim zaman adımının (Δt) büyütülmesi amacı ile geliştirilen Kuvazi-Statik ZUSF (KS-ZUSF) yöntemi, problemin Kuvazi-Statik şartının sağlanması durumunda dalga hızının yavaşlatılması prensibine dayanmaktadır [4]. Kuvazi-Statik şartı Maxwell denklemleri kapsamında, frekansın yeterince düşük olması durumunda dephasman akımının iletkenlik akımından yeterince küçük olarak ihmali edilebilir olması prensibine dayanarak, kayıplı dalga denklemi bakımından da $\omega\epsilon \ll \sigma$ olarak verilir [4]. Burada ω [Rad/sn] açısal frekansı, ϵ [F/m] ortamın dielektrik sabitini gösterir. Bu şartlar altında elektromanyetik olayın Kuvazi-Statik davranış gereği, dalga yayılım hızının düşürülmesi mümkün değildir. Böylece klasik ZUSF yönteminde sıkıntı oluşturan zaman adımlaması büyütülerek, ZUSF çözümü kabul edilebilir iterasyon sayısı ile elde edilebilecektir. Elektromanyetik dalga hızının düşürülebilmesi dielektrik sabiti ϵ [F/m] ve manyetik geçirgenlik μ [H/m] olmak üzere temelde iki parametre üzerinden yapılabılır. Bu çalışmada problemin gerçek karakteristğini (cidar kalınlığı v.b. özellikler) değiştirmemek için öncelikle ϵ üzerinden büyütme katsayıısı uygulanacaktır. Buna göre boş uzayın dielektrik sabiti ϵ_0 , α gibi bir Kuvazi-Statik büyütme katsayıısı ile çarpılırsa, dalga yayılım hızı da

$$\varepsilon_0^{KS} = \alpha \varepsilon_0 \quad \Rightarrow \quad c^{KS} = \sqrt{\frac{1}{\alpha \varepsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} c \quad (4)$$

olmak üzere $\sqrt{\alpha}$ oranında küçülür. Burada $\varepsilon_0 = 10^{-9}/36\pi [F/m]$ ve $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [H/m]$ olmak üzere, ε_0^{KS} ölçülenmiş dielektrik katsayısını ve c^{KS} ölçülenmiş elektromanyetik dalga yayılım hızını gösterir. Ancak Kuvazi-Statik yaklaşımının ZUSF yöntemi bakımından uygulanması için, tüm problem uzayında geçerli olmasının gerekliliği unutulmamalıdır (yani tüm uzay belirli bir iletkenliğe sahip olmalıdır).

2.3. Problem Uzayının Oluşturulması

Şekil 1'de gösterilen Kartezyen koordinatlardaki problem uzayı alıcı/verici noktasal anten, hava, dielektrik özellikli toprak ve gömülü iletken cisimden oluşmaktadır. Problem uzayının gerçek boyutları $L_x = 2.55 m$, $L_y = 4 m$ olmak $10 cm$ kenar uzunluklu gömülü kare cismin modellenebilmesi için $\Delta x = \Delta y = 0.01 m$ olarak seçildiğinden, problem uzayı x ve y yönündeki hücre sayıları N_x ve N_y kapsamında toplam $(N_x, N_y) = (255, 400)$ olacaktır. Açık uzay şartlarının sağlanması için problem uzayının çevresine ikinci mertebeden Mur türü Soğurucu Sınır Koşulu SSK, (Absorbing Boundary Condition, ABC) uygulanmıştır [2].



Şekil 1. İki boyutlu Kartezyen koordinatlardaki problem uzayı.

Problem uzayına göre; h metal detektörü anteninin topraktan yüksekliği, d iletken cismin derinliği ε_H^{KS} , ε_T^{KS} ve ε_C^{KS} sırasıyla hava, toprak ve cismin KS-ZUSF yöntemi için ölçeklenmiş dielektrik katsayı μ_H , μ_T ve μ_C sırasıyla hava, toprak ve cismin manyetik geçirgenlik katsayı σ_H , σ_T ve σ_C sırasıyla hava, toprak ve cismin iletkenlik değerlerini göstermektedir. Toprağın derinliği $L_y/2 = 2 m$ olup elektromanyetik parametreleri $\varepsilon_T = 2.5 \times \varepsilon_0$ olmak üzere $\varepsilon_T^{KS} = \alpha \times \varepsilon_T$, $\mu_T = \mu_0$ ve $\sigma_T = 1.38 \times 10^{-4} [S/m]$ 'dır. Gömülü kare cisim yatay menzil olarak $L_x/2 = 1.38 m$ 'de yerleştirilmiş olmakla beraber, farklı senaryolar için farklı derinliklerde bulunmaktadır. Cismin elektromanyetik parametreleri ise; $\varepsilon_C^{KS} = \alpha \times \varepsilon_0$, $\mu_C = \mu_0$, $\sigma_C = 4.52 \times 10^7 [S/m]$ 'dır. Yine hava ortamının parametreleri de $\varepsilon_H^{KS} = \alpha \times \varepsilon_0$, $\mu_H = \mu_0$ ve $\sigma_C = 5.55 \times 10^{-5} [S/m]$ 'dır.

Noktasal kaynak olarak modellenen metal detektörü verici anteni $f = 10 kHz$ frekanslı sinüzoidal sürekli işaret üretecek şekilde rampa fonksiyonu aracılığı ile

$$u_{kaynak}^{n+1} = \begin{cases} 0 & , n \leq 0 \\ u_{kaynak}^n + \frac{n}{G_R} \sin(2\pi f n \Delta t) & , 0 < n \leq G_R \\ u_{kaynak}^n + \sin(2\pi f n \Delta t) & , n > G_R \end{cases} \quad (5)$$

olmak üzere koşullandırılmıştır. Burada G_R rampa fonksiyonunun genliği olup değeri 175 olarak alınmıştır. Denklemde görüldüğü üzere geçirgen türü kaynak (soft source) başlangıç koşulu olarak uygulanmıştır.

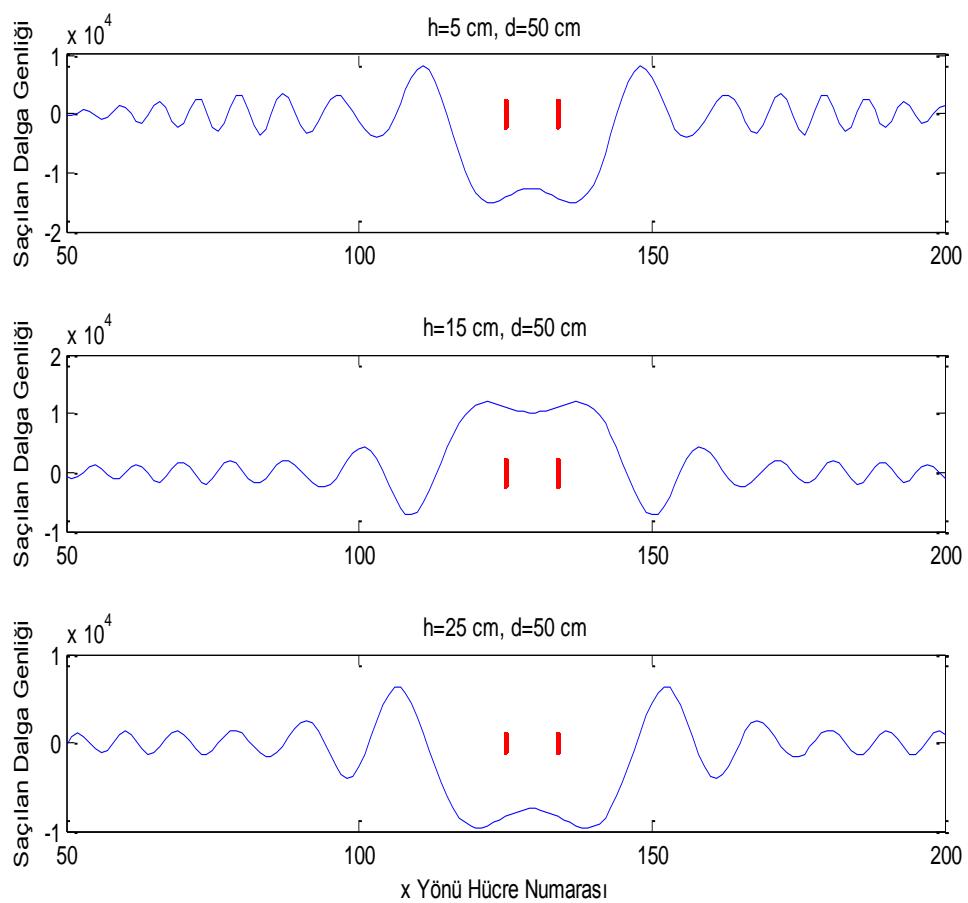
Bu problemde Kuvazi-Statik büyültme katsayı $\alpha = 5 \times 10^{10}$ olarak alınmıştır. Bu sayede büyütülen zaman adım süresi $\Delta t = 4.74 \mu s n$ olarak çözümde kullanılmıştır. ZUSF çözümünde kaynaktan yayılan dalgaların tüm uzaya etkileşmesi için toplam 1228 iterasyon yapılmıştır.

3. GÖMÜLÜ CISİM İÇİN SAÇILAN DALGA ANALİZLERİ

Bu kısımda, metal detektörü cisim tespit başarım analizi iki farklı senaryo oluşturularak ele alınacaktır. Birinci senaryo sabit derinlikteki iletken cisim için, topraktan farklı yüksekliklerde bulunan metal detektörünün tespit başarım analizi, ikinci senaryo ise sabit yükseklikteki metal detektörünün farklı derinliklerdeki iletken cismi tespit etme başarım analizidir.

3.1. Sabit Cisim Derinliği ve Farklı Anten Yüksekliği Durumu

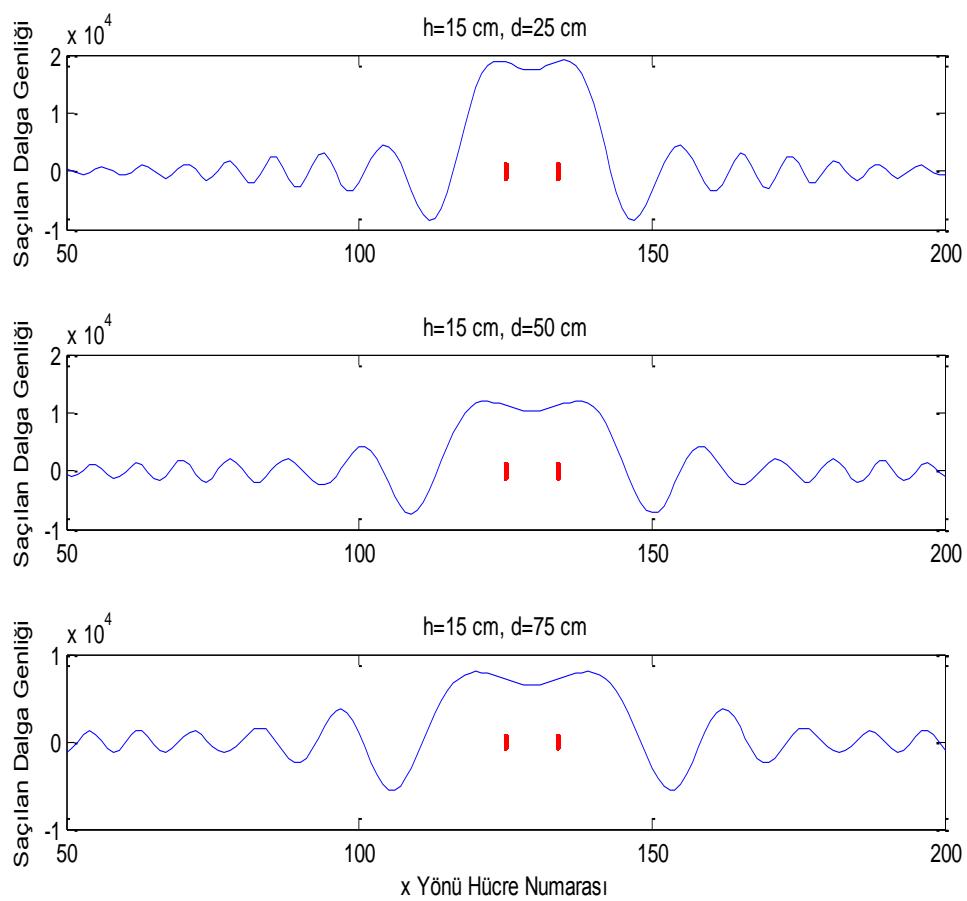
Bu senaryoda, metal detektörü anteninin topraktan yüksekliğinin cisim tespitine başarısına etkisi incelenecaktır. Böylece sabit cisim derinliğinde detektörün farklı yüksekliklerde kullanılmasının cisim tespiti üzerindeki etkisi araştırılacaktır. Buna göre, Şekil 2'de görüldüğü gibi, cismin bulunduğu yatay menzilde (dik paralel çizgiler cismin köşelerini göstermektedir) saçılan dalgaların değişim metal detektörü anteninin topraktan yüksekliğine göre farklılıklar göstermektedir. Burada üç temel husus gözlenmektedir. Birinci husus, anten yüksekliği arttıkça cismin bulunduğu menzile kadarki saçılan dalga salınım miktarı azalmaktadır. İkinci husus, değişen anten yüksekliği ile faz farkları meydana gelmektedir. Üçüncü husus ise, cismin köşelerinden meydana gelen saçılımanın (wedge effect) oluşturduğu genlik farkının tüm anten yüksekliklerinde etkin biçimde gözlemlenebiliyor olmasıdır.



Şekil 2. $d = 50 \text{ cm}$ ve $h = 5, 15, 25 \text{ cm}$ durumları için konuma göre saçılan dalga analizi.

3.2. Sabit Anten Yüksekliği ve Farklı Cisim Derinliği Durumu

Bu bölümde önceki senaryoda incelenen anten yüksekliklerinden $h = 15 \text{ cm}$ referans alınarak metal detektörünün tespit başarımı farklı derinliklere gömülü cisimlerin tespit başarımı konumsal saçılıan dalgalarının analizi bakımından incelenecektir. Buna göre Şekil 3'de üç farklı derinlikte ve sabit anten yüksekliğinde saçılıan dalganın konuma göre değişimi gösterilmiştir. Burada görüldüğü üzere cismin bulunduğu menzildeki saçılıan dalga genlikleri derinlik arttıkça azalmaktadır. Ayrıca, cismin köşelerinden saçılma etkisi (wedge effect) tüm derinliklerde gözlenebilmekle beraber, derinlik arttıkça etkisi azalmaktadır.



Şekil 3. $d = 25, 50, 75 \text{ cm}$ ve $h = 15 \text{ cm}$ durumları için konuma göre saçılıan dalga analizi.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, düşük frekanslı bir metal detektörünün KS-ZUSF yöntemi kullanılarak, cisim tespit başarım analizler yapılmıştır. Bu amaç için iki farklı senaryo oluşturulmuştur. İlk senaryoda sabit derinlikteki gömülü cismin tespit başarımının detektör anteninin topraktan farklı yüksekliklerdeki durumu, ikinci senaryoda sabit anten yüksekliği durumunda farklı derinliklerde gömülü cismin tespit başarımı incelenmiştir. Buna göre düşük frekans metal detektörleri ile toprakta gömülü iletken bir cismin yataydaki menzil tespitinin belirli koşullar altında saçılan dalganın konumsal dağılımı kapsamında yüksek başarı ile yapılabileceği gözlemlenmiştir. Farklı anten yükseklikleri durumunda saçilan dalganın konumsal dağılımında faz farkı etkisi baskın olmakla beraber, daha derinde gömülü iletken cisimler durumunda ise saçilan dalgın genliklerinin cismin köşe etkileri kapsamında azaldığı görülmüştür. Geleceğe yönelik çalışmalar olarak, öncelikle dalga denklemi tabanlı üç boyutlu ve sonralık Maxwell denklemi tabanlı iki ve üç boyutlu KS-ZUSF çözümlerinin yapılması hedeflenmektedir. Yine, gömülü birden fazla manyetik/manyetik olmayan cisimlerin varlığı ile birlikte gerçekçi anten modellemeleri kapsamında, derinlik tahmini konusunda çalışmalar yapılması planlanmaktadır.

5. KAYNAKÇA

- [1] MacDonald J., Lockwood J. R., (2005), Alternatives for Landmine Detection, RAND, Arlington, USA.
- [2] Aksoy S., (2011), *Zaman Uzayında Sonlu Farklar (ZUSF) Yöntemi Ders Notları*, Revizyon 1.3.3, Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Kocaeli, TÜRKİYE.
- [3] Taflove A., Hagness S.C., (2005), *Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, Third Edition, MA: Artech, Boston.
- [4] Holland R., (1994), Finite-difference time-domain (FDTD) analysis of magnetic diffusion, *IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility*, 36(1), 32-39.
- [5] Das Y., McFee J. E., (1991), A simple analysis of the electromagnetic response of buried conducting objects, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 29(2), 342-344.
- [6] Das Y., McFee J. E., Toews J., Stuart G. C., (1990), Analysis of an electromagnetic induction detector for real-time location of buried objects, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 28(3), 278-288.
- [7] Bruschini C., (2004), On the low-frequency EMI response of coincident loops over a conductive and permeable soil and corresponding background reduction schemes, *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 42(8), 1706-1719.

DÜŞÜK MALİYETLİ ATALETSEL ÖLÇERLERLE YÖNELİM TESPİT SİSTEMİ ALGORİTMASININ SİMÜLASYONU VE IPHONE 4 ÖLÇERLERİNE UYGULANMASI

Tolga Sönmez^(a), H. Burak Kaygısız^(b), Bekir Sen^(c), Nail Çadallı^(d)

^(a) Karel Elektronik, Arge Merkezi, Cyberplaza Bilkent 06800 Ankara, tolga.sonmez@karel.com.tr

^(b) Karel Elektronik, Arge Merkezi, Cyberplaza Bilkent 06800 Ankara, burak.kaygisiz@karel.com.tr

^(c) Karel Elektronik, Arge Merkezi, Cyberplaza Bilkent 06800 Ankara, bekir.sen@karel.com.tr

^(d) Karel Elektronik, Arge Merkezi, Cyberplaza Bilkent 06800 Ankara, nail.cadalli@karel.com.tr

ÖZ

Günümüzde ataletsel ölçerlerin maliyetleri düşmekte ve boyutları küçülmektedir. Bu sayede uygulama alanları da genişlemektedir. Bu bildiride düşük maliyetli ataletsel ölçerler içeren (Üç eksenli ivmeölçer, dönüölçer ve magnetometre) bir yönelim tespit sistemi için Kalman tabanlı bir algoritma tasarlanmıştır. Ölçerlerin dünyaya göre üç boyutlu yönelimi hesaplanmaktadır. Ölçüm sistemi, hareketsizken, ivmeölçer verilerini ve magnetometre verilerini kullanarak yönelimi bulmaktadır. Hareketliken, dönüölçer verileri kullanılarak yönelim hesaplanmaktadır. Bu algoritmanın test edilmesi için bir simülasyon altyapısı geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritma, iPhone4TM telefonundan toplanan ölçer verilerine uygulanmıştır ve sonuçlar incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: seyrüsefer, yönelim, Kalman, ataletsel ölçerler, veri füzyonu.

ATTITUDE HEADING REFERENCE SYSTEM ALGORITHM DESIGN USING LOW-COST INERTIAL SENSORS AND APPLICATION TO IPHONE4 SENSORS

ABSTRACT

Today, inertial sensors cost much less and their sizes are diminishing. With this development inertial sensor applications are widening. In this paper we design a Kalman filter based algorithm which fuses data from low cost inertial sensors (three dimensional accelerometer, gyroscopes and magnetometers). Attitude of the sensors in reference to Earth is calculated in three dimensions. While the measurements system is stationary, attitude is determined using the accelerometers and magnetometers. When it is moving, measured rotation rates by gyroscopes are integrated to track the attitude. In

order to assess the performance of the system a simulation test bed is developed. The developed algorithm is applied to iPhone4TM sensor data (accelerometers, gyroscopes and magnetometers).

Keywords: navigation, attitude, Kalman, inertial sensors, data fusion.

1. GİRİŞ

Ataletsel ölçerlerin ve diğer mikro-elekromekanik ölçerlerin üretim miktarlarının artması ve fiyatlarının düşmesi, bu ölçerlerin askeri ve sivil birçok farklı sistemde ve uygulamada kullanılmasına yol açmıştır (Bkz. [1]). Günümüzde düşük maliyetli ataletsel ölçerler, video oyun sistemlerinde, cep telefonlarında, beyaz eşyalarda (Bkz. [2]) ve benzer birçok sistemde titreşim ölçümü, hareket yakalama (motion capture), yönelim ölçümü, performans takibi (Bkz. [3]) yapabilmek için kullanılmaktadır. Askeri olarak özellikle UAV tipi platformlarda yönelimi tespit eden sistemler kullanılmaktadır.

Bu bildiride düşük maliyetli ataletsel ölçerlerin kullanıldığı birçok uygulama için kritik bir sistem olan yönelim tespit sistemi (YTS) tanıtılmaktadır. Bildiride tasarılan sistemın başarımı iPhone4TM kullanılarak gösterilmiştir. Bildiride öncelikle YTS modeli çıkarılmış (2. Bölüm) ve ölçerler için hata modelleri oluşturulmuştur (3. Bölüm). Çıkarılan YTS ve hata modelleri kullanılarak YTS Kalman filtresi oluşturulmuş (4. Bölüm) ve oluşturulan algoritma benzetim ortamında denenmiştir. Bildiride son olarak benzetimlerle doğrulanın algoritma, hareket halindeki iPhone4TM telefonundan toplanan ivmeölçer, dönüölçer ve magnetometre verilerine uygulanmış ve sonuçlar incelenmiştir.

2. YÖNELİM TESPİT SİSTEMİ

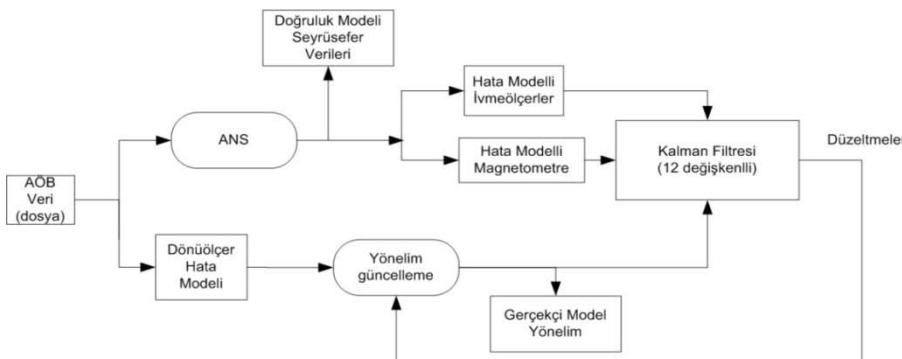
YTS'nin amacı bağlı olduğu platformun dünya referanslı NED (kuzey, doğu ve aşağı) koordinat sistemine göre üç boyutlu yönelimini bulmaktır. Benzetim ortamı için öncelikle her algılayıcının ölçüm kaynağı ve hata modeli belirlenmelidir. Simülasyon senaryosunda belirlenen hareketin yapılması için AÖB (Ataletsel Ölçüm Birimi) verileri yapılan harekete göre üretilmektedir. Bu AÖB verileri üç ivmeölçer ve dönüölçer verisinden oluşmaktadır. Bu verilere hata modeli eklendiğinde, gerçekçi veriler modellenmiş olur. AÖB verileri gövdeye bağlı ANS (ataletsel navigasyon sistemi) algoritmalarında kullanılarak seyrüsefer değişkenleri (konum, hız, yönelim) elde edilir ([4]).

Geliştirilen simülasyon ortamının blok şeması Şekil 1'de verilmiştir. Simülasyonlarda AÖB verileri bir dosyadan okunur. Üst kolda ANS algoritmasına sokularak hatasız AÖB verilerinden doğruluk modeli seyrüsefer verileri elde edilir. Değerlendirme sırasında tüm karşılaştırmalarda bu doğruluk modeli seyrüsefer değişkenleri kullanılır.

Alt kolda bir sonraki bölümde açıklanan dönüölçer hata modeli eklenerek gerçekçi veriler elde edilmiş olur. Bu hatalı ataletsel veriler yönetim güncellemesinde kullanılarak gerçekçi model yönetim verileri elde edilir.

$$\dot{C}_b^n = C_b^n (\omega_{nb}^b \times) \quad (1)$$

Burada C_b^n gövde (b) koordinat sisteminden NED (n) koordinat sistemine geçiş matrisini, $\omega_{nb}^b \times$ ise dönüölçerlerden gelen gövdenin NED koordinat sistemin göre dönüşür.



Şekil 1. YTS simülasyon blok şeması

Algılayıcıların ölçüm kaynağı doğruluk modeli olmalıdır, hata modeli de eklenerek entegrasyon algoritmasına algılayıcı verileri iletilir. Tüm algılayıcılardan gelen bilgiler Kalman滤resi bloğunda uygun şekilde birleştirilerek gerekli düzeltmeler hesaplanır ve yönetim güncelleme ve diğer algılayıcı işleme bloklarına gönderilir.

3. ALGILAYICILAR

Bu bölümde yukarıdaki şekilde blok şemaları verilen algılayıcıların hata modelleri incelenecaktır. Bu konudaki detaylar [4]'de bulunabilir.

3.1. Ataletsel Ölçer Birimi

Ataletsel ölçer birimi, 3 ivmeölçer ve 3 dönüölçerin duyarlı eksenlerinin birbirine dik yerleştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Yönetim hesaplaması sırasında integral alınması nedeniyle, dönüölçer verilerindeki hatalar eklenerek büyür.

α_x , α_y , α_z hareket eden ölçüm cihazının eksenlerindeki ivmeleri, ω_x , ω_y , ω_z de dönme hızlarını gösterir. Ayrıca B_G ve B_A sabit kayma vektörünü, B_g yerçekimine bağlı hata katsayılarını içeren matrisi, S_A ve S_G orantı katsayılarını içeren matrisi, M_A ve M_G eksen kayması terimlerini içeren matrisi, w_A ve w_G ise rasgele hataları içeren vektörü göstermektedir. Ölçer hatalarını (δw : dönüölçer hataları, δf : ivmeölçer hataları) toplu olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

Dönüölçer: $\begin{bmatrix} \delta\omega_x \\ \delta\omega_y \\ \delta\omega_z \end{bmatrix} = B_G + B_g \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{bmatrix} + S_G \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + M_G \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + w_G$	İvmeölçer: $\begin{bmatrix} \delta f_x \\ \delta f_y \\ \delta f_z \end{bmatrix} = B_A + S_A \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{bmatrix} + M_A \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_z \end{bmatrix} + w_A$
---	--

Bir eksendeki ivme/dönü hızı hatası, ölçerden okunan değer ve gerçek değer arasındaki fark olarak ifade edilir. Denklemlerde b gövde(body), i ise ataletsel koordinat sistemini belirtmektedir.

$$\begin{aligned} \tilde{f}^b &= f^b + \delta f^b \\ \tilde{\omega}_{ib}^b &= \omega_{ib}^b + \delta\omega_{ib}^b \end{aligned} \quad (2)$$

Doğruluk modeli AÖB verilerine (f^b, w_{ib}^b), yukarıdaki denklemlerde ifade edildiği gibi hatalar eklenerek hata modelli AÖB verileri ($\tilde{f}^b, \tilde{w}_{ib}^b$) elde edilir.

3.2. Magnetometre

Magnetometre, manyetizma ölçen algılayıcıların duyarlı eksenlerinin üç eksende birbirine dik yerleştirilmesi ile oluşturulmaktadır.

Magnetometre hatalarını toplu olarak aşağıdaki gibi ifade edebiliriz:

$$\begin{bmatrix} \delta m_x \\ \delta m_y \\ \delta m_z \end{bmatrix} = B_M + M_M \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} + w_M \quad (3)$$

$$\tilde{m}^b = m^b + \delta m^b \quad (4)$$

m_x, m_y, m_z üç eksendeki manyetizma değerlerini gösterir. Ayrıca B_M sabit kayma vektörünü, M_M eksen kayması terimlerini içeren matrisi, w_M ise rasgele Gauss dağılımlı hataları içeren vektörü göstermektedir.

Bu bildiri kapsamında modellenen algılayıcılar düşük maliyetli oldukları için sıcaklığa bağlı hatalar modellenmemiş ve baskın olan yukarıdaki hatalar modele dahil edilmiştir.

4. YÖNELİM TESPİT SİSTEMİ KALMAN FİLTRESİ

YTS için kullanılan tüm algılayıcı verileri Kalman filtresiyle bütünlenmiştir. Kalman filtresinde kullanılan durum değişkenleri ve ölçümler aşağıda açıklanmıştır.

4.1. Kalman filtresinin durumlarının modellenmesi

Kalman filtresinin algılayıcılarından kaynaklanan belirsizliklerin hesaplandığı yayılım bölümü, sistemin hata durumlarının dinamiğine bağlıdır. YTS'de Kalman filtresindeki hata durumları gözlemlenebilir durumlardan oluşur. Bunlar yönelim hatası, ivmeölçer sabit kayması, dönüpölçer sabit kayması ve magnetometre sabit kaymasıdır. Gözlemlenemeyen hatalar ise filtre durumu olarak modellenmemiş ve bunların etkileri filtre tasarlanırken Q ve R matrislerinde ayrıca ele alınmıştır. YTS Kalman filtresinin durum sayısı 3 yönelim hatası (NED çerçevesinde yönelim), 9 ölçer hatası (ivmeölçer, dönüpölçer ve magnetometre sabit kaymaları) olmak üzere toplam 12 hatadan oluşmaktadır.

YTS Kalman filtresindeki durum vektörü aşağıdaki sıralamada oluşturulmuştur:

$$\delta x = \begin{bmatrix} \delta \varepsilon_x & \delta \varepsilon_y & \delta \varepsilon_z & \delta f_x & \delta f_y & \delta f_z & \delta w_x & \delta w_y & \delta w_z & \delta m_x & \delta m_y & \delta m_z \end{bmatrix}$$

$\delta \varepsilon_x, \delta \varepsilon_y, \delta \varepsilon_z$: Gövde ile NED koordinat sistemleri arasında dönüşümü tanımlayan Euler açıları üzerindeki hatalar (rad)

$\delta f_x, \delta f_y, \delta f_z$: Ivmeölçer çıktıları üzerindeki sabit kayma hatası (m/sn^2)

$\delta w_x, \delta w_y, \delta w_z$: Dönüpölçer çıktıları üzerindeki sabit kayma hatası (rad/sn)

$\delta m_x, \delta m_y, \delta m_z$: Magnetometre çıktıları üzerindeki sabit kayma hatası (μ Tesla)

4.2. Kalman滤resi denklemleri

Kalman滤resi değişkenleri hata değişkenleri olarak tasarlanmıştır. Bu nedenle Kalman filtresinde hesaplanan değerler ilgili değişkenlerin güncellenmesinde kullanılır.

$$\begin{aligned} K_{k+1} &= P_{k+1|k} H_{k+1}^T (H_{k+1} P_{k+1|k} H_{k+1}^T + R_{k+1})^{-1} \\ \delta x_{k+1} &= K_{k+1} z_{k+1} \\ x_{k+1} &= x_k - \delta x_{k+1} \end{aligned} \tag{5}$$

Burada z ölçüümü, K Kalman matrisini, H ölçüüm matrisini, $P_{k+1|k}$ kovaryans matrisini ve R ölçüüm gürültü matrisini ifade etmektedir (Kalman滤resi denklemleri için [4]).

4.3. Ivmeölçer ölçümleri

Ivmeölçerler üç eksendeki kuvveti ölçmektedirler ancak yerçekimi ivmesini havadayken ölçemezler. Ancak hareketsizken yerçekimi ivmesini değil, yerçekimi kuvvetinin tepkisini ölçerler. Bu sayede ivmeölçerlerin çıktılarıyla yerçekimi ivmesinin tersi ölçülebilir. Yerçekimi ivmesi ölçülerin yapıldığı Ankara Bilkent'te $g^n = [0 \ 0 \ 9.78] m/sn^2$ olarak hesaplanmıştır ([4]). Ölçüm denklemleri ve Kalman滤resindeki değişkenlerle ilişkileri aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} z_k^a &= f^b - C_n^b(-g^n) \\ &\cong \delta f^b + C_n^b \delta \varepsilon \times g^n + v_a \end{aligned} \quad (6)$$

Burada z_k^a üç eksenli ivme ölçüm farkını, f^b gövde (b) eksenindeki ivme ölçümlerini, δf^b ivmeölçer sabit kayma hatasını, $\delta \varepsilon \times$ gövde-NED koordinat sistemleri arasındaki çevrim açı hatalarını, v_a ise ölçüm gürültüsünü göstermektedir. Ölçüm güncellemesi sadece ivme ölçüm şiddetinin yerçekimi ivmesine yakın olduğu zamanlarda yapılmıştır. Bu sayede yüksek dinamikli hareketlerin oluşturduğu ivmeler nedeniyle yanlış güncellemeler engellenmiştir. Ölçüm gürültüsü 3mg olarak alınmıştır.

4.4. Magnetometre ölçümleri

Dünya manyetik alanından yararlanmak, navigasyonda kullanılan en eski yöntemlerden biridir. Üç eksende manyetik alan ölçerlerin birbirine dik yerleştirilmesi ile her eksene düşen manyetik alan bileşenleri ve bu bileşenlerden de toplam manyetik alan hesaplanabilmektedir.

Dünya manyetik alanı 30-60 μ Tesla aralığında zayıf bir alandır. Magnetometreden okunan değer çevrede bulunan ferro manyetik materyallerin oluşturduğu manyetik alanı da içermektedir. Ferro manyetik materyallerin oluşturduğu istenmeyen etki sert demir etkisi olarak adlandırılır ve magnetometre hata modelinde *sabit kayma* terimi olarak ifade edilebilir. Ölçerin kullanılacağı platformda kalibre edilmesi ile bu etki giderilebilir. Yumuşak demir etkileri, sadece dünya manyetik alanı ile aynı hizaya geldiğinde manyetik alan oluşturan nesnelerden kaynaklanmaktadır.

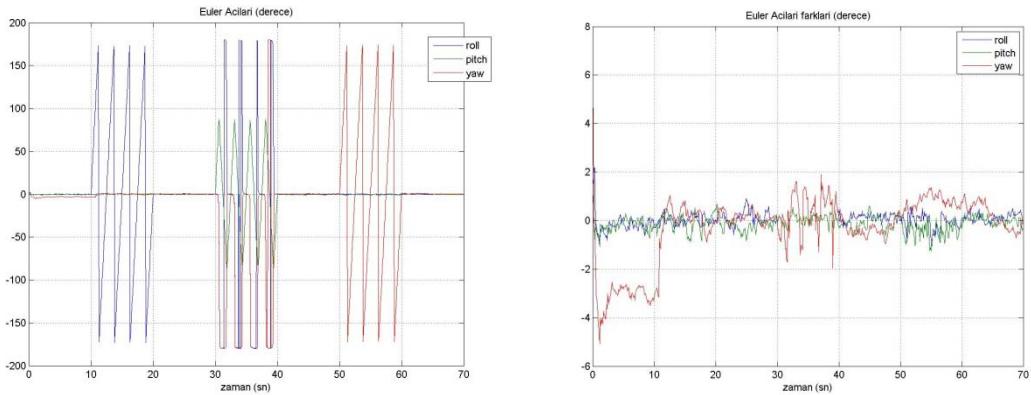
Ankara, Bilkent etrafındaki manyetik alan, World Magnetic Model'e ([5]) göre $H_{ref}^n = [25.239 \ 2.203 \ 39.958] \ \mu T$ olarak hesaplanmıştır. Kalman filtresinde kullanılan ölçüm denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} z_k^m &= m^b - C_n^b H_{ref}^n \\ &\cong \delta m^b - C_n^b \delta \varepsilon \times H_{ref}^n + v_m \end{aligned} \quad (7)$$

Burada z_k^m üç eksenli manyetik alan ölçüm farkını, m^b gövde (b) eksenindeki magnetometre ölçümlerini, δm^b magnetometre sabit kayma hatasını, $\delta \varepsilon \times$ navigasyon eksenindeki açı hatalarını, v_m ise ölçüm gürültüsünü göstermektedir. Burada da yine ölçüm şiddeti beklenene yakın olduğunda güncelleme yapılmıştır. Ölçüm gürültüsü 1 μT olarak alınmıştır.

5. YTS SİMÜLASYON SONUCLARI

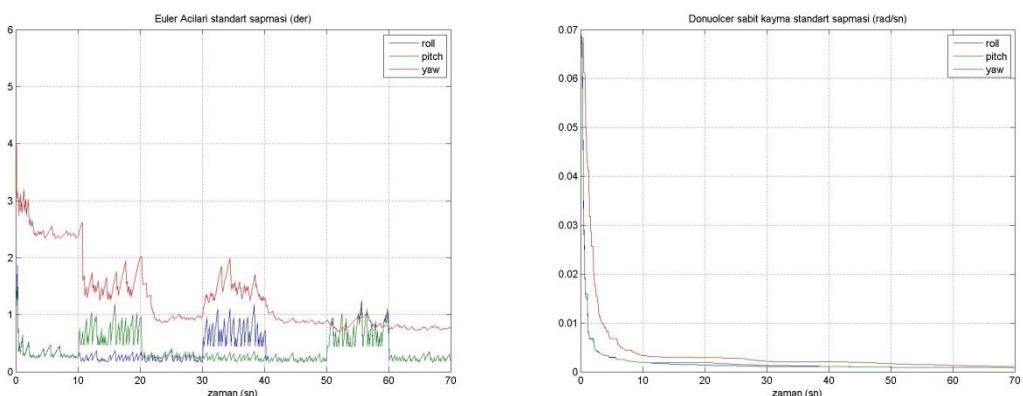
Bu simülasyonlar, Şekil 1'de verilen yapıya göre yapılmıştır. Ölçerlerin hata modelleri mümkün olduğunca iPhone4TM ölçerlerine göre belirlenmiştir (Tablo 1 ve [6]). Burada YTS'nin yuvarlanma (roll), yunuslama (pitch) ve yana dönme (yaw) eksenleri etrafında sırasıyla 4'er kez çevrildiği ve 10 saniye hareketsiz bırakıldığı bir simülasyon senaryosu uygulanmıştır.

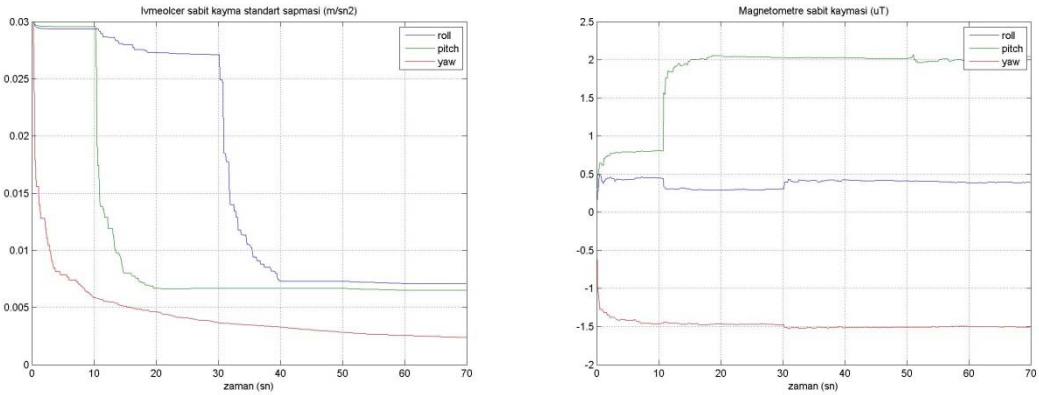


Şekil 2. YTS simülasyonu Euler açı değişkenleri ve hataları

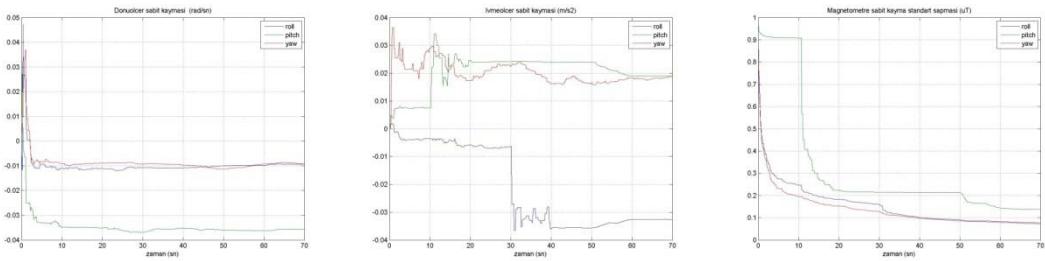
Şekil 2'de Euler açı değişimleri ve referansa göre hatalar görülmektedir. Görüldüğü gibi yana dönem açı hatasının düzeltmesi için yunuslama eksenini etrafında dönü verilmesi gerekmıştır. Şekil 3'de Kalman filtresinde hesaplanan değişkenlerin standart sapmaları verilmiştir. Değişik eksenlerde dönü verildiğinde hataların gözlemlenebilir hale geldiği ve varyanslarının düştüğü görülmektedir.

Şekil 4'de ise Kalman filtresiyle düzeltmeleri hesaplanan sabit kayma değerleri görülmektedir. Hata standart sapma değişimlerine uygun olarak bu değerler de gözlemlenebilir oldukları zamanlarda değişim görülmektedir.





Şekil 3. YTS simülasyonu Kalmanfiltresi değişkenlerinin standart sapmaları



Şekil 4. YTS simülasyonu Kalman değişkenlerini değerleri

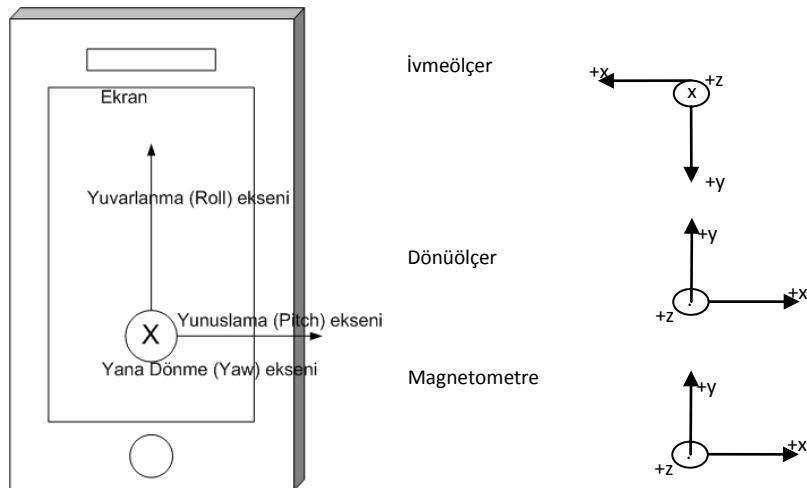
6. YTS'NİN IPHONE4 VERİLERİNE UYGULANMASI

iPhone4 akıllı telefonun içinde üç eksenli ivmeölçer, dönöölçer ve magnetometre bulunmaktadır. Bu algılayıcıların tipleri [6]'da, özellikleri de Tablo 1'de verilmiştir. Bu değerler kullanılan algılayıcıların kılavuzlarından alınmıştır.

Tablo 1. iPhone4 algılayıcılarının özellikleri

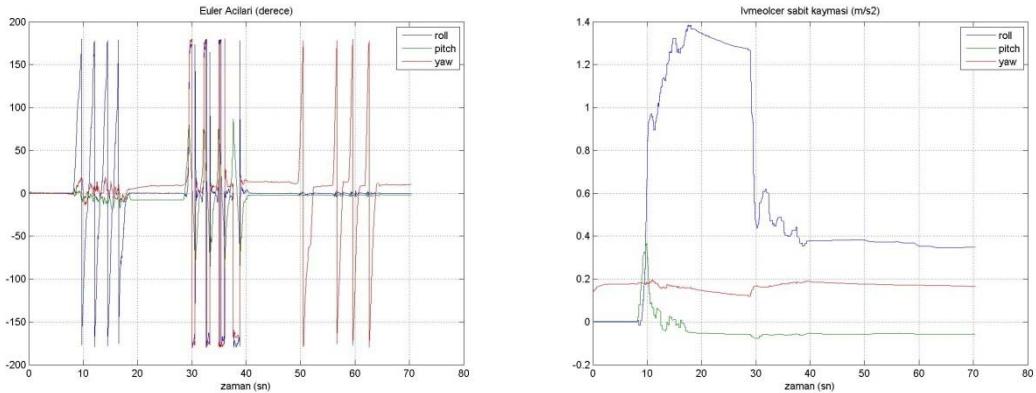
Dönöölçer	ST LIS331DLH
Ölçüm aralığı	± 250 der/sn
Çözünürlük	8.75 mili der/sn
Sabit kayma tekrarlanabilirliği	10 der/sn
Gürültü yoğunluğu	0.03 der/sn/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Oranti katsayı hatası	%0.2
İvmeölçer	ST L3G4200D
Ölçüm aralığı	± 2 g
Çözünürlük	12 bit, 1mg
Sabit kayma tekrarlanabilirliği	20mg
Gürültü yoğunluğu	$218\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Hız rasgele yürüme hatası	$0.013\text{m}/\text{sn}/\sqrt{\text{Hz}}$
Oranti katsayı hatası	%0.2
Magnetometre	AKM AKM8975
Ölçüm aralığı	± 1200 μT
Çözünürlük	0.3 μT
<i>Diger detaylar açık kaynaklarda bulunamamıştır.</i>	

iPhone4 üç eksenli algılayıcıların x , y , z , eksenleri Şekil 5'de verilmiştir. Bu eksenler birbirleriyle uyumlu olmadığı için verilen eksen takımıma çevrilmiştir. Bu çevrim yapılırken ölçerlerin birbirlerine dik yerleştirildiği ve açısal kayma olmadığı varsayılmıştır.

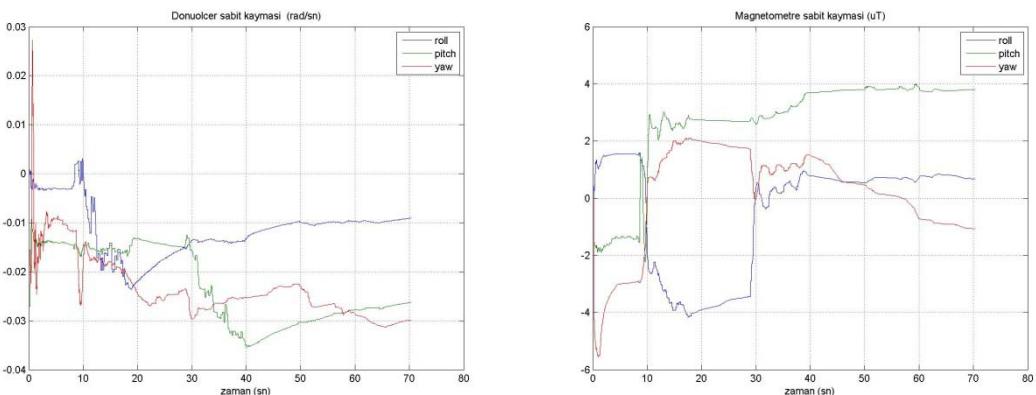


Şekil 5. iPhone4 eksenleri ve ölçerlerin eksenleri.

Yapılan testte, simülasyonda olduğu gibi iPhone4 her eksen etrafında 4 kere çevrilmiştir. Bu sırada Sensor Monitor 1.0.9 uygulaması kullanılarak ivmeölçer, dönüpölçer ve magnetometreden 90Hz'de veri toplanmıştır. Ancak iPhone4 işletim sistemi tam gerçek zamanlı çalışmamışından ölçüm zaman aralıkları düzenli değildir. Ancak YTS'de ölçümler geldiği anda işlendiğinden dönüpölçer veri alma zaman aralığının uzaması sistemin sadece tepki süresini geciktirmektedir. Toplanan veriler Kalman filtresinde dışında işlenerek değişkenler hesaplanmıştır (Bkz. Şekil 6 ve Şekil 7). Kovaryans değişimleri YTS simülasyonuna benzettiği için tekrar verilmemiştir. Açıların eksenler etrafında çevirme işleminden sonra aynı değerlere geldiği tespit edilmiştir. Bu sistemin temel olarak çalıştığını göstermektedir. Ancak özellikle ivmeölçer sabit kaymasında varyanslarına göre fazlaca zıplamalar olduğu görülmektedir. Sabit kaymaların gözlemlenebilir olmasına rağmen algılayıcılarda kalibrasyon yapılmadığı için, diklik hatalarının filtre modelinde hatalara sebep verdiği tahmin edilmektedir. Bu hataların belirlenmesi için ayrıca cihazın kalibre edilmesi gerekmektedir ([7]).



Şekil 6. iPhone4 verileriyle hesaplanan Euler açıları ve ivmeölçer sabit kaymaları



Şekil 7. Kalmanfiltresi değişkenleri

7. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu bildiride düşük maliyetli ölçerler için tasarlanan yönelim tespit sistemi anlatılmıştır. YTS algoritmasının test edilmesi için bir simülasyon ortamı geliştirilmiştir. Bu sayede tüm Kalman filtresinin değişkenlerinin hataları incelenmiştir. Tasarlanan filtre dünyanın yerçekimi ivmesini ve dünyanın manyetik alanından faydalananarak yönelim tespitini yapmaktadır. Filtrede algılayıcıların sabit hatası değişken olarak alındığından değişen ortamlara uyum sağlayabilmektedir. Algılayıcıların dikliklerinin tespiti için ayrıca kalibrasyon algoritması da ileride geliştirilecektir.

Geliştirilen algoritma iPhone4 telefonundan alınan verilere uygulanmıştır. Telefon üzerinde yapılan hareketlerden sonra telefon aynı yönelime bırakılmış ve açı tahminlerinin aynı değerlere geldiği görülmüştür. Ayrıca yapılan çevirmelerden hemen sonra telefon hareketsiz kaldığında açı değerlerinde çok büyük değişimler olmadığı görülmüştür. Bu da filtrenin düzgün uyumlandırıldığını göstermektedir. Ancak

algoritmanın performansının tam olarak belirlenmesi için bu testlerin hareket simülatörleriyle yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada, akıllı telefonlarda çalıştırılacak algoritmalarla AHRS, INS/GPS gibi uygulamaları geliştirmenin mümkün olduğu gösterilmektedir.

8. KAYNAKÇA

- [1] Schmidt, G. and N. Barbour, “Inertial sensor technology trends”, IEEE Sensors J., 2001, pp. 332-339.
- [2] <http://www.invensense.com/>
- [3] M.T. Lapinski, “A Wearable, Wireless Sensor System for Sports Medicine”, MS Thesis, MIT Media Arts and Sciences, 2008
- [4] D.H. Titterton, J.L. Weston, “Strapdown Inertial Navigation Technology 2nd ed.”, *The American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2004.
- [5] M McLean, S., S. Macmillan, S. Maus, V. Lesur, A. Thomson, and D. Dater, “The US/UK World Magnetic Model for 2005-2010”, *NOAA Technical Report NESDIS/NGDC-1*, December 2004.
- [6] <http://www.tgdaily.com/hardware-features/50344-the-real-iphone-4-teardown>
W.T.Fong, S.K. Ong and A.Y.C. Nee, “Methods For In-field User Calibration Of An Inertial Measurement Unit Without External Equipment” *Measurement Science and Technology*, Vol:19, 2008, pp.1-11.

GENEL AMAÇLI ARAŞTIRMA SİMÜLATÖRÜ: DONANIM ve YAZILIM ALTYAPISININ TASARLANMASI ve GELİŞTİRİLMESİ

**Aslı Yılmaz ^(a), Deniz Yılmaz ^(b), Abdullah Murat Şenyigit ^(c),
Bilge Kaan Görür ^(d), Veysi İşler ^(e)**

^(a) ODTÜ-TSK MODSİMMER, İnönü Bulvarı, 06800, Çankaya, Ankara,
aslimail2me@gmail.com

^(b) Control & Simulation Division Delft University of Technology, Kluyverweg 1, 2629
HS Delft, The Netherlands, d.yilmaz@tudelft.nl

^(c) ODTÜ-TSK MODSİMMER, İnönü Bulvarı, 06800, Çankaya, Ankara,
senyigit@metu.edu.tr

^(d) ODTÜ-TSK MODSİMMER, İnönü Bulvarı, 06800, Çankaya, Ankara,
kgorur@metu.edu.tr

^(e) ODTÜ-TSK MODSİMMER, İnönü Bulvarı, 06800, Çankaya, Ankara,
isler@ceng.metu.edu.tr

ÖZ

Eğitim simülatörleri, eğitimlerin amaçlandığı araçların yüksek seviyelerde gerçekçi benzetim modellerinin ulusal ve uluslararası sertifika protokollerine uygun şekilde benzetim uygulanmasını öngörmektedir. Araştırma simülatörleri ise bilimsel çalışmaların ilgili disiplinlerde istenilen araştırmanın verimli bir şekilde yapılabilmesini sağlamaya yönelik olarak geliştirilmektedir. Yüksek maliyetleri olan eğitim ve araştırma simülatörleri, genellikle belirli bir tip araca veya araç sınıfına yönelik olarak tasarlanıp üretilmektedir. Özellikle araştırma simülatörleri düşünüldüğünde, farklı disiplinlerden araştırmacıların ortak bir simülatör üzerinde çalışma yapmasını sağlayacak ve istenilen araç konfigürasyonuna hızlı bir şekilde dönüştürülebilecek genel amaçlı bir simülatörün tasarımı ve geliştirilmesi ODTÜ-TSK MODSİMMER bünyesinde projelendirilmiştir. Bu simülatör, farklı dinamiklere sahip kara, deniz ve hava araçlarının hareketli bir platform üzerinde, görsel ortam içerisinde benzetiminin yapılmasını sağlayacaktır. Modüler ve dinamik donanım ve yazılım altyapısı sayesinde farklı araştırma ve eğitim alanlarında ihtiyaç duyulan benzetim modelleri, aynı simülatör kabini içerisinde kolay ve etkin bir şekilde kullanılabilecektir. Sistemin donanım altyapısında, kullanıcı odaklı bir tasarım süreci oluşturulmuş, bu bağlamda farklı araçların kullanıcı senaryoları belirlenerek fiziksel ergonomi bilgileri entegre edilmiştir. Sistemin donanım ve yazılım altyapısının önemli bir bileşeni olan hareketli platform sistemi, tasarlanan genel bir yazılım mimarisi ile kullanıcının sağladığı yazılımlarla haberleşerek kontrol edilmektedir. Böylece farklı simülasyonların yazılım entegrasyonu kolaylıkla

gerçekleştirilebilecektir. Bu çalışmada, sistemin tasarım ve geliştirme sürecinde, şu ana kadar atılan önemli adımlar ve bundan sonra sürdürülecek aşamalara değinilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Araştırma Simülörü, Ergonomi, Simülör Donanım, Entegrasyon, Simülör Yazılım

GENERAL PURPOSE RESEARCH SIMULATOR: HARDWARE and SOFTWARE SYSTEM DESIGN and DEVELOPMENT ABSTRACT

Training simulators are generally designed specifically for the proposed vehicle modeling under the regulations and corresponding certification of national and international authorities, whereas research simulators widely aim to provide the base platform for scientific research interests of various disciplines. Regarding the cost of high technological components and whole system built-up perspective of simulators, most of the existing simulators are products of one type or class of vehicle oriented design and development process. Therefore, especially for the research simulator area of interest, METU-TAF MODSIMMER has initiated a project to develop “General Purpose Research Simulator” for air, ground and sea vehicles with different dynamics which will be enhanced by mathematical model support, motion based platform, ergonomic user environment and visual simulation. Modular and dynamical hardware and software system of the simulator will provide its application in different educational and research fields through its design as a unique cabin where the simulations could be easily and effectively performed. During hardware design, user-oriented analysis was performed and scenarios of different users, physical ergonomics issues are integrated. As being an important component of the whole software and hardware system, the motion platform is controlled through developed generic software architecture. As a result, the integration of different simulations will be performed with a general method. In this study, the critical processes of the system design up to moment will be examined and further processes will be mentioned.

Keywords: Research Simulator, Ergonomics, Simulator Hardware, Integration, Simulator Software

1. GİRİŞ

Aktif kullanıcı tarafından kumanda edilen araç simülör sistemlerini eğitim ve araştırma simülörleri olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür [1, 2]. Eğitim simülörleri, ulusal ve uluslararası sertifikalandırma kurum ve kuruluşlarının ilgili araç için kullanım ve benzetim olanaklarının değerlendirilmesi sonucu sınıflandırma ve

sertifikasyon aşamalarından geçerek kullanıcılarla ilgili protokollere göre eğitim alma hizmetleri vermektedir [3]. Araştırma simülatörleri ise insan-makine etkileşimi, elektronik konfigürasyon, hareketli platformlarda insan algısı, görsel ve işitsel geri beslemelerin kullanıcı üzerindeki benzetim etkisi, olası eğitim simülatörü uygulamalarının ön araştırması ve güncellenmesi vb. birçok araştırma konusunun uygulandığı temel simülatörlerdir. Örnek araştırma uygulamalarına değiştirilebilir simülatör uçuş kontrol sistemleri araştırmaları [4], uçuş simülatörleri için modüler yazılımlar [5], değiştirilebilir tank simülatörü altyapısı [6], konvoy taktik genel amaç araç [7], yüksek performans araba [8], zırhlı araç [9], acil durum araç sevkıyat, taktik eğitim[10], deniz araçları [11], denizaltı [12], uzay mekiği yazılım geliştirme hareketli simülatörler [13], insan-makine araştırmaları için geliştirilen modüler simülatörler [14], sabit tabanlı-değiştirilebilir mimariye sahip uçuş simülatörleri [15], NASA uzay ve uçuş modüler araştırma simülatörleri [16], tek kişilik hareketli platform araştırmaları [17] gibi çalışmalar gösterilebilir.

Uygulama ve geliştirme kapsamında düşünüldüğünde araştırma simülatörleri, eğitim simülatörlerinin başlangıç ve geliştirme platformlarıdır. Ancak bu durum ticari pazarda, özellikle sivil taşımacılıktaki hava platformu payının artmış olması ve gelişen teknolojiyle askeri uygulamaların artan performans ve verim beklenileri, eğitim ve araştırma simülatörlerinin belirli yönlerde odaklanması neden olmuştur. Bunun sonucunda da gerek araştırma, gerekse eğitim simülatörü çalışmaları belirli tek tip araçlar üzerine yoğunlaşmıştır [18]. Ancak simülatör sistemlerinin bileşenleri, entegrasyonu ve işletim ve bakım maliyetleri göz önüne alındığında, özellikle araştırma simülatörlerinde farklı konfigürasyondaki araçların bir arada modellenmesine olanak sağlayan simülatör altyapılarına olan ihtiyaç giderek artmaktadır [19]. Bu kapsamda, ODTÜ-TSK MODSİMMER bünyesinde genel amaçlı bir simülatör uygulaması projelendirilmiştir.

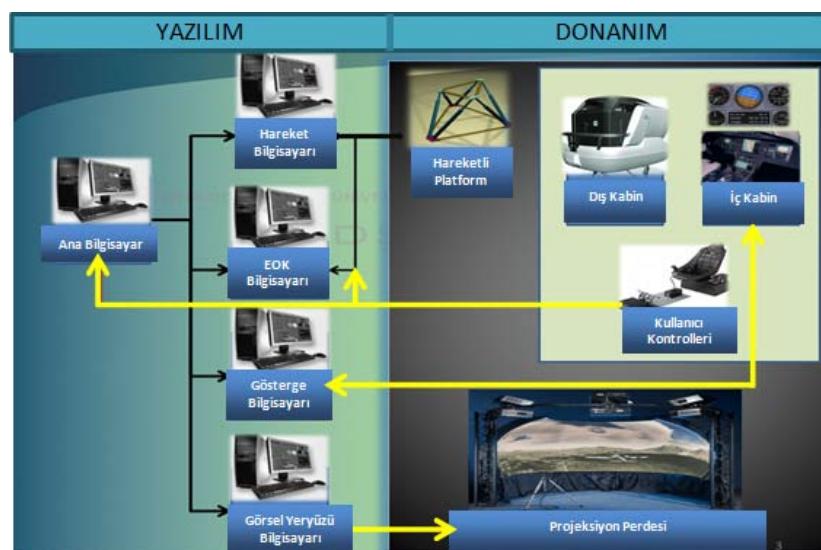
Literatüre bakıldığından genel amaçlı simülatörler, patentli bazı uygulamalar [20, 21] ve daha çok hava, kara ve deniz alanlarının bir bölümündeki araçlara yoğunlaşmıştır. Patentli çalışmalarla bakıldığından, insan faktörleri ve ergonominin bu uygulamalarda pek uygulanmadığı görülmüştür. Yapılan çalışmaların çoğunda, kabin iç mekanında yapılacak değişimden çok farklı kabinlerin tek bir hareketli platforma yerleştirilmesi sonucu farklı araçlar oluşturulması hedeflenmiştir. Genel amaçlı simülatörler kapsamında şu ana kadar yapılan önemli çalışmaların bir tanesi Coiro, Marco ve Nicolosi'nin gerçekleştirdiği çalışmadır [22]. 6 serbestlik dereceli bir hareketli platformun kullanıldığı çalışma araba ve hava araçlarının benzetimi için kullanılan çok amaçlı bir simülatör çalışmasıdır. Gerektiğinde hareketli platform üzerindeki uçak kabini çıkarılıp yerine araç kabini monte edilmektedir. Ayrıca NLR (Hollanda Ulusal Havacılık ve Uzay Laboratuvarı) tarafından geliştirilen modüler uçuş simülatör sistemi

de tek kokpit içerisinde birçok farklı hava aracının benzetimini yapabilen bir yazılım - donanım mimarisine sahiptir [23].

Ancak bu simülatör yaklaşımlarından farklı olarak, bu çalışmada bahsedilen proje kapsamında hareketli platformun kullanacağı tek bir kabin olup hava, deniz ve kara araçlarının benzetimi için kullanılabilecek modüler bir yapıda olacaktır. Farklı kullanıcı ve araçlara hitap edecek bu simülatörde insan faktörleri ve ergonomi koşulları sağlanacaktır. Bu sayede kara, hava ve/veya deniz araçlarına yönelik bir araştırma yapılmasına olanak sağlayan, istenilen araçların konfigürasyonuna dönüştürülebilen genel amaçlı bir simülatör ile farklı disiplinlerden araştırmacıların ihtiyaçlarını karşılamaya yönelik ortak bir simülatör platformu sağlanmış olacaktır.

2. SİSTEM MİMARİSİ

Simülatör sistemi birbiri ile entegre çalışan iki ana bölümden oluşmaktadır: yazılım ve donanım (Şekil 1). Sistemin donanım ve yazılım altyapısının önemli bir bileşeni olan hareketli platform sistemi, tasarlanan genel bir yazılım mimarisi ile kullanıcının sağladığı yazılımlarla haberleşerek kontrol edilmektedir.



Şekil 1. Sistem Mimarisi

Ana bilgisayar, hareket bilgisayarı, eğitmen operatör konsol (EOK) bilgisayarı, gösterge bilgisayarı ve görsel yeryüzü bilgisayarı yazılımları oluşturan ana bileşenlerdir. Ana bilgisayar, sistemin beyni gibi çalışmaktadır, veri paketleri oluşturur ve bunları ilgili bilgisayarlara gönderir. Hareket bilgisayarı, hareketli platformun hareketlerini yazılım aracılığı ile düzenler. EOK bilgisayarı, simülatörün operatör ve eğitmenleri için ana bilgisayardan veri paketlerinin gelmesini ve hareketli platformdan gelecek bilgileri kontrol eder. Gösterge bilgisayarı, dijital arayüz bileşenlerinin iç kabindeki ekranlarda

görünmesini sağlar. Görsel yeryüzü bilgisayarı ise projeksiyon perdesine yansıyacak olan görüntünün işleyişini düzenler.

Donanım tarafında bulunan bileşenlerden projeksiyon perdesi kabinin ön tarafına entegre olmuş ve silindirik yapıdadır. Projektör sistemi içinde 3 adet projektör bulunmaktadır. Kullanıcı kontrolleri bileşeni ise kullanıcının ana bilgisayara hareket sinyalleri göndermesini sağlar. Kabin hareketli platformun üzerine monte edilecektir.

3. DONANIM TASARIMI

Sistemin temel kısımlarından biri olan donanımın oluşturulmasındaki aşamalara bakacak olursak; kabin tasarımına zemin hazırlayan yapısal ve işlevsel tasarım, hareketli platformun üzerine yerleşecek kabin tasarımını ve kabin dışında kontrol odasına yerleştirilecek olan eğitmen ve operatör konsol (EOK) sistemleri şeklinde belirlenmiştir. Donanım tasarımında temel amaç sistemin hareketli oluşu esas alınarak araçların simülasyonuna izin verecek genel amaçlı ve modüler tasarıma izin veren bir entegrasyonun oluşmasıdır. Şu an gelinen aşama, ince üretim detayına sahip olmayan fakat bileşenlerin tasarımının ve yerleşiminin gerçekleştirildiği kabin ve konsol sistemlerinin kavramsal tasarımıdır.

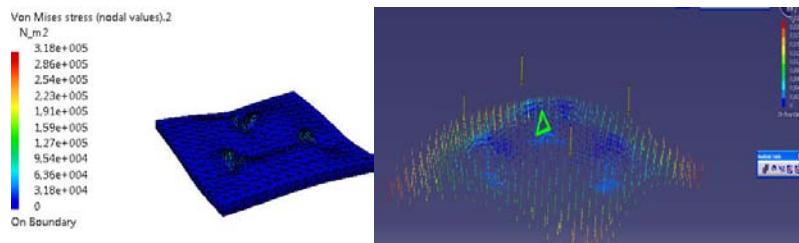
3.1. Yapısal ve işlevsel tasarım

3.1.1. Hareketli platform özelliklerı

Simülatör kabininin üzerine yerleşeceği hareketli platform *Bosch Rexroth B.V. Motion System* markalı olup, 6 serbestlik derecesine sahiptir. Tahrik kolu genliği 800mm, sabit durumda yüksekliği 1392 ± 5 mm ve taşıma yükü 1500 kg'dır [24].

3.1.2. Kabin zemin yapısal analizi

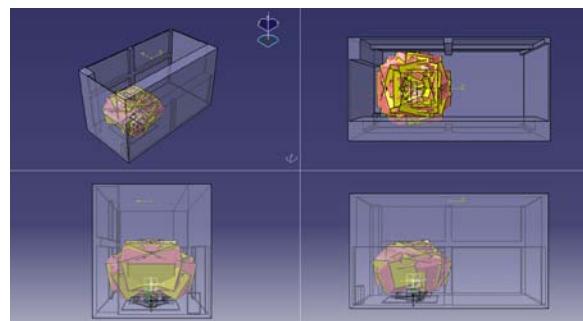
Simülatör kabininin içerisindeki bileşenlerin entegre edileceği, hareketli platformla birebir etkileşim halinde olan simülatör kabin zemininin mukavemet ve stres özelliklerinin güvenlik ve sağlamlık bakımından özellikle dikkatle tasarlanması gerekmektedir. Bu kapsamında bir ön çalışma yapılarak çeşitli üretim malzemelerine ait farklı konfigürasyonlardaki zemin örnekleri *Catia* yazılımında çizilerek statik ve dinamik muhtemel hareket ve yük dağılımı durumlarına göre analiz edilmiştir. Örnek bir analiz çalışması Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Örnek zemin yapısal analizleri

3.1.3. Kabin hareket uzayı analizi

Simülatör kabininin yerleştirileceği simülatör odası, ölçülerini bakımından tüm hareket uzayı içerisinde limitleri aşmayacak şekilde tasarlanmalıdır. Bunun için hem simülatör odasının hem de muhtemel simülatör kabin tasarımının teknik çizimlerle modellenmesi ve hareketli platformun tüm hareket uzayı içerisindeki kapladığı alanın simülatör odasının yüzeyleriyle temas etmediğinin teyit edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle öncelikle hareketli platformun 3 boyutlu, dinamik bir *Catia* modeli ve simülatör odasının ölçekli üç boyutlu modeli çizilmiştir.



Şekil 3. Hareket uzay analizi ve mekan limitleri

Daha sonra tasarlanan kabin çizimleri bu model içerisindeki hareketli platformun üzerine yerleştirilerek dinamik modelleme ile kapladığı alan ve temas edebileceği noktalar geliştirilen yazılımlarla tespit edilmiştir. Böylece tasarım aşamasındaki bir kabinin yerleştirildiği takdirde 6 aktuatör kolunun her türlü açılım ve sönüm konumlarına göre simülatör odasında nasıl bir alanı tarayacağı önceden öngörebilmektedir. Buna ait bir örnek çizim Şekil 3'te gösterilmiştir.

3.2. Ergonomik iç kabin tasarımı

Sistemin tasarım aşamasına geçilmeden araştırma ve beyin fırtınası süreci gerçekleştirilmiştir. Mekânın kısıtları göz önüne alınarak oluşturulabilecek kara, deniz ve hava araçlarının iç mekanları incelenmiştir. Bunların dışında, ülkemizdeki kara, deniz ve hava araçlarının var olan eğitim simülatörlerinin birçoğu ziyaret edilmiştir. Kabinin iç mekânında olabilecek tüm bileşenler ortaya dökülmüştür. Kabin tasarımını oluştururken, parçadan bütüne giden bir yaklaşım izlenmiştir. Öncelikle, farklı araçlara uyarlanabilecek bileşenler tasarlanmış ve modellenmiştir. Daha sonra, bu

bileşenlerin fiziksel ergonomi koşullarını sağlayacak şekilde tasarımı ve yerlesimi gerekiğinde sökülebilecek bir modülerlik içinde düşünülmüştür.

Farklı araçlara dönüştirebilecek bir altyapı için yapılan bir sonraki aşama kullanım senaryolarının oluşumudur. Birebir gözlemler ve beyin firtinaları sonucu oluşturulan kullanım senaryoları sırasında olası kullanıcı tipleri ve hareketleri açığa çıkarılmıştır. Tek bir kabin içinde, farklı kullanıcılarla yönelik farklı konfigürasyonlarının oluşturulması hedeflenmiştir (Şekil 4).

Bu hareketlerin belirlenmesi ergonomik bir iç mekân alt yapısının oluşması için önemli bir ilk adım olmuştur. Ergonomik bilginin tasarımın erken aşamasında dahil edilmesi beklenir. Amerika’da insan faktörleri, Avrupa’da ise daha çok ergonomi diye tabir edilen disiplinler arası bilim, insan biyolojisi, anatomisi, psikolojisi ve fizyolojisine dayanan iş tasarımları teknolojisi olarak tanımlanmıştır [25]. Bir başka tanıma göre ergonomi basit olarak insan ve çevre iletişimini inceleyen bir bilimdir [26]. Özellikle karmaşık insan makina etkileşimlerinin olduğu mekanlarda ve durumlarda örneğin, araç konsol ve kokpit tasarımlarında askeri kara, deniz ve hava araçlarında, problemlerin oluşmaması için ergonomi koşullarının sağlanması gereklidir [27]. Simülatörler bu araçların benzetimleri olduğu için bu grup mekânlarının içine girmektedirler. Bu karmaşık arayüzlerin olduğu mekânlarda bulunan kullanıcılar ortamda kendilerini güvende, rahat ve memnun hissetmelidirler.

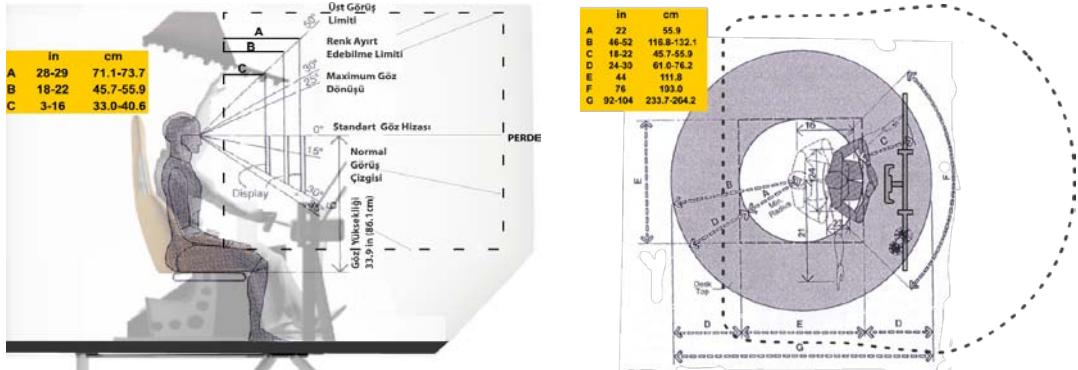
Tasarımın fiziksel ergonomi koşullarını gerçekleştirmek için NASA’nın belirlemiş olduğu yüzde 95’lik erkek popülasyonunun bilgileri temel alınmıştır [28]. Bu bilgiler ışığında 3 boyutlu sanal ortamda birebir bir insan modeli oluşturulmuştur. İstenen hareketleri gerçekleştirmesi için de modelin içine entegre olmuş 27 eklem noktasına sahip bir iskelet sistemi giydirilmiştir. Bu aşama için, Autodesk 3d Max 2010, 3 boyutlu modelleme programı kullanılmıştır. Bu model üzerinde, kullanıcının sabit ve hareket halinde olduğu durumlarda, en küçük ve en büyük erişim noktaları, uzaklıklar ve limitler uyarlanabilmiştir. Sistemin bileşenlerinde olması gereken olası 3 boyutlu ölçüler ortaya çıkarılmış ve sanal ortamda modelle beraber kullanıcı senaryoları her bir araç için tek tek gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. Kabin içi konfigürasyonlar

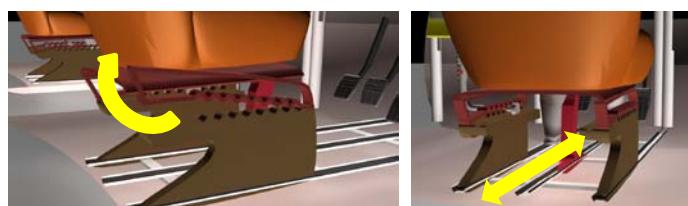
Bileşenleri tasarlarken ve yerleştirirken en önemli kısım, görsel sistemin görünebilirliği olduğu tespit edildi. Sistemde, senaryoya göre sanal görsel mekan perde üzerine

projektör vasıtası ile yansıtılacaktır. Bunun dışında, ön konsol tasarımdındaki ekranlar da dokunmatik konsol sistemleri olarak çalışacaklardır. Araçlar değişikçe, farklı elektronik arayüzler, ekranlara yüklenecektir. Perde ve ön konsol sistemindeki ekranlar bu limitler dikkate alınarak Şekil 5'teki gibi kabin içine yerleştirilmiştir.



Şekil 5. Görüş alanları ve limitleri [27]

Diğer önemli kısım ise üst, ön ve yan konsol sistemlere rahat erişimin sağlanması idi. Bunun sağlanması için de dairesel sistemlerde erişebilirlik dikkate alınmıştır (Şekil 5). Ön konsol ekranları dikeyde ve yatayda yükseltip alçalabilmekte, ileri ve geri dönüş yapabilmekte iken kenardaki ekranlar kullanıcının oturma merkezine doğru çeyrek dönüş yapabilmektedir (Şekil 4). Bu esneklik sayesinde hem farklı araç konfigürasyonlarına yönelik modülerlik sağlanmış hem de kullanıcının erişebilirliği artmıştır. Bunların yanı sıra, koltuk sistemi de genel amaçlı koltuk sistemlerinin limitleri baz alınarak tasarlanmıştır. Koltuk sistemi bir ray sisteminin üzerinde ileri ve geri gidebilmektedir ve kullanıcıya göre boy ayarı yapılmaktadır. Ayrıca, koltuğun sırt yastığı ileri ve geri hareket yapabilmektedir (Şekil 6).

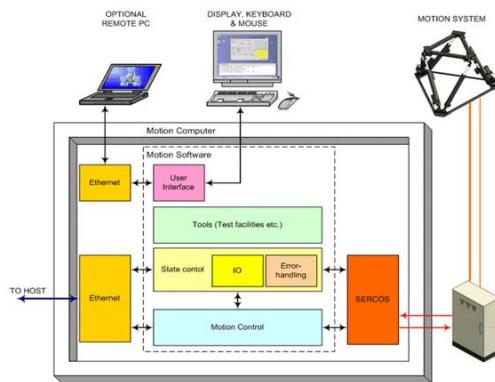


Şekil 6. Koltuk sistemi

4. YAZILIM TASARIMI

Bu proje kapsamında geliştirilmekte olan yazılımlar sayesinde, sistemin her alt yapıya destek sağlayabilecek nitelikte olması hedeflenmektedir. Böylece sistem için gerekli simülör haberleşme alt yapısı kurulmuş olacaktır. Bir simülör için belirlenen bileşenler Şekil 7'de yer almaktadır. Simülör üzerinde oluşturulacak farklı ortamlar için gerekli bileşenler geliştirilmiş; kullanıcı veya geliştirici için örnek yazılımlar ve kütüphaneler ortaya konmuştur.

Bu kapsamda, bir aracın matematiksel modeli hazırlanarak dışarıdan bir kontrol cihazı veya yazılımin kendi içerisindeki verilen hareket değerleri ile matematiksel modelin anlık verilerle çalışmasının sağlanması için *LinMod*, matematiksel modeli oluşturulan bir sistemin hareketli platformla haberleşebilmesi veya dışarıdan kumanda kolları aracılığıyla gelecek değişik eksenlerde hareketin sağlanabilmesi için *Jint*, simülasyon sistemi ve hareketli platformun durum bilgilerinin takibi, herhangi bir arıza veya uyarı durumunun görülebilmesi için *SimMon* ve simülasyondan gelecek veriler doğrultusunda kullanıcı arayüzünde gösterilecek çok maksatlı gösterge arayüz programı ve farklı gösterge arayızlarının görüntülenebilmesi için gösterge arayüzünün değiştirilebildiği *DisSim* yazılımları geliştirilmiştir.



Şekil 7. Hareket bilgisayarı ve yazılımı [24]

4.1. Örnek uygulama

Bu proje kapsamında yazılım tasarımında da bahsedildiği üzere bazı uygulamalar geliştirilmiş bazıları da geliştirilmeye devam etmektedir. Hareket bilgisayarı ve yazılımı hareketli platformu yönetmekte ve bu bilgileri ana bilgisayar yazılımı *Jint* aracılığı ile almaktadır. Hareket bilgisayarı, aynı zamanda hareketli sistemin sağlık durumunu ve o anki bilgilerini ana bilgisayara aktarmaktadır. Kumanda kolu desteği ile hareketli platform bilgisayarına hareket komutları gönderen bu uygulamanın amacı; platformun kullanıcı tarafından doğrudan komutlarla yönlendirilmesi ve farklı senaryolarla anlık kontrolünün sağlanmasıdır. Kullanıcı klavye üzerinden hareketli platforma istediği veriyi gönderip hareketi gözlemleyebileceği gibi 5 kumanda koluna kadar olan desteği sayesinde istediği hareket eksenlerini kumanda kollarının istediği eksenlerine bağlayarak platforma veri gönderebilmektedir. Bu sayede gerçek zamanlı olarak kumanda kolları üzerinden yaptığı bir değişikliği hareketli platformda karşılık gelen yer değiştirme olarak gözlemeylebilmektedir.

Gösterge bilgisayarı yazılımı *DisSim*, örnek bir gösterge yazılım arayüzü sunmaktadır. Analog ve dijital göstergelerin benzetimlerinin yapılabildiği bu arayüz ile ana bilgisayar üzerinden beslenen veriler gösterilmektedir. Yazılımın amacı ana bilgisayardan gelen model bilgilerini kullanıcı ekranında bulunan göstergelere aktarmaktır. Böylece kullanıcı, simülatör bilgilerini kabin içerisinde bulunan değiştirilebilir ve ayarlanabilir

gösterge ekranından takip edebilmektedir. Matematiksel modelin üreteceği değerlerin kolay bir şekilde farklı gösterge elemanlarına aktarımı için de xml tabanlı bir konfigürasyonun kullanılması hedeflenmiştir.

Eğitmen operatör konsol (EOK) yazılımı *Simmon*, gerek ana bilgisayardan gerekse hareketli platformdan gelen bilgilerin toplandığı bir temel EOK görevi yapmaktadır. Bir durum değerlendirme yazılımı olan *Simmon*'un amacı; hareketli platformun çıktılarını ve durum bilgilerini, ana bilgisayar tarafından gönderilen verilerle toplamak, sistemdeki hata ve uyarıları göstermektir. Böylece kullanıcı hem platformun anlık durumunu hem de ana bilgisayar tarafından üretilen komut ve verileri görebilecektir. Literatürde eğitmen operatör konsolu olarak geçen bu yaklaşım sayesinde kullanıcı anlık olarak kendi matematiksel modelleri ve entegre edilmiş hareketli platformla ilgili güncel bilgileri takip edebilmekte ve gerekli kontrolleri yapabilmektedir.

Görsel yeryüzü bilgisayarı ana bilgisayardan gelecek model bilgileri ile oluşacak hareketleri alarak ilerlemektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan örnek lineer bir *Cesna 182* uçak matematiksel modelinin [29] entegrasyonu başarıyla gerçekleştirilip tüm sistemlerin çalışma performansları gözlemlenmiştir.

5. SONUÇ

Bu projede, hareketli bir platform kullanılarak geliştirilmesi muhtemel farklı bilimsel disiplinlere ait araştırmalara olanak sağlama amacıyla modüler bir yapıda kullanım kolaylığı ve verimliliği sağlamak maksadıyla bir simülatör tasarlanmıştır. Bu tasarımda farklı araçlara ait kullanıcı ergonomik özelliklerini göz önüne alınarak modüler bir kabin iç tasarım yöntemi geliştirilmiştir. Tasarım aşamasında kullanıcı duruş ve hareket limitleri düşünülerek muhtemel kullanım senaryolarına uygunlukları göz önünde bulundurulmuştur. Yazılım mimarisi olabildiğince genel bir altyapı seviyesinde tasarılanarak herhangi bir araştırmacının ihtiyacı gereği mevcut sisteminin entegrasyonunda kolaylık sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Buna ek olarak hareketli platform durum bilgileri ve kontrol ve test yazılımları geliştirilerek, sistem operasyonel hale getirilmiştir. Ayrıca, tasarılanan kabin üretim öncesi Autodesk 3D Max yazılımı kullanılarak 3 boyutlu olarak benzetimi yapılmıştır. Hareketli platformun dinamik modeli de dahil olmak üzere, bütün sistem Catia ile çizilerek benzetim sisteminin katı modelleri geliştirilmiştir.

Sistemin, kurulması planlanan hangarın boyutları nedeniyle bir hareket uzayı analizi yapılması gerekmisti. Bu nedenle simülatör için fiziksel hacim ve yapısal kısıtlamalar bulunmaktadır. Bunun için de belirli bir iyileştirmeye gidilmiştir. Üretim aşamasında olan kokpit içerisindeki bileşenlerin modüler olması aynı zamanda mukavemet açısından daha riskli olmalarını beraberinde getirmiştir. Bu nedenle, üretim teknikleri ve yapısal güçlendirme konularındaki çalışmalar devam etmektedir.

Mevcut durumu üretim aşamasında olan bu araştırma simülatörü, hareketli platform üzerinde yapılması düşünülen birçok araca ait bilimsel araştırma için umut eden, ilk uygulamalarından başarılı sonuçlar veren ve üniversitelerdeki araştırmacılar ve ilgili ticari girişimciler için önemli bir veri kaynağı olan, kendi sınıfındaki birçok simülatörden “modüler ve çok amaçlı” olması özellikle farklı kılınmış bir projedir. Üretim sonrası uygulamaları ile bu simülatörün daha da şekillenmesi ve sistematik yapısının uygulamalara yönelik gelişmesi beklenmektedir.

6. KAYNAKÇA

- [1] Koonce, J.M. & Bramble, Jr., W. J. (1998), Personal Computer-Based Flight Training Devices, *International Journal of Aviation Psychology (Int. J. Aviat. Psychol.)* Vol. 8, no. 3, pp. 277-292.
- [2] Daniel J., Garland, John A., Wise, V., David Hopkin (1998), *Handbook of aviation human factors*, Lisanne Bainbridge Press.
- [3] J. M. Rolfe, K. J. Staples (1998), *Flight Simulation*, Cambridge University Press.
- [4] Steinberg, M. (2005), A Historical Overview of Research in Reconfigurable Flight Control, *Naval Air Systems Command*, Patuxent River, MD 20670.
- [5] Ippolito, C.A. , Pritchett, A.R. (2000), Software Architecture For A Reconfigurable Flight Simulator, *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference*,Denver, CO.
- [6] Lawless, M. T., LaVine, N. D. (1992), Reconfigurable Simulator Specifications for Future Main Battle Tanks Within the Close Combat Test Bed, *Micro Analysis And Design Boulder Co*, Final rept.
- [7] O'Bea, M., Crabtree, J., Bell, C. (2006), Spiral Development of Virtual Solutions for Convoy Defense Training, *The Interservice/Industry Training, Simulation & Education Conference (I/ITSEC)*.
- [8] Thanagasundram, S. (2008), *A Flexible and Reconfigurable Hardware in the loop Simulator for a Vehicle Programme at Jaguar & Landrover*, 22 Şubat 2011 izlendi, <<http://www.actc-control.com/events/meetings/Thanagasundram.pdf>>
- [9] Walker, K., Dron, A. (2010), *Driving Simulators Motion Systems Add New Realism to Training*, Defense News, 22 Şubat 2011 izlendi,<<http://www.defensenews.com/story.php?i=4731228>>
- [10] Carleton University. (2011), *Simulators*, 22 Şubat 2011 izlendi, <<http://www2.carleton.ca/ace/simulators>>.
- [11] Liu, X., Xie C., Jin Y., Yin Y. (2006)., Construct Low-Cost Multi-Projector Tiled Display System for Marine Simulator, *Proceedings of the 16th International Conference on Artificial Reality and Telexistence Workshops*, 688-693.
- [12] Lin, Z., Feng S., Ying L. (1998), The Design of a Submarine Voyage Training Simulator, *International IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 3720-3724.

- [13] Ferguson, R.C., Thompson, H.C. (2006), Case Study of The Space Shuttle Cockpit Avionics Upgrade Software, *Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 21(8), 3-8.
- [14] Deverex, R.W., Wilkinson,J. (1998), Reconfigurable field research vehicle for human factors experiments, Digital Avionics Systems Conference, 1998 Proceedings, Vol.2,I34/1-I34/8.
- [15] RealSims Capabilities Brochure.(2003), *The Next Generation, Modular Field Deployable Simulators & Training Devices*, 12 Şubat 2011 izlendi, <<http://www.floridaexportdirectory.com/Uploads/ProductSpecSheet/176e1d06-1d03-4665-a811-28a5149d05a1.pdf>>.
- [16] National Aeronautics and Space Administration. (2008), *Nasa Langley Research Center: The Flight Simulation Facilities*, 1 Şubat 2011 izlendi, <http://scap.hq.nasa.gov/docs/SCAP_FLIGHTSIM_112508_508.pdf>
- [17] Salcudean, S. E., Drexel, P. A., Ben-Dov, D., Taylor, A. J., Lawrence, P. D. (1994), A six degree-of-freedom, hydraulic, one person motion simulator, in Proc. *Int. Conf. Robotics and Automation*, May,pp. 859–864.
- [18] Allerton D. (2009), *Principles of Flight Simulation*, John Wiley and Sons Press.
- [19] Ray L. Page (2000), Brief History of Flight Simulation, *Asia-Pacific Simulation and Training Conference and Exhibition (SimTecT 2000 Proceedings)*.
- [20] Pollak, E. (2000), *Reconfigurable Easily Deployable Simulator*, US Patent 6,106,298.
- [21] McGraw, R. (2007), *Reconfigurable Simulator Structure*, US Patent 7,195,486.
- [22] Coiro D.P., Marco A.D., Nicolosi F. (2007), A 6DOF Flight Simulation Environment for General Avaiton Aircraft with Control Loading Reproduction, *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*, 2007-6364.
- [23] Heesbeen, B.W.W.M., Ruigrok, R.C.J., Hoekstra J. M.(2006), GRACE – A Versatile Simulator Architecture Making Simulation of Multiple Complex Aircraft Simple, *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*,Colorado.
- [24] Rexroth Bosch Group. (2008), *Bosch rexroth B.V. Systems & Engineering EMotion -1500-6DOF-800-MK2 Manual*. The Netherlands.
- [25] Singleton, W. T. (1972), Introduction to Ergonomics, *World Health Organization*.
- [26] Grandjean, E. (1973), Ergonomics of the Home, *Halsted Press Division*.
- [27] Panero, J. ve Zelnik M. (1979), Human Dimension and Interior Space, *The Architectural Press Ltd.*
- [28] National Aeronautics and Space Administration. (1978), Anthropometric for Designers,1, *Anthropometric Source Book*, NASA Reference Pub. 1024. Scientific and Technical Information Office, IX-14.
- [29] Droskam, J.(2003), *Airplane Design Parts I Through VIII*, 2nd edition, Darcorporation.

WEB TABANLI SİSTEMLER İÇİN SİMÜLASYON MODEL ÖNERİSİ

Olgun Karademirci ^(a), Asist. Prof. Dr. Altan Özkil ^(b)

^(a) OLLE Ar-Ge Yazılım, Gazi Üniversitesi, Gölbaşı Yerleşkesi, Teknoplaza Binası
Gölbaşı, Ankara, olgun.karademirci@olleco.com

^(b) Atılım Üniversitesi, Karacaşar Mah. İncek, Ankara, aozkil@atilim.edu.tr

ÖZ

İletişim teknolojilerindeki sürekli gelişim ile birlikte günümüzde insanlar, birçok ihtiyacını uzaktan, sanal ortamda gerçekleştirmek istemektedir. Bu durum, Dünya Çapında Ağ (World Wide Web, kısaca www veya web)'ın ortaya çıktığı 1991 yılından beri yaygın olarak kullanılmasına ve hızla büyümeye yol açmıştır. Bu hızlı büyümeyin temelinde; insanların bilgiyi paylaşma isteği ile birlikte web sayfalarının kolay oluşturulup yayınlanabilmesi ve oluşturulan sayfalara hızlı ve ucuz yollarla erişilebilmesi yatkınlıkta. Konuya ilişkin yapılan çalışmalar, web ortamının büyümeye artışının her yıl bir önceki yıla göre ortalama %50 olduğunu göstermektedir. Bu husus, sistem tasarımcılarını ağ trafiği, tıkanıklıklar ve izdihamlar ile web sunucuları yük dengelemesi açısından bir takım zorluklarla karşı karşıya bırakmaktadır. Özellikle kullanıcıların web sistemlerine kesintisiz ulaşmaları ve sisteme gönderdikleri bir isteğin geri dönüşünü almaya kadar geçen süre olarak adlandırılan cevaplama sürelerinin mümkün olduğunda minimize edilmesi, kullanıcı memnuniyetini artıran iki önemli etkinlik ölçüdü olarak kabul görmektedir. Bu çalışmada geliştirilen bir simülasyon modeli vasıtası ile anılan etkinlik ölçütlerinin tahmin edilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada ayrıca öngörülen ulaşma ve cevaplama ölçütlerini sağlayacak web sunucularının temel sistem bileşenleri (İşlemci, Bellek, Bant Genişliği, vb.) ile web sunucu uygulama değişkenleri (Bellek Kullanım Oranı, İzlek Sayısı, vb.) değerlerinin tahmin edilmesi hedeflenmiştir. Çalışmadan elde edilen çıktı setlerinin analizleri ile ise web tabanlı sistemlerin etkin bir şekilde uygulanılmasına ilişkin ön tasarımların ortaya çıkarılması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Modelleme, Simülasyon, Sistem Analizi, Sistem Tasarımı ve Optimizasyonu, Web Tabanlı Sistemler

SIMULATION MODEL PROPOSAL FOR THE WEB-BASED SYSTEMS

ABSTRACT

Along with the continuous improvement in communication technologies, people wish to meet their needs from the remote virtual environments. Such a context has led to the World Wide Web (WWW or Web for short)'s widespread use and rapid growth since 1991. On the basis of this rapid growth, with the desire of people to share information, both generating and publishing web pages easily, quickly and cost efficiently lie. Studies on the topic show that average growth rate of the web environment is 50% of the previous year. This situation challenges the system designers in terms of network traffic, congestions, load balancing of web servers with bottlenecks. In particular, two important issues that increase user satisfaction are the seamless access to the web systems and minimizing response time as much as possible which is called as the return time of a request when request is sent to the system. In this study, it is aimed to estimate the mentioned event metrics by means of a simulation model. Also it is aimed to predict basic system components (CPU, Memory, Bandwidth, etc.) which provide access to web servers and response from the servers, as well as the web server application variables' (Memory Utilization Rate, Video Hits etc.) values. By the help of the analysis of the output sets in the study, it is aimed to develop the pre-design of the web-based systems for the effective implementation.

Keywords: Modelling, Simulation, System Analysis, System Design and Optimization, Web-Based Systems

1. GİRİŞ

İletişim teknolojileri gelişikçe, web tabanlı sistemlerle ilgili insanların sadece beklentileri değil talepleri de gelişmekte. İlgili istatistiklere göre, web veri dolaşımı neredeyse her altı ayda bir iki katına çıkmaktadır [1]. Kuşkusuz, bu durum sistem tasarımcılarını ağ trafiği, tıkanıklıklar ve izdihamlar ile web sunucuları yük dengelemesi açısından bir takım zorluklarla karşı karşıya bırakmaktadır. Kapasite artışı için harcanan çabalara rağmen talepler her zaman yerine getirilememektedir. Aslında, bilindiği üzere, özel ve kamu kuruluşları gibi son kullanıcıların da en önemli taleplerinden biri web ortamında yüksek hızla istenen içeriğe ulaşmaktır. Başka bir deyişle, erişim ve tepki süresinin kısaltılması kullanıcı memnuniyeti için vazgeçilmez bir konu haline gelmiştir.

E-ticaret ortamları, çevirim içi sağlık ve eğitim hizmetleri gibi web tabanlı sistemlerin kullanılması arttıkça, uygun mimari tasarım ve sistem parametreleri konusunda karar verme sürecinde bu sistemler için geliştirilmiş bir performans modeline de ihtiyaç duyulmaktadır. Girdi değerlerini değiştirerek bu değişimin sistem tepki süresine etkisini araştırmak hem web tabanlı sistem özellikleri konusunda karar alan yöneticiler hem de sistem geliştiricileri için faydalı olabilir. Ayrıca, istemcilerin gerçek hayatı rastlanması zor türden vakalar bu tür simülasyon modelleri kullanılarak test edilebilir.

2. ÇALIŞMANIN AMACI

Bu çalışmada geliştirilen bir simülasyon modeli vasıtası ile etkinlik ölçütlerinin tahmin edilmesi hedeflenmiştir. Web tabanlı bir sistemin kullanıcıları simülasyon modeli aracılığı ile çeşitli girdi değişkenleri ve sistem parametrelerini değiştirerek ne tür çıktı alacaklarını gözlemlayabilir, bu doğrultuda sistemin iyileştirilmesi ve hangi değişkenin ne tür değer alması gerektiği konusunda fikir yürütebilir.

Model her bir kullanıcı etkileşimi için ortalama tepki zamanını çıktı olarak verecek ve kullanıcılar sistem parametrelerini ve iş yükünü değiştirerek sistemdeki performans farklarını gözlemlemelerini sağlayacaktır.

CPU, RAM, bant genişliği gibi sistem değişkenleri ve izlek (thread) sayısı, havuz (pool) sayısı gibi web-sunucusu uygulama değişkenleri sistem tepki zamanını etkileyen önemli faktörler olduğundan çalışmanın hedefleri aşağıdaki gibidir:

- Kullanıcıların, modelde tanımlanmış değişkenlere ait değerlerin girişini yapabilmeleri ve çıktı olarak sistem tepki zamanını alabilmeleri için gelişmiş bir simülasyon modelinde gerekli olan sistem değişkenlerini (CPU, RAM, bant genişliği gibi) tanımlamak.
- Kullanıcıların, modelde tanımlanmış değişkenlere ait değerlerin girişini yapabilmeleri ve çıktı olarak sistem tepki zamanını alabilmeleri için gelişmiş bir

simülasyon modelinde gerekli olan web-sunucusu uygulama değişkenlerini (izlek sayısı, havuz sayısı gibi) tanımlamak.

3. VARSAYIMLAR VE ÇALIŞMANIN SINIRLILIKLARI

Bu çalışmada ele alınan varsayımlar aşağıdaki gibidir:

- Müşteri istekleri, istemciden web sunucusuna doğrudan ulaşım amacıyla yapılan istekler olarak kabul edilir,
- Web sunucu üzerindeki yük ayarını gerçekleştiren herhangi bir yük dengeleyici donanım veya yazılım kullanılmamaktadır,
- Sunucu işlem süresi ilk varsayımdan nedeniyle tepki süresi olarak kabul edilmektedir
- Sistemde herhangi bir talep kuyruğu yoktur.

Bu varsayımlarla birlikte, istemci tarafında tepki zamanını ölçmek güç olduğundan, bu çalışmada istemci ve web-sunucusu arasındaki bant genişliği bir değişken olarak değerlendirilmemiştir. Ayrıca, web sunucunun diğer sunucular ile herhangi bir iletişim yaparak değil, tek başına çalıştığı kabul edilmektedir.

4. MODEL

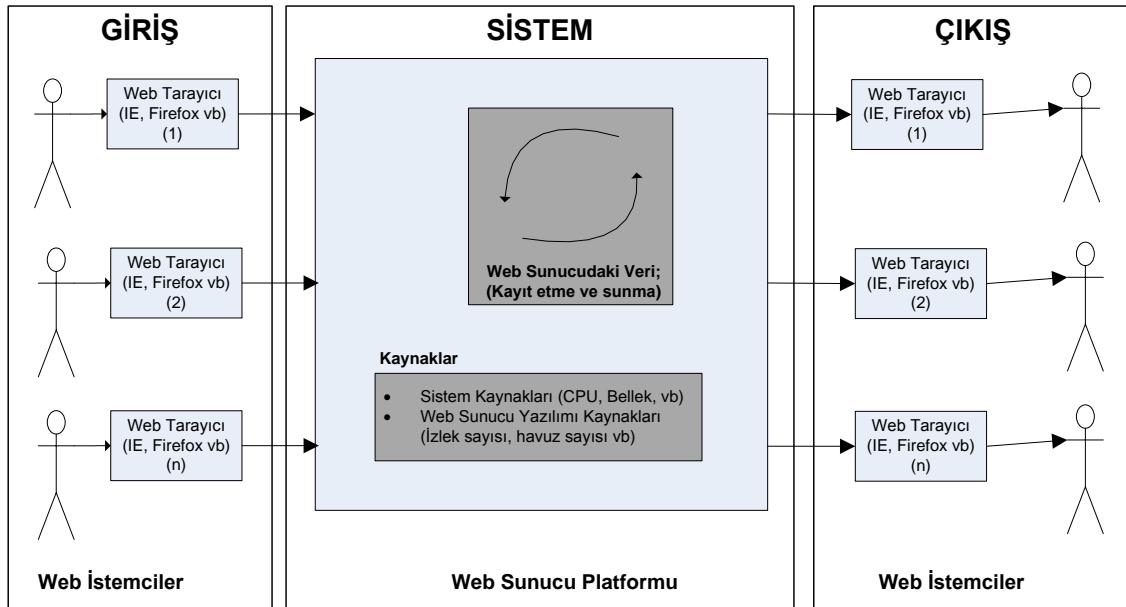
4.1. Sistem bileşenleri

Sistem bileşenleri olarak varlıklar, nitelikleri, kaynaklar, değişkenler, olaylar ve faaliyetler aşağıdaki tabloda gösterilmektedir:

Tablo 1. Sistem bileşenleri

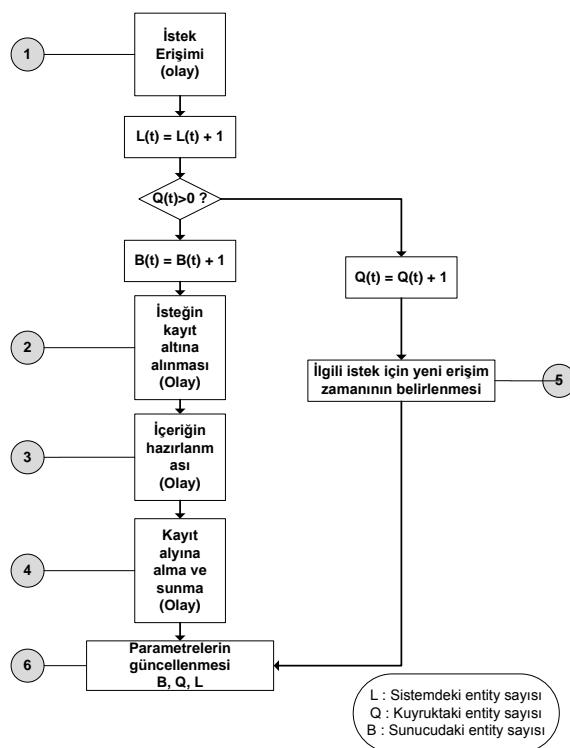
Kategori	Tanım
Varlıklar	İstemci talepleri
Nitelikler	Web içeriği tipi
Kaynaklar	CPU, RAM, bant genişliği gibi sistem kaynakları ile izlek sayısı, havuz sayısı gibi web-sunucusu uygulama kaynakları
Değişkenler	Talep sayısı, tepki süresi
Olaylar	Yeni istemci talebinin gelmesi Talebin işlenmesi Servisin tamamlanması İşlemin başarısızlığa uğraması
Faaliyetler	Talebi almak Talebi işlemek İstemciye yanıt göndermek

4.2. Kavramsal model



Şekil 1. Kavramsal model

4.3. Mantıksal model



Şekil 2. Mantıksal model

5. GİRDİ ANALİZİ

5.1. Veri toplama prosedürleri

Bu çalışmada veri girişi iki kaynaktan toplanmıştır. Bunlardan birisi web-tabanlı bir sistem (www.ato.org.tr), diğeri de web-tabanlı bir sistemin simülasyon modelidir.

Ato.org.tr web sunucusu için istekler sunucu tarafında kaydedilir. Bu loglama işlemine göre, istemci kimliği (IP adresi), istek tipi (statik mi dinamik veri mi), talep edilen kaynak (URL tipi), talebin geliş zamanı (timestamp cinsinden), talebin sonlandırılma zamanı ve tepki zamanı kayıt altına alınmaktadır. Böylece, önceden belirlenmiş bir zaman aralığında, talep sayısı ve işlem süreleri elde edilmektedir.

Sanallaştırma teknolojileri [2] yardımıyla, tam olarak eşleşen web tabanlı bir sistem farklı bir donanım üzerinde web sunucu platformu olarak geliştirilmiştir. Gerçek ortamda, web tarayıcıları tarafından iletilen gerçek istemci talepleri Apache Benchmarking Tool [3] isimli yazılımla taklit edilmiştir.

Girdi verisinin analizi, on iki gün için gerçekleştirilmiştir.

5.2. Girdi verisinin analiz edilmesi

Veri analizi sırasında IBM SPSS Statistics Family [4] isimli yazılım kullanılmıştır. Tanımlayıcı analizler aşağıdaki tabloda gösterilmektedir.

Tablo 2. Girdi verisinin tanımlayıcı istatistikleri

	N	Minimum	Maksimum	Ort.	Stand. Sapma
Gün	12	11	123	47.08	40.35
Geçerli N (listwise)	12				

6. DOĞRULAMA VE ONAY

Doğrulama açısından araştırmacılar tarafından aşağıdaki adımlar atılmıştır:

- Sanal web sunucusu platformun parametreleri ekranдан takip edilerek incelendi.
- Gerçek ve simülasyon ortamlarında kullanılan ve toplanan veriler uzmanlar tarafından kontrol edildi.

- Apache Benchmarking aracının web platformu simülasyon modeli dışında bir platformda sağlıklı olarak çalışıp çalışmadığı kontrol edildi.

Model doğrulama için, gerçek web ortamında elde edilen on iki günlük veri, simülasyon modelinde bir günde on iki tekrarla elde edilen veri ile karşılaştırıldı. Bu karşılaştırma bağımsız (ilişkisiz) t-test ile gerçekleştirildi, $\alpha = 0.05$. T-testi için geçerli olan, bağımsız gözlem ve normallik varsayımları karşılanmıştır. Aşağıdaki tabloda, gerçek ortam ve simülasyon ortamının çalışma sürelerine (runtime) ait betimsel veriler yer almaktadır:

Tablo 3. Çalışma sürelerine ilişkin betimleyici istatistik

	Ort.	Sayı	Std. Sapma	Std. Hata Ortalaması
Gerçek Ortam-Ortalama Çalışma Süresi	110.17	12	23.21	6.70
Simülasyon Ortamı-Ortalama Çalışma Süresi	102.67	12	20.36	5.88

Gerçek ortamda ve simülasyon ortamında elde edilen verilerin birbirlerinden anlamlı derecede farklı olup olmadığını incelemek için yapılan t-testinde kullanılan gölge ve alternatif hipotezler aşağıdaki gibidir:

H0: Gerçek web ortamında ortalama çalışma süresi ortalaması ve simülasyon web ortamında ortalama çalışma süresi arasında anlamlı bir fark yoktur.

H1: Gerçek web ortamında ortalama çalışma süresi ortalaması ve simülasyon web ortamında ortalama çalışma süresi arasında anlamlı bir fark vardır.

Yapılan teste göre, gerçek web ortamında ortalama çalışma süresi ortalaması ($M = 110.17$, $SD = 23.21$) ve simülasyon web ortamında ortalama çalışma süresi ($M = 102.67$, $SD = 20.36$) arasında anlamlı bir fark olmadığı ortaya çıkmıştır $t(11) = 2.201$, $p > .05$. İki veri seti arasında anlamlı bir fark olmadığı için onaylama (validation) gerçekleştirilmiştir.

7. ÇIKTI ANALİZİ

7.1. Tekrar sayısı ve güven aralığı

Tekrar sayısını bulma işlemlerinde β ve α değerleri $\beta = 90$ milisaniye ve $\alpha = 0.10$ olarak saptanmıştır. İlk 12 çalışmada elde edilen çıktı değerleri ve varyans ile tekrar sayısı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

$$\begin{aligned} n &= (t_{11, (0.95)})^2 S^2 / \beta^2 & (1) \\ n &= (2.201)^2 (64.78)^2 / (90)^2 \\ n &= 3 \end{aligned}$$

Random.org sitesinde rasgele istek numaraları 100 ve 500 arasında seçilerek üç tekrar da girdi verisi olarak hangi sayının kullanılacağı üretildi. Böylece tekrarlarda kullanılacak veriler aşağıdaki gibi belirlendi:

- 1. Tekrar: 164 istek kullanıldı.
- 2. Tekrar: 181 istek kullanıldı.
- 3. Tekrar: 230 istek kullanıldı.

Tablo 4. Tekrarlar

Tekrar#	Ort. Çalışma Süresi	Ortalamaların Ortalaması	Ortalamaların Farkı	Karelerin Farkı
1	94	112	-18	324
2	145	112	33	1089
3	97	112	-15	225
	$\Sigma: 336$			$\Sigma: 1638$
	Xort: 112		Varyans:	819
	$\beta = 90$ msan		$\Omega:$	28,61
	$\beta^2 = 81000$ msan.			
	N=3			
	$t(2, 0,95) = 4.303$			
	$t_2 = 18.51$			

X: Sistemdeki çalışma süresi. Aşağıdaki formül kullanılarak Güven Aralığı bulundu:

$$\bar{x}(n) \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{S^2(n)}{n}} \quad (2)$$

$$112 \pm t_{2,0.95} \sqrt{\frac{819}{3}}$$

$$CI = 112 \pm 47.90$$

Böylece, talebin %90'ı web sunucusunda 64,10 ve 159,9 arasında bir sürede yanıtlanacaktır.

8. SONUÇ

Bu çalışmada, aynı sistem (CPU, RAM ve bant genişliği) ve uygulama (izlek sayısı, havuz sayısı) kaynakları kullanılarak gerçek web ortamı ve simülasyon ortamı geliştirilmiş ve test edilmiştir. Test sonuçları simülasyon modelinin geçerli olduğunu göstermiş ve gerçek ortamda bir web sunucusuna gelecek olan taleplerin %90'ının 64.10 ila 159.9 milisaniye arasında yanıtlanacağını göstermektedir.

Web tabanlı sistem için geliştirilen bu tür bir simülasyon çeşitli web platformlarında kolayca uygulanabilir. Böyle bir simülasyon modelinin web tabanlı sistemlerle ilgili karar vericiler ve sistem geliştiriciler için faydalı olacağı düşünülmektedir. Ayrıca, gerçek sistemlerde test edilemeyecek vakaların böyle bir simülasyon modelinde test edilmesi zaman ve maliyet kaybını engelleyebilir. Böylece, simülasyon modelleri yüksek miktardaki istemci talepleri, zirve zaman yaratan istekleri ve kötü niyetli saldırıcıları öngörme yetisi sağlayabilir.

9. KAYNAKÇA

- [1] Heddaya, A.S. (1998), DynaCache, weaving caching into the Internet, *Infolibria*.
- [2] Smith, J.E. ve Nair, R. (2005), *Virtual Machines: Versatile Platforms for Systems and Processes*, Elsevier Press: 500 Sansome Street, Suite 400, San Francisco, ABD.
- [3] ab - apache http server benchmarking tool, 2011. <http://httpd.apache.org/docs/2.0/programs/ab.html> [Çevrimiçi; erişim 11-Nisan-2011].
- [4] IBM SPSS Statistics Family, 2011. <http://www.spss.com/software/statistics/> [Çevrimiçi; erişim 11-Nisan-2011].

İNTERNET SİSTEMLERİNİN ANALİZİ İÇİN AYRIK OLAYLI BİR SİMÜLASYON ÇERÇEVESİ

Fatih ÇELİK^(a), Ahmet ZENGİN^(a)

^(a) Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü,
54187, Sakarya, TÜRKİYE, fhcelik@yahoo.com, azengin@sakarya.edu.tr

ÖZ

Internet teknolojilerinin hızlı gelişimi Internet ağının ölçülebilirliği ve performans değerlendirme konularını önemli hale getirmiştir. Yüz binlerce düğümden ve bağlantı elemanından oluşan bir ağı gerçek bir laboratuar ortamında kurmak mümkün olmadığından, modelleme ve simülasyon büyük ölçekli sistemlerin davranışlarının ve performanslarının değerlendirilmesinde yegane bir araçtır. Düğümlerin ve olayların sayısının fazlalığı performans, doğruluk, çalışma zamanı ve ölçeklendirmeyi önemli ölçüde etkilemektedir. Bu çalışmada, Internet sistemi üzerine protokol araştırma ve geliştirme sürecinde kullanılabilecek yüksek performanslı ve DEVS tabanlı ayrik olaylı bir simülör tasarlanmıştır, RIP ve BGP gibi günümüzün Internet sistemlerinde yaygın bir şekilde kullanılan protokoller modellenmiş ve simülasyon sonuçları tablo halinde sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Ayrik Olay Modelleme, DEVS, DEVS-Suite, Ölçeklenebilirlik, RIP, BGP.

A DISCRETE EVENT SIMULATION FRAMEWORK FOR STUDYING INTERNET SYSTEMS

ABSTRACT

Scalability and performance evaluation of the network systems are becoming more important research topics to model Internet. Modeling and Simulation is an important artifact to evaluate and analyze large-scale networks. A huge amount of number of processing units and events affects performance, accuracy, execution time and scalability. In this work, a high performance, parallel and DEVS-based discrete event simulator is developed to develop and study protocols for Internet-size networks. RIP as interior protocol and BGP as an exterior protocol are modeled as realistic Internet protocols and results are presented.

Keywords: Discrete Event Modeling, DEVS, DEVS-Suite, Scalability, RIP, BGP.

1. GİRİŞ

Başlangıçta 5 üniversite arasında test ağı olarak tasarlanan ilk ağ yapısının (ARPANET), yakın gelecekte ulaşılacak bir milyar düğümlü İnternet yapısına erişeceğini tahmin etmek imkânsızdı. Ağların bu şekilde dünya çapında bir yapı ile hızla büyümesi, ağlarda ölçeklenebilirlik konusunun yeni anamlar kazanması yanında, yeni kavramların / konularında teknolojiye eklenmesine neden oldu. İnternet'in mevcut boyutuna ve karmaşıklığına erişmeden önce, küçük homojen ağlarda yönlendirme algoritmalarını tasarlamak, test etmek ve modelleme / simülasyon yoluyla prototip ağları incelemek kısmen mümkünüydü. Bununla birlikte, İnternet ortamının davranışının modellerini oluşturmak amacıyla yeterince veri ve analiz yöntemi bulunsa idi, kritik hataların ve yapısal zayıflıkların tespit edilebilmesi yanında olası hatalara karşı önlemler alınabilirdi.

Dağıtık sistemleri ve iletişim ağlarını modellemek amacıyla kullanılabilecek yazılımlar (NS2 [5], NS3 [4], OPNET [3], OMNET++ [16], COMNET [13], GLOMOSIM [2], JNS [14], vb.) yanında donanım bileşenlerini modellemek için kullanılabilecek araçlar (VHDL araçları gibi) bulunmaktadır. En yaygın kullanılan ağ simülatörleri olan NS2, OPNET, OMNET++, COMNET, vb. simülatörler küçük boyutlu ağları çalışmak için ideal platformlardır. Bu ürünler / yazılımlar kullanılarak büyük ölçekli sistemleri modellemek ve test etmek zor olmasının yanında, bu yazılımlar değişik teknolojilerin içine katıldığı sistemleri modelleme yeteneğine sahip değildirler.

Sonuç olarak, ağ sistemlerinin karmaşıklık, ölçeklenebilirlik, vb. problemlerinin çözülmesi amacıyla gelişmiş yönlendirme sistemlerini tasarlamak / test etmek için bileşenlerin hangi seviyede soyutlanması gerektiğini, hangi elemanlar arasında ne tür bir ilişki olduğunu belirlemek amacıyla kullanılacak gerçek dünya verisi, modelleme / simülasyon desteği ve büyük ölçekli sistemleri tasarlama yaklaşımı gerekmektedir. Bu makale, yukarıdaki gereksinimleri karşılamak üzere özel bir ayrık olaylı modelleme ve simülasyon aracı olan DEVS teknolojisi kullanılarak yeni bir simülatörün geliştirilmesini, simülatör üzerinde İnternet modeli oluşturmak üzere RIP ve BGP protokollerinin modellenmesini ve bir topoloji üreteci ile oluşturulan büyük ölçekli modellerin tasarlanması deneylerin gerçekleştirilen analizini içermektedir.

2. KULLANILAN TEKNOLOJİLER

2.1 Ayrık Olaylı Modelleme (DEVS)

Bu çalışmada kullanılan modelleme ve simülasyon yöntemi, ayrık olaylı sistemlerin modellenmesi ve analizi için ilk olarak Dr. Bernard P. Zeigler tarafından 1976 yılında *"Theory of Modeling and Simulation"* isimli kitabı ile ortaya konmuştur. DEVS [11] sistem davranışını iki farklı seviyede tanımlar: Atomik ve Birleşik (Coupled) DEVS.

Atomik DEVS; en düşük seviyede, sıralı durumlar arasındaki geçişler gibi ayrik olaylı sistemin otonom davranışını, harici bir girişe (olaylar) nasıl tepki verdiği ve çıkışını (olaylar) nasıl hesapladığını tanımlar. Birleşik DEVS; daha yüksek bir düzeyde, bir sistemi bileşenler ağı olarak tanımlar. Bileşenler, atomik DEVS modelleri ve birleşik DEVS modelleri olabilirler. Bağlantılar, bileşenlerin birbirini nasıl etkilediğini gösterir. Özellikle, bir bileşenin çıkış olayları ağ bağlantısı aracılığıyla bir diğer bileşenin giriş olayları olabilir. Her bir birleşik DEVS için bir atomik DEVS tasaranabileceği gibi, atomik veya birleşik olan bir DEVS modeli bir atomik DEVS ile gösterilebilir. Birleşik DEVS, başka birleşik DEVS bileşenlerine sahip olabildiği için hiyerarşik modelleme yapısı desteklenir [1] .

DEVS yaklaşımının avantajları, bileşenler arası sağlam bağlantı, hiyerarşik tasarım, olay-tabanlı verimli simülasyon, nesneye-yönelik uyarlama, düşük tasarım zamanı, gelişmiş test, daha kaliteli modeller, kolay deney yapma, otonom paralel/gerçek-zamanda çalışma, doğrulama ve geçerleme kolaylığı, karşılıklı çalışabilirlik ve yeniden kullanım, birden fazla yöntem kullanarak modelleme ve yüksek performanstır [15]. Bu çalışma yukarıdaki üstünlüklerden faydalananarak DEVS yönteminin özellikle ağlar gibi paralel ve dağıtık sistemlerdeki performans kazanımlarını deneyler ile göstermiştir.

2.2 RIP Yönlendirme Algoritması

Yönlendirme bilgi protokolü (Routing Information Protocol - RIP), dünyadaki binlerce ağıda kullanılmakta olan bir uzaklık vektörü protokolüdür. Açık standartlara dayalı olması ve uygulanabilirliğinin çok basit olması yönyle tercih edilmesine karşın RIP, daha gelişmiş gönderim protokollerinin özelliklerinden ve gücünden yoksundur [7].

RIP, uzaklık-vektör tabanlı bir yönlendirme protokolüdür. Bu protokolü çalıştırın yönlendiriciler kendi yönlendirme tablolarının tamamını 30 saniye aralıklarla bütün komşularına gönderir. Ayrıca en iyi yolu seçerken sadece yönlendirilen paketlerin maksimum atlama sayısı değerini temel alır (bu uygulamada değeri 15 alınmıştır).

2.3 BGP Protokolü

BGP (Border Gateway Protocol), İnternet omurgasına birden fazla noktadan bağlanıldığında, trafiğin nereden aktarılacağına karar verilmesini sağlayan ve otonom sistemler (Autonomous Systems – AS) arasında ara bağlantıları sağlayan yönlendiriciler üzerinde çalışan bir yönlendirme protokolüdür.

BGP protokolü ile yalnızca belirli bir hedefe yönlenmiş trafiğin hangi yoldan iletileceğine ilişkin kararlar alınmaz; aynı zamanda bir otonom sistem (AS) kendisine nasıl erişileceğine dair duyurular yapar.

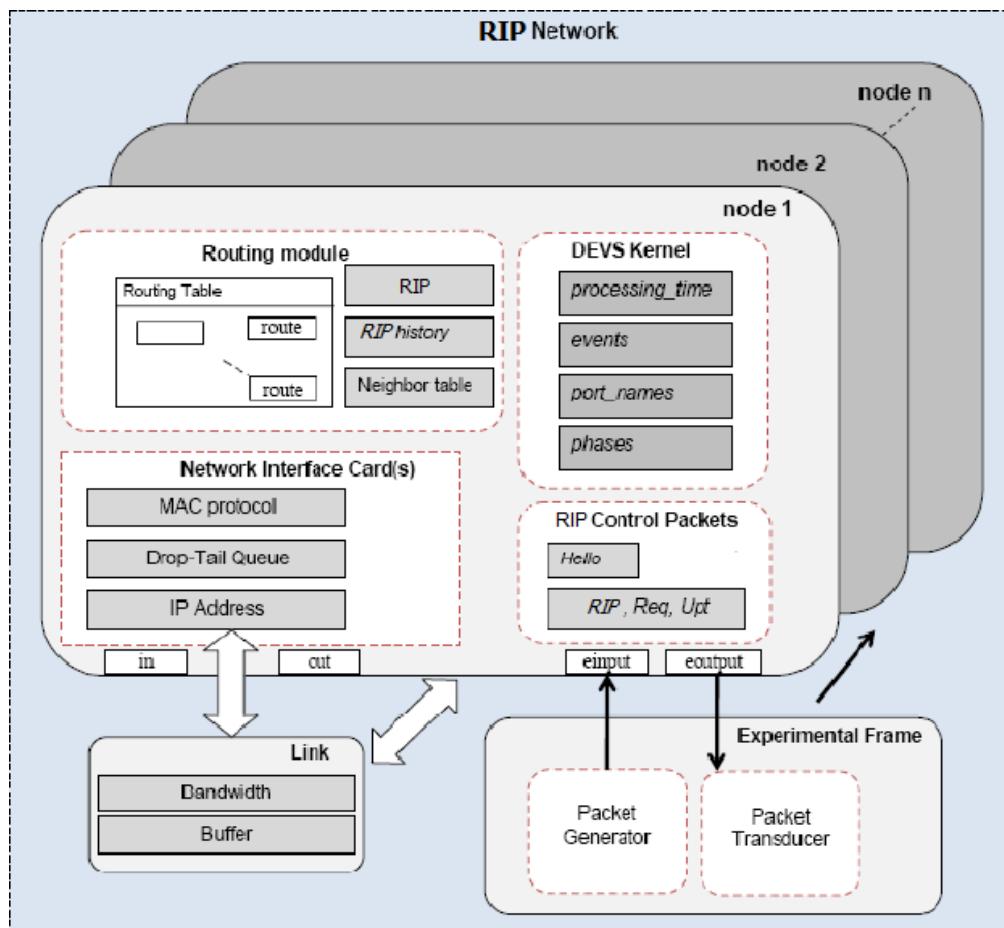
BGP, yönlendirme tablosunu oluşturmak için metrik hesaplarken, hedefe giderken üzerinden geçen otonom sistem sayısını göz önüne alır. Bu durum BGP'nin bir tür uzaklık vektörü algoritmasını kullandığını gösterir. BGP farklı otonom sistemlere ait

yönlendiriciler arasında da çalışabilmektedir. Güncellemeye paketlerinde sadece değişen rotalar gönderilir [8].

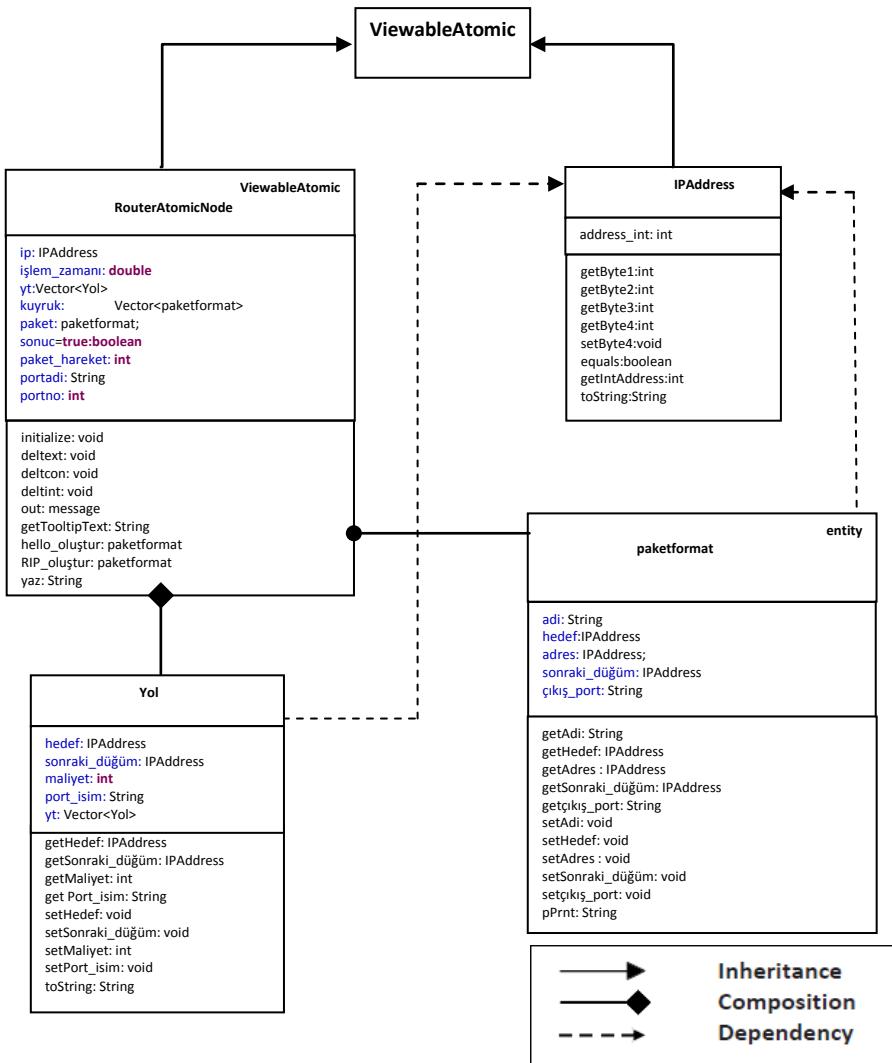
3. SİMÜLATÖR TASARIM ÇERÇEVESİ

3.1 DEVS Atomik Düğüm Modeli

Bu bölümde, geliştirilen büyük ölçekli simülasyon modelinin özelikleri anlatılacaktır. Geliştirilen model [19] çalışmasında detaylı olarak açıklandığı için modelleme safhaları kısaca özetlenmiştir. Modelleme yöntemi olarak DEVS formalizminin seçilmiş olmasının sebebi, yukarıda da ifade edilen DEVS avantajlarıdır. Bu avantajlar sonuçlar bölümünde elde edilen çıktılar ile birlikte ele alınmıştır. DEVS özellikle akıllı bileşenlere sahip olan dağıtık bir sistem modelinde karmaşıklığın önüne geçer. Bilgisayar ağları son derece paralel ve dağıtık olduğu için ağ modeli paralel DEVS atomik modeli olarak geliştirilmiştir [9].



Şekil 1. Kavramsal RIP Ağ Modeli



Sekil 2. RIP-DEVS Simülasyonu yapılan ve yapılmayan sınıfların yapısal ilişkileri

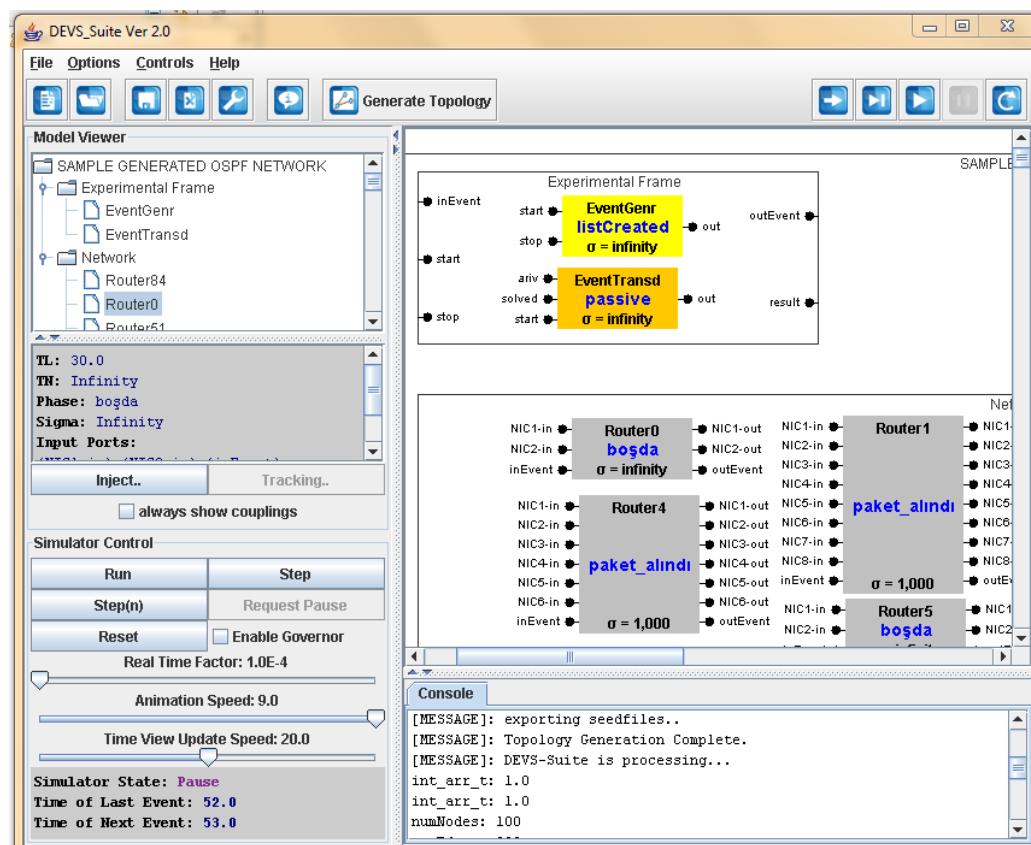
Geliştirilen atomik düğümün kavramsal modeli deneysel çerçevesi ile birlikte Şekil 1'de gösterilmiştir. Atomik düğüm modelleri birleştirilerek DEVS birleşik ağ modeli oluşturulmuştur. Şekilde DEVS çekirdeği ile çalıştırılan düğüm, RIP protokolünü çalıştırıyan yönlendirme modülünde yönlendirme tablosuna sahiptir. Yönlendirme modülünde, RIP sürüm 1 ve Sınır Geçit Protokolü (BGP) uygulandı. RIP protokolü intranet yönlendirmesini ve BGP protokolü ise internet yönlendirmesini destekler. Yönlendirme modülü birkaç protokol yığınından oluşur. Bunlar; RIP sürümünü depolayan RIP tarih bilgisi ve tüm ağ veritabanını depolayan topoloji veritabanıdır. Bu yığınlar protokol yönetimi ve organizasyonunu destekler. Düğümler her komşu için ağ arayüzlerine sahiptir. Arayüz basit bir gelen ve giden paket kuyruğuna sahiptir. Hedef büyük ölçekli bir deney ortamında yönlendirme protokollerini test etmek olduğu için, çok basit bir MAC protokolü uygulanmıştır. Düğümler Hello, RIP mesajları gibi kontrol

paketleri üretir ve karşılıklı değişir. Ayrıca geliştirilen simülatörün sınıf hiyerarşisi Şekil 2'de görülmektedir. Şekilde tipik bir yönlendiricinin yol ve paket sınıfları ile birleşim ilişkisi ViewableAtomik temel modeli ile ise kalıtım ilişkisi görülmektedir.

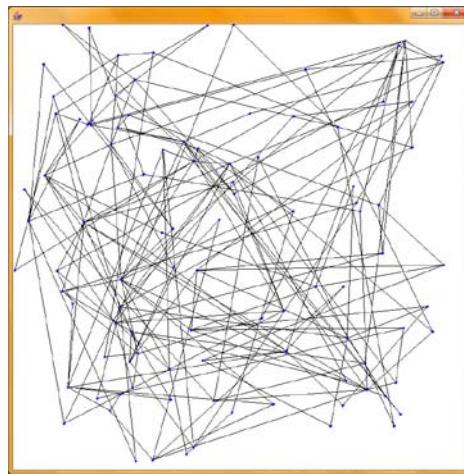
RIP ve BGP yönlendirme protokollerinin modelleri DEVS-Suite [12] modelleme ve simülasyon ortamında Java dili kullanılarak geliştirilmiştir. Geliştirilen model görsellik, gelişmiş izleme yeteneği, yeniden kullanabilirlik ve bileşen temelli modellemeyi destekler.

Şekil 3'te geliştirilen simülatörün RIP modeli ile birlikte ekran çıktısı görülmektedir. DEVS-Suite simülatörünün üst sol bölümünde tüm modellerin model görüntüleme listesi ve sol alt bölümde ise simülasyon kontrolleri mevcuttur. Pencerenin altında kodların çalışmasıyla oluşan mesajları izlemek için konsol çıkışı mevcuttur.

Düğüm genel olarak tasarlandığından dolayı küçük değişikliklerle dağıtıçı, anahtar, geçit ve sınır düğümü gibi ağ aygıtları tasarlanabilmektedir. Bir düğümün iki farklı davranışları olur: (1) düğümün işlem zamanını etkileyen işlem hızı ve (2) gelen ve giden paketleri depolayan kuyruktur. Şekil 3.a'da yönlendiricilerin isimleri, durumları ve bir sonraki olay zamanı görülmektedir. Şekil 3.b'de ise 100 düğümlü bir ağının topolojisi görülmektedir.



a) RIP-DEVS ekran çıktısı



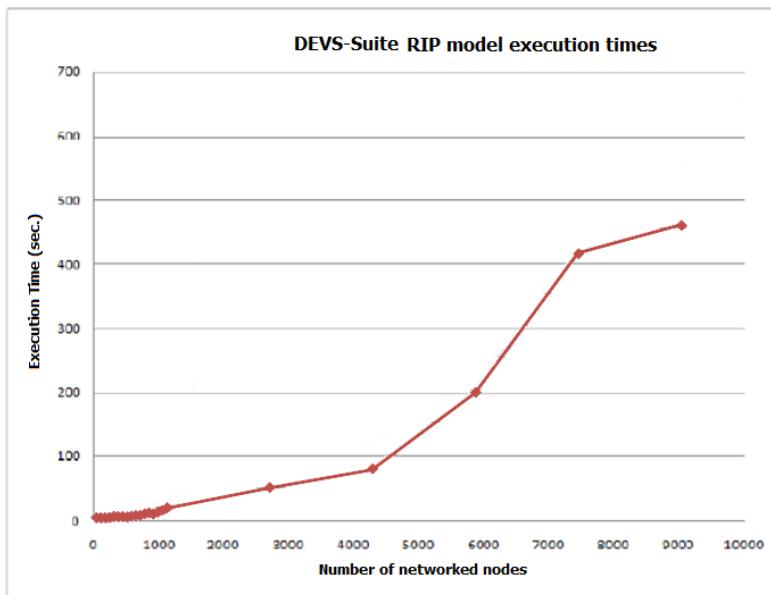
b) Topoloji Görünümü

Şekil 3. RIP-DEVS simülatörü ekran çıktısı ve topoloji görüntüleyici

4. BÜYÜK ÖLÇEKLİ SİMÜLASYON DENEYLERİ

Bu bölümde geliştirilen RIP modeli çeşitli ağ ve trafik şartlarında test edilmiş ve sonuçlar tablo halinde sunulmuştur. Deneyler Core 2 Duo 2.1 GHz, 4 GB RAM ve Ubuntu 9.10 64 bit işletim sistemli bir makine de gerçekleştirilmiştir. Binlerce düğümden oluşan büyük ölçekli DEVS modelleri üretilirken, topoloji üreticisi kullanılmıştır. Dokuz bin düğüm üzerine çıktılığında Java sanal makinesi bellek uyarısı verdiği için, deneylerde bu boyutun üstüne çıkılamamıştır. Ancak buna karşın bu çalışmanın yazarlarından biri tarafından geliştirilen OSPF-DEVS modelinin on bin düğümün biraz üstüne çıkabildiği gözlemlenmiştir [10]. Aynı konfigürasyonda ns-2 ve OPNET birkaç bin düğüm üzerine ölçeklenmemektedir, dolayısıyla geliştirilen simülör oldukça iyi ölçeklenebilir ve paralel performans sergilemektedir.

Aşağıdaki grafikte (bakınız Şekil 4), RIP-DEVS simülatörü altında çeşitli modellerin çalışma süreleri saniye cinsinden verilmiştir. Grafikten de anlaşıldığı gibi simülör büyük ölçekli ağların simülasyonunu kabul edilebilir bir zaman içinde tamamlayabilmektedir. Dokuz bin düğüme kadar hemen hemen doğrusal bir artış söz konusudur (9000 düğüm için duvar saatı cinsinden çalışma süresi 455 saniyedir).



Şekil 4. RIP-DEVS modelinin çalışma zamanı.

5. SİMÜLASYON SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Tablo 1'de değişik topoloji senaryolarına göre üretilen ağların sonuçları ve parametreleri verilmektedir. Tablodan da anlaşılacağı üzere tüm ağ topolojileri Waxman [6] topoloji modeline uygun olarak modellenmiştir. Sadece bazı modellerde m bağlanırılık parametresi (düğüm başına düşen link sayısı) 2 olarak ve bazlarında da 1 olarak seçilmiştir.

Ağ veritabanı oluşum ya da birleşim zamanı (convergence) simülasyonda yönlendirme veritabanının kurulumu için geçen süredir. Düşük ağ veritabanı oluşum zamanının anlamı hızlı yönlendirme işlemidir. Büyük ölçekli ağlarda bu değerin özellikle düşük olması beklenir. Birleşim zamanı tüm modeller için bileşen sayısına bağlı olarak doğrusal artış göstermektedir. Bağlantılarla da (m değeri) doğrusal bir ilişkiye sahip olduğu tablodan anlaşılmaktadır.

Tüm ağ modellerinin verimliliği ölçülmüş, küçük modeller için % 100 iken en büyük modelde % 63,2'ye düşügü görülmüştür. Bu değer günümüz İnternet sisteminin verimliliğinin iyi bir şekilde modellendiğinin göstergesidir ([17] de verilen değerlere göre Asya kıtasının paket kaybı oranı %33'tür). Verimlilik başarıyla hedefine teslim edilen paketlerin tüm paketlere oranıdır.

Önemli ağ performans kriterleri olan çıkış ve yayılım gecikmeleri ayrıca ölçülmüştür. Bu kriterler ağın performansı üzerinde daha iyi bir değerlendirme yapmayı sağlar. Çıkış saniye başına ağın işlediği toplam bit sayısı (bps) ve bazen de saniyedeki veri paketi sayısı olarak kullanılır. Büyük modellerde ortalama bant genişliği tüketimi yükseltirken,

çıkış küçük değerler vermektedir. Yayılım gecikmesi en küçük ağ için yaklaşık 5 msn iken 9000 düğümlü en büyük ağda yaklaşık 33 milisaniyedir.

Tablo 1. Yapay topoloji ağlarının performans sonuçları

Düğüm sayısı	AS sayısı	AS başına düğüm sayısı	Topoloji modeli	Ağ veritabanı oluşum zamanı (adım)	Verimlilik (%)	Ortalama ağ çıkışı (kbps)	Ortalama gecikme (milisaniye)
10	1	10	Waxman (m=2)	50	100	4,39	5,213
20	1	20	Waxman (m=2)	98	100	4,36	7,346
30	1	30	Waxman (m=2)	128	100	4,38	7,652
50	1	50	Waxman (m=2)	183	93,5	4,08	9,024
50	5	10	Waxman (m=2)	131	100	4,35	10,158
70	1	70	Waxman (m=2)	213	98,4	4,30	10,501
100	1	100	Waxman (m=2)	228	96,7	4,20	11,35
100	5	20	Waxman (m=2)	130	92,9	4,03	13,106
100	10	10	Waxman (m=2)	131	100	4,34	13,289
150	5	30	Waxman (m=2)	167	99,1	4,28	17,146
200	10	20	Waxman (m=2)	171	97,7	4,19	17,144
250	5	50	Waxman (m=2)	235	92,2	3,94	18,41
300	10	30	Waxman (m=2)	244	93,9	4,05	19,556
350	5	70	Waxman (m=2)	268	97,6	4,17	20,67
500	5	100	Waxman (m=2)	477	94,5	4,06	22,701
500	10	50	Waxman (m=2)	285	91	3,88	22,841
500	50	10	Waxman (m=2)	273	97,3	4,19	21,954
700	10	70	Waxman (m=2)	320	93,9	4,03	24,123
1000	10	100	Waxman (m=2)	469	87	3,69	25,519
1000	50	20	Waxman (m=2)	412	92,2	3,94	24,869
1000	100	10	Waxman (m=1)	134	29,6	1,27	27,591
1000	100	10	Waxman (m=2)	321	96,9	4,15	23,819
1500	50	30	Waxman (m=2)	505	75,9	3,23	28,963
2000	100	20	Waxman (m=2)	810	83,8	3,58	27,919
2500	50	50	Waxman (m=2)	780	69,6	2,96	31,841
3000	100	30	Waxman (m=2)	901	69,2	2,96	30,065
3500	50	70	Waxman (m=2)	743	45,9	2,28	31,042
5000	50	100	Waxman (m=2)	1024	51	2,08	32,672
5000	100	50	Waxman (m=2)	786	50,5	2,12	32,102
7000	100	70	Waxman (m=1)	281	6,5	0,29	25,259
8000	100	80	Waxman (m=2)	944	68,8	1,34	32,882
9000	100	90	Waxman (m=2)	1060	63,2	1,57	33,112

6. SONUÇLAR

Geliştirdiğimiz modelleme ve simülasyon ortamı, ölçeklenebilir, adaptif ve sağlam ağ uygulamalarının modellenmesi ve tasarımı için örnek bir çerçeve olmuştur. Teorik modelleme ve simülasyon bilgisinin pratiğe dökülkerek uygulanması, ülkemizde son derece zayıf olan modelleme ve simülasyon biliminin uygulamalı olarak kavranmasını ve öğrenilmesini sağlamıştır. Bu çalışma DEVS yönteminin geniş bir uygulama alanına uygulanabilirliğini desteklemiştir. Tablo 2'de DEVS yönteminin avantajlarının geliştirilen RIP-DEVS tasarımına ne şekilde etki ettiği özetlenmeye çalışılmıştır. Geliştirilen simülatör bünyesinde HLA teknolojisini de barındırdığı için özellikle ağ merkezli askeri operasyonların simülasyonunda bir çerçeve vazifesi görebilir.

Tablo 2. DEVS üstünlüklerinin RIP-DEVS Modeline Katkıları

DEVS Üstünlüğü	RIP-DEVS Modeline Katkısı
Bileşenler arası sağlam bağlantı	Geliştirilen model daha güçlü ve güvenli model ilişki ve bağlantılarına sahip olmuş ve böylece daha büyük ve karmaşık modeller kurulabilmiştir.
Olay-tabanlı verimli simülasyon	Zamanın sadece olay zamanlarında ilerlemesi modelin hesaplama ünitesine olan yükünü hafifletmiştir. Böylece, kaynaklar daha ekonomik kullanılmış ve verimlilik artırılmıştır. Bu sonuçla daha kaliteli modeller ortaya konulmuştur.
Modüler ve hiyerarşik tasarım	Büyük ölçekli ve karmaşık sistemler uygun bir hiyerarşi ile düzenlenebilmekte ve sistem ölçügi büyümeye rağmen karmaşıklık artmamaktadır. Bu durum özellikle içinde yüz binlerce düğümün bulunduğu ağ sistemleri için kaçınılmazdır. Ayrıca sistemi modüllerden inşa ederek bakım ve güncelleme kolaylığı yanında takım çalışmaları içinde uygun bir çerçeve oluşması sağlanmıştır.
Nesneye-yönelik uyarlama	DEVS tabanlı RIP-DEVS modeli nesneye yönelik programlamanın bütün avantajlarından faydalıdır. Nesneye yönelik programlama gerçek dünya bakışına sahip olduğu için bileşenler türetilerek daha az zamanda model üretimi tamamlanabilir. RIP-DEVS modelleri oldukça düşük tasarım zamanına sahiptir.
Soyutlama kolaylığı	DEVS yaklaşımı son derece esnek bir soyutlama ve basitleştirme seçeneği sunmaktadır. Basitleştirme derecesi modelleyicinin hedeflerine bağlıdır. Çalışmamızda RIP protokolünün tüm özellikleri ve OSI ağ katman modelinin tüm teknolojileri modellenmemiştir (örneğin, RIP split horizon özelliği ihmal edilmiş ve MAC protokolü en temel seviyede ele alınmıştır).
Paralel/gerçek-zamanda çalışma	DEVS atomik modelleri paralel çalışabilir. Paralel çalışma için özel bir çakışma işlevi vardır [15] ve bu işlev aynı anda meydana gelen olayları isteğe bağlı olarak sıraya dizer. Ayrıca DEVS modellerinin zaman senkronizasyonu kontrolü gerçek zamanlı çalışmaya uygundur.
Karşılıklı çalışabilirlik ve	DEVS/HLA teknolojisi tüm DEVS modellerini desteklemektedir. HLA teknolojisi simülasyonların

yeniden kullanım	yeniden kullanımı ve karşılıklı çalışabilirliğini sağlamak için ortak kavramlar ve teknolojiler sunar [18].
Kolay deney yapma	DEVS deneysel çerçeve teknolojisi merkezi bir trafik üretimi ve simülasyon sonuçlarının ortak bir merkezde toplanıp rapor edilmesini sağlar. Trafik üreteç modeli ilgili parametreleri kolayca ayarlayıp istenilen kullanıcı trafiği şartlarının benzetimini kolaylaştırır.
Doğrulama ve geçerleme kolaylığı	DEVS otomatik araçlar sağlayarak model doğrulama ve geçerleme sürecini daha resmi ve dinamik bir şekilde gerçekleştirmeyi sağlar.

7. KAYNAKÇA

- [1] Zengin. A (2004), "Dağıtık Simülasyon Sistemleri için Yeni bir Yönlendirme Algoritması ve Uygulaması", Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [2] X. Zeng, R. Bagrodia, and M. Gerla (1998), “Glomosim: A Library for the Parallel Simulation of Large Scale Wireless Networks,” in Proc. of Parallel and Distributed Simulation Conf., pp. 154.
- [3] OPNET Network Simulator, <http://www.opnet.com/>, 2011.
- [4] Network Simulator 3 (ns-3), <http://www.nsnam.org/>, 2011.
- [5] Network Simulator 2 (ns-2), <http://www.isis.edu/nsnam/ns/>, 2011.
- [6] B. M. Waxman (2002), “Routing of Multipoint Connections,” “IEEE Journal on Selected Areas in Communications,” vol. 6, no. 9, pp. 1617–1622. August.
- [7] C. Hedrick (1988), Routing Information Protocol, <http://tools.ietf.org/html/rfc1058> (2011 de erişildi).
- [8] Y. Rekhter, T. Li, S. Hares (2006), A Border Gateway Protocol 4 (BGP 4), <http://tools.ietf.org/html/rfc427> (2011'de erişildi).
- [9] Ahmet Zengin (2010), “Large-Scale Integrated Network System Simulation with DEVS-Suite”, KSII Transactions on Internet and Information Systems VOL. 4, NO. 4, August.
- [10] Ahmet Zengin ve Hessam Sarjoughian (2010), “OSPF Discrete Event Simulator for Computer Network Education and Research”, Submitted to Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International.

- [11] Zeigler, B.P., Praehofer, H. and Kim, T.G. (2000), “Theory of Modeling and Simulation”, Academic Press, Second Edition.
- [12] S. Kim, H. Sarjoughian, and V.Elamvazhuthi (2009), “DEVS-Suite: A Simulator Supporting Visual Experimentation Design and Behavior Monitoring,” in *Proc. of the Spring Simulation Conf.*, San Diego, CA, pp. 29–36, March.
- [13] COMNET Simulator, <http://www.caciasl.com>, 2011.
- [14] JNS network simulator, <http://jns.sourceforge.net>, 2011
- [15] A. Chow (1996), “Parallel DEVS: A Parallel, Hierarchical, Modular Modeling Formalism and Its Distributed Simulator,” *International Transactions of the Society for Computer Simulation*, vol.13, no. 2, pp. 55–67.
- [16] A. Varga (2011), “The OMNET++ Simulator”, <http://www.omnetpp.org>.
- [17] Internet Traffic Report, <http://www.internettrafficreport.com/>, 2011
- [18] Zengin, A., Ekiz, H., Firat, C.(2001), “The High Level Architecture (HLA) for Distributed Simulations”, 3rd International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems, August 30 -31.
- [19] Çelik F. ve Zengin A.(2011). “Discrete Event Simulation-based Performance Evaluation of Internet Routing Protocols”. Submitted to Elsevier Simulation Modelling Practice and Theory.

SİMÜLASYON SİSTEMLERİNDE VARLIK MODELİ OLUŞTURMA

Ahmet ERDEM (a), Serhat TURHAN(a), Şenol Lokman ALDANMAZ(a), Serap ERKORKMAZ (a), Başar KASIM (a), Mesut GÖZÜTOK (a)

^(a) HAVELSAN A.Ş., ANKARA, {aerdem, sturhan, saldanmaz, serkorkmaz, bkasim, mgozutok}@havelsan.com.tr

ÖZ

Bu makalede, MGKMOS Projesi kapsamında geliştirilen Model Oluşturma Araçları (MOA) modülü anlatılmaktadır. Etmen tabanlı simülasyonlarda modellenenek varlıklar ve öznitelikleri oldukça değişkendir. Bu değişkenliğin sistemin bütününe etkilemeden ele alınması önemlidir. Geliştirilen sistemde, kod değişikliği gerektirmeden varlık modelleri, sistemde tanımlı özelliklerle sınırlı olarak, güncellenebilmektedir.

Modeller, modellerin birbirleriyle olan ilişkileri, model öznitelikleri, özniteliklerin veri tipleri, özniteliklerin veri kısıtları üst-veri (İng. metadata) olarak tutulmaktadır. Bu yaklaşım model oluşturmada esneklik sağlamaktadır. Üst-veri değiştirilerek yeni modeller sisteme kolaylıkla eklenebilmekte ve mevcut modellere ait öznitelikler güncellenebilmektedir. Üst-verideki özniteliklerin veri tipleri ve kısıtları kullanılarak öznitelik için hangi tür veri giriş ekranının kullanılacağı, tutarlılık denetiminin hangi kısıtlara göre yapılacağı belirlenmektedir.

MGKMOS Projesi’nde geliştirilen algoritmalar modellerin özellikleri girdi olarak kullanılmaktadır. Üst-veri değiştirilerek modellere özellikler atanabilmektedir. Bu sayede herhangi bir modelin sahip olduğu özellikler değiştirilerek farklı algoritmalar kullanılması mümkün olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Esnek Model Oluşturma, Etmen Tabanlı Simülasyon, Öznitelik, Tutarlılık Denetimi, Üst-veri.

CREATION OF ENTITY MODELS IN SIMULATION SYSTEMS

ABSTRACT

In this paper, the Model Creation Module, developed as a part of MGKMOS Project, is described. In actor based simulations, modelled entities and their attributes are subject to change. Handling this change is very important. In the developed system, the modelled entities and their attributes can be changed, with the limitation of properties defined in the system, without making any change in the code.

Models, relationships between models, model attributes, attribute data types, data constraints on attributes are held in metadata. This approach provides flexibility in model creation. By changing metadata, new models can be added into system and attributes of existing models can be updated easily. By using data types and constraints of attributes, the data entrance interfaces for attributes and constraints for consistency checking is determined.

In MGKMOS Project, model properties are used as inputs to the algorithms. By changing metadata, new properties can be assigned to models. By this way, by changing properties of a model, it can be used in different algorithms without need to code changes.

Keywords: Flexible Model Creation, Actor Based Simulation, Attribute, Consistency Checking, Metadata.

1. GİRİŞ

Simülasyonlarda yeniden kullanılabilirliğin önemi gittikçe artmaktadır. Modellerin yeniden kullanılmasının modelleme süresini kısalttığı [2]'de vaka çalışmasıyla gösterilmiştir. Model yeniden kullanımıyla ilgili [7], [3] ve [4]'te yöntemler önerilmiş ve yeniden kullanımın süre ve maliyeti azalttığı, benzetim kalitesini artırdığı belirtilmiştir. Sadece veriyi değiştirerek, benzer sistemlerin modellenmesinin ve benzetiminin sağlanması yeniden kullanılabilirlik için gerekli esnekliği sunmaktadır [1]. Bu esnekliğe ulaşmak için model oluşturma aşamasında sağlanan imkânlar ilerleyen bölümlerde anlatılmıştır.

MGKMOS Projesi'nde benzetimi yapılacak olan varlık modelleri ve onların alt sınıfları, model ve varlık tipi olarak adlandırılmaktadır.

Sistemde benzetimi yapılacak olan varlıklar, model olarak adlandırılmıştır. Örnek: ağaç, tank, helikopter, göl vb. Modeller benzetimi yapılacak olan varlığın hangi özelliklere ve özniteliklere sahip olduğunu belirtir. Modelin sahip olduğu özellikler ve öznitelikler, model üst-verisinde tutulur.

Bir modelin sahip olduğu özniteliklere değer atanarak oluşturulmuş alt sınıfına varlık tipi adı verilmiştir. Örnek: Leopard Tankı, M-48 tankı vb.

Modeller tiplerine göre sınıflara ayrılmışlardır. Bu tipler platform, durağan varlık, cihaz ve mühimmat tipleridir. Platform tipindeki modeller üzerinde cihaz taşıyan, hareket edebilen, belirli görevleri yapabilen varlıklardır. (Örnek: Tank, ZPT, Tek Er vb). Cihaz tipindeki modeller platformlarla ilişkilendirilen, platformun görevlerini yapmasında kullandığı yardımcı varlıklardır. (Örnek: dürbüñ, tüfek, telsiz vb). Durağan varlık tipindeki modeller belirli bir görevi yerine getirmeyen, doğrudan diğer varlıklarını etkilemeyen fakat kendileri diğer varlıkların hareketlerinden etkilenen varlıklardır. (Örnek: yol, nehir, siper, ağaç vb.) Mühimmat tipindeki modeller müdahale cihazlarından atıldıktan sonra oluşturulan, kendilerine ait hareket yeteneği olan bir varlığa çarpınca yok olan varlıklardır. (Örnek: Top mühimmatı, el bombası vb.)

MOA modülünün amacı model üst-verisini kullanarak benzetimi yapılmak istenen modellere ait varlık tiplerinin oluşturulmasını sağlamaktır. Varlık tipi oluşturma aşamaları şunlardır:

- Varlık tipinin ait olduğu model üst-verisi yoksa hazırlanır,
- Varlık tipi oluşturma ekranı açılır,
- Üst-veriden okunan model öznitelikleri kullanıcıya gösterilir,
- Özniteliklere değer girilir,
- Oluşturulan varlık tipi bir platform ise varlık tipine cihaz eklenir,

- Varlık tipinin tutarlılık kontrolü yapılır,
- Varlık tipi veritabanına kaydedilir.
- Varlık tipinin kod tabloları bilgileri girilir.

Bu aşamadan sonra, oluşturulan varlık tipi başka bir varlık tipiyle ilişkilendirilebilir ve senaryo hazırlanırken kullanılabilir.

2. VARLIK MODELİ OLUŞTURMA

Varlık modeli oluşturulurken model üst-verisinde model adı, model belirteci, modelin tipi değerleri girilir. Model tipi platform, durağan varlık, cihaz, mühimmat tiplerinden biri olabilir.

2.1. Modele Özellik Ekleme

Sistemde modellerin sahip olabileceği özellikler tanımlanmıştır. Algoritmalar sistemde tanımlı bulunan özellikleri kullanarak çalışmaktadır. Örneğin, kara aracı ilerleme algoritması, kara aracı ilerleme özelliğini girdi olarak alır. Bu durumda kara aracı ilerleme özelliğine sahip herhangi bir model kara aracı ilerleme algoritmasını kullanabilecek ve kara aracı gibi ilerleyebilecektir.

Oluşturulan bir modele sistemde tanımlı olan özellikler eklenebilmektedir. Her özelliğin gerektirdiği öznitelikler vardır. Modele bir özellik eklenince o özelliğin gerektirdiği öznitelikler de modele otomatik olarak eklenmektedir. Modele özellik ekleme aşamasında modelin sahip olduğu özellik ve özniteliklerin sayısı değişmektedir. Özniteliklere değer atanması 3. Varlık Tipi Ekleme bölümünde anlatılmıştır.

2.2. Özniteliklere Veri Kısıtları Tanımlama

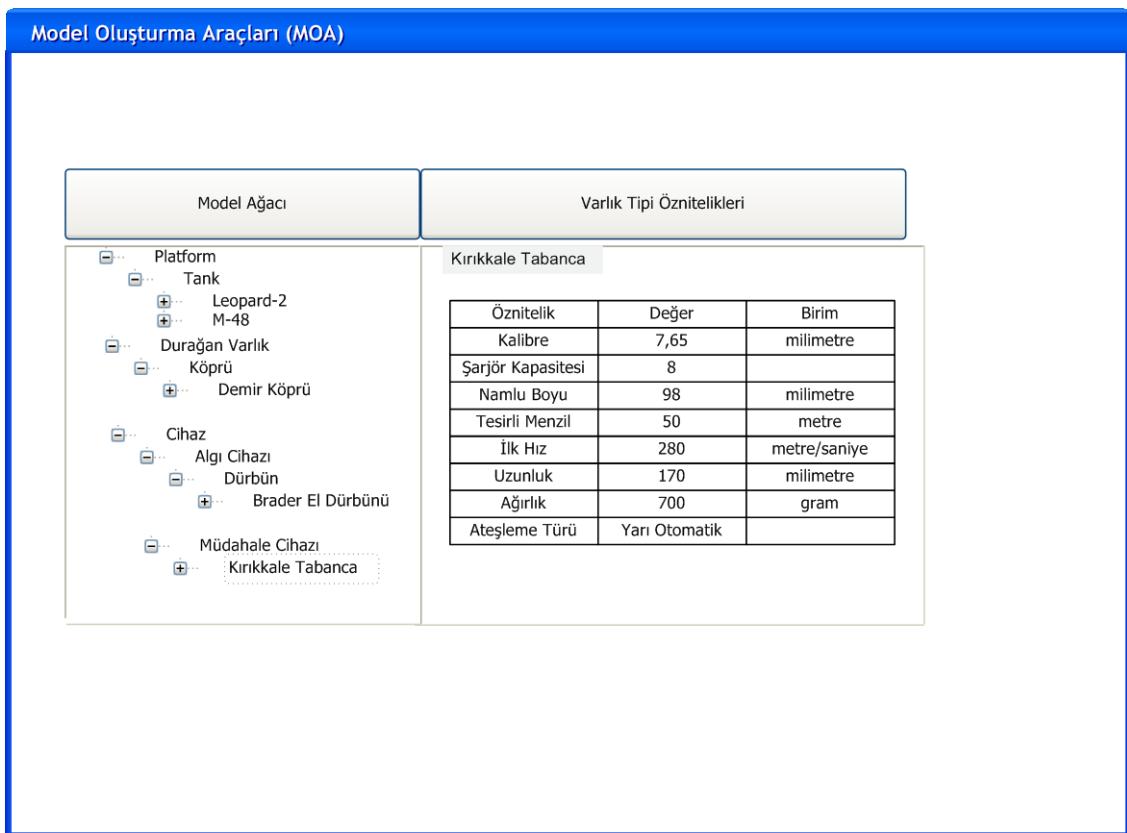
Modele eklenen özniteliklerin veri tipi, alt değer ve üst değeri, varsayılan değeri, seçimlik alan ise alabileceği değerler, kullanıcıya gösterim bilgileri, varsa öznitelığın birimi bilgileri girilir.

Varlık modeli oluşturma aşamasında, üst-veride değişiklik yapılarak herhangi bir kod değişikliği yapılmadan yeni varlık modelleri sisteme eklenebilmektedir.

3. VARLIK TİPİ EKLEME

MOA modülü çalıştırıldığında üst-veride tanımlanmış olan modeller ekrana gelir. Bu modellerden varlık tipi oluşturmak için varlık tipi oluştur ekranı açıldığında seçili modelin öznitelikleri ekranда gösterilir. Veri girişi yapılrken seçilen öznitelığın veri tipine uygun veri giriş ekranı açılır ve öznitelığın varsayılan değeri ekranда kullanıcıya gösterilir. Kullanıcı istediği özniteliklerin değerlerini ve varsa birimlerini

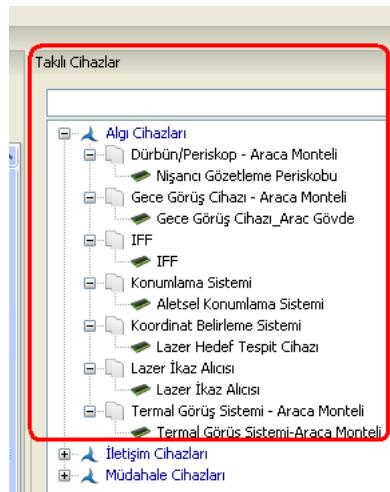
güncelleylebilir. Bu güncellemeden sonra kullanıcı kaydet tuşuna basarak yeni varlık tipi oluşturulur. Model Oluşturma Araçları ekranının temsili görüntüsü Şekil 1'de verilmiştir. Temsili görüntüde *Tabanca* modeli kullanılarak oluşturulan *Kırıkkale Tabanca* varlık tipinin öznitelikleri görülmektedir.



Şekil 1. Varlık Tipi Oluşturma Ekranı (Temsili Ekran)

4. PLATFORMA CİHAZ EKLEME

Platform tipindeki modellerin varlık tiplerine, tanımlanmış olan cihaz tipindeki modellerin varlık tipleri eklenebilir. Eklenen cihaz varlık tipleri, eklendikleri platform varlık tipinin ilgili özniteliklerine kaydedilir. Platform tipindeki bir modelin varlık tiplerine, hangi cihaz modeline ait varlık tiplerinin eklenebileceği ve eklenebilecek cihaz adedinin maksimum ve minimum değeri üst-veride tanımlanır. Bu veri tutarlılık kontrolünde kullanılır. Eklenen cihaz mühimmat atan bir cihaz ise, atacağı mühimmat varlık tipi ve miktarı da girilir. Platforma eklenmiş cihazları gösteren ekran Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Platforma Eklenmiş Cihazlar

5. TUTARLILIK KONTROLÜ

Varlık tipi oluşturulurken, tutarsızlıklarını engellemek amacıyla çeşitli kontroller yapılır. Bu kontrollerde kullanılacak eşik değerleri her model ve özniteligi için üst-veride tanımlanmıştır. Tutarlılık kontrolü aşamaları şunlardır:

- **Öznitelik Değer Kontrolü:** Her öznitelijke girilen değerin, üst-veride tanımlanmış olan alt ve üst değerlerin arasında olması kontrol edilir.
- **Özniteliklerin Birbirleriyle Tutarlılığı Kontrolü:** Bir varlık tipinin farklı özniteliklerinin aldığı değerler arasında tutarsızlık olmasını engellemek için varlık tipi kaydedilirken öznitelik değerleri kontrol edilir.
- **Platforma Eklenen Cihaz Kontrolü:** Platforma eklenen cihaz adedinin üst-veride tanımlanmış olan maksimum ve minimum değerlerinin arasında olduğu tutarlılık kontrolü kapsamında kontrol edilir.
- **Kod Tabloları Kontrolü:** Varlık tipinin simülasyon koşarken kullanması gereken kod tabloları varsa bunlara veri girilmesi yönünde kullanıcıya uyarı mesajı verilir.

6. KOD TABLOLARI BİLGİLERİNİN GİRİLMESİ

Simülasyon koşumu sırasında varlık tipleri öznitelikleri dışında varlığın hareket etmesi, ateş etmesi, hasar alması, algısı için kullanılan parametrik değerlerin tutulduğu tablolara kod tabloları adı verilmiştir. Bu kod tabloları bir cihazın çalışması, bir platformun

hareket etmesi, bir varlığın hasar alması gibi fonksiyonlarda kullanılan listelerdir. Varlık tipi oluşturulurken o varlık tipiyle ilişkili kod tablolarının girilmesi sağlanır.

Kod tablolarının girişinde kolaylık sağlamak amacıyla, önceden oluşturulmuş değerler kullanıcının isteğine göre otomatik olarak atanabilir. Kullanıcının kod tabloları için girilebilecek değerleri gruplaması ve tanımlanmış grplardan herhangi birinin kod tablosu değeri olarak kullanmasına imkân sağlanır. Mayın modelinden üretilmiş varlık tipinin hedeflere hangi olasılıkla hasar vereceği bilgisi Tablo 1'de örnek olarak verilmiştir.

Tablo 1 Mühimmat Varlık Tipi Hasar Verme Olasılıkları

Mühimmat Varlık Tipi	Hedef Tipi	Hasar Türü	Hasar Olasılığı
A/T Mayın	Leopard Tankı	Algı Yeteneği Hasarı	0.70
A/T Mayın	Leopard Tankı	Hareket Yeteneği Hasarı	0.75
A/T Mayın	Piyade Varlık Tipi	Tahrip	0.95
A/T Mayın	M113	Hareket Yeteneği Hasarı	0.80

7. SÜRÜMLEME

Hazırlanan varlık tiplerinin birbirleriyle olan ilişkilerini (örnek: platform cihaz ilişkisi) kaybetmeden gruplamak amacıyla istenen varlık tipleri aynı sürüm etiketi altında toplanabilmektedir. Bir sürüm etiketi altında toplanan varlık tipleri ancak kendileriyle aynı sürümde olan varlık tipleriyle ilişkilendirilebilmektedir.

Bir sürüm etiketi altındaki tüm varlık tipleri dosyaya aktarıldıkten sonra, başka bir ortamda tekrar dosyadan okunup veritabanına aktarılarak kullanılabilmektedir.

Bu sayede merkezi bir yerden varlık tiplerinin tanımlanıp, bir sürüm adı altında gruplandıktan sonra başka böümlere dağıtılması mümkün olmaktadır. Sürümülerin dağıtılması hazırlanan varlık tiplerinin yeniden kullanılmasına imkân sağlamaktır ve yeniden kullanılabilirliği artırmaktadır.

8. SONUÇ

Varlık modellerinin koddan bağımsız olarak eklenebilmesi, geliştirilen simülasyonda benzetimi yapılacak yeni varlık modellerinin tanımlanabilmesini kolaylaştırmaktadır. Algoritmaların, modellerin sahip olduğu özellikleri kullanarak çalışması, algoritmaları modellerden bağımsız hale getirmekte ve yeni eklenen modellerin mevcut algoritmalarla çalışmasını mümkün kılmaktadır. Sonradan geliştirilecek algoritmalarla, benzetimi yapılacak modeller yerine algoritmanın çalışması için gereken özelliklere odaklanılabilecektir.

Modellerin üst-veriden okunan bilgilerle oluşturulabilmesi, yeniden kullanılabilirliği üst seviyeye çıkarmaktadır. Bu durum maliyet ve zaman açısından önemli kazanımlar sağlamaktadır.

9. KAYNAKÇA

- [1] Brown, N.A. (2010), Model Flexibility: Development of a Generic Data-Driven Simulation, *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference*, 1366-1375.
- [2] Mackulak, T.G. (1998), Effective Simulation Model Reuse: A Case Study for AMHS Modelling, *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*.
- [3] Overstreet, M.C., Nance, R.E. ve Balci, O. (2002), Issues in Enhancing Model Reuse, *First International Conference on Grand Challenges for Modeling and Simulation*, ed. W.H. Lunceford and E.H., 1-5.
- [4] Paul, R.J. ve Taylor, S.J.E. (2002), What Use is Model Reuse: Is There a Crook At the End of Rainbow?, *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*.
- [5] Robinson, S. (2004), *Simulation, The Practice of Model Development and Use*, John Wiley & Sons, Ltd.
- [6] Law, A. M. ve Kelton, W. D. (2000), *Simulation, Modelling and Analysis*, 3/e, McGraw Hill.
- [7] Brown, N. ve Powers S. (2000), Simulation in a Box (A Generic Reusable Maintenance Model), In *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, ed. J.A. Jones, R.R. Barton, K. Kang, and P.A. Fishwick, 1050-1056.

ETMEN TABANLI SİMÜLASYON UYGULAMALARINDA MERKEZİ İŞLEM BİRİMİ VE GRAFİK İŞLEM BİRİMİ KULLANARAK DAĞITIK OPTİK ALGI HESAPLAMASI

Mesut GÖZÜTOK^(a), Başar KASIM^(a), Burak İLTER^(a), Amlı Yiğit FİLİZ^(a),
Mehmet Ömer ÖZEK^(a)

^(a) HAVELSAN A.Ş., Muharebe Simülasyonları Grup Müdürlüğü, ANKARA,
{mgozutok, bkasim, bilter, ayfiliz, mozek}@havelsan.com.tr

ÖZ

Etmen tabanlı simülasyonlarda algı modelinin sadakatının simülasyonun gerçekliği üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Algı modeli sadakati arttıkça bu modeli gerçekleştirmek için gerekli işlemci gücü de artmaktadır, bu ise simülasyon performansına olumsuz yönde etki etmektedir. Bu kapsamda artan iş yükünü dengelemek amacıyla alternatif sistem çözümleri geliştirilmelidir. Bu makalede etmen tabanlı bir simülasyon olan Müşterek Görev Kuvveti Harekatının Modellenmesi ve Simülasyonu (MGKMOS) projesi kapsamında optik algı hesaplamasının nasıl yapıldığı, iş yükünün simülasyondaki bilgisayarlarla ve her bir bilgisayardaki merkezi işlem birimi (İng. CPU) ile OpenGL tabanlı algoritma yardımıyla grafik işlem birimi (İng. GPU) arasında nasıl paylaştırıldığı anlatılmaktır ve bu uygulamanın hız performansı ölçümleri, sadece CPU'da çalışan algoritma çözümüyle kıyaslamalı olarak sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Dağıtık, EtmenTabanlı Simülasyon, Grafik İşlem Birimi, Merkezi İşlem Birimi, Optik Algı

DISTRIBUTED OPTIC PERCEPTION COMPUTATION USING CENTRAL PROCESSING UNIT AND GRAPHICAL PROCESSING UNIT WITH AGENT BASED SIMULATION APPLICATION

ABSTRACT

The fidelity of optic perception modeling has an important role on simulation reality in simulation systems using agent-based models. As the fidelity of perception model increases so does the required processor power and this affects simulation performance in a negative way. With in this context, alternative solutions should be incorporated, in order to balance the increasing work load. In this paper, firstly, it is explained that how to do optical perception calculations sharing the work load between Central Processing

Unit (CPU) and Graphical Processing Unit (GPU) by means of an OpenGL based algorithm in Joint Task Force Modeling and Simulation (JTFSIM) project which is an agent-based military simulation application. After algorithmic details of perception calculations are explained, speed performance measurements of this application are given in comparison with the algorithm that is solely executed on the CPU.

Keywords: Agent Based Simulation, Central Processing Unit, Distributed, Graphical Processing Unit, Optic Perception

1. GİRİŞ

Günümüz askeri simülasyon uygulamalarının bir çoğunda askeri harekatlar, yarı otonom kuvvet (İng. semi-automated force) kavramı çerçevesinde, etmen/varlık (İng. agent/entity) yaklaşımı kullanılarak modellenmektedir. Varlık tabanlı simülasyonlarda, modellenen her bir varlığın davranışları ve diğer varlıklarla etkileşimi, topluluk düzeyinde değil, bireysel düzeyde canlandırılmaktadır. Etmen tabanlı simülasyonlarda, algılama, karar verme ve harekete geçme yeteneği olan varlıklar aktör olarak ayrıntı edilmektedir. Aktörlerin modellenmesi ve yazılım olarak gerçekleştirimi etmen tabanlı yöntemlerle yapılmaktadır.[6]

Etmen tabanlı simülasyonlarda, etmenin dış dünya ile ilgili durum farkındalığını oluşturan önemli araçlardan bir tanesi optik algıdır. Optik algı modellemesinin sadakat düzeyi arttıkça, hesaplama süreleri de oldukça artmaktadır. Artan hesaplama yükünü dengelemek için dağıtık simülasyon sistemlerinin kullanılması, bu alanda uygulanan yaygın bir yöntemdir. Dağıtık simülasyon uygulamalarında, hesaplama yükünün paylaştırılması için iki farklı yöntem düşünülebilir:

Yetenek Tabanlı Dağıtım: Bu yöntem, bir aktöre ait farklı yeteneklerin (hareketlilik, algı, müdahale,..v.b.) farklı bilgisayarlarda hesaplanması esas almaktadır. Bu çözümde, bir yeteneğe ait hesaplamlar tek bir simülasyon bilgisayarında gerçekleşebileceği gibi, yeteneğin ihtiyaç duyduğu işlemci gücüne bağlı olarak birden fazla bilgisayarın kullanımı da mümkündür.

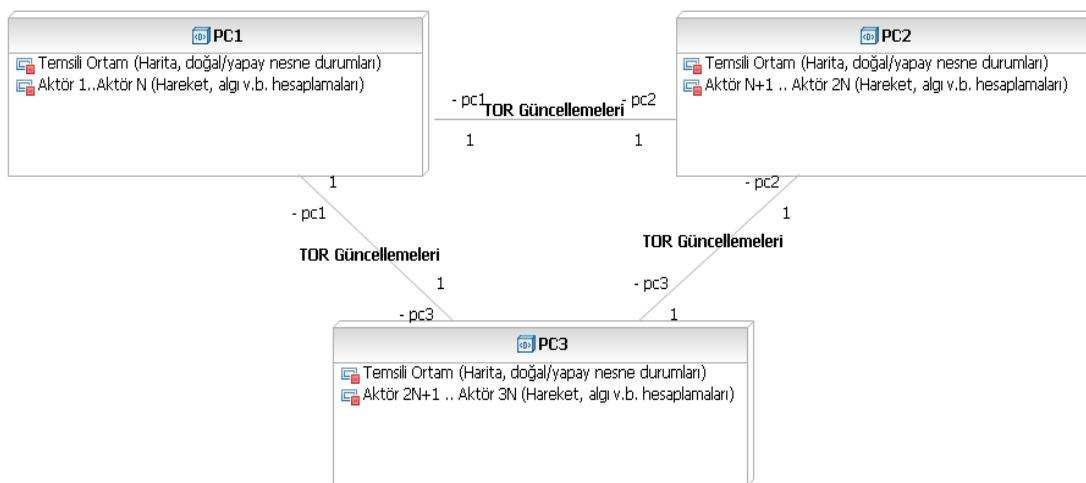
Aktör Tabanlı Dağıtım: Bu yöntem, bir aktörün tüm yeteneklerinin aynı bilgisayar üzerinde hesaplanması çözümünü adreslemektedir. Bu mimaride, aktöre ait yetenek hesaplamlarının sonuçları, bu aktörle etkileşimi bulunan ilgili diğer aktörlere ev sahipliği yapan bilgisayarlara da ağ üzerinden bildirilmektedir. Yetenek tabanlı dağıtım mimarisine benzer şekilde bu çözümde de bir bilgisayar üzerine atanacak aktör sayısı yapılan hesaplamların yoğunluğuna bağlı olarak belirlenmektedir.[6]

Bu çalışmada, HAVE SAN A.Ş. tarafından geliştirilen Müşterek Görev Kuvveti Harekatının Modellenmesi ve Simülasyonu (MGKMOS) projesi kapsamında, optik

algının nasıl gerçekleştiği ve hesaplama yükünün etkin bir şekilde dağıtılması için uygulanan yöntemler açıklanmaktadır.

2. ETMEN BAZINDA DAĞITIK TEMSİLİ ORTAM

Simülasyon etmen ve varlık sayısına göre ölçülebilir bir sistem geliştirilmesi, MGKMOS projesinin temel performans gereksinimlerinden biridir. Bu gereksinimi karşılamak için, algılama, hareketlilik, müdahale etme, hasar alma ve iletişim yapma yeteneklerine sahip olan MGKMOS aktörlerinin, bu yetenekleri kapsamındaki hesaplama yükünün, birden fazla bilgisayar arasında dağıtık bir mimaride paylaşılması hedeflenmiştir. Bu amaçla simülasyon aktörlerinin her biri, dağıtık koşum ortamı içinde yer alan bilgisayarlardan birine atanarak, aktörlerin yukarıda verilen yetenekleri kapsamındaki tüm hesaplamları aktörün atandığı bilgisayarın kaynaklarını kullanılarak yapılması sağlanır. Hesaplama sonuçları, gerekli olması durumunda, diğer bilgisayarlardaki temsili ortam dünya durumunu güncellemek üzere bilgisayarlar arasında dağıtılmaktadır. Bu kapsamda, temsili ortam dünya durumu simülasyonun koştuğu arazi yapısını, bu arazi üzerindeki doğal / yapay nesnelerin durum bilgisi ve konumlarını tutmaktadır. Mimari içerisinde yer alan tüm bilgisayarlar temsili ortam dünya durumunu aynı güncellikte saklamaktadır.[5]



Şekil 1.Temsili Ortamın (TOR) Dağıtılmazı

Şekil 1'den görüldüğü üzere tüm varlıklar bütün bilgisayarlarda çoklanmaktadır. Aktörlerin algı, hareket, vb. kabiliyetlerine ilişkin hesaplamları sadece aktörün atandığı bilgisayar üzerinde yapılmaktadır. Temsili ortamdaki herhangi bir nesnenin durumunda değişim olduğunda bu değişim ilgili temsili ortam tarafından diğer temsili ortamlara yayılanmaktadır. Temsili ortamlar arasındaki bu senkronizasyon yerel alan ağı üzerinden yapılmaktadır.

3. OPTİK ALGI HESAPLAMASI

Etmenin içinde bulunduğu temsili ortam hakkında, etmende durum farkındalığı oluşturan temel yeteneği algılamadır. Algılama yeteneğinin özelleşmiş bir biçimini olan optik algı, MGKMOS projesi kapsamında aşağıdaki sahte kod adımlarına uygun olarak gerçekleşmiştir:

```

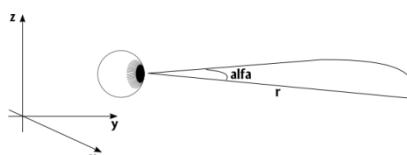
for each etmen1 in algisiHesaplanacakEtmenler do
    for each etmen2 in algilanacakTumNesneler do
        if gorusAlaniTestiYap(etmen1, etmen2) then
            if araziKesisimTestiYap(etmen1, etmen2) then
                if nesneKesisimTestiYap(etmen1, etmen2) then
                    algilanmaOlasiligi := algilanmaOlasiligiHesapla(etmen2)
                    if algilanmaOlasiligi >= ALGILANMA_ESIK_DEGERI then
                        algilanlanlar[i++] = etmen2
                    end if
                end if
            end if
        end if
    end for
end for

```

3.1. Görüş alanı testi

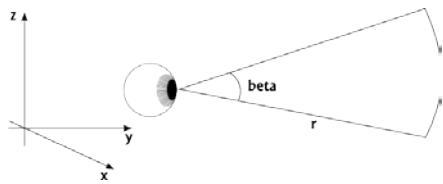
Görüş hattı testi yapılacak nesneleri belirlemek için öncelikle görüş konisi testi yapılacaktır. Görüş konisi yatay ve dikey görüş alanlarının birleşiminden oluşmaktadır.

Yatay görüş alanı, kullanılan algı cihazının kapsadığı yatay açıya ve algı cihazının tespit menzili kadar yarıçapa sahip bir daire parçasıdır. Yatay görüş alanı Şekil 2'de gösterilmiştir. Resimdeki alfa açısı kullanılan algı cihazının kapsadığı yatay açısı, dairenin yarıçapı olan r ise algı cihazının tespit menziliidir.



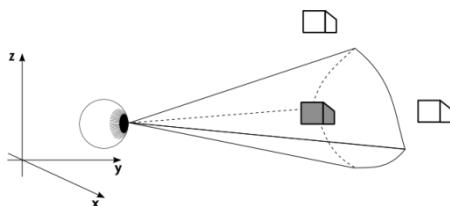
Şekil 2. Yatay görüş alanı

Dikey görüş alanı, kullanılan algı cihazının kapsadığı dikey açıya ve algı cihazının tespit menzili kadar yarıçapa sahip bir daire parçasıdır. Dikey görüş alanını gösteren Şekil 3'te, algı cihazının dikey görüş aralığı beta, tespit menziliyse r olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. Dikey görüş alanı

Görüş konisinin oluşturulduğu Şekil 4'te koninin içinde kalan nesne koyu renkle, dışarıda kalanlar ise açık renkle gösterilmiştir.



Şekil 4. Görüş konisi

3.1.1. Yatay görüş alanı testi

Varlıkların temsili ortam üzerinde bulundukları noktanın koordinatları, belirlenen yatay görüş alanı içinde kalıyorsa, bu varlık için yatay görüş alanı testi başarılıdır.

3.1.2. Dikey görüş alanı testi

Yatay görüş alanı testinden geçen, yani yatay tarama açısı içinde kalan varlıklar için dikey görüş alanı testi yapılmaktadır. Bu varlıkların, temsili ortam üzerinde bulundukları noktanın koordinatları ile algıyı gerçekleştiren varlığın koordinatları arasındaki dikey açı, kullanılan algı cihazının dikey görüş açısı değer aralığında ise, bu test başarılıdır.

3.2. Arazi kesim testi

Algılanan etmen ile algılanacak varlıklar arasında arazi görüş hattının olup olmadığını anlaşılması için, “Milli Müsterek Harekat Alanı Simülasyon Sistemi: Temsili Ortam Standart ve Uygulamaları” (MUHATEM) kütüphanesinin Şekil 5'te yapısı gösterilen izgara tabanlı arazi görüş hattı testi kullanılmıştır.



Şekil 5. MUHATEM profil işini görüntüsü

3.3. Nesne kesişim testi

Nesne kesişim testi hesaplamasında amaç, algılanan etmen ile gözlenen varlık arasında görüş hattını engelleyen başka bir nesnenin varlığını sorgulamaktır. Bu kontrolün yapılmasında kullanılabilecek algoritmaların ikisi İşin-Kutu Kesişimi tabanlı görüş hattı algoritması ve Örtme Sorgusu tabanlı görüş hattı algoritmasıdır.

3.3.1. İşin-kutu kesişimi

İşin-Kutu Kesişimi tabanlı görüş hattı algoritması etmenlerin bakış hatlarının algılanan etmenlerin algılanma noktalarına uzanan bir işin olarak temsil edildiği ve bu işin ile kesişen herhangi bir etmen bulunup bulunmadığı testinin yapıldığı CPU tabanlı bir algoritmadır. Test edilen etmenler performans nedeniyle kutu ile temsil edilmektedir. Tüm etmenler test edildikten sonra işin ile kesişen herhangi bir etmen bulunamaz ise bakılan etmen görüş hattı içerisinde sonucu dönülmektedir. Algoritma adımları aşağıda verilmiştir:

- Algısı hesaplanacak tüm etmenler için:
 - Algılanacak tüm etmenler için:
 - Sorgu işinini oluştur
 - Sorgu işini bakış hattı içerisinde mi kontrolünü yap
 - Engel oluşturan ve algılanan tüm nesneler için “İşin-Kutu Kesişim Testi” yap

3.3.2. Örtme Sorgusu

Örtme Sorgusu (Ing. Occlusion Query) tabanlı görüş hattı algoritması ise etmenlerin bakış hatlarının etmenden çıkan bir prizma olarak temsil edildiği ve bu prizma içerisindeki bakıldığından etmenin görebildiği nesnelerin bakış hattı içerisinde, diğerlerinin ise bakış hattı dışarısında olarak tanımlandığı bir algoritmadır. Etmenin

görebildiği nesnelerin hesaplanması OpenGL gibi bir grafik kütüphanesi kullanılarak off-screen (ekran-dışı) bir alana tüm nesnelerin çizilmesi ve ekrana başarı ile çizilmiş (başka bir etmenin kutusu arkasında kalmamış) nesnelerin bakış hattında diğerlerinin ise bakış hattı dışında kabul edilmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Nesneler ekrana çizildikten sonra algılanan nesneler için yapılan “Çizim başarılı mı?” sorgusuna “Örtme Sorgusu” adı verilmektedir ve bu sorgu sonucunda çizim başarılı mı sonucu yanı sıra “Etmen ne kadar görülebilmektedir?” (“Etmeni görme miktarımın tüm bakış hattına oranı nedir?”) sorusuna da sonuç alınmaktadır. Algoritma tamamen ekran kartı sorguları kullanılarak gerçekleştiği için hiç CPU kullanmayan, tümüyle ekran kartı üzerinde bulunan GPU kullanılarak hesaplanan bir algoritmadır. Etmenlerin temsil edilmesinde kutu, üçgen prizması, vs. gibi primitif nesnelerin kullanılması mümkündür ve performans kaybı olmaksızın her nesne farklı bir primitif ile de temsil edilebilir.[4]

- Algısı hesaplanacak tüm etmenler için:
 - Algılanacak nesneleri çiz
 - Engel oluşturan nesneleri çiz
 - Algılanacak nesneler için “Örtme Sorgusu” cevabını al

3.3.3. Performans Karşılaştırması

Görüş hattı testlerinde kullanılacak iki tip etmen bulunmaktadır. Birinci tip etmenler algılanan etmenler, ikinci tip etmenler ise algıya engel oluşturan fakat algıları hesaplanmayan etmenler olarak sınıflandırılabilir. MGKMOS kapsamında birinci tip etmenler platformlar ikinci tip etmenler ise durağan nesneler olarak düşünülebilir. Görüş hattı hesaplamalarına etki eden birincil faktör bu iki tip etmen grubundan kaç etmen var olduğunu. Yukarıda adımları verilen algoritmaların Big O notasyonuna göre performansları aşağıda verilmiştir. Algılanan ve algılanan nesne sayısı n, algıya engel oluşturan fakat algılanmayan nesne sayısı ise k kabul edilirse:

Örtme Sorgusu tabanlı görüş hattı algoritması performansı:

$$O(n * ((n + k) + n)) \approx O(2n^2 + n * k) \approx O(n^2 + n * k)$$

Işın-Kutu Kesişimi tabanlı görüş hattı algoritması performansı:

$$O(n * (n * (n + k))) \approx O(n^3 + n^2 * k)$$

Big O notasyonlarından çıkarılabilen sonuç bu algoritmaların gerçekleştiriminin bağımsız olarak etmen sayısından nasıl etkileneceleridir. Algoritmaların performanslarına bakıldığından algılanan etmen sayısı 2 katına çıktığında Örtme Sorgusu algoritmasının yaklaşık 4 kat, İşın Kutu Kesişimi algoritmasının ise yaklaşık 8 kat yavaşlayacağını söyleyebiliriz. Aynı şekilde algıya engel olan etmen sayısı 2 katına çıktığında 2 algoritmanın da yaklaşık 2 kat yavaşlayacağı söylenebilir. İşın Kutu Kesişimi algoritması ve Örtme Sorgusu algoritmaları için Tablo 1 ve Tablo

2'de, aktör (n) ve engel (k) sayılarının değişimine göre hesaplama sürelerinin değişimleri verilmiştir.

Tablo 1. İşin-Kutu Kesişimi CPU Tabanlı Görüş Hattı Algoritması Hesaplama Süreleri

İşin-Kutu Kesişimi CPU Tabanlı Görüş Hattı Algoritması Hesaplama Süreleri					
	100 Engel	1000 Engel	5000 Engel	10000 Engel	20000 Engel
100 Aktör	0.87 sn.	3.57 sn.	15.98 sn.	32.03 sn.	65.0 sn.
250 Aktör	7.2 sn.	18.25 sn.	69.45 sn.	135.79 sn.	268.57 sn.
500 Aktör	56.65	95.93 sn.	276.12 sn.	506.06 sn.	979.98 sn.
1000 Aktör	385.65 sn.	497.34 sn.	1026.4 sn.	> 1000 sn.	> 1000 sn.

Tablo 2. Örtme Sorgusu GPU Tabanlı Görüş Hattı Algoritması Hesaplama Süreleri

Örtme Sorgusu GPU Tabanlı Görüş Hattı Algoritması Hesaplama Süreleri					
	100 Engel	1000 Engel	5000 Engel	10000 Engel	20000 Engel
100 Aktör	0.03 sn.	0.03 sn.	0.04 sn.	0.05 sn.	0.07 sn.
250 Aktör	0.07 sn.	0.09 sn.	0.11 sn.	0.125 sn.	0.156 sn.
500 Aktör	0.18 sn.	0.21 sn.	0.25 sn.	0.28 sn.	0.39 sn.
1000 Aktör	0.65 sn.	0.7 sn.	0.78 sn.	0.85 sn.	1.09 sn.

Algoritmalar geliştirilip aynı ortamda koşturulurken hesaplama süreleri ölçüldüğünde elde edilen sonuçlar yukarıda verilmiştir. Burada elde edilen sonuçlar Big(O) notasyonundan elde edilen bulguları doğrulamaktadır. Sonuçlar incelendiğinde “İşin Kutu Kesişimi” algoritmasının Big(O) notasyonundaki n^3 faktörünün ve k'nın n^2 çarpanının yarattığı ciddi performans düşüşünü net bir şekilde görebiliriz. “Örtme Sorgusu” algoritması algılanan nesne sayısından karesel bir düşüş ile etkilenirken “İşin-Kutu Kesişimi” algoritması kübik bir şekilde yavaşlamaktadır bunun yanında “Örtme Sorgusu” algoritması algıya engel olan nesne sayısından lineer bir şekilde bile etkilenmezken “İşin-Kutu Kesişimi” algoritması engel nesne sayısı artışı arttıkça tam olarak lineer bir şekilde yavaşlamaktadır. Performans düşüşleri bir kenara konulduğunda bile aynı etmen ve engel sayılarında “İşin Kutu Kesişimi” algoritması tüm testlerde “Örtme Sorgusu” testlerinden çok daha kötü sonuçlar vermiştir.

Algoritmaların olumlu ve olumsuz yanlarının karşılaştırması Tablo 3 ve Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 3. “Işın-Kutu Kesişimi” CPU Tabanlı Görüş Hattı Algoritması

“Işın-Kutu Kesişimi” CPU Tabanlı Görüş Hattı Algoritması	
Olumlu	Olumsuz
Kolay anlaşılabilir ve geliştirilebilir olması.	En iyi durumda bile “Örtme Sorgusu” tabanlı algoritmadan 30 kat yavaş olması.
CPU üzerinde hesaplandığı için iş parçacığı (İng. thread) kullanımı ile mevcut sistemlerde 2-4 kata kadar hız artışı sağlanabilme potansiyelinin olması.	Algılanan nesne sayısından kübik olarak etkilendiği için nesne sayısı artıkça kabul edilemez bir performans düşüşü yaşaması.

Tablo 4. “Örtme Sorgusu” GPU Tabanlı Görüş Hattı Algoritması Hesaplama Süreleri

“Örtme Sorgusu” GPU Tabanlı Görüş Hattı Algoritması	
Olumlu	Olumsuz
Performans olarak etkin bir algoritma olması.	OpenGL gibi dış bir kütüphaneye bağımlı kalıldığı için geliştirilebilirliğinin daha az olması.
Tamamen GPU’da hesaplanması, CPU’yu boş bırakması.	
Nesneler hakkında sadece göründü / görünmedi değil ne kadar göründüğüne dair de bilgi vermesi.	
Algıya engele olan nesne sayısından lineer’den az, algılanan nesne sayısından kare bir şekilde etkilenmesi.	
Kutular dışında diğer primitif geometrik nesnelerin de kullanılabilirnesine olanak vermesi.	

Yukardaki tablo göz önünde bulundurularak MGKMOS projesinde “Örtme Sorgusu” algoritması kullanılmasına karar verilmiştir.

MGKMOS optik algı modelinin son aşaması olan algılanma olasılığının belirlenmesi konusuna bu çalışmanın kapsamı dışında olduğundan burada değinilmemiştir.

4. SONUÇ

Bu makalede MGKMOS Yazılımı’nda kullanılan dağıtık temsili ortam tasarımları ve optik algı algoritması sunulmuştur. Nesne kesim testi için kullanılması düşünülen CPU ve GPU tabanlı iki algoritma anlatılmış ve kıyaslaması yapılmıştır. [1][2][3]

5. KAYNAKÇA

- [1] Vaughan B.D., Soldier-In-The-Loop Target Acquisition Performance Prediction Through 2001: Integration of Perceptual and Cognitive Models, sayfa 102, 2006.
- [2] http://members.cox.net/ltec/Target_Acquisition_LTS.pdf, sayfa 3.
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Johnson's_Criteria.
- [4] Salomon, B., Govindaraju, N., Sud, A., Gayle, R., Lin, M., Manocha, D., Butler; B., Bauer, M., Rodriguez, A., Eifert, L., Rubel, A., Macedonia, M. (2004): Accelerating Line of Sight Computation Using Graphics Processing Units, 24th Army Science Conference Proceedings, Orlando, Sayfa 5.
- [5] David Scerri , Alexis Drogoul , Sarah Hickmott , Lin Padgham, An architecture for modular distributed simulation with agent-based models, Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: volume 1, May 10-14, 2010, Toronto, Canada.
- [6] Georgios Theodoropoulos and Brian Logan, “A framework for the distributed simulation of agent-based systems,” in Modelling and Simulation: a tool for the next millennium, Proceedings of the 13th European Simulation Multiconference (ESM’99), Helena Szczerbicka, Ed. SCS, Society for Computer Simulation International, June 1999, vol. 1, pp. 58–65, Society for Computer Simulation International.

KARAR DESTEK VE MODELLEME ORTAMI OLARAK 3 BOYUTLU SANAL KÜRE YAZILIMI

Serdar Sultanoğlu ^(a), Özgür Balçı ^(a), Serkan Gazel ^(a)

^(a) ULUSAL CAD VE GIS ÇÖZÜMLERİ A.Ş., Cyberpark, Bilkent, ANKARA,
{serdar.sultanoglu, ozgur.balci, serkan.gazel }@netcad.com.tr

ÖZ

Bu bildiride, karar destek, kavramsal modelleme, benzetim ve görselleştirme amaçları ile kullanılabilecek 3 Boyutlu Sanal Küre Yazılımının geliştirilmesi sırasında elde edilen deneyimler anlatılmaktadır. Bu amaçla Harita Genel Komutanlığı (HGK) için geliştirilen 3 Boyutlu Sanal Küre Yazılımı projesinde elde edilen deneyimler paylaşılmaktadır. Bu projede, HGK bünyesinde bulunan raster, vektör ve yükseklik verilerini sanal küre üzerinde gösterme, kesintisiz 3 boyutlu arazi modeli oluşturup oluşan model üzerinde, Görünürlük Analizi, Kesit Alma, Harekat Planlama gibi işlemleri yapabilme, OGC WMS ve WFS standartlarında veri sunma ve bu standartlarda veri sunan uygulamalardan içerik alma ve Tehdit Analizi, Meteorolojik Analiz, Kayan Harita Sistemi gibi özel ihtiyaçlar için uygulama geliştirme arayüzü elde etme gibi konular gerçekleşmiştir.

Anahtar Kelimeler: 3B, Benzetim, CBS, Sanal Küre, Sayısal Yükseklik Modeli

3D VIRTUAL GLOBE SOFTWARE AS DESICION SUPPORT AND MODELING ENVIRONMENT

ABSTRACT

This paper explains experiences in development of 3D virtual globe software which can be used for decision support, conceptual modeling and simulation and visualization purposes. This software, which is developed for General Command of Mapping, contains solutions such as visualization of raster, vector and elevation data on virtual globe, generation of continuous terrain model and performing visibility analysis, profile generation, operations planning on this model, serving and consuming data compatible to OGC WMS and WFS standards and development of application programming interface for potential future requirements such as meteorological analysis, threat analysis, floating map system.

Keywords: 3D, Digital Elevation Model, GIS, Simulation, Virtual Globe

1. GİRİŞ

3 boyutlu görselleştirme, özellikle arazinin çok önemli bir unsur olduğu askeri alanda, son kullanıcı açısından 2 boyutlu görselleştirmeye oranla daha tatmin edici sonuçlar ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Bu alanda çözüm sunan yazılımlar, günümüzde gittikçe daha fazla alanda kullanılmakta, bu da yeni kullanıcı beklentileri oluşmasına neden olmaktadır. HGK için geliştirilen 3 boyutlu sanal küre yazılımına, Glonet'e, de bu nedenlerden ötürü ihtiyaç duyulmuştur.

HGK tarafından belirlenen gereksinimler, 4 ana başlık üzerinde toplanmıştır. Bunlar aşağıda özetlenmiştir. Bu bildiride, 3 numaralı ileri istemci yazılımı geliştirme sırasında çözülen problemler ve elde edilen deneyimler detaylandırılacak, diğer bileşenlerden bilgilendirme amacı ile söz edilecektir.

Yazılım Bileşenleri:

1. Coğrafi veri sunum yazılımı

OGC standartlarında veri sunan, 250 eş zamanlı isteğe yanıt verebilen, raster, vektör ve yükseklik katmanlarını güvenlik ayarları ile sunan, performans ve kullanım istatistikleri oluşturabilen, web tabanlı sunum yazılımıdır.

2. Basit istemci yazılımı

Web browser üzerinde çalışan, raster ve vektör verileri görüntüleyen ve sorgulayan, katman yönetimi arayüzü bulunan istemci yazılımıdır.

3. İleri istemci yazılımı

Sunucudan aldığı yükseklik verilerini kullanarak sanal küre üzerinde kesintisiz arazi modeli oluşturan, bu model üzerinde sunucudan gelen raster verileri doku olarak kaplayan ve vektör verileri gösteren temel yazılım bileşenidir. OGC WMS ve WFS standartlarındaki verilere ek olarak, KML/KMZ ve SHP formatındaki verileri destekler, katman yönetimi desteği sunar. Bunların yanında ölçümleme, hareket planı oluşturma, kesit alma, görüş analizi yapma işlevlerine sahiptir ve tüm bu yetenekleri aynı zamanda API olarak da sunar.

4. Uygulama geliştirme arayüzü

Sunucu ve istemci işlevsellliğini API olarak sunan, C++, C#, COM destekli tüm dillerde programlanabilen, yeni komutlar, menüler ve analizler ekleme, kullanıcı arayüzlerinde değişiklik yapma gibi gereksinimleri karşılan uygulama geliştirme kütüphanesidir.

2. COĞRAFİ SUNUM YAZILIMI

Coğrafi Sunum Yazılımı gereksinimlerinin birçoğu Netgis Server üzerinde var olduğu için, sıfırdan bir yazılım geliştirilmemiştir. Sadece, yükseklik verilerinin sunumu için Netgis Server'a eklenti yapılması gerekmıştır.

Yükseklik verilerinin sunumu konusunda geliştirilmesi gereken çözüm için temel gereksinimlerin en önemlileri; eş zamanlı 250 istemci desteğini sağlayacak ölçüde yüksek performans ile verilerin sunulabilmesi, kurumun elinde bulunan STRM, DTED gibi veri türlerinin desteklenmesidir. Bu gereksinimleri karşılamak için kullanılacak çözüm yükseklik verilerinin önceden karolar halinde oluşturup sunulmasına dayanmaktadır. Bu çözüm, web sunucunun işlem yükünü azalttığı için sunum performansının en üst seviyeye çıkmasını sağlamaktadır. Yapılan testlerde sistemin 10 saat süre ile 250 eş zamanlı isteğe yanıt verdiği gözlenmiştir.

3. BASIT İSTEMCİ YAZILIMI

Basit istemci gereksinimleri de Netgis Server tarafından karşılandığı için bu bileşen için bir geliştirme yapılmamıştır.

4. İLERİ İSTEMCİ YAZILIMI

İleri istemci 3 boyutlu sanal küre olması itibarı ile en önemli yazılım bileşenidir. Bu bileşende teknik karmaşıklık seviyesi yüksek birçok probleme çözüm geliştirilmeye çalışılmıştır. Aşağıda bu konuların detayları paylaşılmaktadır.

4.1. Arazi Modeli Oluşturma

Arazi modeli, askerî bir harekât için vazgeçilmez bir unsur olan arazinin kullanıcılarla basit ve etkili biçimde sunulabilmesini sağlamaktadır. Bu modeli etkin bir yöntemle oluşturma çözülmesi gereken en temel problemlerden bir tanesidir.

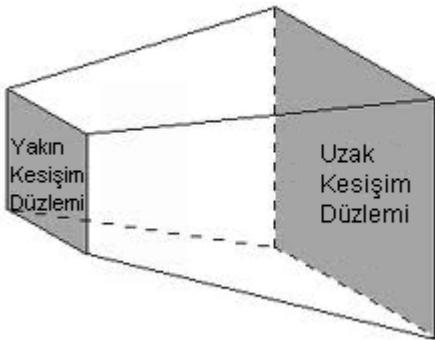
Bir grid şeklinde düşünülebilcek yükseklik verisini arazi görselleştirmek için kullanmadan önce yüzeylere dönüştürmek gerekmektedir. Genelde bu, her üç noktaya karşılık gelen yükseklik verisinden bir üçgen oluşturarak yapılır. Bu işleme üçgenleme (triangulation) denir. Üçgen model ile arazi modellenebilir ancak tüm dünyanın yükseklik verisinden üçgen model oluşturmak ve bunu görselleştirmek uygulanabilir bir yöntem değildir. Verilerin gösterim yapılan ölçüye göre uygun detaydaki halinin kullanılması ve bu hale kabul edilebilir sürede getirilebilmesi gerekmektedir. Bu durum dörtlü ağaç yapısı (Şekil-la) kullanmayı gerekli kılmıştır. [1]



Şekil 1 Dörtlü Ağacı

Dörtlü ağaç yapısında her bir elemanın temsil ettiği karesel alan, ait olunan üst seviye elemanın alanının $\frac{1}{4}$ üne karşılık gelir (Şekil-1b). Arazi bu şekilde her seferinde 4'e bölünerek ağaç yapısı üzerine yerleştirilirken, bölünmenin sonlandırılması için elde edilmek istenen detay seviyesi ve görülen bölge içerisinde kalan alan dikkate alınır. Burada kritik konu, modelin sürekliliğinin sağlanması ve komşular arasında boşlukların oluşmaması için, alt seviye elemanların uygun şekilde üçgenlere ayrılması ve ekrana çizilmesi gerektidir. Kullanılan algoritma, ağaç oluşturulurken, alt seviye elemanların komşularıyla aralarındaki detay seviye farkını belirli bir bölge için bir alt veya bir üst seviye ile sınırlandırır. Belirlenen bölge dışında en hızlı bozulma sağlanarak etkin alanda daha fazla üçgen modellenebilmesi sağlanır. Elde edilen en alt seviye elemanlar, temsil ettikleri kareleri köşegenlerinden bölmek suretiyle en az 4 ayrı üçgen, ya da komşu düğüm detay seviyesi göz önüne alınarak, bu üçgenlerin bazılarının veya hepsinin tekrar bölünmesiyle en fazla 32 ayrı üçgen olarak ekrana çizilir ve 5x5 noktadan oluşur. (Şekil-1c). Böylece poligon sayısı azaltılıp performans artışı sağlanırken, ekranda görülen arazi yüzeyi üzerinde bozulma olmadan detay seviyesi yüksek tutulabilmektedir. [2]

Dörtlü ağaç yapısındaki en büyük problemlerden bir tanesi bölünmeleri kontrol altına almaktır. Daha fazla yükseklik detayını daha az sistem kaynağı kullanarak göstermek için görüş piramidi (Şekil 2) dışarısında kalan karoları daha fazla bölmemek ilk tercih edilen yöntem olmuştur. Bu yöntem görüş piramidi dışında bir bölgeye yönelikinde hazır olmayan yükseklik ve raster verileri nedeniyle sürekliliğin kaybolmasına neden olmuştur. Kullanıcıları çok fazla rahatsız etmesine rağmen sürekliliği daha gerçekçi hale getirmek için görüş piramidi sınırlarına doğrudan bağlı olmayan farklı algoritmalar uygulanmıştır. İzlenen yöntemde izlenilmekte olan bölgede her seviye için bir küre oluşturulmaktadır. Bölmeye çalışılan karo bu bölge içerisinde ise daha alt seviyelere bölünmektedir. Bu ekranda seviye sayısı kadar görüş piramidi olması şeklinde düşünülebilir. Bu yöntemle izlenmekte olan bölge en fazla üçgeni kullanarak gösterilebilmektedir. [3]



Şekil 2 Görüş Piramidi

Bir diğer problem ise sunucu üzerinde yükseklik ve raster verilerin ne kadar detaylandığı, dörtlü ağaçın bölünmesinin ne zaman duracağı konusudur. Başlangıçta OGC karo servis standartlarında da var olan her bölge için belirlenen seviye meta verilerinin kullanılması tercih edilmiştir. Raster yükseklik verisi sunan diğer sunucular için bu yöntemi desteklemeye devam edilmektedir. Gerçekte özellikle raster veriler düzensiz bir şekilde detaylanmaktadır. Bu detaylanmayı metaveriler ile elde etme, sunucuya sorma, sunucudan verisi bulunmayan karo için bilgi isteme gibi ağ trafigini artıran yöntemler yerine istemciye karo/karolar için gönderilen verilerde bölünecek karolar için meta veri kullanmak uygun görülmüştür.

4.2. Karo Verilerin Hazırlanması

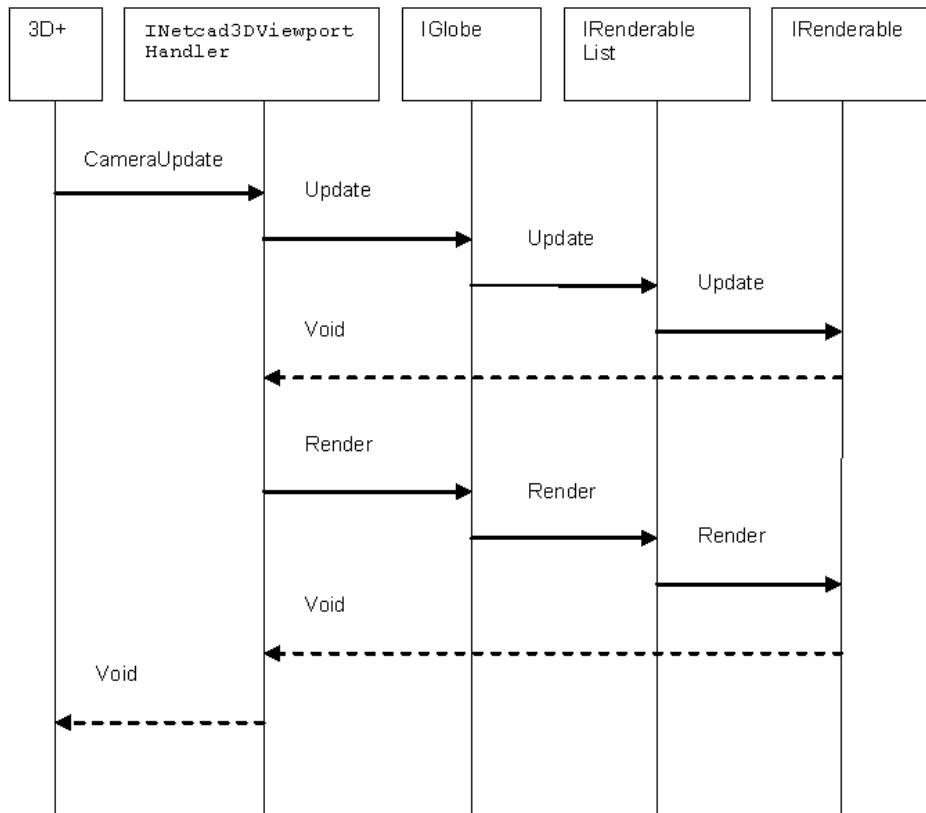
Karoları gerçek zamanlı oluşturmak sunucu yükünü artıracaktır. Bu nedenle yükseklik ve raster verilere ait karoları önceden hazırlama yöntemi tercih edilmiştir.

Yükseklik verilerinin dörtlü ağaç üzerindeki her seviye için hazırlanması yerine bir kaç seviye için büyütülmüş karolar kullanılması sağlanmıştır. Bu şekilde, yapılan indirme isteği sayısını optimize edilerek performans artışı elde edilmiştir.

Raster verilerin karolarının her seviye için hazırlanması tercih edilmiştir. Ana katman için hazırlanan raster karolar bir alt seviyeye geçiş için veri bulunup bulunmadığına ait metaveriyi içerecek şekilde hazırlanmıştır.

4.3. Temel Akış Diyagramı

Uygulama Netcad 3D+ modülü üzerinde geliştirilmiştir. API üzerinde kullanımı üst seviyede tutmak için merkezde küre katmanını yönetmeyi sağlayan IGlobe nesnesi gerçeklenmiştir. Bu nesne 3D+ üzerindeki olayları yakalayıp çizilecek katmanlara olayları bildirmek ile görevlendirilmiştir. Çizim amacı ile kullanan katmanlar için IGlobeRenderable arayüzü hazırlanmıştır. Bu mimari, farklı katmanların farklı yöntemler ile gerçeklenmesine olanak sağlamaktadır. Genel akış aşağıda görülebilir. (Şekil 3)



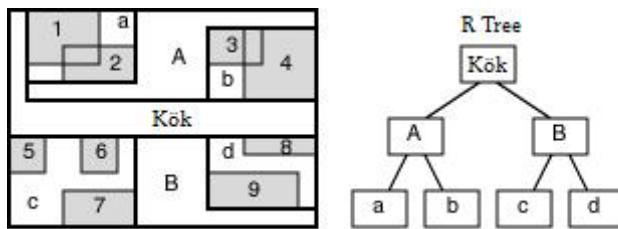
Şekil 3 Temel İş Akışı

4.4. Vektörlerin Gösterilmesi ve Araziye Uydurulması

Birçok uygulamada vektör verilen araziye tam olarak uydurulmamakta, vektör veri üzerinde alınan belirli örnekler araziye uydurularak modellenmektedir. Belirli örnekler alarak modelleme istemci performansını artırmakta, fakat vektör veriler kaba bir modelleme yapılmasına yol açmaktadır. Bu nedenle bu projede görüntü kalitesi için arazi üzerindeki her bir üçgen ile kesişimleri hesaplayan yöntemler sunulmuştur.[4] Ayrıca performansı ön planda tutulan verilerde sıkça kullanılan belirli örneklerin araziye uydurulması tercih edilmiştir.

4.5. Etiketleme

Dörtlü ağaç üzerinden elde edilen etiket verileri sayıca oldukça fazla olabilmektedir. Bu etiketleri belirli bir öncelik ve mesafe sırasına göre süzerek göstermek performans artırmak için kaçınılmazdır. Bu sıralama ve süzme işlemleri için RTree kullanılmıştır. RTree, BTree ailesinden gelen ve konumsal nesneleri indekslemede kullanılan dengeli bir ağaç yapısıdır. İndekslemede nesneleri çevreleyen dikdörtgenler kullanılır ve sorgulamada önemli bir performans kazanımı sağlanır. (Şekil 4)



Şekil 4 R-Tree

Süzme işlemi ne kadar performanslı olursa olsun asıl performans kaybı etiketlerin gösterilmesi sırasında ortaya çıkmaktadır. Etiketleri üçgenlenmiş vektörler olarak göstermek veya platformun sağladığı font desteğini kullanmak istenen performansa ulaşmayı sağlamamıştır. Bu nedenle bitmap font kullanımı tercih edilmiştir. Bu yöntemle her bir karakter tek bir bitmap üzerine konumu bilinen bir alanda yer almaktadır. Bitmap doku (texture) olarak belleğe alınıp etiketler listeler kullanılarak gösterilmektedir. [5]

4.6. Kullanıcı Arayüzleri ve Çok Kanallı Programlama (Multithreading)

Küre uygulamasında tüm yükseklik ve raster verileri istemcide olsa dahi modeli çizim (render) sırasında oluşturmak, ağacın dallanmasını aynı kanalda çalışan bir metot üzerinde tamamlamak kullanıcı arayüzünde beklemelere neden olacaktır. Bu nedenle verinin sunucudan indirilmesi, dörtlü ağacın detaylanması, üçgen modelin hazırlanması, raster verinin ve yükseklik verisinin belleğe alınması, işlenmesi gibi zaman alan işlemler bağımsız kanallar üzerinde yapılmıştır. Bu kanalların önceliği çizim işleminin yapıldığı kanaldan daha düşüktür. Bu sayede kullanıcı hazır olan veriyi herhangi bir takılma olmadan görebilmektedir.

Çok kanallı programlama birden fazla kanalın aynı anda aynı veriye ulaşmasına olanak verir. Bu durum bir kanal veriyi güncellemeye çalışmadığı sürece faydalıdır. Küre uygulamasında veriler ve detaylar sürekli değişmektedir. Bir kanalın artık gerekmeyen bir karo için çalışması kritik olan işlemci kaynağını boş kullanmaya neden olacaktır. Çizim için hazır bir verinin arazi sürekliliği için güncellenmesi ile çizilmesi aynı sırada yapılrsa uygulama yarı doğru bir çizim yapabilecek veya artık bellekte olmayan bir üçgeni çizmeye çalışıp hata oluşmasına neden olabilecektir.

Artık üzerinde çalışılması gerekmeyen veriler için kanalın iptal edilmesi, sistem kaynaklarının aşılması neden olacak kadar kanalın oluşturulması için IThreadManager hazırlanıp gerçeklenmiştir. IThreadManager ile IGlobe üzerindeki hiç bir katmanın ayrıca bir kanal kodlaması yapması gerekmektedir.

Aynı verinin birden fazla kanal üzerinde kullanılmasına engel olmak için karo sınıfları ile birlikte kilitlenebilecek nesneler sunulmuştur. Veri değiştiren veya veri değişiminde hata oluşabilecek parçalar bu nesneleri kilitleyerek farklı bir kanalın veriye erişimine

engel olur. Eğer nesneler uzun süre kilitlenirse çizim sırasında nesneye ulaşılamayacağından takılmalar oluşacaktır. Nesneler mümkün olan en kısa sürede kilitli tutulmalıdır.

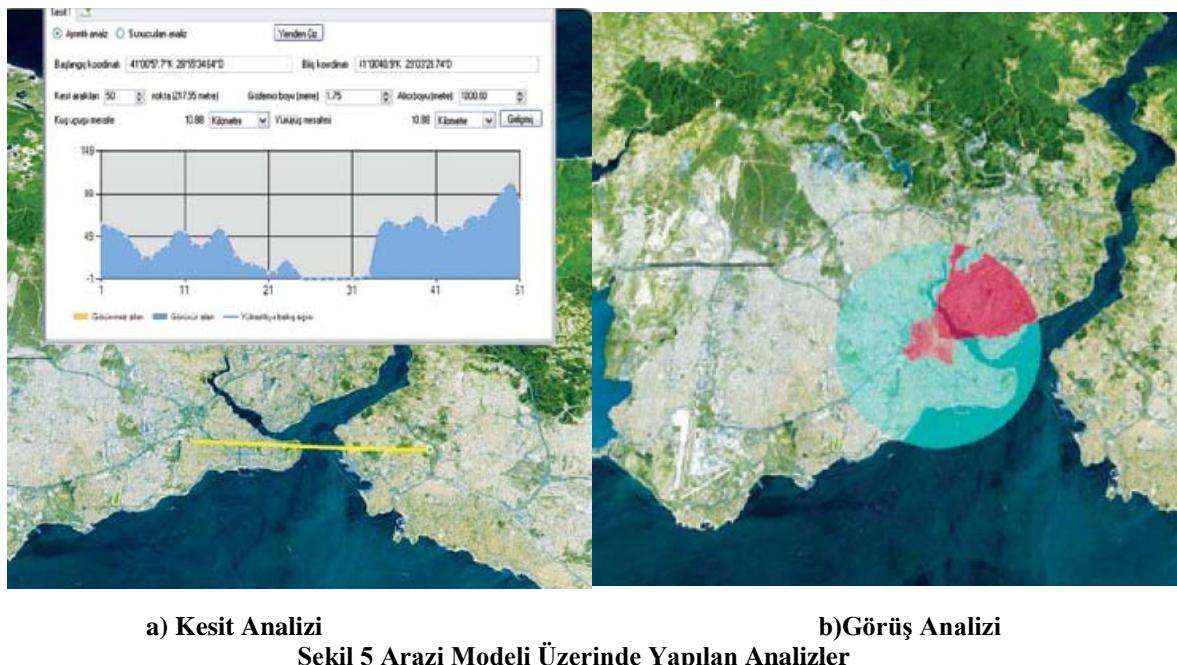
4.7. Birlikte çalışabilirlik

Sunulan verilerin başka sistemler tarafından da kullanılabilmesi ve başka sistemler tarafından sunulan verilerin bu sistemde kullanılabilmesi bu projedeki birlikte çalışabilirlik hedeflerini özetlemektedir. Projedeki hem sunucu hem de istemci yazılımları aşağıdaki tablodaki standart ve verileri desteklemektedir.

OGC WMS	Web Map Service (Web Harita Servisi) Open Geospatial Consortium tarafından tanımlanan, haritaları web üzerinden imaj olarak sunma konusundaki standarttır.
OGC WFS	Web Feature Service (Web Özellik Servisi) Open Geospatial Consortium tarafından tanımlanan, web üzerinden haritaları vektör ve öznitelik kümesi paylaşmaya ve sorgulamaya imkan veren standarttır.
KML	Google tarafından geliştirilen, daha sonra OGC standarı olmuş, coğrafi verileri iki ve üç boyutlu görüntüleyicilerde görüntülenebilecek şekilde tanımlayan dosya formatıdır.
SHP	Esri tarafından geliştirilen popüler konumsal veri formatıdır.
Oracle Spatial	Oracle veritabanında tutulan, konumsal bilgileri ve yer bilgilerini sorgulama, sunma, güncelleme imkanı veren veri şemasıdır.
SQL Server 2008	Microsoft SQL Server veritabanında tutulan, konumsal bilgileri ve yer bilgilerini sorgulama, sunma, güncelleme imkanı veren veri şemasıdır.
Postgis	PosgreSQL veritabanında tutulan, konumsal bilgileri ve yer bilgilerini sorgulama, sunma, güncelleme imkanı veren veri şemasıdır.

4.8. Analizler

Arazinin 3 boyutlu olarak görselleştirilmesi arazinin tanınması için yeterli olsa da bazı durumlarda daha kesin sonuçlara gerek duyulmaktadır. Örneğin, iki nokta arasındaki arazi kesiti üzerinden belli bir rota üzerindeki maksimum eğimin öğrenilmesi gerekebilir (Şekil 5-a) ya da bir gözlemcinin arazi üzerinde gördüğü ve göremediği noktalar kesin olarak görülmek istenebilir. (Şekil 5-b)



a) Kesit Analizi

b) Görüş Analizi

Şekil 5 Arazi Modeli Üzerinde Yapılan Analizler

Bu analizler, sisteme modül olarak eklenmiştir. Her iki analiz, Glonet API üzerinden yükseklik verilerine erişmekte, kullanıcıdan alınan noktalara ve kriterlere göre yükseklik verisinden örnekler almaktadır.

5. UYGULAMA GELİŞTİRME ARAYÜZÜ

Glonet uygulama geliştirme arayüzü tasarlanırken, yazılımın kullanıcı gereksinimleri doğrultusunda özelleştirilebilmesini sağlayan bir API sunmanın yanında, modül desteği olması da sağlanması gereken koşul olarak dikkate alınmıştır

Yazılım API'si, programın tüm yeteneklerinin uygulama geliştiriciler tarafından kullanılabilmesini, aynı zamanda da tüm özelliklerin özelleştirilebilmesini hatta baştan yazılabılmasını sağlayacak detayda hazırlanmıştır Bu konu, programın açık ve birlikte çalışabilir olmasının ön koşullarından biri olarak görüldü. Bu API üzerinden yazılım geliştiren kişi, programın arayüzüne değiştirebilecek, çizimlerin QuadTree den farklı bir yapı üzerinden yönetilmesini sağlayabilecek, görüş analizi algoritmasını baştan yazabilecek ya da yeni analizler ekleyebilecektir.

Modüler yapı sayesinde Glonet'e çalışma zamanında yeni modüller yüklenebilir hale gelinmiştir. Bu modüller de tüm API'ye erişebilmektedir.

6. SONUÇ

İstemci üzerinde mümkün olan en az veri ile çalışmak performansı artıracak, ağ trafiğini azaltacaktır. Model hazırlama, veri indirme, çizim gibi işlemlerin eş zamanlı yapılması kullanıcı açısından sürekliliği ve gerçek zaman hissini sağlamak için gereklidir. Gerçekçi görüntüler oluşturmak CPU yükünü artıracak, uygulamanın yavaş çalışmasına neden olacaktır. Donanım destekliyorsa işlem yükünün bir kısmını Shader gibi teknolojiler ile GPU'ya yüklemek kullanıcı açısından daha seri uygulamalar hazırlanabilmesine olanak verecektir. Küre modelleme sırasında dörtlü ağaçın detaylanması performans açısından en kritik konu olsa da tüm bileşenlerin işlemci üzerinde bir yük oluşturacağı dikkate alınarak uygulama geliştirilmeli, mümkün yerlerde işlem yükünün bir kısmı grafik kartı ile paylaşılmalıdır. Bu bize çok düşük donanımlı sistemlerde çalışma olanağı sağlar. Ayrıca yüksek donanımlı sistemlerde daha gerçekçi görüntüler elde edilebilmesine de olanak verir.

7. KAYNAKÇA

- [1] Selçuk SÜMENGEN, Selim BALCISOY (2004), Hava ve Kara Araç Gruplarının Detaylı Arazi Verisi Üzerinde Gerçek Zamanlı Simülasyonu
- [2] Willem H. de Boer (2000), Fast Terrain Rendering Using Geometrical MipMapping
- [3] Andreas Örgen (2000), Continuous Level of Detail In Real-Time Terrain Rendering
- [4] Christian Dick, Jens Krüger, and Rüdiger Westermann (2009), GPU Ray-Casting for Scalable Terrain Rendering
- [5] Steve Baker (2002), Fast Text in OpenGL

ARAÇ DİNAMIĞİ MODELLENMESİ, SİMÜLASYONU ve GÖRSELLEŞTİRİLMESİ

Engin FIRAT^(a), Vahap Oğuz TOKMAK^(b), Veysi İŞLER^(c)

^(a) SİMSOFT Bilgisayar Teknolojileri LTD. ŞTİ., ODTÜ Teknokent SATGEB Bölge
Ortak Bina 1. Kat AR-GE Ofisi, engin.firat@simsoft.com.tr

^(b) SİMSOFT Bilgisayar Teknolojileri LTD. ŞTİ., ODTÜ Teknokent SATGEB Bölge
Ortak Bina 1. Kat AR-GE Ofisi, oguz.tokmak @simsoft.com.tr

^(c) ODTÜ Bilgisayar Mühendisliği, ODTÜ Bilgisayar Mühendisliği Bölümü B208,
veysi@metu.edu.tr

ÖZ

Bu bildiride tekerlekli araçların fiziksel olarak modellenmesi, simülasyonu ve görselleştirilmesi amacıyla geliştirilen yazılım sunulmaktadır. Fiziksel modelleme, bir aracın sürüs dinamiğine etki eden bütün alt sistemlerin modellenmesini kapsar. Buna göre, sürüs hattındaki motor, debriyaj, dişli kutusu, diferansiyel gibi alt sistemlerin birer kapalı kutu şeklinde fiziksel modellenmesi yapılmaktadır. Bunlara ek olarak, aracın lastik ve tekerlek modelleri, direksiyon kutusu modeli, fren modelleri ve aerodinamik özellikleri sistemde bulunmaktadır. Kullanıcılar, sisteme girecekleri parametre değerleriyle modellemek istedikleri araçları şekillendirebileceklerdir. Örneğin, kullanıcı araç boyutlarını belirleyip, gövde üzerinde istediği yerlere farklı lastiklere sahip tekerlekleri yerleştirip, istenilen tekerlekleri güç tekerliği olarak işaretleyip, sürüs hattındaki bileşenlere uygun değerleri verip, farklı direksiyon kutusu modelleri ve fren modelleri seçerek kendi amaçlarına uygun aracı oluşturabilecektir. Özett olarak kullanıcı tak çıkar mantığı ile farklı bileşenleri şekillendirerek kendi aracını oluşturacaktır. Bu çalışmada, modellenen sistemin incelenmesi, doğrulanması ve geçerlenmesi amacıyla simülasyon anında parametre değerlerinin aldığı değerler etkileşimli bir ara yüz üzerinde görselleştirilmektedir. Sistem içerisinde fizik kütüphanesi olarak Nvidia PhysX, görselleştirme ve ara yüz için ise OpenGL ve QT kütüphanelerinin kullanılması öngörlülmüştür. Yazılımın gelecekte simülatör sistemlerine entegre edilebilmesi, simülatör sistemlerinin fiziksel araç dinamiği hesaplarını üstlenebilmesi hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: araç dinamiği, araç sürüs hattı, lastik modelleri, modelleme ve simülasyon

MODELLING, SIMULATION and VISUALIZATION of VEHICLE DYNAMICS

ABSTRACT

In this paper, a software which is aimed for physical modeling, simulation and visualization of a vehicle is presented. A physical modeling of a vehicle consists of modeling all the components of a vehicle which affects vehicle dynamics. Hence components called engine, clutch, gear-box, differential is modelled in the system. Moreover, tire and wheel models, steering wheel box models, brake models and aerodynamic models of vehicle are implemented in the system. Users of the system can give the required parameters as inputs to the system to form the vehicle that they want to use. For example, user can set the dimensions of the body of the vehicle, put wheels that have different tire models to the pre-determined positions, and sign desired wheels as tractive wheels. Moreover they can give parameters to the components of the driveline, set different models for steering wheel box and brakes in order to form the vehicle that is in the frame of user requests. In summary, users can create their own vehicles with shaping different components by the logic of plug-and-pop. In the system, to examine, verify and validate the system a graphical user interface is prepared. In the system some third party libraries are used to develop some features. In the system, Nvidia PhysX is used as physics engine, QT is used to implement graphical user interfaces and OpenGL is used to render the physical scene. In the future, it is thought that, the software can be built into the simulator systems and can handle the physical calculations of vehicles.

Keywords: modelling and simulation, tire models, vehicle driveline, vehicle dynamics

1. GİRİŞ

Günümüzde simülatörler hayatın hemen hemen her noktasında karşımıza çıkmaktadırlar. Özellikle çeşitli araçları, kendi amaçları doğrultusunda çokça kullanan kurum ve kuruluşlar, personellerinin eğitimlerini artık simülatörler yardımıyla yapmaktadır. Simülatör kullanımı, kurumların maddi açıdan büyük tasarruflar yapabilmesini sağlamaktadır. Ayrıca eğitimlerde ve tatbikatlarda hatalara bağlı kayıpların önüne geçilebilmektedir.

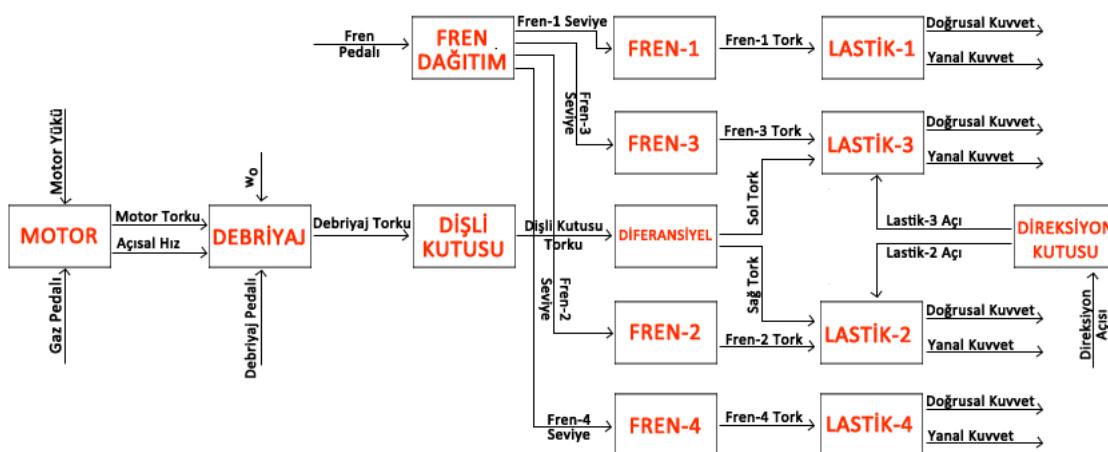
Hayatımızda tekerlekli araçların yeri çok büyüktür. Endüstride, askeri alanda ve gündelik yaşamda tekerlekli araçların kullanım alanlarına çokça rastlamaktayız. Dolayısıyla günümüzde kullanılan veya kullanılması amaçlanan simülatörlerin çoğunda araç dinamiği modellenmesi ve simülasyonu yapılması ihtiyacı duyulmaktadır. Bu nedenle simülatörlerde araç dinamiği hesaplarını yapabilen ve kullanıcıya araçları

dilediği gibi şekillendirebilme imkânı verebilen üçüncü parti bir yazılım kütüphanesine ihtiyaç bulunmaktadır.

Sistem modüler şekilde yapılacaktır. Yani fiziksel modeller, modüller şeklinde tak-çıkar mantığı çerçevesinde araç modeline eklenip çıkarılabilcektir. Böylece kullanıcısı kullanmak veya testini yapmak istediği aracı oluşturup, gerçek zamanlı sürebilecektir.

2. ARACIN FİZİKSEL MODELLENMESİ

Aracın fiziksel modellenmesi ile anlatılmak istenen araç dinamiğine etki edecek bütün bileşenlerin modellenmesidir. Literatürde araç fiziksel modelleriyle ilgili çok daha ayrıntılı ve karmaşık bilgiler olsa da bu sistemde tüm bu fiziksel modeller olabildiğince basitleştirilmiştir. Çünkü sistem gerçek zamanlı çalışmak zorundadır ve günümüz teknolojisi karmaşık araç fiziği modellerinin gerçek zamanlı gerçekleştirilemesine izin vermemektedir.



Şekil 1. Sistem Akış Diyagramı

Daha önceden de bahsedildiği gibi araçtaki parçaların fiziksel modelleri, parçalar sanki birer kara kutuymuş gibi modellenecektir. Bundan dolayı, her bir modülün birbiriyle olan iletişimini ve bağlantıları önem taşımaktadır. Kullanıcının bu parçalar arasındaki bilgi akışını görebilmesi sistemin incelenmesi, doğrulanması ve geçerlenmesi adına önem arz etmektedir. Sistemde farklı parçaların birbirlerine bağlanışları, parçaların sahip olduğu girdi çıktı değerleri ve sistem akış hattı Şekil-1'de görülebilir.

Araç modeli oluşturulmasında araca etki edecek kuvvetler ile aracın çeşitli parçalarının fiziksel modelleri, modüller halinde oluşturulacaktır. Sistemde şu parçaların modellemesi yapılacaktır: Motor, Debriyaj, Vites Kutusu, Diferansiyel, Tekerlek, Fren Dağıtım Sistemi, Fren, Direksiyon Kutusu.

2.1. Motor

Motor modellenmesi için iki tane yol bulunmaktadır. Birinci model parametrik denklemleri kullanarak, motor çıkış torkunun hesaplanmasıdır. İkinci yol ise veri dizileri (look-up table) ile gaz pedali ve motor açısal hızı argümanları ile motorun çıkış torkunun tablodan okunmasıdır [1].

Sistemde motorun çıkış torklarının bulunabilmesi için iki tane veri dizisi kullanılmıştır. Birinci veri dizisinde gaz pedali pozisyonuna karşılık gelen kelebek açılığı (throttle opening) değeri bulunabilir. İkinci veri dizisinde ise motor açısal hızı ve kelebek açılığı değerlerine karşılık gelen, motor çıkış torku bulunmaktadır. Modelimizde, her bir simülasyon karesinde, önce birinci veri dizisinden gaz pedali pozisyonuna karşılık gelen kelebek açılığı bulunup, daha sonra ikinci veri dizisine kelebek açılığı ve motor açısal hızı girdi olarak verilerek, motorun çıkış torku hesaplanır.

Motorun net çıkış torku bulunduktan sonra aşağıdaki birinci dereceden diferansiyel denklem çözüлerek her bir simülasyon karesinde motorun açısal hızındaki artış hesaplanır (2.1.1) [1].

$$I_e \dot{w}_e = \tau_{net} - \tau_{load} \quad (2.1.1)$$

$$w_t = w_{t-1} + \dot{w}_e dt \quad (2.1.2)$$

Yukarıda da bahsedildiği gibi bu denklem her bir simülasyon diliminde çözüлerek bir sonraki dilimde motorun hangi açısal hız değerine sahip olacağı bulunur. Bu değere göre bir sonraki simülasyon diliminde motorun sağlayabileceği net tork veri dizileri üzerinde uygun operasyonlarla elde edilebilir.

2.2. Debriyaj

Yukarıda da bahsedildiği gibi, içten yanmalı motorlar belirli bir açısal hızın altında çalışmazlar. Bundan dolayı araçları durdurma ve kaldırma manevraları için ek bir sisteme ihtiyaç duyulmuştur. Sistemde bu durum için debriyaj sistemi kullanılmıştır [1].

Debriyaj basitçe motorla vites kutusu arasına konumlanmış iki tane diskten oluşan bir sistem olarak düşünülebilir. Debriyaj pedali seviyesine göre bu sistem, motordan gelen hareketi vites kutusuna doğru belirli bir oranda aktarır veya aktarmaz. Bu sayede araç durduğu zaman debriyaj ile motor hareketi aktarma organlarına iletmez, böylelikle motorun çalışmayaçağrı açısal hızlara düşmesi engellenir.

Debriyajın çıkış torklarını bulabilmek için veri dizilerinden faydalılmıştır [2]. Veri dizisine slip girdi olarak verilir ve çıktı olarak da debriyajın aktaracağı tork alınır. slip şu şekilde hesaplanır:

$$\text{slip} = \text{engine} - \omega_0 \quad (2.2.1)$$

Burada, ω_0 debriyajın ikinci diskindeki açısal hızı, engine ise motordan gelen açısal hızı yani debriyajın ilk diskinin açısal hızıdır.

2.3. Vites Kutusu

İçten yanmalı motorlar, belirli bir maksimum açısal hıza kadar çıkabilmektedir, buda araç hızına bir üst limit konulması demektir. Bu durumu aşabilmek için vites kutusu mekanizması geliştirilmiştir. Vites kutusu mekanizması, bizim farklı dişli oranları seçerek, araç hareketine uygun motor açısal hızlarında aracı sürebilmemizi sağlar.

Vites kutusuna gelen tork değeri ve açısal hız, vites kutusunda şekillendirilerek diferansiyele doğru gönderilir. Bu aktarım sırasında aşağıdaki matematiksel modeller kullanılır [3]:

$$\tau_{out} = \tau_{in} \cdot \rho_i \cdot \eta_{gear-box(i)} \quad (2.3.1)$$

$$\omega_{out} = \omega_{in} \cdot \frac{1}{\rho_i} \quad (2.3.2)$$

Bu matematiksel modele göre sistemimizde vites kutusunun simülasyonu yapılmıştır. Farklı araç tiplerine göre farklı vites kutuları, uygun dişli oranları ve verimlilik değerleriyle, sisteme entegre edilebilir.

2.4. Diferansiyel

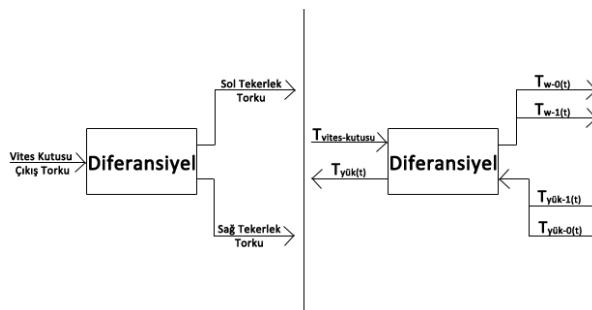
Diferansiyel aktarma organlarının sonuncusudur. Buradan geçen dönme hareketi direk olarak tekerleklerde aktarılır. Diferansiyel sabit bir dişli oranına sahiptir. Diferansiyel araç tekerleklerinin farklı hızlarda dönebilmesine izin verirken, araç lastiklerinde eşit çekiş kuvvetlerinin oluşmasını sağlar.

Diferansiyel aşağıdaki matematiksel modellere göre modellenebilir:

$$\tau_{wheel-i} = \tau_{in} \cdot \rho_{differential} \cdot \eta_{differential} \cdot \frac{1}{2} \quad (2.4.1)$$

$$w_{in} = \rho_{differential} \cdot \frac{(w_{left} + w_{right})}{2} \quad (2.4.2)$$

Diferansiyel modeli ve onun zamana bağlı akışı Şekil-2'de görülebilir.



Şekil 2. Diferansiyel Modeli ve Zamana Bağlı Değişimini

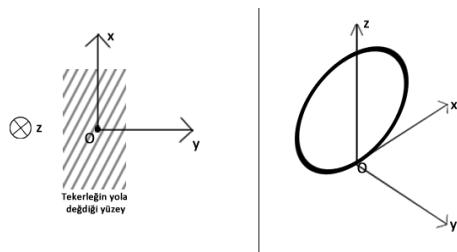
2.5. Tekerlek

Tekerlekler aslında sistemin en önemli unsurlarıdır. Tekerlekler üzerinde tanımlanmış lastik modelleri, motordan gelen torkun etkisiyle, çekiş için gerekli kuvvetleri üretir.

Bununla birlikte direksiyon hareketleri ile de dönüş için gerekli olan yanal kuvvetler elde edilir.

Lastiklerin ürettiği kuvvetlerle ilgili anlatımlardan önce tekerlekler için bir koordinat sistemi geliştirmek uygun olacaktır. Şekil-3'te farklı açılardan tekerlek, lastik ve koordinat sistemi görülebilir. Buna göre x-ekseni üzerinde oluşan kuvvetler çekis kuvvetleri (\vec{F}_x) ve y-ekseni üzerinde oluşan kuvvetler yanal kuvvetler (\vec{F}_y) olarak adlandırılır. Bununla birlikte z ekseni etrafında oluşan moment ise (M_z) olarak adlandırılır.

Lastiklerin deform olma büyülüklüklerine göre lastığın üreteceği çekis veya yanal kuvvetler değişmektedir. Lastiklerin deformasyonlarına göre ne kadar kuvvet üretecekleri çeşitli modeller yardımıyla bulunabilir. Sistemimizde, hem gerçek zamanlı kullanımlara uygun olması hem de net sonuçlar verebilmesi nedeniyle [1] Hans B. Pacejka'nın geliştirdiği Magic Formula isimli lastik modelleri kullanılmıştır. Bu modelin kullanılma nedenlerinden biri de bu lastik modeli içinde gerekli sabitler değiştirilerek lastiklerin farklı zeminlerde ne kadar kuvvet üreteceklerinin bulunulabilmesidir.



Şekil 3. Tekerlek Koordinat Sistemi

Magic Formula çıktısı Y, modele giren X girdisi ile şu şekilde hesaplanabilir [2]:

$$Y_{(X)} = y_{(x)} + S_v \quad (2.5.1)$$

bu denklemde

$$x = X - S_h \quad (2.5.2)$$

$$y_{(x)} = D \sin[C \tan^{-1}\{Bx - (Bx - \tan^{-1} Bx)\}] \quad (2.5.3)$$

olarak tanımlanır.

Bu modelde Y çıktıları F_x , F_y veya M_z olabilir. Girdiler ise kayma açısı (slip angle - α) veya kayma yüzdesi (slip percentage - σ) olabilir.

Cekis kuvvetlerinin oluşmasına neden tekerlein boylamsal yönde deform olmasıdır. Tekerlein boylamsal yönde deformesini boylamsal kayma (longitudinal slip) denilen bir nicelikle ölçeriz. Bu nicelik şu şekilde hesaplanabilir:

$$\varepsilon = \frac{\omega}{\omega_0} - 1 \quad (2.5.4)$$

Burada ε tekerleğin yola degen noktasının kayma oranıdır. Magic Formula'da bu değeri rahatlıkla kullanabilmek kayma yüzdesine ihtiyaç vardır. Kayma yüzdesi de Denklem (2.5.5)'de belirtildiği gibi bulunur.

$$\sigma = \varepsilon * 100 \quad (2.5.5)$$

Kayma yüzdesi Magic Formula'ya girdi olarak verilerek çekis kuvveti bulunur.

Cekis kuvveti motor üzerinde yük torkunu oluşturan kuvvettir. Çekis kuvveti, araç tekerleğinin dönüşünü yavaşlatacak bir biçimde tork üretir. Bu tork,

$$\vec{\tau}_{load} = \vec{R} \times \vec{F}_x \quad (2.5.6)$$

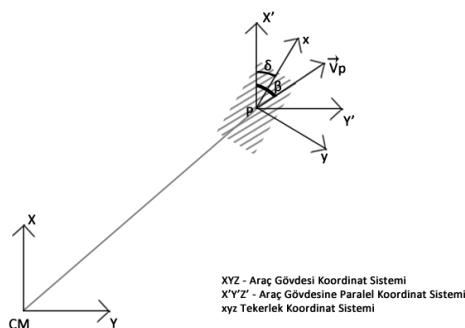
bağıntısı ile hesaplanır. Elde edilen tork aktarma organları üzerinden aktarılarak motora etki edecek yük torku hesaplanmış olur.

Lastiklerin oluşturduğu yanal kuvvetleri bulabilmek için kayma açısını hesaplamamız gerekmektedir. Kayma açısını bulmak için lastiğin yol ile temas eden alanının vektörel hızını bulmamız gereklidir. Bu hesaplamaya geçmeden önce araç koordinat sistemi ve tekerlek koordinat sisteminin Şekil-4 üzerinde incelenmesi denklemleri anlamayı kolaylaşacaktır[2].

Bu hız vektörü şu denklem yardımıyla bulunur:

$$\vec{V}_p = \vec{V}_{cm} + \dot{\psi} \times (\vec{P} - \vec{CM}) \quad (2.5.7)$$

Bu denklemde araç kütleye merkezinin hızına aracın sapma hareketinden gelen dairesel hızın eklenmesiyle, tekerlek yüzeyinin toplam vektörel hızı bulunur.



Şekil 4. Araç ve Tekerlek Koordinat Sistemleri

Hız vektörü bulunduktan sonra, hız vektörünün araç koordinat sisteminin x-ekseni ile yaptığı açı şu şekilde bulunur:

$$\beta = \tan^{-1} \left(V_{py} / V_{px} \right) \quad (2.5.8)$$

Bununla birlikte tekerleğin araç koordinat sistemine göre açısı da önemlidir. Bu açı sistem içinde uygun yapılarda tutulmaktadır. Tekerlek açısı δ ile gösterilmektedir.

Son olarak kayma açısı her bir lastik için

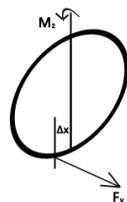
$$\alpha = \beta - \delta \quad (2.5.9)$$

ile bulunur. Bu elde edilen veri Magic Formula'ya girdi olarak verildiğinde tekerlek koordinat sisteminde tekerleğin üreteceği yanal kuvveti, \vec{F}_y , verir.

Magic Formula'nın çıktısı olan yanal ve çekiş kuvvetler, sadece çekış kuvveti veya yanal kuvvet varmış gibi çalışırlar [4]. Fakat gerçekde durum böyle değildir. Tekerlekler $\mu \cdot F_z$ değerinden daha fazla kuvvet üretmezler. Bundan dolayı bu iki kuvvet kombine edilir. Bu işlem şu şekilde yapılır:

$$F_y = F_{y0} \cdot \sqrt{1 - (F_x/F_{x0})^2} \quad (2.5.10)$$

Tekerlek üzerinde self-aligning torque (SAT) denilen, z-tekerlek koordinat sistemi etrafında oluşan bir moment oluşmaktadır. Bu moment viraj dönerken direksiyon sistemine verilen bir geri besleme gibidir. Bu momentin en somut örneği araçlarla köşeler dönülürken, direksiyonun bırakıldığından kendi kendini toplamasıdır. Bu momentin kaynağı Şekil-5 incelendiği takdirde rahatlıkla anlaşılabılır. Görüldüğü üzere tekerlek tarafından oluşturulan yanal kuvvetler x kadar kaymıştır. Bundan dolayı bu kuvvetin z etrafında tork etkisi görülür. Aslında direksiyon sistemine verilen tek geri besleme bu değildir. SAT yanında kastor açısı, kamber açısı, döndürme-aksi eğimi (steering-axis inclination) gibi direksiyon sistemine etki eden etmenler vardır. Fakat bunların modellenmesi gerçek zamanlı çalışan bir sistem için uygun değildir. Dolayısıyla SAT modellemesiyle gelen etki belirli bir parametreyle yükseltilerek direksiyondan uygun geri-besleme alınmaya çalışılacaktır.



Şekil 5. SAT Oluşması

2.6. Fren Dağıtım Sistemi

Fren dağıtım sistemi, fren pedalına basıldığında, farklı tekerleklerdeki fren balatalarını farklı oranlarda sıkıştırarak, farklı tekerleklerde farklı fren torklarının olmasını sağlar. Sisteme eklenecek farklı fren dağıtım modelleri ile araç frenlerinin modellenmesi sağlanmaktadır.

Fren dağıtım sistemine ilişkin Şekil-6'de görülebilir.



Şekil 6. Fren Dağıtım Sistemi Modeli

2.7. Fren

Fren sistemi, sürtünen parçalar yardımıyla (fren diskleri, fren balataları, tamburlar) tekerleklerin dönüş yönüne ters yönde tork uygularlar. Böylece tekerleğin serbest açısal dönüş hızı, gerçek dönüş hızından daha az olarak aracın hareket yönüne ters yönde çekiş kuvveti oluşur.

Fren sistemi basitçe, fren pedali seviyesine göre, sağlanabilecek maksimum torka göre doğrusal bir modelle tekerleklerde uygulanacak fren torkları hesaplanır. Matematiksel model şu şekildedir:

$$\vec{\tau}_{brake} = \vec{\tau}_{max} \cdot \text{brake-pedal} \quad (2.7.1)$$

Daha sonra bu tork tekerlek modülüne giriş olarak gönderilir.

2.8. Direksiyon Kutusu

Direksiyonun ne kadar döndüğüne bağlı olarak, tekerleklerin ne kadar döndürüleceği bu birim üzerinde hesaplanır. Model tekerleklerin hangi açıda geleceği bilgisini hesaplar ve bu bilgi daha sonra tekerleklerde girdi olarak verilir.

Bununla birlikte, direksiyon hareketlerinden dolayı SAT olusur. Her iki tekerlekten gelen SAT değerleri Direksiyon Kutusunda işlenerek, direksiyon donanımına geri besleme olarak geri döndürülür.

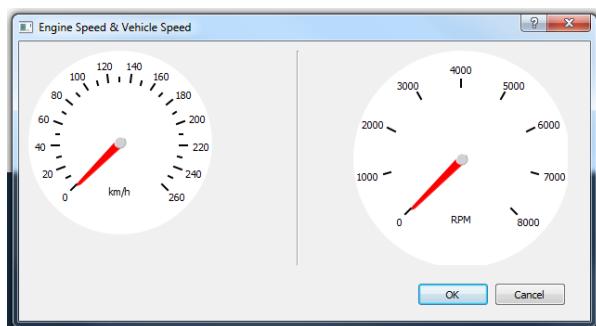
2.9. Sistem Modelinin Özeti

Şekil.1'deki sistem akış diyagramından da görülebileceği gibi, motordan başlayarak araç dinamiğine etki eden bütün bileşenlerin modellenmesi yapılmıştır. Motordan tekerleklerde kadar fiziksel modellerin çalıştırılmasıyla en son tekerleklerin yatay ve dikey yönde ne kadar kuvvet oluşturacakları hesaplanır. Bu hesaplanan kuvvetler motordan tekerleklerde kadar her parçanın ayrı ayrı etkileri ile oluşmaktadır. Sonrasında bu kuvvetler Nvidia PhysX'te tanımlanmış olan araç gövdesine eklenerek geriye kalan fiziksel simülasyonun PhysX tarafından yapılması sağlanır. PhysX kütüphanesinde araç gövdesinin tanımlanması, kütlesinin, atalet momentinin, hava sürtünmesi katsayılarının tanımlanması ile yapılır. PhysX her bir gövde için kendine sağlanan kuvvetlerin yardımı ile kendi içerisinde "Forward Dynamics" tekniği ile yani bir diferansiyel zaman içerisinde kuvvetten ivme, ivmeden hız, hızdan pozisyon hesaplayarak fiziksel dünyanın simülasyonunu yapmaktadır. Buradan da anlaşılacağı gibi, fiziksel bir ortam içerisinde, aracın hareketi büyük ölçüde bizim hesapladığımız kuvvetler ile şekillenirken, aracın doğrusal ve dairesel hareketlerinin hesabı, fiziksel çevre ile olan etkileşimi - çarpışmalar ve çarpışmalara verilen tepki, hava sürtünmesinden kaynaklı harekete karşı kuvvetler ve araç gövdesine uygulanması - PhysX kütüphanesi tarafından sağlanmaktadır.

3. SİMÜLASYON GÖRSELLEŞTİRMEŞİ

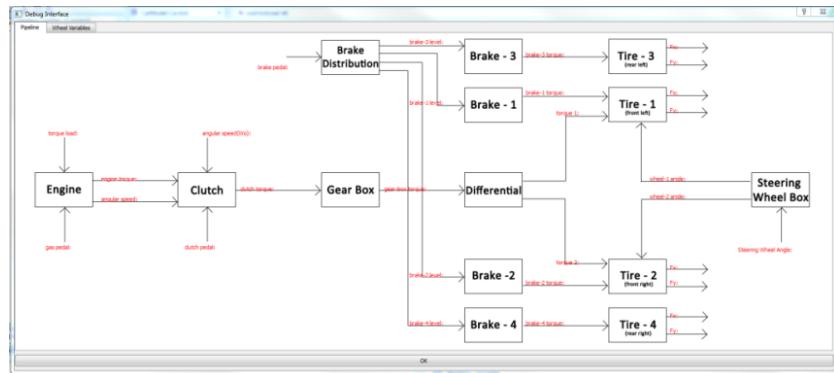
Daha önceden de bahsedildiği gibi kullanıcıya, modüller arasında akan veriyi göstermek adına bir kullanıcı ara yüzü bulunduğundan bahsetmiştik. Böyle bir ara yüz sağlanması önemlidir, çünkü önceki deneyimlerimiz bize böyle bir ara yüz olmadan sistemi geliştirmenin zor olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte değişik parametreler vererek hazırlanan aracın incelenmesi, doğrulanması ve geçerlenmesi ara yüzler üzerinden okunan değerlerle mümkün olabilmektedir.

Sistemde, kullanıcıya üç tane ara yüz sağlanacaktır. Birinci ara yüz, aracın motor hızını ve aracın kendi hızını gösterir. Bu ara yüze kullanıcı araç motor hızını ve araç hızını takip edebilmektedir. Şekil-7'de bu ara yüze ilişkin görsel görülebilir. Bu ara yüz sayesinde kullanıcı araç hızını ve motor hızını takip ederek aracın fren ve gaz girdilerine karşı uygun davranışını kontrol edebilir.



Şekil 7. Arayüz -1 (Araç Hızı ve Motor Hızı)

İkinci ara yüz, birinci ara yüze çok daha önemli bir ara yüzdür. Bu ara yüz iki tane sekme içinde aracla ilgili farklı bilgileri kullanıcıya göstermektedir. "Pipeline" başlıklı sekmede, kullanıcıya araç dinamığını etkileyen bütün parçalar arasındaki veri akışı gösterilmektedir. Bu ara yüz kullanıcılar parça, sistem akış hatta üzerinde, verileri kontrol etme olanağı sağlamaktadır. Böylelikle kullanıcı veri akışındaki herhangi bir problem gördüğünde ilgili model üzerinde hangi değişiklikleri yapacağını bilebilir. Şekil-8'de bu ara yüzün detayları görülebilir. İkinci sekme iste "Wheel Variables" adına sahiptir. Bu sekmede tek tek dört tekerlek için önemli araç dinamığını etkileyen önemli değişkenler

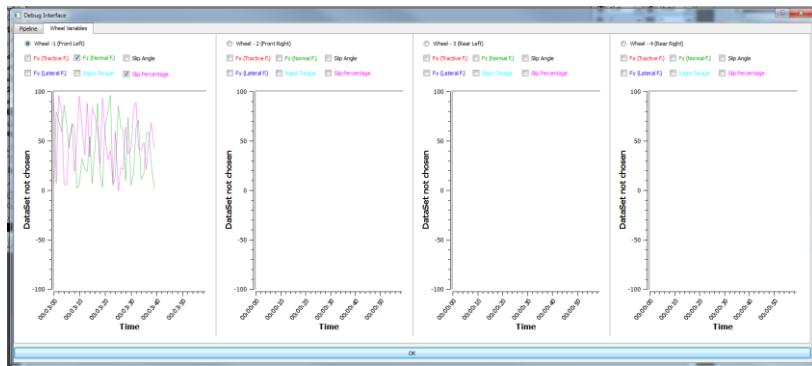


Şekil 8. Ara yüz - 2 (Sistem Akışı)

görebilir. Sistem çalışırken, farklı değişkenlerin yanlarındaki kutular işaretlenerek istenilen değişkene uygun bilgiler grafik olarak görülebilmektedir. Deneyimlerimiz sonucu, araç dinamini en çok etkileyen etmenlerin lastiklerin ürettiği kuvvetler olduğunu öğrenmiş bulunmaktayız. Bundan dolayı bu ara yüzün de kullanıcıya sistemi kullanma esnasında büyük avantaj verdiği söyleyebiliriz. Bu ara yüzde her bir tekerin girdisi veya çıktısı olan bilgi gösterilebilmektedir. Örneğin, lastiklerin çıktısı olarak çekici ve yanal kuvvetler aracın hareketini etkileyen baş etmenlerdir. Bunlar ara yüz aracılığıyla gerçek zamanlı incelenerek sistemle ilgili problemin nerede olabileceği bulunabilir. Bununla birlikte bu kuvvetlerin anlamsız olmasına sebep olan etkenler yine buradaki değerler incelenerek görülebilir. Örnek vermek gerekirse, eğer bir tekerlek için anlamsız yanal kuvvetler elde ediyorsak, kayma açısına bağlı değerleri incelemek yerinde olacaktır. Başka bir örnek olarak da, çekiş kuvvetinin anlamsız çıktığı zamanlarda veya çekiş kuvveti ile araç hızı artışı arasında anlamlı bir ilişki kurulamıyorsa, kayma yüzdesine bağlı değerlerin incelenmesi yerinde olacaktır. Bu şekilde verilerdeki tutarsızlıklar incelenerek sistem dengesi sağlanabilecektir. Şekil-9 üzerinde bahsedilen ara yüz rahatlıkla görülebilir.

Ara yüzler hazırlanırken QT isimli üçüncü parti yazılım kütüphanesi kullanılmıştır. QT hem dokümantasyonları iyi hazırlanmış bir kütüphane olduğu için hem de internet üzerinde büyük tartışma topluluklarına sahip olduğu için tercih edilmiştir. Bununla birlikte, gerçek zamanlı grafik çizdirmek için ise QT'ye bir eklenti olarak geliştirilmiş Qwt kütüphanesi kullanılmıştır. Qwt sunduğu ara yüz sayesinde, sistem içerisinde grafik çizimlerinin hızlıca ve kolayca yapılmasına olanak sağlamıştır.

Bununla birlikte fiziksel sahnenin basılması için basit OpenGL rutinleri yazılmıştır. Bu rutinler her sistem tıkında, fizik sahnesindeki bütün parçaların alınarak ekrana basılmasını sağlar. Fiziksel sahnenin ekrana basılması ile kullanıcı, aracı bir direksiyon veya diğer girdi aracı sayesinde rahatlıkla kontrol edebilir ve yukarıda bahsedilen ara yüzler aracılığıyla sistem incelemesi ve yorumlaması yapabilmektedir.



Şekil 9. Ara yüz - 3 (Tekerlek Verileri)

4. SONUÇ

Hazırlanan sistem, araç simülatörlerinde araç dinamiği hesaplarını üstlenebilecek ve sağladığı gerçek zamanlı simülasyonlara uygun fiziksel modellerle istikrarlı araç simülasyonları elde edilebilecektir.

Sistem zaman içerisinde gelişmeye devam edip ara yüzler daha da geliştirilecektir. Ara yüzler kullanıcılarla sistemi kullanırken yaşadığı deneyimle sorularak geliştirilecektir. Bununla birlikte fiziksel model de teknolojinin önmüze koyduğu limitler dahilinde gelişmeye devam edecektir.

Sistem ilk denemelerinde, gerçek zamanlı olması gerekliliğini yerine getirerek, yüksek FPS'lerde çalışabilmiştir. Bunda kullanılan fiziksel sahnenin çizdirilirken en basit rutinler kullanılarak yapılmasının katkısı çok büyktür. Bundan dolayı, ağır grafik çizdirme işlemlerinin olduğu simülatör sistemlerinde, araç dinamiği sistemi, ana sisteme çok az bir yük getirerek çalışabilecektir.

5. KAYNAKÇA

- [1] Rajamani, R. (2006), Vehicle Dynamics and Control, Springer Science + Business Media: Spring Street, New York, USA.
- [2] Genta, G. (1997), Motor Vehicle Dynamics - Modeling and Simulation, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.: Suite 1B, 1060 Main Street, River Edge, New Jersey, USA.
- [3] Jazar, R. N. (2008), Vehicle Dynamics - Theory and Application, Springer Science + Business Media: Spring Street, New York, USA.
- [4] (Yayımlanma : Aralık 23, 2010) Pacejka's Magic Formula
<http://www.racer.nl/reference/pacejka.htm> (Düzeltilme: Ocak 14, 2011)

PALETLİ ARAÇ DİNAMİĞİNİN SAYISAL BENZETİMLERLE İNCELENMESİ

Anıl Yılmaz ^(a), Hasan Günal ^(b), Namık Kılıç ^(c), Prof.Dr. Y.Samim Ünlüsoy ^(d)

^(a) OTOKAR Otomotiv ve Savunma San.A.Ş., SAKARYA, ayilmaz@otokar.com.tr

^(b) OTOKAR Otomotiv ve Savunma San.A.Ş., SAKARYA, hgunal@otokar.com.tr

^(c) OTOKAR Otomotiv ve Savunma San.A.Ş., SAKARYA, nkilic@otokar.com.tr

^(d) ODTÜ, Makina Müh. Böl. 06800 ANKARA, unlusoy@metu.edu.tr

ÖZ

Yüksek hız ve mobilite özelliklerine sahip paletli araçlar, palet baklalarının yol ve aracın hareketli aksamları ile olan etkileşimleri sonucunda çeşitli dinamik yüklemelere maruz kalırlar. Söz konusu dinamik yükler, aracın sürüş konforuna olan etkilerinin yanısıra, aracın görev donanımına dahil olan pek çok ekipmanın fonksiyonel çalışma koşullarını ve ömrünü olumsuz etkilemektedir. Bu sebeple, yüksek mobilite ve hız özelliklerine sahip paletli araçlarda konfor ve titreşim performanslarının geliştirilmesi ancak karmaşık süspansiyon sistemleri ve detaylı tasarım geliştirme faaliyetleri ile sağlanabilmektedir. Bu çalışmada Recurdyn/TRACK HM modülü ile paletli bir aracın araç dinamiği davranışları sayısal benzetim modeli yapılmıştır. Süspansiyonda kullanılan farklı yay tipi ve özelliklerinin araç personelinin performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi hedeflenmiş ve sürücü ve sürücü koltuğu da araç modeline eklenmiştir. Farklı senaryolar -yol ve hız- için gerçekleştirilen sayısal benzetimlerle sürücü koltuğunda zamana bağlı ivme verileri elde edilmiştir. Ivme verileri soğurulan güç (absorbed power) açısından değerlendirilerek süspansiyon karakteristığının etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Soğurulan Güç, Paletli Araç, Sayısal Benzetim, Süspansiyon Modelleme

INVESTIGATION OF TRACKED VEHICLES WITH SIMULATIONS

ABSTRACT

High speed and high mobility tracked vehicles are subjected to dynamic loadings originating from interaction between track segments and road. These dynamic loads have hazardous effects on not only the ride comfort, but also the function and service life of on-board equipments and the vehicle body. The ride and vibration performance of high speed and high mobility tracked vehicle can be improved only by sophisticated suspension systems and detailed development processes. This study investigates the dynamic behaviour of a tracked vehicle by Recurdyn/TRACK HM simulation. The driver and driver seat are also added to the model and the effect of different damper characteristics on comfort is focused. Different scenarios, involving different tracks and speeds are simulated and the time response of the vertical acceleration of driver is calculated. This acceleration data is evaluated according to absorbed power calculation to compare the different suspension characteristics.

Keywords: Absorbed power, Simulation, Suspension Modelling, Tracked Vehicle

1. GİRİŞ

Kapsamlı bir paletli araç dinamiği modeli, palet modelinin içereceği ayrıntılar doğrultusunda yüzlerce veya binlerle ifade edilebilecek sayıda serbestlik derecesine sahip olabilir. Bu durumda karşımıza binlerce diferansiyel ve doğrusal olmayan denklemlerden oluşan bir problem çözümü çıkacaktır. Paletli araçlar dinamiği çalışmalarında, geometrik açıdan oluşan karmaşıklığa ilave olarak, palet bakkaları ile süspansiyon elemanları ve palet bakkaları ile yer arasındaki darbe davranışları özellikleri taşıyan temas kuvvetleri, kullanılan hareket denklemlerinin sayısal çözümünü daha da zorlaştırmaktadır. Bu konuda geçmişte yapılan çalışmalar doğrultusunda [1,2] geliştirilmiş ve ticari olarak kullanılabilen yazılımlar mevcuttur. Yazılımlardaki gelişmeler paralel olarak, bilgisayar teknolojisinde ve sayısal yöntemlerdeki hızlı gelişmeler çok ayrıntılı dinamik doğrusal olmayan modellerin kurularak, aracın karmaşık davranışlarının incelenmesine olanak sağlanmıştır.

Bu çalışmada, ağırlığı yaklaşık 50 ton olan 3 boyutlu bir ana muharebe tankı modeli oluşturularak, aracın dinamik davranışını çeşitli sürüş senaryolarında incelenmiştir. Bu tip yüksek hız ve mobilite özelliklerine sahip paletli araçlarda, palet bakkalarının yol ve aracın hareketli aksamları ile olan etkileşimleri sonucunda çeşitli dinamik salınımalar oluşur. Mürettebatın uzun süre yüksek titreşim düzeylerine maruz kalması, gerek hayatı organlarında gerekse kas yapısı üzerinde olumsuz etkiler oluşturacaktır. Özellikle

sürücü ve mürettebat koltukları üstünden gövdeye aktarılan salınımlar bu tarz araçları kullananlarda kronik sırt ağrısı problemlerinin sıkılıkla görülmesine sebep olmaktadır.

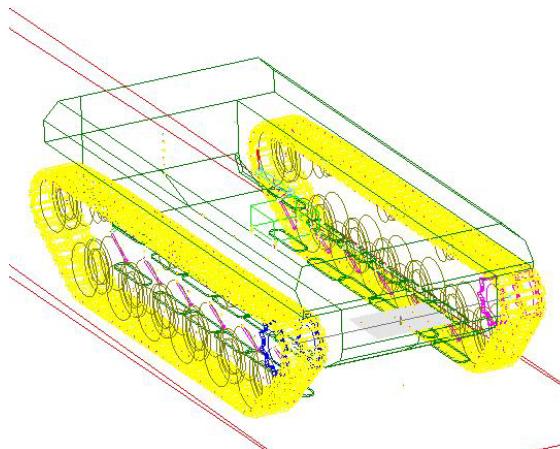
Yüksek mobilite ve hız özelliklerine sahip paletli araçlarda konfor ve titreşim performanslarının geliştirilmesi ancak karmaşık süspansiyon sistemleri ve detaylı tasarım geliştirme faaliyetleri ile sağlanabilmektedir. Bu çalışmada Recurdyn/TRACK HM modülü ile paletli bir aracın dinamik davranışının sayısal modellenmiştir. Süspansiyonda kullanılan farklı yay tipi ve özelliklerinin araç personelinin performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi hedeflenmiş ve sürücü ve sürücü koltuğu da araç modeline eklenmiştir. Farklı senaryolar -yol ve hız- için gerçekleştirilen sayısal benzetimlerle sürücü koltuğunda zamana bağlı ivme verileri elde edilmiştir. İvme verileri soğurulan güç (absorbed power) açısından değerlendirilerek süspansiyon karakteristiğinin etkileri incelenmiştir.

2. PALETLİ ARAÇ DİNAMİĞİ MODELİ

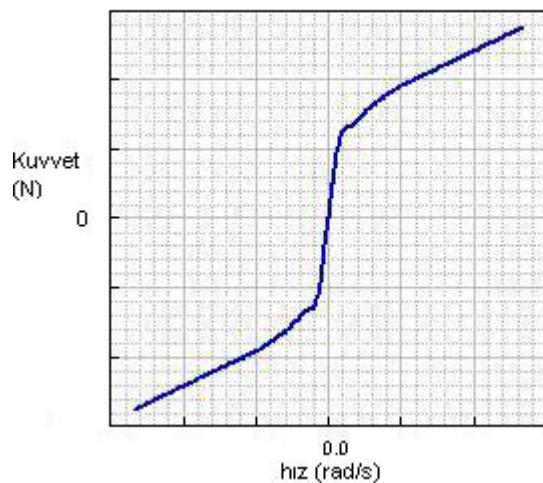
Çalışmada kullanılan 3 boyutlu araç modeli yaklaşık 50 ton ağırlığındadır. Dinamik yükler altındaki gövde salınımlarının daha doğru hesaplanabilmesi için kütlesel parametrelerden araç kütlesi yanında 3 eksendeki atalet momentleri girilmiştir. Model tank gövdesi, her iki tarafta olmak üzere palet sistemi, taşıyıcı tekerlekler, süspansiyon kolları, cer dişlişi, istikamet makaraları ve gergi kasnağını içermektedir. Taşıyıcı tekerlekler süspansiyon kollarına ve süspansiyon kolları da gövdeye tek eksende dönmeye izin veren mafsalarla bağlanmıştır. Gergi kasnağı gergi koluna ve gergi kolu da gövdeye tek eksende dönmeye izin veren mafsal ile bağlanmıştır. Güç paketinden alınan tork ya da hareket, tek eksende dönmeye izin veren mafsalla gövdeye bağlanan cer dişlisine iletilmektedir. En önde yer alan gergi kasnağının konumu statik haldeki palet gergisini belli bir seviyede tutacak şekilde ayarlanmıştır. Her süspansiyon kolu ve gövde arasına burulma çubuğunun sertliği ve amortisör sönmüş eğrisi girilmiştir. Her palet bakçası ile tüm taşıyıcı tekerlekler, cer dişlişi, gergi kasnağı ve istikamet makaraları arasında temas kuvveti vardır.

Kullanılan burulma çubuğu 4000 N.m/rad sertliğindedir. Amortisör sönmüş karakteristiği ise Şekil 2 de verilmiştir. Araç kütlesinin belli bir süspansiyon kolu uzunluğu ile tasarım yüksekliğinde dengede kalabilmesi için burulma çubuğu gövdeye belli bir ön yükleme değeri ile monte edilmiştir.

Her palet bakçası diğerine 6 serbestlik derecesi olan kauçuk burçlar ile bağlanmıştır. Bu esneklik sayesinde sistemde oluşan serbestlik, zorlu zemin koşullarında oluşan darbe kuvvetlerini azaltmaktadır.

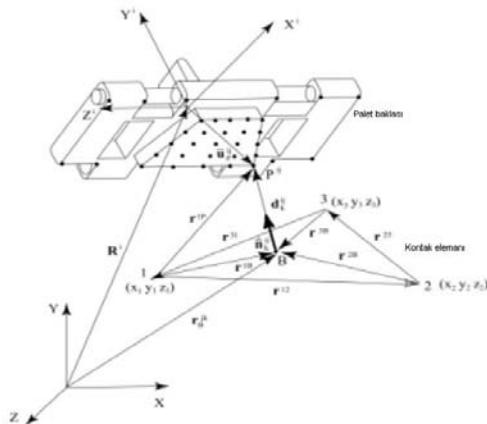


Şekil 1. Tank modeli



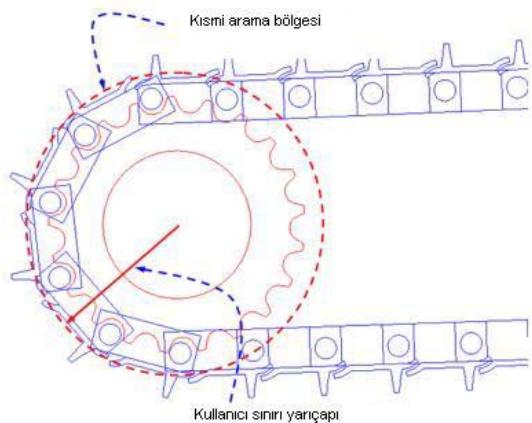
Şekil 2. Amortisör karakteristiği

Palet baklaları araç komponentleri üzerinde hareket ederken izlediği yol diğer parçalar ile arasındaki temas kuvvetleri tarafından belirlenir. Temas belirleme algoritması diğer bir parça ile olan teması algılayarak bu iki parça arasında oluşan temas kuvvetini etkin hale getirir. Yer ile olan temas durumunda kauçuk parça ve metal dış çerçeveye için her temas noktasında o noktaya özgü sertlik ve sönmü degeri kullanılır.



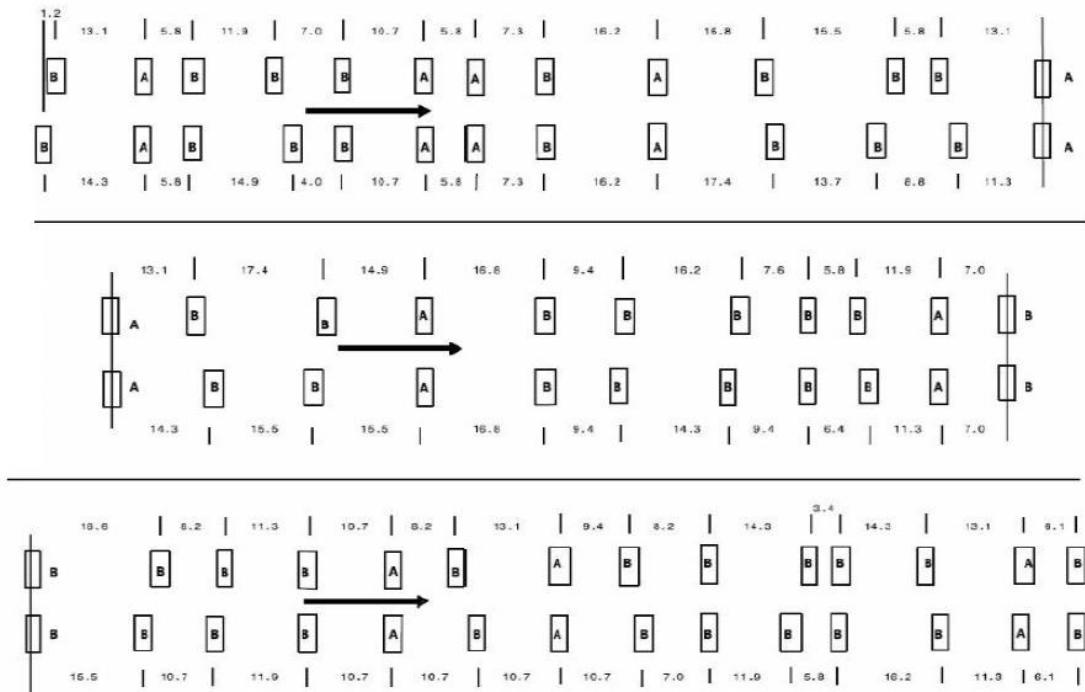
Şekil 3. Palet pad ve yer arasındaki üçgensel kontak bölgeleri

Recurdyn programının sunduğu kısmi arama (Partial Search) fonksiyonu sayesinde cerdişli sadece kendisine belli bir mesafede bulunan palet baklaları ile arasındaki temas kuvvetini hesaplamaktadır. Bu sayede kendisi ile temas ilişkisi olmayan baklalar için hesaplama yapmadığından çözüm sürelerinde avantaj sağlamaktadır. [3]

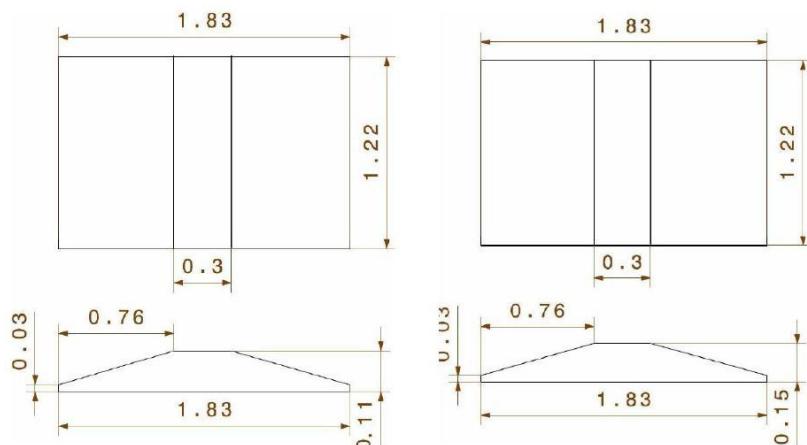


Şekil 4. Kısmi arama özelliği

Recurdyn ortamında her türlü yol profili program içine farklı şekillerde dahil edilebilir ve farklı zemin karakterlerindeki sürüs davranışını incelenebilir. Import edilen bir katı model dosyasının yüzeylerinde yol profili seçilebilir, ya da koordinatları ile belli bir profil oluşturulup derinlik verilebilir. Aşağıdaki şekilde analizlerde kullanılan APG parkuru görülmektedir. APG parkuru hem simetrik hem de asimetrik engeller içermektedir. Bu parkurda 20 ve 40 Km/h hızlarında analizler koşturularak sürücü koltuğundaki düşey ivme değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5. APG Parkuru

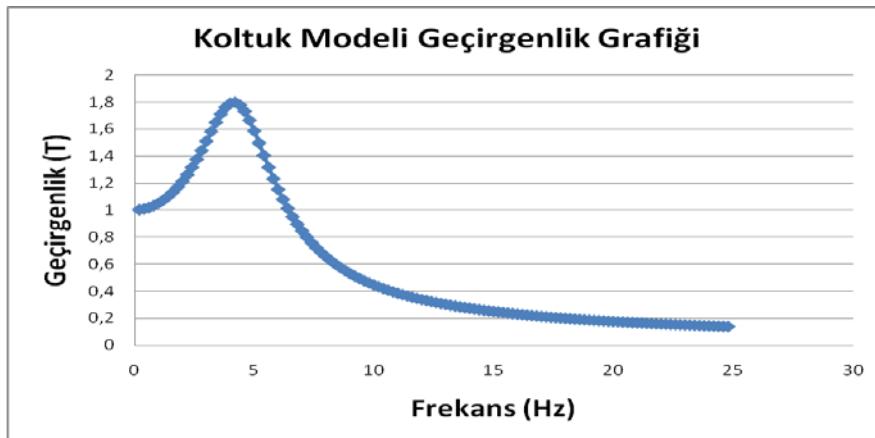


Şekil 6. APG Parkurundaki iki engel tipi

2.1. Sürücü Koltuğu Modeli

Sürücü koltuğu araç gövdesi üzerine 4 köşesinden tek eksende öteleme hareketine izin veren mafsallar ile bağlanmıştır. Sürücü ve koltuğu için öngörülen 86 kg lik kütle bu dört noktadan doğrusal yay ve amortisör kuvvet elemanları ile gövdeye desteklenmiştir.

Koltuk modelinde kullanılan yay ve amortisör karakterleri yapılan ivme ölçümleri sonrası deneme yanılma yöntemi aynı geçirgenlik davranışını elde edecek şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 7. Sürücü koltuğu geçirgenlik grafiği

3. SÜRÜŞ KONFORU

Sürüş konforu problemleri çoğu zaman çeşitli kaynaklar tarafından araç gövdesinde oluşan titreşimlerden kaynaklanır. Bu kaynakların başında genellikle bozuk yol koşulları yer alır. İyi bir sürüş konforuna sahip olan araçta yolcunun hissettiği rahatsızlık düzeyini belli bir seviyenin altında tutmak amaçlanır. Bu konuda kullanılan ölçütlerden birisi soğurulan güç (absorbed power) değeridir. Çeşitli kaynaklarda sürücü bölgesindeki soğurulan güç değeri için üst sınır 6 Watt olarak belirlenmiştir. [4]

3.1. Soğurulan Güç

Soğurulan Güç, titreşime maruz kalan insan vücudunun soğurduğu güç değeridir. Askeri araçlarda bozuk yol koşullarında insan vücudunun dayanabildiği titreşimler için bir ölçüt olarak kabul edilir. Belli bir noktada belli bir eksene göre oluşan soğurulan güç değeri ivme güç spektrum yoğunluğunun belli bir transfer fonksiyonu ile çarpılıp integralinin alınması ile elde edilir. Bu metodun avantajı karmaşık sistemlerde oluşan salınımlar için tek bir sayısal değer verebilmesidir.

Standard sürüş konforu testleri belli bir parkurda sürücü koltuğu noktasında sınır olan 6 Watt değerine hangi hızla seyir halinde ulaşıldığı üzerine kuruludur.

Bir eksendeki soğurulan güç değeri aşağıdaki şekilde hesaplanır.

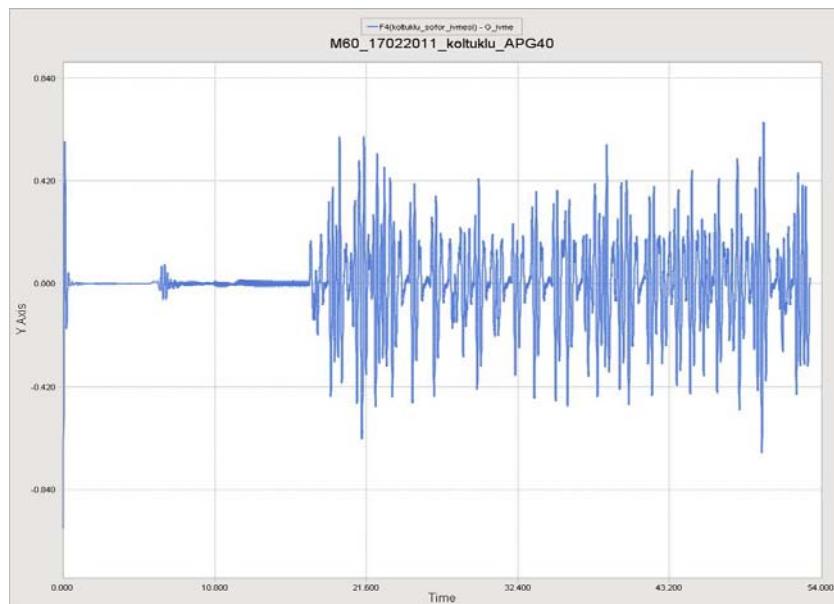
$$P = \sum (C_i) A_i^2$$

Burada A_i her band için oluşan ivme verilerinin rms değeri, C_i değeri de frekans ve belirli katsayılarla bağlı hesaplanan bir faktördür. Bu formülasyon sonucun ivme verilerinin frekans, büyülüklük ve integralini kapsayan bir değer hesaplanır.

Sürüş konforu testlerinde soğurulan güç grafiği seyir hızına bağlı olarak çizdirilir.

3.1.1. Soğurulan Güç Değeri Hesabı

Şekil 8 de bir senaryo için elde edilen ivme verileri ve Çizelge 1 de bu verilerden elde edilen soğurulan güç değeri görülmektedir.



Şekil 8. 40 kmh için elde edilen sürücü düşey ivme grafiği

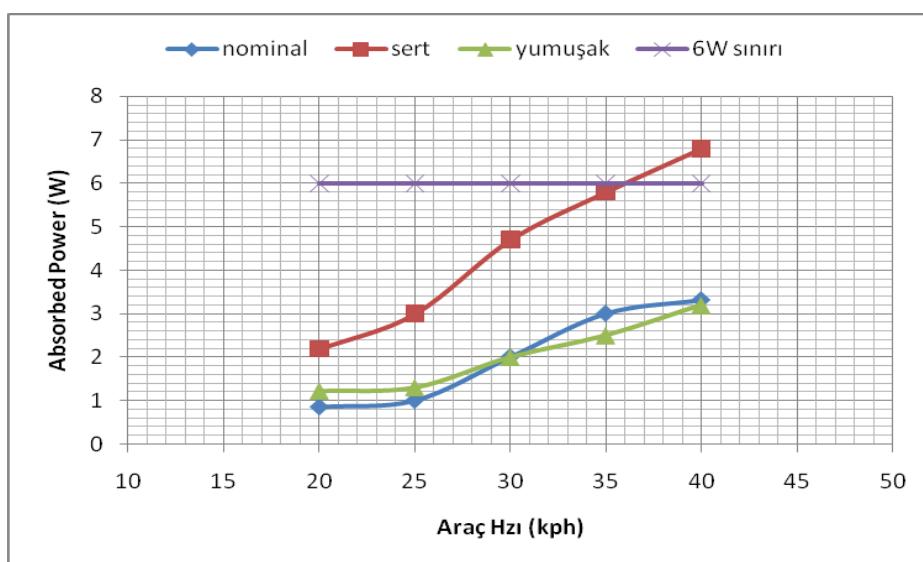
Çizelge 1. Soğurulan güç hesabı

APG 40 km/h					
No	Alt Limit	Üst Limit	Merkez	RMS(g)	Absorbed Power
1	0	1	0,5	0,0222	0,001077
2	1	2	1,414214	0,0468	0,045316
3	2	3	2,44949	0,01	0,007676
4	3	4	3,464102	0,114	2,081159
5	4	5	4,472136	0,0639	0,858497
6	5	6	5,477226	0,0285	0,150783
7	6	8	6,928203	0,02	0,040467
8	8	10	8,944272	0,0119	0,007685
9	10	12	10,95445	0,0076	0,002614
10	12	16	13,85641	0,0086	0,001863
11	16	20	17,88854	0,0053	0,000372
Toplam Soğurulan Güç(W)					3,20

Yukarıdaki çizelgede görüldüğü gibi her bir frekans aralığındaki ivmenin RMS değeri tabloya girilmiş, bu değerlerin belirlenen katsayılar ile çarpılıp tüm frekans aralığındaki değerlerin toplanması ile soğurulan güç değeri hesaplanmıştır.

4. SONUÇ

Bu çalışmada tank modeli üç farklı amortisör karakteri ile APG parkurunda iki farklı hızda koşturulmuştur. Analiz sonrasında sürücü koltuğunda oluşan düşey ivme verileri soğurulan güç yöntemi ile hesaplanmış, aşağıdaki grafik elde edilmiştir.



Şekil 9. 3 farklı amortisör sertliği ile elde edilen absorbed power değeri

Yukarıdaki grafikte sert amortisör karakteri için 36 kph üzerindeki hızlarda kritik değer olan 6 Watt değerinin aşıldığı görülmüştür. Aynı zamanda bir amortisör eğrisinin her hızda aynı konfor değerini sağlayamadığı görülmüştür. Hıza bağlı değişken karakterli yarı aktif bir sönmeyici ile farklı hızlardaki sürüs konforu iyileştirilebilir.

5. KAYNAKÇA

- [1] Lacombe, J., Moran M., September 2000, A 3-DIMENSIONAL DYNAMICS MODEL FOR GENERATING TRACKED VEHICLE SEISMIC SIGNALS
- [2] Ryu, H, Choi J., Bae,D., April 3-6 2006, SAE Technical Paper Series, 2006-01-0929
- [3] Recurdyn Track HM Manual
- [4] Wong, J.Y. (1993), *The Theory of Ground Vehicles*, 2, 353.

ATALETSEL SEYRÜSEFER SİSTEMİ (ASS) HATA ANALİZİ İÇİN GELİŞTİRİLEN SİMÜLASYON ARACI

Onur ÇULHA ^(a), Vedat EKÜTEKİN ^(b)

^(a) TÜBİTAK-SAGE, Mamak ANKARA, onur.culha@sage.tubitak.gov.tr

^(b) TÜBİTAK-SAGE, Mamak ANKARA, vedat.ekutekin@sage.tubitak.gov.tr

ÖZ

Bu çalışmada, Ataletsel Seyrüsefer Sistemi (ASS) hata analizi için geliştirilen bir simülasyon aracı sunulmuştur. Bu simülasyon aracı girdi olarak ilk konum, hız, yönelim bilgileri, başlangıç hatası, ölçer karakteristik bilgileri, ilk konum, hız ve açı belirsizlikleri ile ideal anlık ivme ve dönü verilerini alır. Ölcer hata modelleri kullanılarak bulunan hatalı ivme ve dönü değerleri ile Ataletsel Seyrüsefer algoritması çalıştırılır. ASS hataları Kovaryans analizi ve Monte Carlo analizi olmak üzere iki yöntem kullanılarak belirlenmektedir. Böylece, seyrüsefer sistemi tasarımda önemli bir yere sahip olan ASS hatalarının zaman içerisinde nasıl ilerlediği gözlenebilir. Ölcer parametreleri, başlangıç hataları ve diğer belirsizliklerin ASS hatalarını zamanla nasıl etkilediği gözlenerek seyrüsefer sisteminde kullanılacak olan ölçer özelliklerinin belirlenmesi sağlanır.

Anahtar Kelimeler: Ataletsel Seyrüsefer, Hata analizi, Kovaryans, Monte Carlo.

SIMULATION TOOL DEVELOPED FOR ERROR BUDGET OF INERTIAL NAVIGATION SYSTEM (INS)

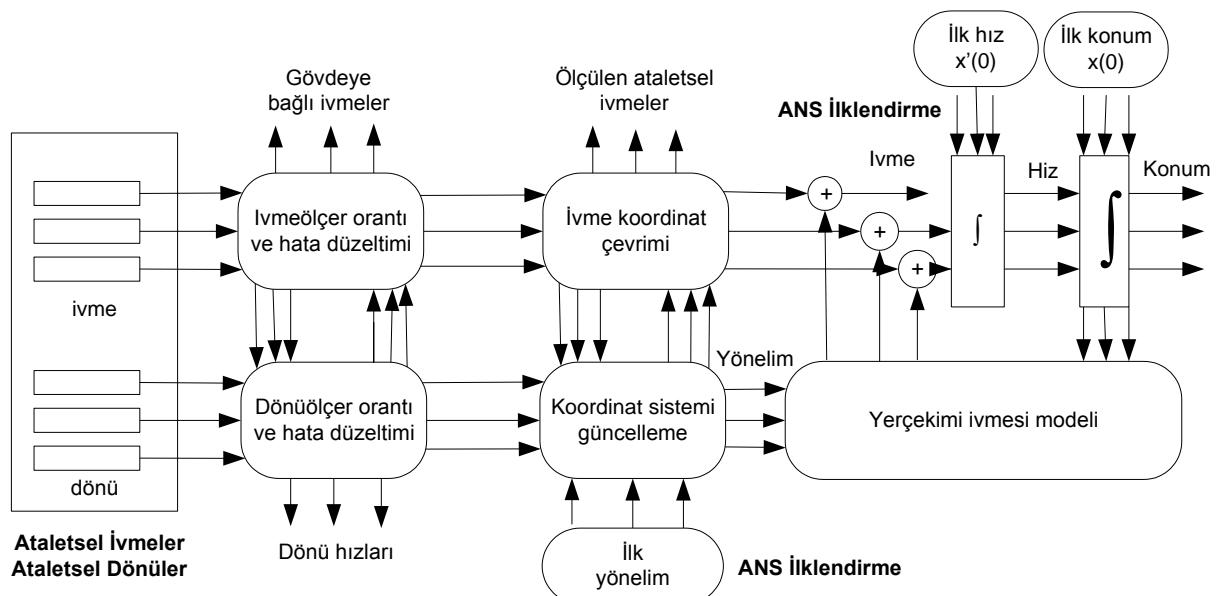
ABSTRACT

In this paper, a simulation tool which is developed for error analysis of inertial navigation system is proposed. The inputs of the simulation tool are initial position, velocity, and attitude, initialization error, sensor characteristics, initial uncertainty of position, velocity, and attitude, and also ideal acceleration and angular rate. Firstly, angular rate and acceleration values including sensor errors are found using IMU sensor models. Then, inertial navigation algorithm is run with these values. INS errors are determined using two methods Covariance analysis and Monte Carlo analysis. Thus, it can be observed how INS errors propagate in time, which is an important issue in navigation system design. By observing how sensor parameters, initialization errors and other uncertainties are affected, specifications of sensors used in navigation system can be determined.

Keywords: Inertial Navigation, Error budget, Covariance , Monte Carlo.

1. GİRİŞ

Ataletsel seyrüsefer sistemi, ölçülen anlık gövde ivmesi ve açısal dönü hızları değerleri ile Newton'un klasik mekanik kurallarını kullanarak gövdedenin zaman içerisindeki konum, hız ve yönelimini hesaplar. İvmenin ölçülebildiği durumlarda, hız değişimi ve konumu ivmenin zamana göre ardarda uygun şekilde integralleri ile mümkün olur. Ayrıca, ivmeölçerlerin hangi yönde olduğunu bilmek de gerekektir. Bunun için de dönüölçerlerle (jiroskop) ölçülen ivmeölçer eksenlerindeki dönü hızları kullanılır. Şekil-1'de ataletsel seyrüsefer sistemi yapısı görülmektedir [1].



Şekil 1. Ataletsel seyrüsefer sistemi

Pratik bir uygulamada, ataletsel seyrüsefer sisteminin çalıştığı doğruluk, seyrüsefer hesabından önce elde edilen veri üzerindeki hataların ve sistemi oluşturan çeşitli bileşenlerin kusurları ile sınırlıdır. Ataletsel seyrüsefer sistemi hataları şu şekilde sınıflandırılabilir:

- ilk durum hataları
- ataletsel ölçer hataları
- hesaplama hataları

İlk durum hataları, gövdenin konum, hız ve yönelim bilgilerini tam olarak doğru bileyemek veya gövdeyi bilinen değerlere göre ayarlayamamaktan kaynaklanır ve deterministik hatalardır. Ölçer hataları ise ivmeölçer ve dönöölçer değerleri üzerindeki hatalardır ve istatistiksel (rastgele) hatalardır. Hesaplama hatalarının etkisi düşük olacağından önerilen simülasyon aracı, kullanılan işlemciden kaynaklanan hesap hatalarını dikkate almamaktadır.

Bu simülasyon aracı, ilk durum hataları ve ölçer hatalarını 15 durumun (3 konum, 3 hız, 3 yönelim, 3 ivme kayması ve 3 dönöölçer kayması) belirsizliklerini güncellemek için kullanmaktadır. Belirsizliklerin zaman içerisinde ilerletilmesi kovaryans analizi yöntemi ile gerçekleşmektedir. Monte Carlo analizi ile de kovaryans analizi defalarca tekrarlanarak hataların rastgele değişkenlere nasıl bağlı olduğu gözlenir.

Simülasyon aracında hataları değerlendirmek için yatay CEP (Circular Error Probable) değeri kullanılmıştır. Yatay CEP değeri yatay düzlemden merkezinde doğru değerin bulunduğu ve içerisinde %50 olasılıkla doğru tahmin yapılan çemberin yarıçapıdır.

2. ÖLÇER HATA MODELİ

AÖB (Ataletsel Ölçüm Birimi) hataları ham AÖB çıktıları üzerine olan etkilerine göre sınıflandırılır. Benzer karakteristik gösteren hatalar, bulunduğu gruba ait baskın hata kaynağı temel alınarak tek bir model kullanarak modellenmiştir. Örneğin, ölçer sayısallaştırma hatalarının ölçer çıktılarına etkisi rastgele kayma varyASSını ayarlarken gösterildiği için sayısallaştırma hataları ihmali edilmiştir, çünkü sabit bir hızda kaydedilen ölçer çıktıları ile bu iki hatayı ayırt etmek mümkün değildir.

Kullanılan hata modeline göre [2] ölçülen ivme ile gerçek ivme arasındaki hata şu şekilde ifade edilmiştir:

$$\begin{vmatrix} \tilde{a}^x \\ \tilde{a}^y \\ \tilde{a}^z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a^x \\ a^y \\ a^z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \delta a_{BR}^x \\ \delta a_{BR}^y \\ \delta a_{BR}^z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \delta a_{BS}^x \\ \delta a_{BS}^y \\ \delta a_{BS}^z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \delta a_{RW}^x \\ \delta a_{RW}^y \\ \delta a_{RW}^z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \delta a_{SFR}^x & 0 & 0 \\ 0 & \delta a_{SFR}^y & 0 \\ 0 & 0 & \delta a_{SFR}^z \end{vmatrix} \begin{vmatrix} a^x \\ a^y \\ a^z \end{vmatrix} \quad (1)$$

Burada, a^x, a^y, a^z gerçek ivme değerlerini, $\tilde{a}^x, \tilde{a}^y, \tilde{a}^z$ hatalı ölçme değerlerini, $\delta a_{BR}^x, \delta a_{BR}^y, \delta a_{BR}^z$ ivmeölçer sabit kayma tekrarlanabilirliğini, $\delta a_{BS}^x, \delta a_{BS}^y, \delta a_{BS}^z$ ivmeölçer sabit kayma kararlığını, $\delta a_{RW}^x, \delta a_{RW}^y, \delta a_{RW}^z$ ivmeölçer rastgele kaymasını, $\delta a_{SFR}^x, \delta a_{SFR}^y, \delta a_{SFR}^z$ orantı katsayısı tekrarlanabilirliğini göstermektedir.

Aynı şekilde ölçer hata modelinde ölçülen dönü ile gerçek dönü arasındaki hata şu şekilde ifade edilmiştir:

$$\begin{vmatrix} \tilde{\omega}^x \\ \tilde{\omega}^y \\ \tilde{\omega}^z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \omega^x \\ \omega^y \\ \omega^z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \delta g_{DR}^x \\ \delta g_{DR}^y \\ \delta g_{DR}^z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \delta g_{DS}^x \\ \delta g_{DS}^y \\ \delta g_{DS}^z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \delta g_{RW}^x \\ \delta g_{RW}^y \\ \delta g_{RW}^z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \delta g_{SFR}^x & 0 & 0 \\ 0 & \delta g_{SFR}^y & 0 \\ 437 & 0 & \delta g_{SFR}^z \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \omega^x \\ \omega^y \\ \omega^z \end{vmatrix} \quad (2)$$

Burada, $\omega^x, \omega^y, \omega^z$ gerçek dönü dēerlerini, $\tilde{\omega}^x, \tilde{\omega}^y, \tilde{\omega}^z$ hatalı ölçme dēerlerini, $\delta g_{DR}^x, \delta g_{DR}^y, \delta g_{DR}^z$ dönüölcer sabit kayma tekrarlanabilirliğini, $\delta g_{DS}^x, \delta g_{DS}^y, \delta g_{DS}^z$ dönüölcer sabit kayma kararlılığını, $\delta g_{RW}^x, \delta g_{RW}^y, \delta g_{RW}^z$ dönüölcer rastgele kaymasını, $\delta g_{SFR}^x, \delta g_{SFR}^y, \delta g_{SFR}^z$ orantı katsayısı tekrarlanabilirliğini göstermektedir.

3. HATA YAYILIMI

3.1. Kovaryans analizi

Seyrüsefer hataları ve ölçer hataları için oluşturulan modeller arasındaki bağlantılar kurularak gerçek hata modeli için sistem dinamiği matrisine ulaşılır. Sistem dinamiğinin matrisi aşağıdaki ilişkiyi sağlayan 15x15 boyutlu bir matristir.

$$\delta\dot{x} = F\delta x \quad (3)$$

Burada, δx 15 elemanlı durum vektörü, F sistem dinamiği matrisidir. Sistem dinamiği matrisi kullanılarak durum geçiş matrisine ulaşılır. Durum geçiş matrisi ile sistem dinamiği matrisi arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir:

$$\Phi(t + \Delta t, t) = e^{\int_t^{t+\Delta t} F(\tau) d\tau} \cong e^{F\Delta t} = I + F\Delta t + \frac{(F\Delta t)^2}{2!} + \frac{(F\Delta t)^3}{3!} + \dots \quad (4)$$

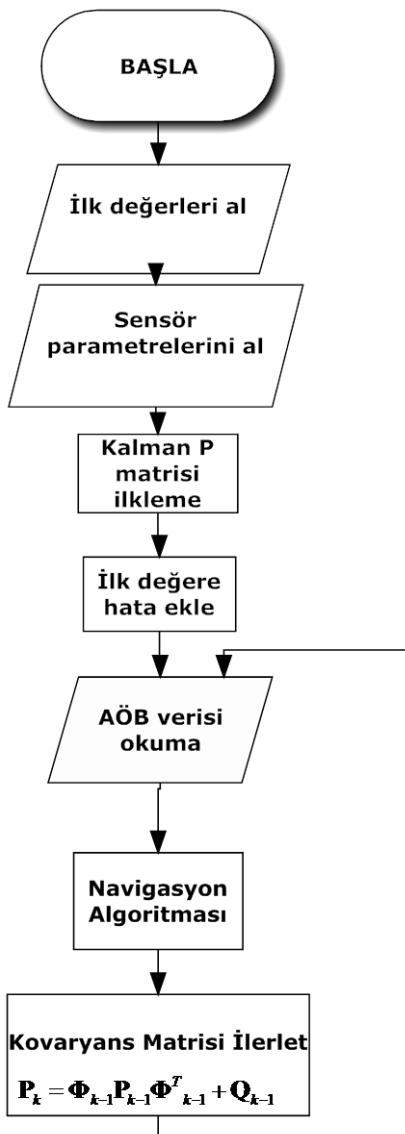
Burada, Δt kovaryans matrisi ilerletme zaman aralığını, $\Phi(t)$ durum geçiş matrisini göstermektedir. Küçük zaman aralıkları için durum geçiş matrisi, F matrisinin fazla değişmediği kabul edilerek Taylor serisi açılımı ile yakınsanabilir.

Süreç gürültüsü (girdi) kovaryans matrisinin (Q matrisi) elemanları ölçer başarım özelliklerini kullanılarak belirlenir. Q matrisinin elemanları ölçer orantı katsayısının, eksen kaymasının, rastgele kaymanın ve sabit kaymanın etkilerini gösterir. İvmeölçer ve dönüölcer sabit kaymaları birinci derece Markov süreci olarak modellenmiştir.

Hata modeli ve o anki seyrüsefer parametrelerini kullanarak herbir hata durumu üzerindeki belirsizliğin büyüğünü veren P durum kovaryans matrisi güncellenir [3]. Bu matris zaman içinde değişen durum vektörüne göre Riccati denklemi ile yayılım yapar:

$$P_k = \Phi_{k-1} P_{k-1} \Phi_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (5)$$

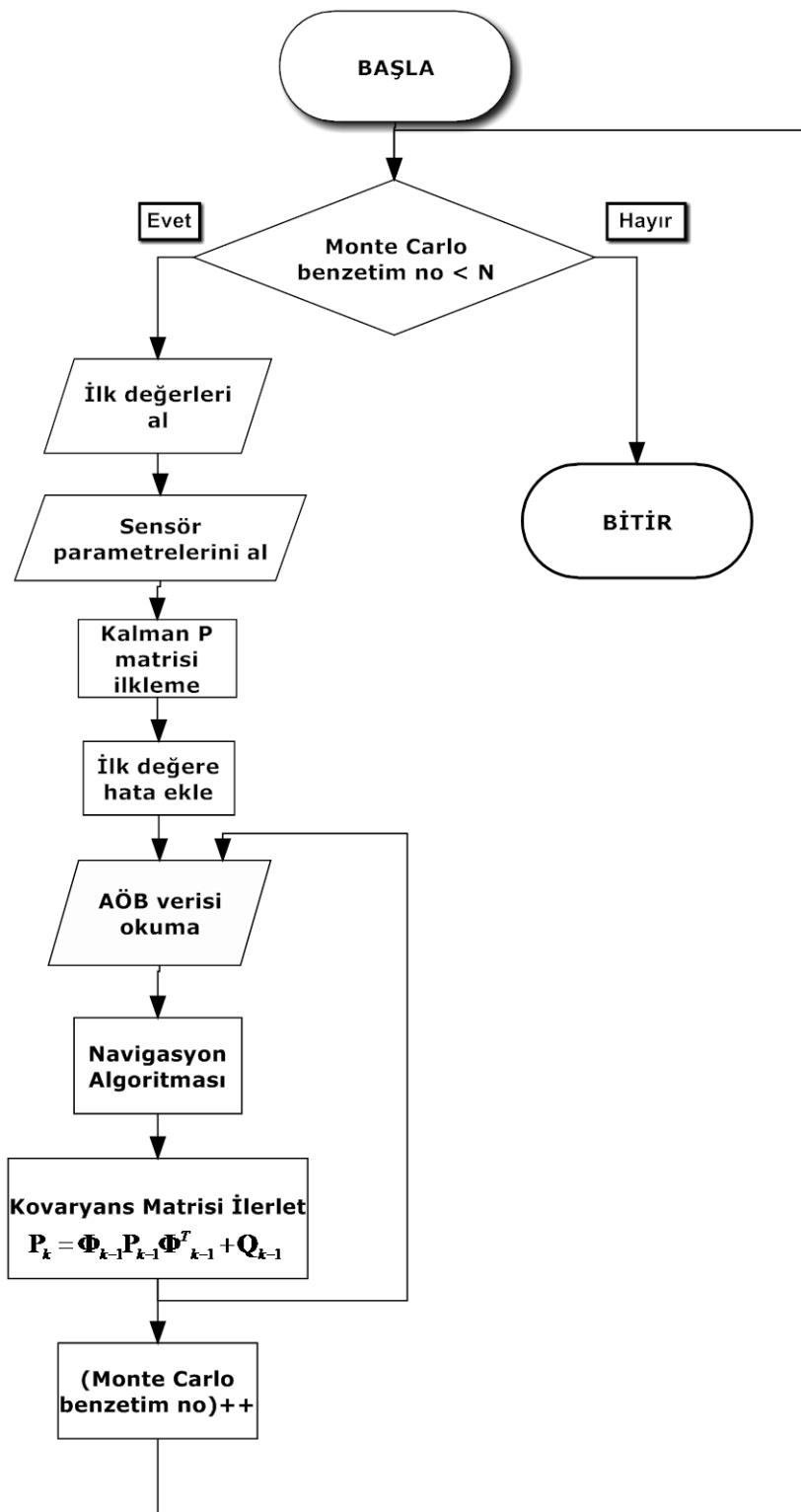
P_k , Φ_k , Q_k sırasıyla k 'nın zaman aralığındaki kovaryans matrisi, durum geçiş matrisi, ve süreç gürültüsü kovaryans matrisidir. P hata kovaryans matrisi simetrik matristir ve köşegen elemanlar karşılık gelen durumun belirsizliğini verir. Şekil-2'de kovaryans analizi akış şeması verilmiştir. Kovaryans analizi çıktıtı zamanla değişen P matrisi köşegen elemanlarıdır.



Şekil 2. Kovaryans Analizi

Monte Carlo analizi ^[4]

Rastgele üretilen sayılarından faydalananarak, hataların istatistiksel değişkenlere göre nasıl değiştiğini gözlemlmek için kovaryans analizi belirli bir süre için çok sayıda gerçekleştirilir. Böylece istatistiksel değişkenlerin rastgele değerler almaları durumunda da CEP hatalarının ne düzeyde olacağı bilinir. Monte Carlo analizi de ölçer parametrelerini belirlemek için önemli bir araçtır. Şekil-3'te Monte Carlo analizi akış şeması verilmiştir. Monte Carlo analizi çıktıları her benzetim sonundaki P matrisi köşegen elemanlarıdır.

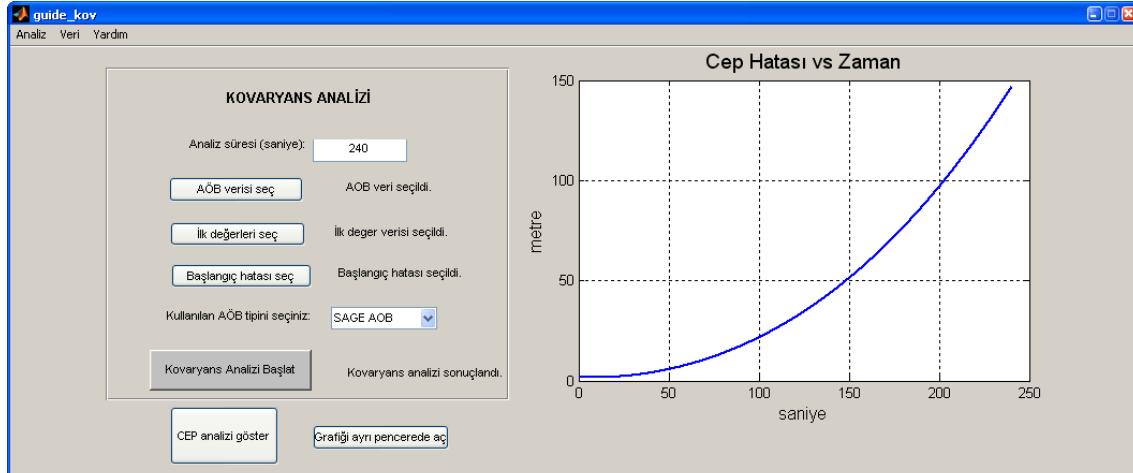


Şekil 3. Monte Carlo Analizi

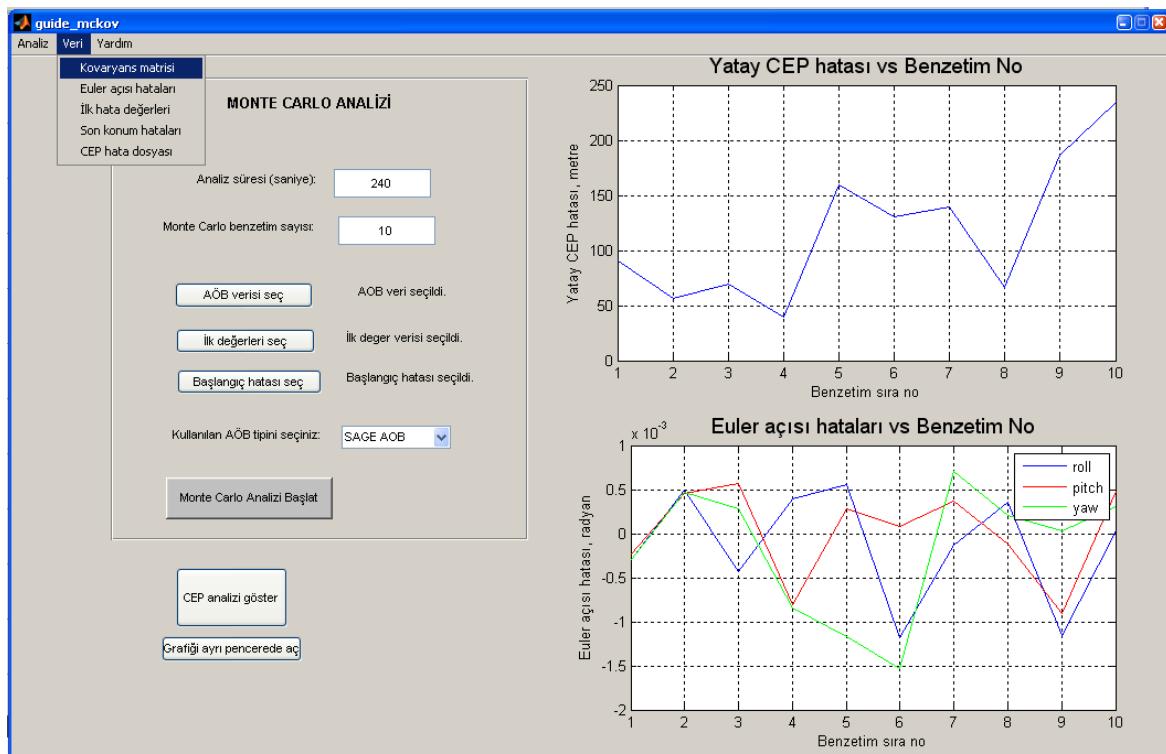
3.2. Arayüz programı

Kovaryans analizi ve Monte Carlo analizlerini yaparken kullanmak üzere bir arayüz programı hazırlanmıştır. Bu arayüz programı kullanıcının ilk değerleri, ilklandırma hatalarını, ideal ölçüm verisini, analiz süresini, ölçer parametrelerini ve benzetim

sayısını kolaylıkla girebilmesi ve analiz sonuçlarını grafik halinde görülebilmesi amacıyla oluşturulmuştur.



Şekil 4. Kovaryans analizi arayüzü



Şekil 5. Monte Carlo analizi arayüzü

Şekil-4'te kovaryans analizi, Şekil-5'te Monte Carlo analizi için oluşturulan arayüz programları gösterilmiştir. Bu arayüz Matlab GUI'de [5] oluşturulmuştur. C ortamında hazırlanan analiz kodlarına ait çalıştırılabilir (.exe) dosyaya gerekli girdiler (ilk değerleri, ilklandırma hatalarını, ideal ölçüm verisini, analiz süresi vb.) sağlanarak,

çalıştırılabilir dosya Matlab tarafından çağırılır, çıktılar görüntülenir ve grafik olarak gösterilir.

4. SONUÇ

Seyrüsefer sistemlerinde hata analizi yapabilmek, seyrüsefer sistemini tasarlarken kullanılan önemli bir yetenektir. İlk durum hataları ve ataletsel ölçer hatalarının seyrüsefer sistemi için ne derecede kabul edilebilir olduğunu belirlemenin etkili bir yöntemidir. Bu hata analizleri, kovaryans analizi ve Monte Carlo analizi ile gerçekleştirılmıştır. Kovaryans analizi ile zaman içerisinde hataların ne durumda değiştiği, Monte Carlo analizi ile rastgele değişkenlerin farklı değerler alması durumunda hatalardaki değişimler izlenebilir.

5. KAYNAKÇA

- [1] Titterton, D.H. ve Weston J.L. (2004), Strapdown Inertial Navigation Technology, 2nd Edition, *The Institution of Electrical Engineers*, 0-86341-358-7.
- [2] Lawrence, A. (1998), Modern Inertial Technology, 2nd edition, *Springer*, 0-387-98507-7.
- [3] George M. Siouris (2003), Missile Guidance and Control Systems, *Springer*, 0-387-00726-1.
- [4] Mooney, C.Z. (1997), Monte Carlo Simulations, *Sage Publications*, 0-8039-5943-5.
- [5] Matlab, Version 7.4.0.287 (R2007a), January 29, 2007.

İNSAN HATASI ANALİZİ İÇİN HATA SİMÜLASYONU

Hakan İŞÇİ ^(a), Sema ŞİMŞEK ^(b)

^(a) TUSAŞ A.Ş., Entegre Helikopter Sistemleri, hisci@tai.com.tr

^(b) TUSAŞ A.Ş., Entegre Helikopter Sistemleri, ssimsek@tai.com.tr

ÖZ

Farklı istatistiklerde değerler az çok değişse de, havacılık kazalarının %60-%75'inin nedeni “pilot hatası” olarak değerlendirilmektedir. Havacılık sektörü pazarında önemli bir yer tutan avyonik entegrasyon projelerinde de çeşitli değişkenlerden dolayı ortaya çıkan insan hatası kaynaklarının tespit edilmesi ve bunun için hata modellerine ve simülasyonuna ihtiyaç duyulmaktadır. İnsan hatası kaynaklarını etkileyen değişkenler işyükü, ekip koordinasyonu, farklı seviyelerdeki algı süreci, eğitim stratejisi, ekip üyelerinin tecrübeşi ve değişik seviyelerdeki karmaşıklık olarak sıralanabilir. Bu değişkenlerin birbirini nasıl etkilediğini belirlemek için insan hatasının oluşum sıklığı ve tahmini için yer testlerinden sistem entegrasyon laboratuvarına ve uçuş testlerine uzanan bir simülasyon süreci geliştirilmiştir. Bu yöntem, TUSAŞ Helikopter Bölümü projelerinde hava aracının emniyetli olduğu ve operasyon verimliliğinin sağlandığını göstermek için kalifikasyon amaçlı kullanılmaktadır. Çalışma kapsamında “İnsan Algısal Modeli” oluşturulmuş, çoklu kullanıcı için insan hatası noktaları belirlenmiştir. Belirlenen hata noktalarında olusabilecek hata tipleri İnsan Hatası Şablonu (Human Error Template - HET) yöntemine paralel olarak sınıflandırılmış ve hava aracının operasyon konseptine uygun olarak geliştirilen senaryolar üzerinde hata kaynaklarının simülasyonu oluşturulmuştur. Uçuş fazlarına uygun olarak oluşturulan görevler içinde simül edilen hatalar denekler üzerinde gözlenerek belirlenen sınıflamalara uygunluğu açısından değerlendirilmekte ve “Geçer/Geçmez” kararları verilmektedir. Geçmez kararı verilen hata tipleri için hata bariyerleri yada uçuş manuellerine uyarı girilir.

Anahtar Kelimeler: Algı, Anlama, İnsan Hatası, Simülasyon, Sistem Emniyeti

ERROR SIMULATION FOR HUMAN ERROR ANALYSIS

ABSTRACT

Even though different statistics show slight variation in numbers, around 60%-75% of all accident causes are traced back to “pilot error”. In avionic integration projects, which forms a considerable part of the aviation industry market, it is also necessary to predict

different human error; therefore, error models and simulations are needed. Human workload, crew coordination, perception on different levels, training strategy, crew experience and different levels of complexity effect human error sources. A simulation process has been developed from ground tests to System Integration Laboratory (SIL) to flight tests, in order to show the relationship among these sources. This methodology is in use for qualification purposes in TUSAŞ Helicopter Division projects to prove that the Air Vehicle is airworthy and operational effectiveness is achieved. In this study, the “Human Perceptual Model” has been prepared and human error points have been identified for multi-crew applications. Human error types are classified in those identified human error points in accordance with the Human Error Template (HET) method and error source simulation has been prepared on scenarios which are in line with the operational usage concept of said Air Vehicle. Simulated errors that are performed within the scenarios are observed on crew, classifications are validated and “Pass/Fail” criterions are given.

Keywords: Perception, Cognition, Human Error, Simulation, System Safety

1. GİRİŞ

İnsan hatası, havacılık sektöründe kazalar ya da emniyet kritik olaylarda “doğru olandan farklı” davranış ya da “sapma” olarak tanımlanabilir. Karmaşık hava aracı tiplerinde karşılaşılan bu tip kazalar için Sivil Sertifikasyon kurallarında beklenen değişiklikler 2011 yılının başında hayatı geçirilmeye başlanmıştır. Yolcu uçağı sınıfında (FAR/CS 25) uzun süredir beklenen 25.1302 numaralı gereksinim, 2011 yılının başında yayınlanmıştır. Bu gereksinimle birlikte yayınlanan Advisory Circular (AC) 25.1302, kabin ekibi tarafından yapılan tasarım ile ilişkili hataların, ekibin hataları fark etmesini ve yönetmesini sağlayarak, oluşma sıklığının azaltılmasını hedeflemektedir. Bu hata tiplerine uygun olmayan eylemlere örnek olarak prosedürde tanımlananın tersi işlem, yanlış karar, yanlış tuşa basmak veya yanlışlıkla silmek gösterilebilir.

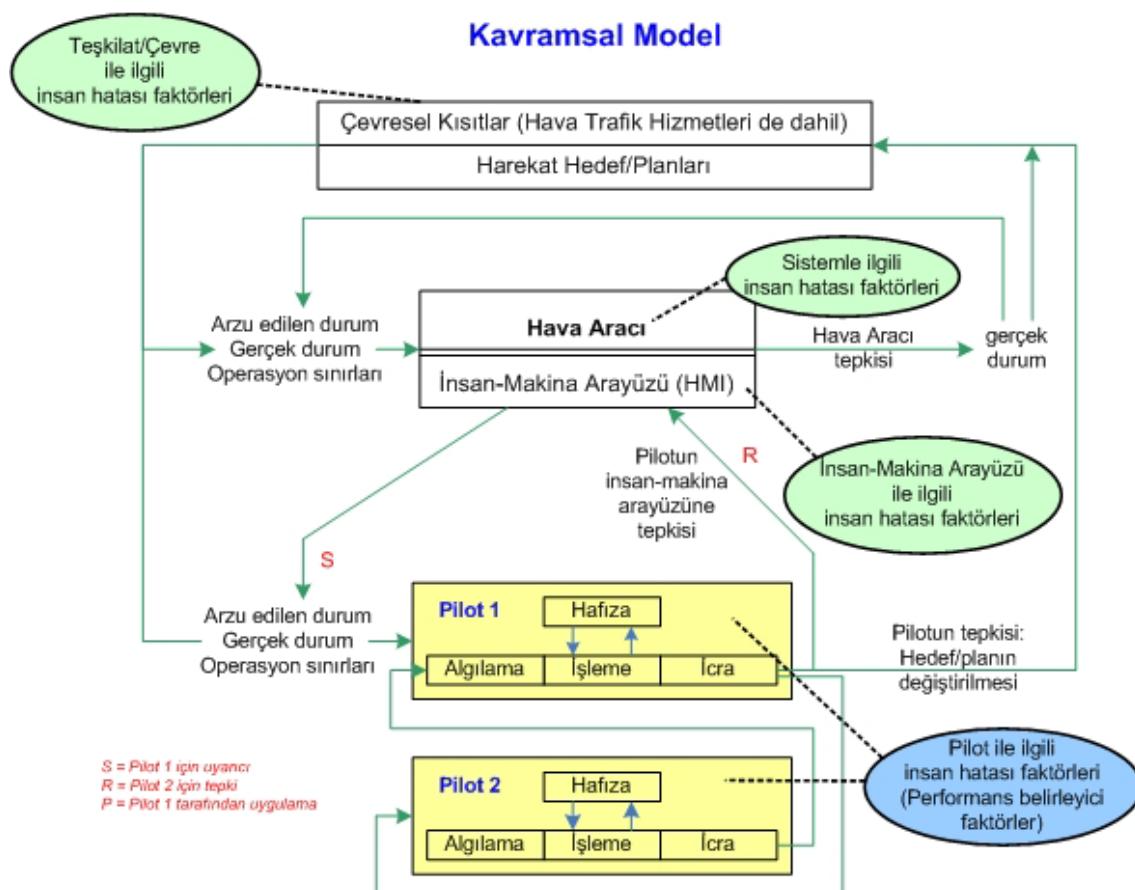
Kabin ekibi, sürekli değişen durumu muhakeme etmek, olası eylemleri analiz etmek ve mantıklı kararlar vermek sureti ile hava aracının emniyetine olumlu katkı yapar. Ancak iyi eğitilmiş, lisanslanmış, sağlıklı ve uyarılara dikkat eden uçuş ekipleri de hata yaparlar. Hataların bir kısmı sistem tasarımindan ya da sistem ile insan iletişiminden de kaynaklanabilir. Bu hataların çoğunu emniyete olumsuz anlamda önemli bir etkisi yoktur ya da normal olarak yapılan eylemler arasında tolere edilebilirler. Ancak yine de, kaza araştırmalarında önemli miktarda havacılık kazasının sebepleri arasında çoğunluk olarak insan hatası gösterilmektedir. [1]

İnsan hatası kaynaklarını etkileyen değişkenler işyükü, ekip koordinasyonu, değişik seviyelerdeki algı süreci, eğitim stratejisi, ekip üyelerinin tecrübesi ve değişik

seviyelerdeki karmaşıklık olarak sayılabilir. Bu değişkenlerin birbirini nasıl etkilediğine ek olarak, insan hatasının oluşum sıklığı ve tahmini için yer testlerinden sistem entegrasyon laboratuvarına ve uçuş testlerine uzanan bir simülasyon yöntemi geliştirilmiştir.

2. İNSAN MODELİ

Bu çalışmada, İnsan Faktörleri Harmonizasyon Grubu Raporu'nda [2] belirlenen hata kapsamı ele alınmıştır. Öne çıkan insan hatası alanları Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Kokpit için “Kavramsal İnsan Davranış Modeli”

Mürettebatın hata noktaları ortaya çıkarıldığında, tespit edilen hatalar için yapılan değerlendirmeler uzmandan uzmana değişebilmektedir. Ancak, bazı hata tipleri sonuçlarında yıkıcı (havacılık terminolojisinde “katastrofik” olarak nitelendirilmektedir) etkiler yaratabileceği için doğrudan sertifikasyon gereksinimlerinin içinde yer almış ve bunlar için düzeltici önlemler (örn. sesli uyarı mesajları) kuralların içine dahil edilmiştir. FAR / CS gereksinimlerinde görülen bazı insan hatası durumları aşağıda verilmiştir.

- İniş öncesi iniş takımlarının açılmasının unutulması

- Kalkış için yeterli olmayan konfigürasyonda kalkış (Flap pozisyonunun ayarlanmaması)
- Motor yanın ikazı alındığında yanlış motorun susturulması
- Hava aracının izin verilen en yüksek hızının üstünde kullanılması

Öte yandan aşağıdaki durumlara benzer durumlarda mürettebatın prosedürlere uygun şekilde görev yaptığı kabul edilir ve bu durumlar için hata senaryosu çalıştırılmaz, önleyici işlem tanımlanmaz.

- Hava aracı ağırlığının Uçuş Yönetim Sistemi'ne (Flight Management System – FMS) yanlış girilmesi.
- Mürettebat koltuğunun yanlış ayarlanarak dümen pedalının son noktasına kadar kullanılamaması ve ihtiyaç duyduğunda bu kontrolün istenilen seviyede tepki verememesi.
- Otopilotun izin verilen minimum irtifadan sonra devredışı bırakılmaması ve bunun sonucu olarak hava aracının iniş için burnunu toplayıp yumuşak inişe izin vermekszin sert iniş yaparak yapısal bütünlüğün bozulması.

İnsan hatası analizi ve bu analiz için yapılacak simülasyonda seçilen hatalar, bu tip temel kurallar ile belirlenmiş hataları barındırmamalıdır.

3. ÖN ÇALIŞMA

Simülasyonda insan faktörleri değerlendirme seanslarına gitmeden önce, hata tahmini yapılabilmesi için yukarıda tanımlanan model çerçevesinde kontrol listeleri oluşturulmalıdır. Bu amaçla, daha önceden oluşturulmuş “İnsan Hatası Şablonu” (Human Error Template - HET) kullanılmaktadır. Bu şablon, tasarım kaynaklı pilot hatalarını öngörmek için geliştirilmiştir. Bulgulara göre bu yöntem, halihazırda varolan diğer 3 yöntemle kıyaslandığında en doğru hata tahminlerini sunmaktadır. İnsan Hatası Şablonu yöntemi “Dış Hata Modu” (External Error Mode – EEM) sınıflandırma bilimini kullanmaktadır. Bu sınıflandırmada hatanın dış ve gözlemlenebilir göstergeleri kullanılarak hatanın hangi gerçekleşen olaylarda meydana geldiğini tanımlamaktadır. Burada sıralanan 12 hata tipi hem diğer İnsan Hata Tanımlaması (Human Error Identification - HEI) yöntemlerinin incelenmesi hem de tasarım kaynaklı pilot hatalarındaki olayların değerlendirilmesiyle ortaya çıkarılmıştır [3].

“İnsan Hatası Şablonu” yöntemi 12 temel hata modu [3] tanımlamaktadır:

- *İnfaz edememek*; örn. pilotun belirli bir görev ya da eylemi yerine getirememesi
- *Görev icrasını tamamlayamama*; örn. pilotun belirli bir görev ya da eylemin tamamını yerine getirememesi
- *Yanlış yönde icra edilen görev*; örn. pilotun belirli bir düğme ya da dümeni yanlış yöne çevirmesi
- *Yanlış görevin icrası*; örn. pilotun yanlış bir görev ya da eylemi yerine getirmesi

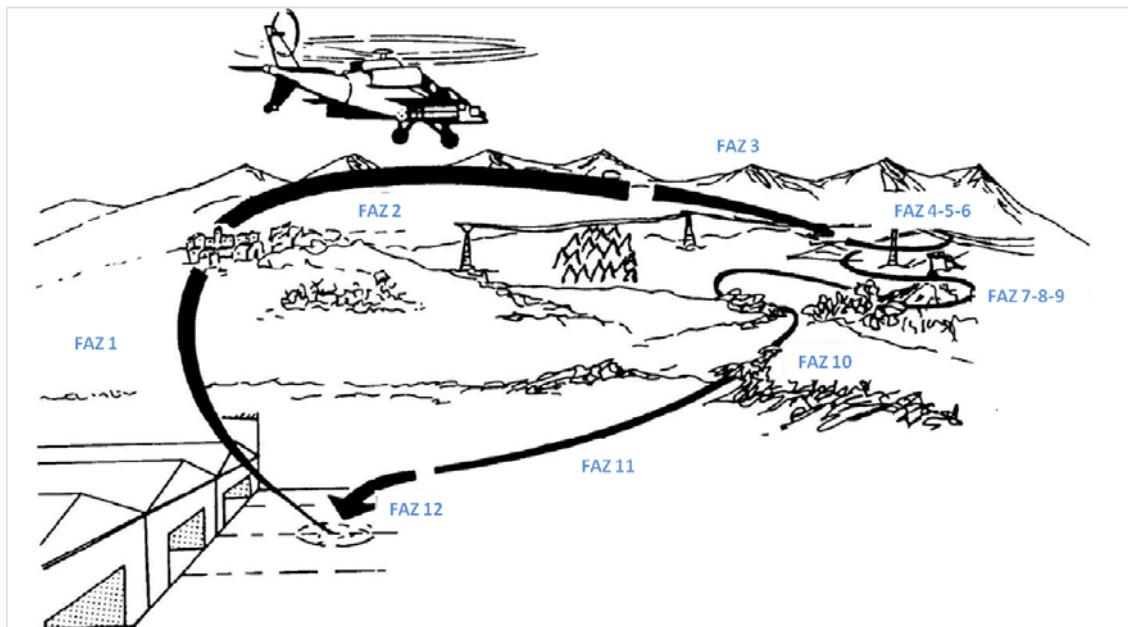
- *Tekrarlanan görev*; örn. pilotun doğru tuşa iki kez basması
- *Görevin yanlış arayüz elemanında icra edilmesi*; örn. pilotun yanlış tuşa basması
- *Çok erken icra edilen görev*; örn. pilotun belirli bir görev ya da eylemi sıralamadaki yerinden daha önce yerine getirmesi
- *Çok geç icra edilen görev*; örn. pilotun belirli bir görev ya da eylemi sıralamadaki yerinden daha sonra yerine getirmesi
- *Gereğinden fazla icra edilen görev*; örn. pilotun bir düğme ya da dümeni gereğinden fazla hareket ettirmesi
- *Gereğinden az icra edilen görev*; örn. pilotun bir düğme ya da dümeni gereğinden az hareket ettirmesi
- *Yanlış okunan/anlaşılan bilgi*; örn. pilotun bir ekranda aktarılan bir bilgiyi yanlış okuması
- *Diger*

Her bir olası hata için analizi gerçekleştirecek uzmanın, hatanın tanımı ve potansiyel sonuçlarını dikkate alması gerekmektedir. Bu çalışmada aşağıda verilen hata tipleri üzerinde durulmuştur.[3]

- Tepki göstermemme
- Usulden şaşma
- Sınır aşımı
- Otomasyonla savaşma
- Yanlış veri girişi
- Enerji yönetimi hatası
- Yeni sistemlere hakim olmama
- Yakıt yönetimi
- Buz ve buzlanma farkındalığı
- Bilgilerin bütünlüğü (hatalı bilginin ayırtılaması)
- Minimum irtifa ihlali
- Yakın kontrollerin yanlış kullanılması
- Standardizasyon ile ilgili yanlışlıklar
- Kalkış konfigürasyonun hatalı olması
- Piste yanlış yaklaşma

4. SENARYOLAR

Senaryolar, kokpitlerde insan makina arayüzünün doğrulanmasına yardımcı olacak şekilde mürettebat görev ve prosedürlerini kapsamalıdır. Özellikle kullanım ve operasyon kolaylığını, mürettebatın ortak çalışmasını, hata yönetimini ve işyükünü ele almmalıdır.



Şekil 2. Örnek senaryo

Çizelge 1. Örnek senaryoda fazların tanımı

FAZ 1	Başlatma/Kalkış –Yer etkisinde havada durma/Tırmanma
FAZ 2	Alçak irtifaya geçiş
FAZ 3	Yer profilini takip ederek son geçiş fazı
FAZ 4	1 no'lu atak pozisyonuna yer profilini takip ederek yaklaşma
FAZ 5	1 no'lu atak pozisyonu/füzelerin ateşlenmesi
FAZ 6	Yer profilini takip ederek ayrılma manevrası
FAZ 7	2 no'lu atak pozisyonuna geçiş
FAZ 8	2 no'lu atak pozisyonuna yaklaşma
FAZ 9	2 no'lu atak pozisyonu/füzelerin ateşlenmesi
FAZ 10	Yer profilini takip ederek dönüş
FAZ 11	Alçak irtifaya dönüş
FAZ 12	Yer etkisinde havada durma / İniş

Örnek senaryodan da görüleceği üzere, farklı hata tiplerinin ortaya çıkabilmesi için gerçek uçuşta olması beklenecek değişik uçuş ayaklarının da senaryoya dahil edilmesi gerekmektedir. Testlerden önce Uçuşa Elverişlilik Otoritesi ile senaryolar üzerinde hemfikir kalınması esastır.

5. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Analizler göstermektedir ki hava aracının kokpiti ve diğer sistemlerinin tasarımlarının mürettabatın görev performansı ve bazı pilot hatalarının sıklık ve etkileri üzerinde etkisi olabilir.

Değerlendirmelerin çoklu pilot setleri ile yapılması gerekmektedir. Değişik tecrübe seviyelerindeki pilot grupları ile yapılan değerlendirmelerde hatalar gözlenerek tekrar eden hataların bulunması, hataya sebeplerinin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Projenin ilerleyen safhalarında hata yaratan sistem unsurları için düzeltme işlemi yapılamıyor ise hata bariyerleri konması gerekmektedir. Önerilen pilot tecrübe seviyeleri ve değerlendirme için önemli parametreler ise Çizelge 2'de sunulmaktadır.

Çizelge 2. Değerlendirme ekibi için tavsiye edilen sınıflandırma

	Değerlendirici için önemli parametreler		
	Uçuş Saati (En az)	Uçuş Saati (En fazla)	“Glass Cockpit” Tecrübesi
Az Tecrübeli	500	1000	Evet
Orta Seviye Tecrübeli	1000	3000	Tercih edilir
Çok Tecrübeli	3000	5000+	Gerekmiyor

Değişik pilotlar ile yapılan değerlendirmelerde sık yapılan hatalar belirlenmeli ve bunlar için düzeltici önlemler alınmalıdır. Eğer tasarımda düzeltme yapılmıyor yada bir hata bariyeri konamıyor ise, uçuş emniyetini etkileyebilecek bu tip husular ile ilgili konular eğitim materyallerinde vurgulanarak pilot eğitimlerine girmesi sağlanmalıdır.

Sistem tasarımcısı için Pilot, iyi eğitilmiş, zor durumda muhakeme yeteneği ile doğru kararı verebilen bir kullanıcıdır. Eğitimi tanımlanan çerçevede yapılmış bir Pilot için, hava aracı sistemlerinin kullanıcı arayüzünün uçuş emniyetine etkisi iki ana başlıkta ele alınır.

- Pilot iş yükünün tanımlanan minimum personel tarafından gerçekleştirilecek seviyede olması
- Sistemin Pilot'un hata yapmasına sebep olmaması

Bu çalışma, uçuş emniyetinin temini için yapılması gereken İnsan Hatası Analizini tanımlamaktadır, ancak bu tip çalışmalar daima İş Yükü Analizleri ile birlikte gerçekleştirilmelidir.

Çizelge 3. Değerlendirme ekibi için tavsiye edilen sınıflandırma örneği

Faz	Mürettebat Görevi	Gözlem	Geçmez										Geçer
			İnfaz edememek	Görev icrasını tamamlayamama	Yanlış yönde icra edilen görev	Yanlış görevin icrası	Tekrarlanan görev	Görevin yanlış arayüz elemanında icra edilmesi	Cok erken icra edilen görev	Cok geç icra edilen görev	Gereğinden fazla icra edilen görev	Gereğinden az icra edilen görev	
Uçuş Planı	Yük Sorumlusu'ndaki yük çizelgesinin kontrolü	Yakit ve yük kontrolünün Yük Sorumlusu'nun öneri ve onayına göre gözlenmesi		Görev icrasını tamamlayamama	Yanlış yönde icra edilen görev	Yanlış görevin icrası	Tekrarlanan görev	Görevin yanlış arayüz elemanında icra edilmesi	Cok erken icra edilen görev	Cok geç icra edilen görev	Gereğinden fazla icra edilen görev	Gereğinden az icra edilen görev	
Uçuş Planı	Ayrılış bilgisinin yerleştirilmesi	Geçici uçuş planının doğrudan takılı olup olmadığı kontrol edilmesi											✓
Uçuş Planı	Alçak İrtifada Uçuş (LLF) Bölüm Tanımı	NTD ve FM formatlarının Alçak İrtifada Uçuş (LLF) planlaması için kullanılması											✓
Uçuş Planı	Havadan Hayava Yakıt Transferi İzleme Modeli Tanımı	Havadan Yakıt İkmal İzleme Modelinin eklenmesi için FM formatının kullanılması		X									
Uçuş Planı	Yük Atma Zamanı İşaretleyici Tanımı	Havadan yere yük atma hazırlığı, Kargo ve FM formülünün kullanımı											✓
Motor Başlatma	Motor Başlatma	Motor başlatma sıralaması Motor ve pervane parametrelerinin denetlenmesi (güç sınır modu, pervane dönüş hızı, motor güç göstergesi)											✓
Havada Yakıt İkmali	Tankerle görsel iletişim kurulması	Emisyon yöntemi ayar güncellemesinin gözlemlenmesi Yakıt format ayarının yakıt miktarı ayarı için gözlemlenmesi. Havadan Yakıt İkmal kural seçiminin gözlemlenmesi											✓

6. KAYNAKÇA

- [1] FAA, *Draft Advisory Circular 25.1302*
- [2] *Human Factors-Harmonization Working Group Flight Crew Error / Flight Crew Performance Considerations in the Flight Deck Certification Process* Federal Aviation Administration – USA, European Aviation Safety Agency – Europe
- [3] Neville A. Stanton, Don Harris, Paul M. Salmon, Jason M. Demagalski, Andrew Marshall, Mark S. Young, Sidney W. A. Dekker, Thomas Waldmann, *Predicting Design Induced Pilot Error using HET (Human Error Template) – A New Formal Human Error Identification Method for Flight Decks*, Aeronautical Journal, February 2006, Vol 110, No 1104, February 2006, pp107-115
- [4] Neville A. Stanton, Paul Salmon, Don Harris, Andrew Marshall, Jason Demagalski, Mark S. Young, Thomas Waldmann, Sidney Dekker, *Predicting pilot error: Testing a new methodology and a multi-methods and analysts approach*, Applied Ergonomics 40 (2009) pp464–471

UÇAK UYARI SİSTEMLERİNİN, EĞİTİMLERDE KULLANIM VE ANALİZ AMAÇLARIYLA HAZIRLANMIŞ BİR BİLGİSAYAR SİMÜLASYONU TASARIM ÖRNEĞİ

Yasin Kaygusuz^(a), Soner Uyar^(a), Çağrı İlçe^(a)

(a) TAI, TUSAŞ Türk Havacılık ve Uzay Sanayi A.Ş, AEYM, Aviyonik, Elektrik ve Yazılım Mühendisliği Grup Müdürlüğü, Fethiye Mah. Havacılık Bulvarı No:17 Kazan 06980 Ankara Türkiye, ykaygusuz@tai.com.tr, suyar@tai.com.tr, cilce@tai.com.tr.

ÖZ

Hava aracı mürettebat uyarı sistemleri, kritik durumların hava aracı mürettebatı tarafından anında fark edilmesini sağlaması ve varsa fonksiyon kayıpları hakkında bilgi vermesi sebebiyle hava aracında bulunan en önemli sistemlerden biri olarak değerlendirilir. Bu sistemleri tanımlayan uçaşa elverişlilik standartları, sertifikasyon dokümanları ve de rehber dokümanlarının yetersiz kaldığı ya da çeliştiği alanlar mevcuttur [1][2]. Bu çalışmada havacılıkta yaygın olarak kullanılan 3 tasarım rehberiyle uyumlu bir görsel/ışitsel uyarı sisteminin benzetilmesi çalışması özetlenecektir. Bu benzetim sistemi; farklı öncelik seviyesine sahip uyarıların görsel ve ışitsel gösteriminin yanı sıra, eşzamanlı gerçekleşmesi durumunda tasarlanan sistemin davranışını ve pilotun bu sisteme tepkilerini gözlemlemekte kullanılması amaçlanmıştır. Ayrıca acil durumlardaki pilot iş yükünün değerlendirilmesinde de kullanılabilecektir. Henüz tam ölçek bir simülatörü olmayan, özgün tasarım askeri ya da sivil hava aracı projelerinde pilot eğitimi ve uyarı sistemi mükemmelleştirmelerinde kullanımını da amaçlanmıştır. Tasarlanan benzetim sisteminde uyarı işaretlerine kaynaklık eden elektriksel, mekanik ya da hidrolik sistemlerin tamamı yerine, aynı ağ üzerinde bulunan birinde ikazların oluşturulacağı, diğerinde ise uyarı sisteminin benetileceği iki bilgisayar kullanılmıştır. Bu çalışmada uçaşa elverişlilik standartlarıyla uyumlu bir ikaz sistemi özellikleri yanı sıra, benzetim sisteminin mimarisi ve yazılım yapısı da anlatılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ağ üzerinde benzetim, aviyonik mimari, görsel ikaz sistemi, hava aracı mürettebat uyarı sistemi, insan makine arayüzü benzetimi, sesli ikaz, uyarı paneli.

THE COMPUTER SIMULATON DESIGN SAMPLE OF THE FLIGHT CREW ALERTING SYSTEM FOR THE EDUCATIONAL AND ANALYSIS PURPOSES

ABSTRACT

The Flight Crew Alerting System provides the flight crew members to realize instantly when there is a critical condition and gives information to the flight crew members if there is a function loss happened in the aircraft. Because of these reasons, Flight Crew Alerting System is one of the most important systems in the aircraft. Airworthiness standards, certification documents and the guidance materials describing the crew alerting systems have deviations and differences between each other in some subjects [1][2]. In this study, a visual/aural alert system simulation compatible with the three design guidelines that are very common used in aerospace industry is explained. Besides it is used to observe the system behaviour of the different priority levels of aural and visual alerts and simultaneous multiple alerts, this simulation is also used to observe the reaction of the pilot to this system. Moreover the pilot workload in the emergency conditions can be evaluated by the help of the simulation. Also one of the aims is to use in pilot training and alerting system development in indigenous civil or military aircraft design projects. The simulation does not include the sources such as mechanic, hydraulic or electrical systems, just the crew alerting system is included. Instead of them, the simulation system consists of two computers, first one is used to set the alerts and the second is used to simulate the alerting system displays. The study not only gives a definition of the alerting system design compatible with airworthiness standards, but also gives a definition of the architectures of the solution and the software.

Keywords: annunciator panel, aural alert, avionics architecture, flight crew alerting system, HMI, human-machine interface simulation, simulation on a computer network, visual alerting system.

1. GİRİŞ

Bir hava aracı birçok alt sistemin birleşmesinden ve birlikte çalışmasından oluşan bir sistemler bütünüdür. Her bir alt sistem kendi fonksiyonlarını yerine getirmenin yanı sıra diğer sistemlerle de koordineli bir şekilde de çalışmaktadır. Bu makaleye konu olan Uyarı Sistemleri ise Sesli uyarılar ile ilgili bölümler içermesi açısından Haberleşme Sistemi'ne, Görsel uyarılar ile ilgili bölümler içermesi açısından da Gösterge, Kayıt ve Kontrol Sistemi'ne dâhil edilmiş durumdadır.

Uyarı Sistemlerinin asıl amacı içinde bulunulan duruma pilotun dikkatinin çekilmesidir. Acil durumlarda pilotun konunun farkına bir an önce varması ve gereği beklenen işlemi

öngörülen zaman içinde yapması planlanmaktadır. Bunu da hatasız ve düzgün çalışan bir uyarı sistemi sağlamaktadır. Pilot içinde bulunulan birçok kritik durumun farkına kokpitte bulunan göstergeler vasıtasıyla ya da hissiyatla varabilir fakat burada zamana karşı bir yarış söz konusudur. Vuku bulan durum uyarı sistemi vasıtasıyla pilota kesin ve apaçık bir şekilde ifade edilirse acil durum esnasında pilot hem hesaplamalar, kontroller ve incelemeler ile zaman kaybetmemiş olur hem de kesin ve apaçık bir şekilde verilen uyarı sayesinde doğru müdahaleye de yönelsmiş olur [3][4].

Ayrıca birden fazla kritik durumun olduğu durumda pilota geri besleme sağlama özgürlüğü de uyarı sisteminin artılarından biridir. Perdövites (Stall) uyarısı ve yakıt az durumlarının aynı anda yaşandığı bir senaryoda daha önemli olan perdövites durumu giderilmeye çalışılırken yakıt az durumu unutulabilir. Sistemin görsel ve sesli olarak sağladığı uyarılar ile durum düzeltmediği sürece pilotun hatırlaması sağlanacaktır [5].

1.1. Bir uyarı sistemi benzetimi için kullanım alanları:

Bir hava aracındaki toplam uyarı sayı ve çeşitliliği tamamen hava aracının sınıfı, işlevi, büyülüğu ya da görev yükleri gibi unsurlarla belirlenir. Sistem, bazı çalışmalarda hava aracı pilot bilgi sisteminin kaybına yol açabilecek ya da önemli bir kayıp sayılabilen 6 önemli unsurdan birisi olarak analiz edilmiştir [6]. Dolayısı ile oldukça önemli bir sistemdir. Aynı zamanda oldukça karmaşıktır ve doğru biçimde kullanımı hayat kurtarabilir. Kritik bir durum esnasında uyarı sisteminin doğru ve etkili bir görsel ve/veya sesli uyarı üretmesi, pilotun gerekli müdahaleleri yapmasını sağlar. Böylece hem mürettebatı, varsa yolcuları hem de hava aracını kurtarabilir. Dolayısı ile bir uyarı sistemi simülatöründe pilotların eğitilmesi oldukça büyük önem arz etmektedir. Küçük bütçeli projelerde, özellikle de eğitim ve akrobasi amaçlı küçük uçaklarda tam ölçekli ve tüm işlevleri içeren bir simülatör yapılması dâmetansa, sadece kritik işlevlerin öğretildiği bir uyarı sistemi simülatörünün yapılması kabul edilebilir bir maliyet avantajı sağlayacaktır. Diğer yandan bu simülatörün de mümkün olan en küçük bütçeyle ve en işlevsel biçimde yapılması temel mühendislik yaklaşımlarından birisidir. Pilotların çeşitli senaryolarla eğitilebildiği bir simülatörün oldukça işlevsel olacağı gözle görünen bir gerçeğtir. Benzer şekilde ikaz sisteminin mükemmelleştirilmesinde ve atlanması muhtemel bir takım işlevlerin fark edilmesinde de bu tip bir simülatör faydalı olacaktır. Yine hava aracı sistem tasarımlı işine yeni başlayan mühendislerin uyarı sistemlerinin işleyişi üzerine eğitilmesinde de kullanılabilir.

Bu çalışmada bu tip küçük bütçeli bir ikaz sistemi benzetim sisteminin tasarımlı anlatılacaktır. Ayrıca kullanım ile ilgili bir takım örnekler de verilecektir. Ama sistemin işlevlerinin anlaşılabilmesi için buradan sonraki başlıklarda, kısaca da olsa benzetimin gerçekleştirdiği tüm ikaz sistemi özellikleri de anlatılacaktır. Böylece ikaz sistemi benzetimin görevleri de netleşecektir. Bu çalışmada kullanılan uyarı sistemi tasarlanırken sistemin dünya havacılık otoritelerinin sertifikasyon rehberleriyle uyumlu olması da amaçlanmıştır. Bu nedenle çeşitli rehber dokümanlardan yararlanılmıştır. Bu

çalışmada bu tip bir küçük bütçeli ikaz sistemi benzetim sisteminin tasarımları anlatılacaktır ve benzetime temel teşkil eden özellikler özetlenecektir.

2. UYARI SİSTEMİ GENEL YAPISI

2.1 Uyarı sistemi mimarisi ve alt bileşenleri:

Hava Aracına ait uyarı sistemleri genel itibariyle sesli uyarılar ve görsel uyarılar olmak üzere 2 kısımdan oluşur [5]. Ancak bazı yarı sistemlerinde dokunsal uyarılara da rastlanmaktadır (Perdövites uyarısı için levye sallayıcı (stick shaker)'da kullanıldığı bazı hava platformlarında görülmüştür). Bu başlıkta daha sonra benzetimi anlatılacak olan bir uyarı sisteminin özelliklerinden bahsedilecektir. Sonunda ise benzetimi anlatılacaktır. Uyarı sistemi tasarımında kullanılan rehberler bu alanda dünyada en yaygın kabul görmüş dokümanlar arasındadır.

Sesli ve görsel uyarılar sistemlerini oluştururken temel alınan ölçüt uyarılarının kritiklik seviyeleridir. [3] numaralı rehber uyarıları 4 ayrı sınıfta gruplamaktadır. Daha askeri bir görüntü çizen [5] ise 3 seviyeyi yeterli görmüştür. Bu iki rehbere göre kendi içinde gruplara ayrılan uyarılar [4] numaralı rehbere göre de kendi içinde önemlerine göre bir öncelik sırasına dizilirler. Bu çalışmada uyarılar 3. seviye uyarılar (Warning), 2. seviye uyarılar (Caution), 1. seviye uyarılar (tavsiye mesajları, Advisory) ve Bilgi mesajları yani 0. seviye uyarılar (bilgi mesajları) olarak adlandırılabilirler. Her durumda da en yüksek seviyeli uyarı en kritik uyarıdır. Aşağıda bu seviyeler özetlenmiştir.

3. Seviye Uyarı (Warning): Acele pilot müdahalesi gerektiren durumlar için öngörülen uyarı seviyesidir. Bu uyarılarda pilotun gereği beklenen işlemi bir an önce yapması planlanmaktadır. Geçen zaman bu seviyedeki uyarılar için oldukça önemlidir [3].

2. Seviye Uyarı (Caution): Acele pilot farkındalığı gerektiren anormal durumlar için öngörülen uyarı seviyesidir. Bu uyarı seviyesi esnasında da pilot müdahalesi gerekmektedir fakat 3. seviye uyarı ile kıyaslandığında bu süre daha uzun tutulmuştur. Öncelikli amaç pilot farkındalığıdır. Hava aracında daha kritik bir durum kalmadığı şartlarda (ortamda birden fazla kritik durum uyarı var ise) pilot gereği beklenen işlemi yapması gerekmektedir [3].

Tavsiye mesajları: Sadece pilot farkındalığı gerektiren durumlar için öngörülen uyarı seviyesidir. Bazı 1. Seviye Uyarılar için sadece farkındalık yetecek iken bazıları için de pilot müdahalesi acil olmamak kaydıyla gerekmektedir. Genel itibariyle 1. Seviye uyarılar için sesli uyarı öngörülmemektedir. Görsel ikaz rengi beyazdır. Bu tavsiye mesajları genellikle askeri uygulamalarda kullanılmaz [4].

Bilgi mesajları: Sadece kokpite bildirimi gereken durumlar için öngörülen uyarı seviyesidir. Pilotları durum konusunda bilgilendirme amaçlanmıştır. Beraberinde herhangi bir pilot müdahalesi gerekmemektedir. Uyarı rengi olarak yeşil kullanılması öngörlmektedir [3].

Tasarlanan uyarı sisteminde pilotların gelen her bir 3. ve 2. Seviye uyarıyı fark ettiklerini sisteme bildirmeleri için birer master anahtar eklenmiştir. Yeni gelen görsel ikazlar uyarı panelinde 2 Hz.'lik bir frekansla yanıp sönecektir. Pilot bunu fark ettiğini master anahtar-lambasına basarak sisteme bildirecek, ancak o zaman master ikaz sönecek ve görsel ikaz yanıp sönmeyi bırakarak normal yanmaya başlayacaktır (3. Seviye uyarılar için bu durum geçerli, 2. Seviye uyarılar için herhangi bir yanıp sönme (blink) fonksiyonu düşünülmemiştir). Ayrıca bu basma işleminden sonra sesli ikaz da susacaktır [3][4][5]. Ancak pilotun bu süreci uçakta anormal durumu düzeltme sürecinin içine yayması gereklidir. Yine uyarı sistemi tasarım rehber dokümanları seviye 3 ikazlar için master warning ve seviye 2 ikazlar için master caution'u zorunlu kılmıştır. Ayrıca seviye 3 ikazlar için sesli (ton ya da sözlü mesaj) zorunlu kılmıştır [5]. Burada söz konusu olan uygulamada seviye 2 ikazlar için de genel bir ses olan CAUTION sesli uyarısı kullanılmaktadır.

2.2. Sesli uyarı donanımları

Sesli uyarısı, görsel uyarının yanında öngörülmüş uyarılar için ton üretici ve ses üretici kullanılmaktadır. Sesli uyarısı ton olarak atanmış uyarılar için ton üretici kullanılır. Üretilen ton sesi pilotların kulaklıklarına aktarılır ve kulaklık vasıtasyyla pilotlar bu sesi duyar. İnsan kulağının farklı tonları ayırt etme kapasitesi sınırlı olduğundan dolayı bir uçahta sesli uyarılar için kullanılacak ton sayısı da sınırlanmıştır. Genel olarak 10 çeşit farklı tondan fazlasının kullanılması öngörülmemektedir.

Ses Üretici: Sesli uyarısı sentetik insan sesi olarak atanmış sesli uyarılar için ses üremede kullanılır. Üretilen sentetik ses pilotların kulaklıklarına aktarılır ve kulaklık vasıtasyyla pilotlar bu sesi duyar.

Kokpitte hem iç haberleşmeden (pilotlar arası interkom vasıtasyyla yapılan haberleşme), hem dış haberleşmeden (telsizler vasıtasyyla; kuleyle ve diğer hava araçlarıyla yapılan haberleşme), hem de seyrüsefer ekipmanlarından gelen tonlardan kaynaklanan sesler bulunmaktadır. Bunlara Sesli Uyarılar olarak eklenen Ton ve sentetik seslerin pilotun iş yükünü arttıracı ve diğer sesleri engelleyici durumda değil, iş yükünü azaltıcı ve acil durumu açıkça bildiren şekilde olması istenmektedir. Bu sebeple uyarıları değerlendirirken ne çok önemli olmayan uyarıya kritiklik seviyesi atanmalıdır ne de çok önemli olan bir uyarıya sıradan uyarı değerlendirmesinde bulunulmalıdır. Çok önemli olan Perdövites uyarısının 1. seviye olarak değerlendirilip sesli uyarı atanması ne kadar ciddi bir yanlış ise, sadece bilgi amaçlı olan EXT PWR ON uyarısının da 3. seviye uyarı olarak değerlendirilip sesli uyarı atanması da o kadar yanlıştır.

2.3. Görsel uyarı bilgi ekranı

Her bir uyarı için atanmış özel hücreye sahip olan Görsel Uyarı Bilgi ekranında 4 farklı uyarı seviyesi için 4 farklı renk kullanılmıştır. Bu renklerden önceki bölümlerde bahsetmiştik. Aşağıda şekil 1'de tek turbo-prop motoru olan bir uçağa ait, daha önce tasarlanmış ikaz paneli ekranı görülmektedir.

Bu hava aracı mimarisine göre bağımsız bir donanım da olabilir, ya da aktif matrisi sıvı kristal ekranlardan oluşan ana borda panellerinde bir sayfadan da ibaret olabilir. Her iki durum da kullanılmaktadır. Sadece 3. Seviye uyarılar (OXYGEN, ECS Fail, vb) için blink etme (belirli bir periyotta yanıp sönme) öngörülmüştür. Diğer seviyeler (GEN, ICE, vb) için böyle bir durum yoktur. Her bir uyarının aktif olması durumunda ilgili hücredeki görsel bilgi ışığı yanacak, aktif olmadığı durumda da ışık sönektir.

STALL	OIL PRESS LOW	OXYGEN	CAS FAIL
PMU FAIL	CANOPY	ECS FAIL	CABIN PRESS
FUEL PRESS	HYD PRESS	EMER HDY PRESS	HYD QTY LOW
HYD OVERTEMP	FLAP OVSPD	ENG CHIP	-----
SEAT NOT ARMED	L FUEL LOW	R FUEL LOW	ENG F FILTER
M BAT HOT	GEN	M BAT OFF	FCU STATUS
ICE	PROP D-ICE FAIL	ICE DET FAIL	CABIN ALT
F IMBALANCE	AUX BOOST ON	PRI PITOT STAT	SEC PITOT STAT
PMU STATUS	F SOV CLOSED	HYD SOV CLOSED	MAN F BAL
TRIM DISC	-----	-----	-----
F FILTER	-----	-----	-----
PROP -DICE ON	SPEED BRAKE	NWS	EXT PWR
IPS	IGNITION	ENG START	-----

Şekil 1. Görsel uyarı bilgi ekranı.

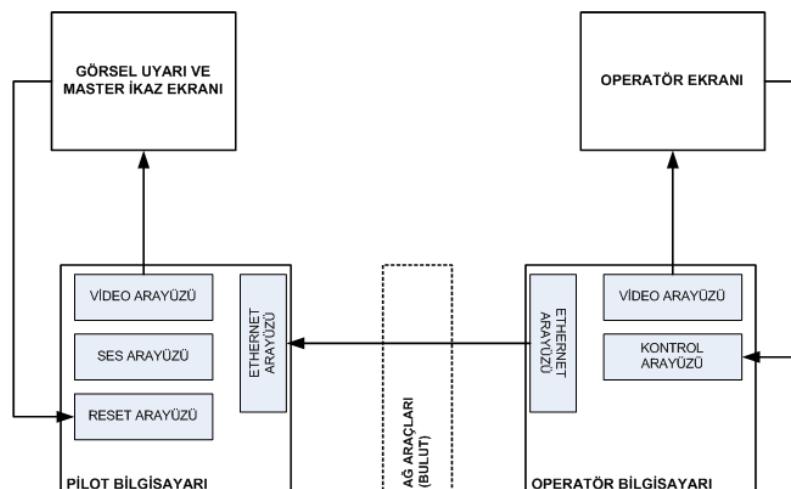
3. BENZETİM SİSTEMİ YAPISI

Benzetim sistemi tasarılanırken önceliği etkinlik ve maliyet kriterleri almıştır. Benzetim sisteminin pilot arayüzü kısmı, uyarı sisteminin tüm unsurlarını içerecek nitelikte olmalıdır. Etkinlikten kastedilen budur. Dolayısı ile hem sesli ve görsel uyarı yeteneklerini, hem uyarı reset yeteneğini hem de ana görsel uyarı yeteneğini içeren bir sistem tasarılanmalıdır. Diğer yandan sistemin ilk seviyede sadece eğitim amaçlı kullanılacak olması nedeniyle, kulaklıklar ya da benzeri detay donanımlara ihtiyaç yoktur. Maliyet kriterinin etkisi ile olabildiğince, donanımsal içeriği az, ama yazılımsal olarak tüm işlevleri yerine getirebilen bir sistem gerekmektedir. Ayrıca pilotların, benzetim sistemini yöneten kişilerce (operatör) verilecek uyarıları önceden görmemeleri için bu arayüz pilot arayüzünden bağımsız olmalıdır. Benzetim sisteminin ilk seviyesi devreye alındıktan sonra ikinci bir seviye ile daha gelişmiş ve yetkin bir sistem tasarlanabilir, yani sistem daha ileriye götürülebilir. Bu çalışmada sadece tasarlanan sistem değil aynı zamanda ilerideki çalışmalar için planlananlar da anlatılacaktır.

3.1. Sistem mimarisi

Sistem temelde iki ticari bilgisayardan (çift çekirdekli işlemcilere sahip PC donanımları) oluşmaktadır. Bu iki ticari bilgisayar bir bilgisayar ağı üzerinde çalışacaktır. Aslında

ikaz sistemini besleyen kaynak sistemler oldukça fazla sayıda olabilir. Burada söz konusu olan tek motorlu hava aracında 17 farklı sisteme ait uyarılardır. Belki ileride her bir sistem için farklı bir modellemenin koştuğu daha geniş bir bilgisayar ağı düşünülebilir. Şu an için operatör ekranında 17 farklı sisteme ait uyarının gösterildiği görsel uyarı ekranıyla birebir aynı bir anahtarlar matrisi mevcuttur. Operatör bu anahtarlarla basarak uyarıları üretebilmektedir. Üretilen uyarılar bilgisayar ağı üzerinden diğer bilgisayara gönderilmektedir. Bu kısmın detayları yazılım mimarisi başlığında anlatılacaktır. Diğer bilgisayarda ise gerekli ikaz paneli, sesli uyarı, master görsel ikaz ve reset işlevlerini gerçekleştiren bir başka yazılım paketi mevcuttur. Aşağıda 2 numaralı şekilde bu donanım mimarisinin özet bir çizimi görülmektedir. Şekil 2'de görülen donanım mimarisinde kullanılan ekranların dokunmatik olarak adlandırılan ve yüzeylerinde dokunulan noktayı algılayan donanımlar olması, böylece dokunmaya dayalı bir insan makine arayüzü de sağlaması amaçlanmıştır. Yine şekil 2'de görülen pilot bilgisaylarından sistemde birden fazla olabilir. Bu birden fazla pilotun aynı ikazlar üzerine aynı anda eğitimini sağlayacaktır.



Şekil 2. Benzetim sistemi donanım mimarisi

Piyasada yaygın bir şekilde kullanılan birkaç modelleme yazılımı mevcuttur. Bu yazılımların discrete modelleme özelliklerinin ikaz panelinin doğasını modelleme de çok da etkin olmayacağına karar verilmiştir. Çünkü bu yazılımların büyük çoğunluğu çalışmakta olan bir simülasyona müdahaleyi olanaksız kılmaktadır. Bu ticari yazılımlarda sistemde bir anahtarın durumunu değiştirebilmek için yazılımı durdurmak (pause) gerekmektedir. Oysaki pilot eğitimi esnasında operatörün anlık müdahaleler yaparak, acil durumlarda tepkilerini doğru ayarlaması yönünde pilotu eğitmesi gerekmektedir. Benzer şekilde bu ticari modelleme yazılımlarının ayrık (discrete) modelleme (uyarı sisteminin çalışması ayrık uyarı sinyallerinin seviye değişikliklerinden ibaret olduğu için ayrık modellemeye daha uygundur) modlarının arayüz yetenekleri çok zayıftır. Bu nedenle ticari bir modelleme aracı yerine kendi yazılımımızı geliştirmek tercih edilmiştir. Aslında bu çalışmanın yazılım kısmından

ziyade uyarı sisteminin davranış biçiminin tasarılanması kısmı asıl büyük iş yükünü teşkil etmektedir. Tüm bu nedenlerle yukarıda şekil 2'te görülen bilgisayarlarda ticari bir modelleme ya da benzetim yazılımı değil, kendi ürünümüz olan davranış modelini içeren yazılım koşmaktadır.

İkaz sisteminin tepki süreleri aslında oldukça kısa sürelerdir. İdeal bir uyarı sisteminde donanımın ve yazılımın toplam tepki süresi 150 ms ile 250 ms arasında olması istenmektedir. 500 ms'den daha büyük gecikmeler ise kesinlikle kabul edilmemektedir [5]. Bu nedenle benzetim sisteminin de toplam tepki süresi maksimum 250 ms olarak belirlenmiştir. İleride daha hassas bir benzetim sistemine ihtiyaç duyulması durumunda ikaz paneli sisteminin en azından pilot bilgisayarı kısmının bir gerçek zamanlı işletim sistemi üzerinde koşacak şekilde yeniden tasarlanması mümkündür. Şu an için; ticari bilgisayarlar üzerinde maksimum 250 ms gecikmesi olan bir uyarı sistemi benzetimi tasarlanmış, uygulanmış ve devreye alınmıştır.

3.2. Yazılım mimarisi

Simülasyon yazılımı TCP/IP protokolü kullanan bir sunucu/istemci uygulaması olarak geliştirilmiştir. TCP/IP kullanılması, sistemi yavaşlatmasına rağmen, güvenilirlik bakımından kaçınılmaz olmuştur. Sunucu ve istemci yazılımları bir önceki paragrafta bahsedilen iki ayrı ticari bilgisayar üzerinde koşmaktadır.

İstemci yazılımı, 4 izlekten oluşmaktadır. İlk izlek gelen uyarıları TCP üzerinden okuma işlevini gerçekleştirmektedir. İkinci izlek okunan uyarıları görsel arayüze yansitan ve seviye 3 uyarılar için ışıkların yanıp sönmesi işlevini kontrol eden bir uygulamadır. Üçüncü olarak sesli uyarıları öncelik sırasına göre işleyen ve doğru sıra ile çalınmasını sağlayan bir izlek mevcuttur. Sonuncu izlek ise master ikaz lamba-anahtarlarının kontrollerini yapma işlevini yerine getirmektedir.

Sistem zamanı, 10 ms aralıklarla alınıp seviye 3 uyarıların yanıp sönmesi işlemi için kullanılmaktadır. Bu kontrol aralığının pilot tepki süresinin çok üzerinde olduğu ve bir eğitim simülatörü için yeterli olduğuna karar verilmiştir.

İstemci tarafında gelen her uyarı mesajı, geldiği andaki sistem zamanına göre işlenir. Böylece anlık tepkiler alınabilmektedir. Yani aslında her bir ikazın bireysel olarak ayrı ayrı yanıp sönmesi mevcuttur. Çünkü orijinal hava aracı üzerindeki ikaz sisteminde her bir uyarıının LED aydınlatmaları ayrı ve bağımsız LED kontrol entegre devreleri ile yönetilmekte ve böylece çeşitli uyarıların yanıp sönme işlevi eş zamanlı olmamaktadır. Bu önemlidir. Aksi durumda tüm ikazların birlikte yanıp sönmesi pilotta panele gelen elektrik enerjisinde kesilmeler olduğu hissini yaratabilir.

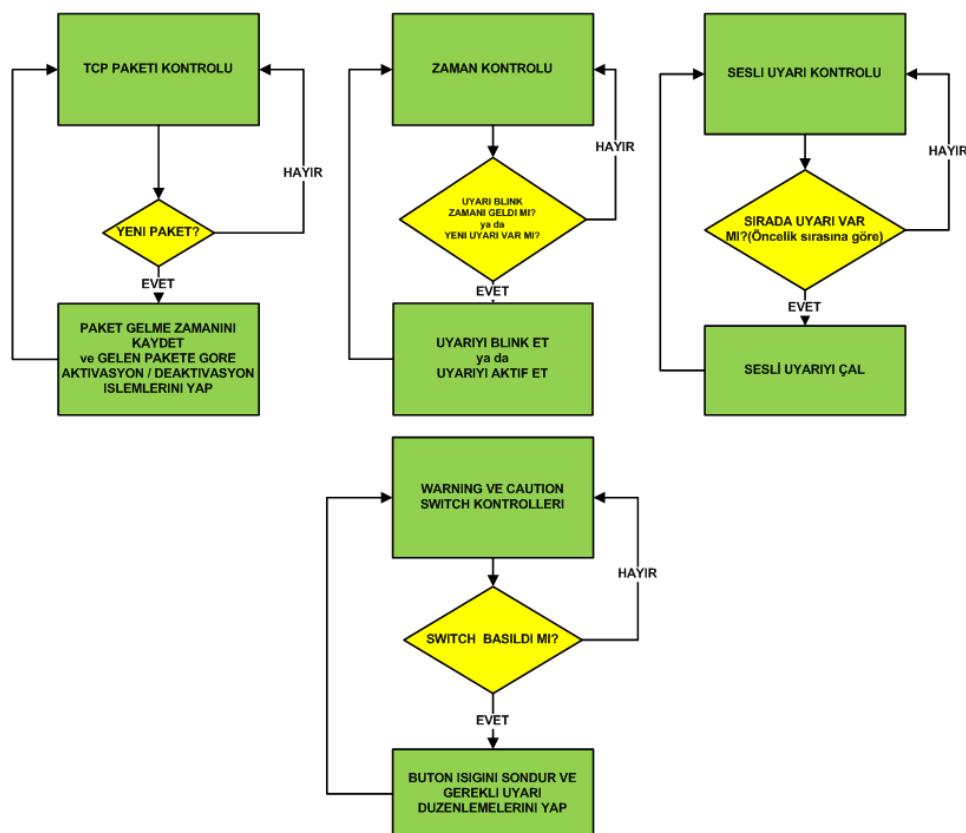
Sunucu tarafında da bir takım izlekler çalışmaktadır. IP tabanlı bir bağlantı söz konusu olduğu için istemci tarafında hedef cihazın IP'sinin girilebildiği ve sistem kullanıcılarının bağlantı ayarlarını yaptıkları bir ekran mevcuttur. Bu ekran üzerinden yapılan bağlantı istemi sunucu tarafında ilgili izlekle karşılaşmaktadır. Ayrıca sistem birden fazla istemcinin bağlanabileceği şekilde tasarlanmıştır. Böylece aynı ikaza iki

ayrı benzetimde çalışan iki farklı pilotun tepkileri birlikte gözlenebilecektir. Bu eğitimler esnasında ciddi bir avantaj sağlayacaktır.

Sunucu yazılımı yukarıda bahsi geçen IP bağlantı isteklerini işleyen izlekten başka bir de operatörün yaptığı ikaz girişlerini işleyen ve istemciye yollayan bir diğer izlek içermektedir. Özetle sunucu yazılımı 2 izlekten oluşmaktadır.

Tüm izlekler arası etkileşimler atomik kilitler ile düzenlenmektedir. Ayrıca, sistemin izlenebilmesi amacı ile kayıt tutma özelliği de eklenmiştir.

Şekil 3'de bu izleklerin algoritmik yapısını basitçe özetleyen çizimler verilmiştir.



Şekil 3. İstemci tarafından izlekler

Yukarıdaki paragraflarda bahsedilen ve istemci tarafı şekil 3'te çizilmiş olan bu izlekler dışında bir de “senaryo üreteci” adı verilen bir diğer işlev mevcuttur. Bu işlev daha önceden planlaması yapılan bir takım senaryoları yine daha önceden yapılan zamanlama planlamasından yararlanarak, istenen zaman aralıklarında istemciye yollamaktadır. Bu şekilde hava aracında birbirini takip etmesi muhtemel uyarıların peş peşe uygun sırada üretilerek pilotun karmaşık durumlara hazırlanması amaçlanmıştır. Senaryo üretecinde önceden hazırlanan senaryolar operatör tarafından başlatılarak pilot karışık ve zor durumlarda bırakılır. Örneğin bu çalışmaya konu olan uçakta iklimlendirme sisteminin arızasını gösteren ECS FAIL uyarısının aktif edilmesi durumunda paralel olarak birkaç saniye sonra OXYGEN uyarısının da aktif duruma

geçmesi kuvvetle muhtemeldir. Bu ikazlar şekil 2'deki ekranдан takip edebilir. Bunu takiben kabin basıncının da eş zamanlı kaybedilmesi durumunda, CABIN ALT uyarısı da yanacaktır. İlk iki uyarı seviye 3 olduğu için yanıp sönecek, CABIN ALT ise seviye 2 olduğu için sabit şekilde ilgili panel hücresinde sarı renkte yanacaktır. Bu arada master ikazlardan da hem master warning hem de master caution yanacaktır. Ayrıca sesli uyarı sistemi de peş peşe OXYGEN-WARNING ve CAUTION sesli mesajlarını tekrar etmeye başlayacaktır. Dolayısı ile bu pilotun komple bir kabin basıncı, iklimlendirme ve oksijen kaybı durumunu yaşadığı çok karmaşık bir durumdur ve bu durumun yerde yaratılarak pilotun eğitilmesi büyük bir avantaj sağlayacaktır.

Senaryo üretici sunucu yazılımının tam olarak bu tip senaryoları oluşturmaya ve üretmeye yarayan bir parçasıdır.

Son evrede sunucu ve istemci yazılımının çalışırlığı test edilmiş ve kullanılacak bilgisayar donanımlarına kurulumlar gerçekleştirilmiştir.

4. UYGULAMA VE SONUÇ

Genel havacılık sınıfı hava aracı pilotunun temel görevi uçuş gerçekleştirmek ya da yönetmek iken, askeri bir hava aracında durum çok farklıdır. Uçmak işlevinin yanı sıra askeri pilotun tamamlaması gereken bir takım görevler vardır. Bunlar havadan havaya, havadan yere çarışma, keşif, eğitim ya da gözlem gibi çok büyük bir çeşitlilikte olabilir. Dolayısı ile askeri pilot arayüzü tasarımda pilot iş yükünün azaltılması büyük bir önem taşımaktadır. Ancak pilot uçuş iş yükü minimize edildiğinde, pilotun askeri görevlerine ayırdığı zaman artırılmış olur. Bu nedenle askeri hava araçlarının pilotlarının yerde uyarı sistemi üzerine eğitilmesi görev başarısında kayda değer artış sağlayabilir.

Tasarlanan ve üretilen simülatör sistemi sadece bilgisayar başında pilot eğitiminde kullanılacak ucuz bir sistem üretimi için yola çıkan bir ürünüdür. Yazılım kısmı sade ama detaylı bir sistem mühendisliği çabasının sonucunda ortaya çıkan ve uluslararası standartlarla uyumlu bir uyarı sistemine tamamen benzetebilmektedir. Sesli ve görsel uyarılar kendi aralarında öncelik sıralarına göre organize edilmişlerdir. Sistem pilotlara bir önceki başlıklarda özetlenen karmaşık uyarı durumlarının verilmesinde kullanılacaktır. Ayrıca basit arayüz güncellemeleri ile her türlü uçaklara da uygulanabilecek bir yapıdadır. Diğer taraftan pilotun iş yükünün ne olacağı konusunda bir fikir sahibi olunabilmesi için kokpitin bir benzerinin üzerine yerleştirilmesi ayrıca fayda sağlayacaktır. Bu çalışmada anlatılan uyarı sistemi simülatöründen bağımsız olarak bir de tam ölçekli kokpit simülatörü bir proje olarak geliştirilmiştir. Aşağıda 4 numaralı şekilde, soldaki resimde uyarı sistemi simülatörünün entegre edilmesi planlanan tam ölçekli uçuş simülatörü gövdesi görülmektedir.



Şekil 4 Pilot-makine arayüzü çalışmalarından bir kesit (sağda) ve uyarı sistemi benzetiminin entegre edilmesi planlanan gövde (solda)

Projenin ilerleyen fazlarında uyarı sistemi simülatörü tam ölçekli kokpit simülatörünün içerisine yerleştirilerek pilot eğitiminin çok daha etkin olmasını sağlamak amaçlanmıştır. Bu tip bir kritik sistemin tasarımda ortaya çıkabilecek çelişkilerin incelenmesi üzerine çeşitli çalışmalar mevcuttur [7]. Bu benzetim sistemi ile bu tip durumların tespitinde kolaylık sağlanabileceği inanılmaktadır.

Burada ilerideki çalışmaları için gösterilebilecek en önemli ek, simülatör mimarisine eklenecek PCI tabanlı bir ayırik arayüz kontrol kartı ile master uyarılarının ethernet yerine doğrudan ayırik sinyallerle kontrolüdür. Bu durumda sistem davranışları hava aracındaki gerçek sisteme daha da çok benzeyebilir. Benzer şekilde sisteme pilotun uyarılarına olan tepkilerinin zaman aralıklarını ölçecek bir kayıt mekanizması eklenmesi halinde, uyarı sistemi simülatörü üzerinde çalışacak bir pilotun hiç çalışmamış bir pilot ile olan tepki süreleri kıyaslanabilir, böylece eğitimlerin etkinliği ölçülebilir. İleriye dönük bir diğer amaçta sistemin ait olduğu hava aracının tüm karışık uyarı zincirlerini üretebileceği senaryoların hava aracı sistemlerini usta pilotlarla inceleyerek hazırlanmasıdır. Bu tip bir hazırlık pilot eğitimi sürecine ileride büyük fayda sağlayacaktır. Eğitimsel amaçlı oluşu nedeniyle sistemin ancak görsel arayüzlerinin ve davranışlarının gerçek ikaz sistemine benzemesi amaçlanmıştır. Sinyal benzerliği ya da mimarisel benzerlikler gibi konularda bütçe ihtiyaçları ve sistem karmaşıklığının artırılmaması hedeflenerek gerçek ikaz sisteminden sapmalar yapılmıştır.

Pilot başarımının artırılması dışında ikaz sisteminin mükemmelleştirilmesi de uçuş emniyetinin artırılmasında çok önemli bir etkendir. İkaz sistemleri farklı yöntemlerle en iyilenebilir. İkaz sisteminin mükemmelleştirilmesinde ya da n iyilenmesinde yapılabilecek bir diğer çaba ise, ikaz sisteminin geçebileceği tüm durumların, evre çizelgeleri (state diagram) ya da sıralama çizelgeleri (sequence diagram) ile analizi olabilir. Bu diğer çalışma oldukça kompleks bir çalışma olacaktır. Çünkü ikaz sistemlerinin sayıca oldukça fazla olan ikaz sinyali girişleri nedeniyle pek çok evresi mevcuttur. İleriki çalışmalardan birisi de bu olabilir. Başka hava aracı sistemleri için bu tip uygulamalar literatürde mevcuttur, ancak ikaz sistemleri üzerine bu tip bir yoğun çaba henüz sarf edilmemiştir [8].

Bu çalışmada küçük ölçekli bir uyarı sistemi benzetim sisteminin ilk versiyonunun sistem mühendisliği, tasarımını, temel yazılım özelliklerini ve kullanımı üzerine bilgi verilmeye çalışılmıştır. Benzetim sistemi burada bahsi geçen eğitim işlevlerinin yanı sıra, hava aracındaki ikaz sisteminin mükemmelleştirilmesinde de kullanılacaktır.

5. KAYNAKÇA

- [1] Kaygusuz, Y., Uyar, S., (2011), Conceptual Design Study of a Flight Crew Alerting System Architecture With a Brief Survey of Common Guidelines, *ICM2011 IEEE International Conference on Mechatronics*.
- [2] Pritchett A.R. (2001), Reviewing The Role of Cockpit Alerting Systems: Implications for Alerting System Design and Pilot Training, *World Aviation Congress & Exposition, Seattle, WA, USA*.
- [3] SAE Committee S7 (2007), *SAE ARP 4102/4, Aerospace Recommended Practice, Flight Deck Alerting System* SAE Aerospace Group, Europe Office; London UK.
- [4] DOT/FAA. (1981), *ADA 106732 Aircraft Alerting Systems Standardization Study Volume II, Aircraft Alerting Systems Design Guidelines*, Springfield, Virginia USA.
- [5] FAA/JAA. (2002), *AC/ACJ 25.1332, Flight Deck Alerting*, Washington, DC USA.
- [6] J.G.Thompson, H.P. Stough, W.S.Green. (1999), Analytical Study of the Reliability of a General Aviation Cockpit Instrumentation System, *1999 World Aviation Conference, SAE, AIAA, San Fransisco, CA, ABD*.
- [7] L. Song, J.K. Kuchar. (2001) Describing, Predicting, and Mitigating Dissonance Between Alerting Systems, *4th International Workshop on Human Error, Safety, and System Development, Linköping, Sweden*.
- [8] Bara G. (2010), *Model Checking of State Management Module of a Flight Management Software*, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Enformatik Enstitüsü, Ankara, Türkiye.

EĞİTMEN KONSOL YAZILIMLARI İÇİN KULLANICI ARAYÜZÜ KILA VUZU GELİŞTİRİLMESİ VE GEÇERLEME SÜRECİ

**Engin Kurşun^(a), Türkcan Karakuş^(b), Aslı Yılmaz^(c), Kürşat Çağiltay^(d), Veysi
İşler^(e)**
Ümit Tezcan^(f), Serkan Gürdal^(g),

^(a) Atatürk Üniversitesi, Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Eğitimi Bölümü,
ekursun@metu.edu.tr

^(b) ODTÜ Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Eğitimi Bölümü, karakus@metu.edu.tr

^(c) ODTÜ Jeodezi ve Cografî Bilgi Teknolojileri Bölümü, asyilmaz@metu.edu.tr

^(d) ODTÜ Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Eğitimi Bölümü, kursat@metu.edu.tr

^(e) ODTÜ – TSK Modelleme ve Simülasyon Araştırma ve Uygulama Merkezi,
isler@ceng.metu.edu.tr

^(f) HAVELSAN AŞ, utezcan@havelsan.com.tr

^(g) HAVELSAN AŞ, serkang@havelsan.com.tr

ÖZ

Bu çalışmada, askeri bilişim sistemleri arayüzlerinin tasarımları ve geliştirilmesinde, İnsan Bilgisayar Etkileşiminin (İBE) önemli konularından biri olan kullanılabilirliğin sağlanması amacıyla bir kılavuzun oluşturulması ve geçerlenmesi sırasında şimdiden kadar izlenen ve daha sonra izlenecek adımların sunulması hedeflenmiştir. Kullanıcı Dostu Grafik Arayüz Kılavuzu adı verilerek geliştirilen raporda, genel kullanılabilirlik unsurları bir araya getirilerek hazırlanan ya da hazırlanacak yazılımların etkililiği, verimliliği ve kullanıcı memnuniyetinin sağlanması beklenmektedir. Kılavuzdaki başlıklar genel olarak Havelsan AŞ tarafından geliştirilen eğitmen konsol yazılımları temel alınarak belirlenmiş ve diğer araştırma standart kullanabilirlik kıstasları ile desteklenmiştir. Bu nedenle benzer eğitmen konsol yazılımlarının geliştiricileri için önemli bir kılavuz niteliğindedir. Kılavuzun geçerlenmesi, arayüzün önceki sürümü ile kılavuza göre yeniden hazırlanan sürümünün karşılaşılması ile sağlanacaktır. Kisaca, bu çalışmada bir kullanılabilirlik kılavuzunun hazırlanma ve geçerlenme sürecinde izlenen adımlar, uygulanan yöntemler ve karşılaşılan problemlerden bahsedilecektir. Bu çalışma özellikle uçuş simülasyonlarında kullanılan eğitmen konsol yazılımları geliştiricileri ve bu alanda kullanılabilirlik çalışması yürüten birimlerinin izleyeceği metodlar için iyi bir örnek teşkil etmesi beklenmektedir.

Anahtar kelimeler: Ara yüz tasarımı, eğitmen konsol yazılımları, insan bilgisayar etkileşimi, kullanılabılırlik, tasarım kılavuzu, uçuş simülatörleri

DEVELOPMENT AND VALIDATION OF USER INTERFACE GUIDE FOR TRAINER CONSOLE SOFTWARE

ABSTRACT

In this study, the development and validation of a guideline was proposed to provide usability, which is one of the most important issues of Human Computer Interaction, in design and development of military computing systems' interfaces. In the report which was called as "User Friendly Graphical Interface Guide", it is expected to provide efficiency, effectiveness and user satisfaction with the available software and the software to be prepared by combining general usability issues. The titles in the guide were defined based on the trainer console software which is being developed by Havelsan AŞ and it was supported with the criteria which are based on the research. For this reason, the report is a very important guide for trainer console software developers. The validation of the software will be provided by comparing old version of the software and the new developed ones via the guideline. Shortly, in this study the steps, methods and the problems encountered while development and validation process of the usability guide will be mentioned. It is expected that this study will be a good methodological example, especially for the developers of trainer console software which are used in flight simulations and the units which conducts usability studies in this field.

Keywords: design guide, designing interface, flight simulators, human computer interaction, trainer console software, usability

1. GİRİŞ

Kullanılabılırlik, hedef kitledeki kullanıcıların, verilen işleri yaparken gösterdikleri verimlilik, etkililik ve memnuniyetlerinin ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Özellikle bilgisayar tabanlı sistemlerde arayüz tasarımında insan faktörünün göz önüne alınması gerekmektedir. İnsan merkezli tasarımın özellikle savunma ürünleri tasarım ve geliştirilmesinde nasıl hayatı geçirileceği askeri araştırma laboratuvarlarının kritik konularından birisidir. Tasarım kılavuzları, kullanımı kolay arayüzlerin geliştirilmesinde yararlı rol oynayabilmekte ve belirli bir amaca yönelik arayüzler için tutarlılığı sağlayabilmektedir. Bu amaçla eğitmen konsol yazılımlarına ait arayüzlerin iyileştirilmesi, daha verimli ve kolay kullanılabilmesi amacıyla, Havelsan ve ODTÜ-Modsimmer işbirliğinde yürütülen proje kapsamında bir tasarım kılavuzu geliştirilmiş

ve kılavuzun geçerlenmesi amacıyla kullanıcı testleri yapılmıştır. Kılavuzun geliştirilmesinde bu konuda akademik araştırmalar yapan kullanılabılırlik uzmanları, eğitmen konsol yazılım geliştiricileri ve bir grafiker yer almıştır. Çalışmanın amacı, hem kullanıcı dostu arayüz tasarım kılavuzunun geliştirilmesi hem de geçerlenmesi aşamalarında kullanılan metodu ayrıntıları ile sunmaktadır. Çalışmanın çıktıları özellikle askeri sistemlerde kullanılabılırlik kılavuzları geliştirilmesinde ve kullanılabılırlik metodları uygulanmasında literatüre ve uygulayıcılara katkı sağlayacaktır.

1.1. Kullanılabılırlik nedir?

Kullanılabılırlik, bir uygulamada belirlenen görevlerin, hedef kitle olarak belirlenen kullanıcılar tarafından, gerekli eğitimin ve teknik destegin verilmesinin ardından, uygun çevre koşullarında, kolaylıkla ve etkili biçimde kullanılabılması olarak tanımlanabilmektedir. Herkes tarafından kabul edilebilecek bir tanım konusundaki girişim Uluslararası Standartlar Enstitüsü (International Standards Organization - ISO) tarafından yapılmış ve sonuçta “ISO 9241 Bölüm 11” sayılı dokümanda belirlenen tanım ortaya çıkmıştır [1]. Bu tanıma göre,

Bir uygulamanın kullanılabılırlığı, kullanıcıların belirli görevleri, belirli bir bağlamda etkili, verimli ve memnuniyet ile yerine getirmelerine denir.

Etkilik, kullanıcıların kendilerine verilen görevleri ne kadar başarıyla tamamladığı ile ilintilidir. Verimlilik ise belirlenen görevin kullanıcı tarafından gerçekleştirilirken zaman, maliyet, enerji vb kaynakları ne derece kullanıldığını belirtir. Memnuniyet ise kullanıcıların bir ürünü kullanırken ne derece memnun ve mutlu oldukları ile bağlantılıdır. Kullanılabılırlikte temel hedef kullanıcı ihtiyaçlarının karşılanmasıdır.

Kullanılabılırlik, Nielsen'ın tanımına göre ise, kullanıcı ile ürün arasındaki etkileşimi etkileyen öğrenilebilirlik, verimlilik, hatırlanabilirlik, düşük hata sayısı ve memnuniyet faktörlerinin toplamı olarak belirlenmiştir [2]. Bu bileşenleri açacak olursak; öğrenilebilirlik, ürünün kolayca anlaşılmasını ve öğrenilmesini ifade eder. Hatırlanabilirlik, ürün tekrar kullanıldığında kullanıcının ürünü hatırlaması ve tekrar öğrenmek zorunda kalmaması ile ilgilidir. Düşük hata sayısı, ürünün kullanıcıya minimum hataya yol açmasını belirtir. Verimlilik ve memnuniyet ise bir önceki tanımda açıklandığı şeklindedir.

Tanımlanan bu kullanılabılırlik bileşenleri kullanılabılırlik testleri ile değerlendirilmektedirler. Literatüre bakıldığından kullanılabılırlik testleri üç ana yöntem başlığı altında geçmektedir. Bunlar, sorgulama, inceleme ve kullanılabılırlik testleri (formal) olarak adlandırılmıştır. Sorgulama yönteminde, kullanıcının ürün hakkındaki fikirleri sorgulanır. İncelemede, ürün kullanılabılırlik uzmanları tarafından incelenir. Kullanılabılırlik testlerinde ise kullanıcı ve ürün arasındaki etkileşim gerçek ortamda gözlenir ve ölçümler buna göre yapılır.

1.2. Askeri Sistemlerde kullanılabilirlik

Yıldırım, Bikmaz, Cagiltay ve Isler’inde (2007) belirttiği gibi, kritik ve hayatı görevlerde kullanılmalarından ötürü, askeri sistemleri kullanan kişilerin en etkili kararı, en kısa zamanda ve en az hata ile vermeleri gerekmektedir. Ancak fiziksel ve bilişsel unsurlar bu süreci ciddi şekilde etkilenmektedir. Dolayısıyla bu sistemlerin tasarılanmasında bahsi geçen unsurların dikkate alınması önem arzettmektedir. Aksi takdirde ciddi maddi kayıplara hatta can kayıplarına sebep olabilecek problemler ortaya çıkabilmektedir [6].

Teknolojinin sunmuş olduğu geniş imkânlar askeri amaçlı kullanılan teknolojilerin sayısının artmasını ve karmaşık sistemlerin askeri sistemlerde kullanılmasına neden olmuştur. Bu durumda beraberinde bu tür karmaşık sistemlerin en etkili bir şekilde nasıl kullanılması gerektiği sorusunu gündeme getirmiştir. Bu noktada İBE alanındaki çalışmalar yol gösterici olmaktadır. Bu nedenle İBE çalışmalarının askeri sistemlerde kullanımının önemi giderek artmaktadır.

İnsan Bilgisayar Etkileşimi alanı askeri sistemlerde birçok şekilde uygulanabilmektedir. Bunlardan bir tanesi stil kılavuzlarının geliştirilmesi olup şimdije kadar askeri alanda gerek NATO bünyesinde gerekse ülkeler bazında geliştirilmiş birçok stil kılavuzu ve standart mevcuttur. Amerikan Savunma Ordusunun geliştirmiş olduğu “Department of Defense (DoD) Style Guideline” [3], ya da NATO’nun geliştirmiş olduğu “NATO Guidelines on Human Engineering Testing and Evaluation” [4] kılavuzları askeri alanda kullanılabilirliği sağlamak için geliştirilmiş örneklerdir.

Bilindiği gibi etkili bir insan bilgisayar etkileşimi, arayüz ile etkileşime girildiğinde yapılabilecek hataları en az seviyeye indirecek şekilde olmalıdır. Bu çalışmada da, Askeri bilişim sistemlerin arayüzlerinin tasarımını ve geliştirilmesinde, İnsan Bilgisayar Etkileşimin önemli başlıklarından biri olan arayüz geliştirme konusunda bir kılavuz oluşturularak etkili arayüzlerin tasarlanması sağlanmaya çalışılmıştır.

Bir başka önemli IBE uygulaması da, kullanıcı tabanlı deneysel çalışmalarıdır. Kullanıcı tabanlı çalışmalar arayüzlerin gerçek kullanıcılarla sunularak kullanım sırasında davranışları incelenip, çıkarımlarda bulunularak yürütülen çalışmalarlardır. Deneysel olması nedeniyle, stil Kılavuzlarının aksine daha gerçekçi ve güçlü sonuçlar ortaya koyabilmektedir [5]. Tullis ve Kodimer’in da belirttiği gibi stil ve tasarım kılavuzları, sezgi ve alışkanlık doğrultusunda yapılan arayüz tasarımları olduğu için her zaman en etkili tasarımların oluşturulması için yeterli olmayıabilmektedir [6]. Bu çalışma kapsamında da öncelikle ekran tasarımları proje kapsamında geliştirilen stil kılavuzuna göre tasarlanmış, ardından deneysel yöntemler kullanılarak elde edilen bulgular ışığında ekranların tekrar düzenlenmesi planlanmıştır. Ancak deneysel uygulamalar bu bildiri yazım sürecinde henüz tamamlanmadığı için, bu çalışma kapsamında hazırlanan kılavuzun geçerlenmesi sırasında şimdije kadar izlenen ve daha sonra izlenecek adımlar sunulmuştur.

1.3. Kullanıcı dostu arayüz kılavuzu geliştirilmesi

Kullanıcı Dostu Grafik Arayüz Önergesi'nin amacı, arayüz geliştirme sırasında İnsan Bilgisayar Etkileşimi en etkili şekilde sağlamak amacıyla, genel kullanılabılırlik unsurlarını bir araya getiren bir Kılavuz oluşturmaktır. Kılavuzda önce insan bilgisayar etkileşimi tanımlanarak, gereksinimlerine dair bilgiler de verilmiştir. Daha sonra, Havelsan'da geliştirilen eğitmen konsol yazılımlarının sağlanması gereken önemli niteliklerden biri olan "Kullanıcı Dostu" ifadesinin teknik olarak tanımı yapılmış ve temel standartlar örneklenmiştir. Kullanıcı Dostu Arayüz Kılavuzunun, HAVELSAN tarafından geliştirilecek Eğitmen Konsol Yazılımları'nın (EKY) tasarımda kılavuz olarak kullanılması ise uzun dönemli bir hedef olarak amaçlanmıştır. Kullanım, fonksiyonlar ve görünüm açısından, "Kullanıcı Dostu" olarak geliştirilen arayüzlerden aşağıdaki işlevsel amaçların desteklenmesi hedeflenmektedir.

Yüksek verimlilik: Kullanıcılar, en az karmaşa ve anlam karışıklığına neden olan arayüzleri benimseyip kullanacaklardır.

En az eğitim zamanı: Standartlaşma sayesinde, kullanıcıların her sistem değiştiğinde tekrar tekrar eğitime ihtiyaç duyması yerine, daha az eğitim ile sistemi kullanmaları sağlanacaktır.

Geliştirme zamanının azaltılması: Belirli standartların geliştirilmesi, yeni sistemler için her seferinde yeni bir arayüz ve insan bilgisayar etkileşimi kurallarının geliştirilmesinin önüne geçecektir. Temel görünüm ve fonksiyonlar, genel kullanılabılırlik ölçütleri ve bu kılavuzda yer alan kıstasların birleştirilmesi ile tüm sistemlerde, tasarım kuralları benzer şekilde kullanılabilecektir. Bu durum ise arayüz geliştirme süresini oldukça azaltacaktır.

2. KILAVUZ GELİŞTİRİLME YÖNTEMİ

2.1. Ortam

Eğitmen konsol yazılımı, uçuş simülatörlerinde, eğitmenlerin uçuşa ilgili ayarlamaları yaptıkları ve eğitimi başlatıp sonlandırdıkları platform olarak tanımlanabilir. Bu platform ile eğitmenler eğitimi kontrol edebilir, eğitim esnasındaki değerleri ve eğitim süreçlerini gözleleyebilirler. Bu platformun sağladığı imkanlar sayesinde, eğitimin verimliliğinin ve etkinliğinin artırılması amaçlanmaktadır. Havelsan tarafından geliştirilen eğitmen konsol yazılımı yaklaşık 40 arayüzden oluşmaktadır. Tüm arayüzlerde kısayol tuşlarının olduğu bir üst menü ile, ağaç yapılı ve sayfalar arasındaki geçiş sağılayan bir yan menü, ve alt kısmında da sabit parametrelerin görülebileceği bir kısım bulunmaktadır. Bunların arasında kalan kısım ise kullanıcının parametreleri değiştirebileceği alanlardır. Eğitmen konsol yazılıminın, kullanım hızlandırmak amacıyla dokunmatik ekranlarla iki pencere halinde kullanılması planlanmaktadır.

2.2. Araştırma ekibi

Araştırma ekibini ODTÜ Bilgisayar ve Öğretim Teknolojileri Eğitimi bölümünden kullanılabılırlik konusunda deneyimli araştırmacılar, ODTÜ-Modsimmer biriminden yine deneyimli kullanılabılırlik uzmanı ile bir grafiker ve Havelsan'da eğitmen konsol yazılımı geliştiricilerinden oluşmuştur. Akademik ekibin kılavuz geliştirme aşamasında temel görevleri, literatür taraması yaparak genel kural ve standartların belirlenmesi, tüm Eğitmen Konsol Yazılımı (EKY) sayfalarının gözden geçirilerek kural ve standartlara göre öneriler sunulması ve kılavuzun dijital ortama aktarılmasıdır. Tüm bu süreçte Havelsan ekibi tarafından sürekli geridönüt sağlanarak, arayüzlerde uygulanabilecek ve uygulanamayacak kriterler ortaya konulmuştur. Kılavuz bu nedenle Havelsan'da geliştirilen EKY'ye yönelik olarak şekillenmiştir.

Kılavuzun hazırlanmasında özellikle ISO standartları (ISO, 1992/2001), askeri alanda geliştirilmiş kılavuzlar [7], Apple firması tarafından geliştirilen kılavuz ve alanda yaygın dergilerde yayınlanmış makaleler kullanılmıştır. Akademisyenlerin kullanılabılırlik alanındaki deneyimleri de kılavuzun hazırlanmasında büyük rol oynamıştır. Yine Havelsan ekibinin arayüz geliştirmede, kullanıcı bekentileri konusunda ve programlamada kullanılan platformun kısıtlılığılarındaki bilgi ve tecrübeleri de uygulanabilir bir kılavuzun hazırlanmasında önemli rol oynamıştır. Özellikle geliştirme platformunun kısıtlılıkları ve dokunmatik ekran kullanımı, kılavuzda sağlanan öneriler hazırlanırken göz önüne alınmıştır.

2.3. Kılavuzun yapısı

Kılavuz üç temel kısımdan oluşmaktadır. İlk bölüm, kılavuzun amacı, savunma sistemlerine yönelik insan faktörü çalışmaları ve kullanılabılırlik ile ilgili temel bilgilerinden oluşmaktadır. İkinci bölüm ise kılavuzun asıl amacı olan tasarım öğelerinin yer aldığı kullanılabılırlik ilkelerinden oluşmaktadır. Kullanılabılırlik ilkeleri kısmında “Başlıklar ve Etiketler”, “Gezinim (Navigation)”, “Görsel Tasarım”, “Renkler”, “Temel Ekran Kontrolleri”, “Dokunmatik Ekran Tasarımı”, “Doküman Yazdırma” ve “Gece Görüş Sistemleri” olmak üzere sekiz temel başlıktan oluşmaktadır. Başlıklar altında sunulan her kullanılabılırlik ilkesi için öncelikle ilgili ilke hakkında bilgi verilmiş, alan yanında bilimsel çalışmalar ışığında önerilen hususlar belirtilmiş ve çoğunluğu Havelsan Eğitmen Konsol Yazılımları’ndan alınan ekran görüntülerinden olmak üzere ilgili kísticaslar daha da anlaşılır hale getirilmeye çalışılmıştır.

Başlıklar ve Etiketler bölümünde başlıkların ve ekran kontrollerine ait etiketlerin isimlendirilmesi, ekranda yerleşimi, büyülüklüğü, rengi gibi etkili başlık ve etiket hazırlamayı etkileyebilecek bir çok temel tasarım unsuru ele alınmıştır. *Gezinim* bölümünde etkili ve verimli bir gezinim altyapısını oluşturabilmek için dikkat edilmesi gereken temel kullanılabılırlik ilkelerini açıklamaya çalışılmıştır. *Görsel Tasarım* alt başlığında, diğer alt başlıklara nispeten biraz daha geniş bir yelpazede tasarım ilkelerinden

bahsedilmiştir. Bunlar, ekran tutarlılığından renklere, uyarı mesajlarının tasarımından açılır pencerelerin tasarımına kadar bir çok görsel tasarım önerisinden oluşmaktadır. *Renkler* bölümünde renk uyumu, parlaklık, doyum gibi ekran tasarımını etkileyebilecek temel konulara değinilmiştir. *Temel Ekran Kontrolleri* bölümünde kullanıcıların yazılımla etkileşime geçmesini sağlayan temel ekran kontrolleri ile ilgili genel ilkelerden bahsedilmiştir. Ekran kontrolleri denilince akla en sık gelen kontroller: butonlar, radyo butonları (radio button), kontrol kutuları (checkbox), açılır listeler (combobox) ve bilgi giriş (textbox) alanlarıdır. Bu bölümde bunların genel kullanımı yanısıra bu kontrollere ait isimlendirmeler, ikon tasarımları ekran yerleşimi ve veri girişinde gibi dikkat edilmesi gereken temel hususlar ele alınmıştır. *Dokunmatik Ekran Tasarımı* bölümde, dokunmatik ekranlardaki ekran kontrollerinin boyutları bu boyutları etkileyen etmenler, dokunma alanı gibi konulara değinilmiştir. *Döküman Yazdırma* bölümünde yazdırma işlemine başlanmadan önce ve yazdırma işlemi sırasında renk, boyut gibi dikkat edilmesi gereken unsurlara değinilmiştir. Son olarak *Gece Görüş Sistemleri* bölümünde ise renk kullanımını parlaklık, ikonların görünümü gibi hususlar ele alınmıştır.

3. KILAUVUZUN GEÇERLENMESİ

3.1. Yöntem

Kılavuzun geçerlenmesi aşamasında, geliştirilen kılavuza göre yeniden düzenlenen arayüz sayfaları ile eski sayfaların karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu karşılaştırma sonucu kılavuza göre geliştirilen sayfaların daha kolay kullanımı beklenmektedir ve bu durumda kılavuzun geçerliliğinin sağlanması amaçlanmaktadır.

3.2. Test sayfalarının seçimi

Havelsan ekibi en fazla kullanılabilecek ve kullanıcıların en fazla sorun yaşayacaklarını düşündükleri 5 sayfayı belirlemiştir. Bu sayfalar toplam 40 sayfa olan arayüz içine yerleştirilmek üzere kullanılabilirlik uzmanları tarafından geliştirilen kılavuza göre yeniden tasarlanmıştır. Sayfalar belirlenirken, sayfaların kullanım sıklığı, eğitim ihtiyaçları kapsamında kritik fonksiyonaliteler içerip içermedikleri, barındırdıkları grafik kullanıcı arayüz ögelerinin çeşitliliği parametreleri göz önünde bulundurularak, örneklenen sayfaların yazılımda yer alan diğer arayızlar için esas teşkil etmesi ve yeniden tasarlama sonuçlarının diğer arayzlere de uygulanabilirliğinin kolaylaştırılması amaçlanmıştır.

3.3. Görevlerin seçimi

Havelsan ekibi, yeniden tasarlanan sayfaların kullanımını gerektirecek türden 5 görev belirlemiştir. Her görev, ideal kullanımıyla ortalama 5 adım içermektedir. Buna göre adım sayısı arttıkça kullanıcının o görevi bitirmede zorlandığı sonucuna

varılabilmektedir. Ayrıca kullanıcının ideal yol yerine farklı yollarla görevi bitirmeye çalışması, aslında kullanıcının beklenelerini de ortaya koyabilmektedir. Görevlerin seçiminde ise, kullanıcının mümkün mertebe farklı grafik kullanıcı arayüz öğeleriyle etkileşime girerek, herbirinde gösterdiği davranışların çeşitlendirilmesi öngörülmüş, yeniden tasarılanma sonuçlarının farklı öğeleri içermesi ön amaçlanmıştır. Görevler çeşitli tecrübe seviyelerindeki kullanıcılar hitap edecek şekilde açık ve ayrıntılı tasarılanarak, anlaşılabilirlik düzeyinin çelişkiden uzak ve yalın olmasına özen gösterilmiştir. Aşağıda bir görev örneği sunulmuştur.

Görev 1: Seçilen “Battery Fault” arızası için irtifa değeri “10000ft” ve hız değeri “200knot” olan tetikleme parametrelerini tanımlayınız.

Ideal çözümleme yolu: (1) Parametric Malf Management tabı açılır. Sol taraftaki Malfunction Grups altında yer alan gruplardan “Electric” seçilir. (2) “Selected Groups Malfunctions” açılır menüsünde, seçili gruba ait arızalardan “Battery Fault” bulunup seçilir. (3) Sağ taraftaki “Activation Conditions” alanından, “parameter condition = Altitude” ve “value = 10000” seçilir. (4) “Add” komutu verilir. (5) “Parameter condition= Airspeed” ve “value=200” seçilir. (6) “Add” komutu tekrarlanır. (7) “Save” komutu verilerek işlem kaydedilir ve tamamlanır.

Görevler tanımlandıktan sonra, Havelsan’da bulunan fakat farklı bölgelerde çalışan katılımcılar vasıtası ile görevlerin anlaşılabilirliği ve uygulanabilirliği test edilerek görevlere son şekli verilmiştir.

3.4. Test sayfalarının kılavuza göre yeniden tasarılanması

Havelsan ekibi tarafından seçilen arayüz ekranları üzerinde, kılavuzda yer alan bilgiler doğrultusunda değişiklikler yapılmıştır. Her ekranın birçok unsuru için kılavuzun farklı yerlerinden alınan kıstaslar uygulanmıştır. Aşağıda arayüze ait bir ekran tasarımı (Şekil 2) ve kıstaslara göre düzenlenmiş yeni tasarlanmış ekran (Şekil 3) verilmiştir.

Scene Conditions					Misc					
<input checked="" type="radio"/> Day	<input type="radio"/> Dusk	<input type="radio"/> Dawn	<input type="radio"/> Night	<input type="radio"/> 12:00 AM	Visibility (m)	Environment Lights				
					0	OFF				
					icing	Humidity				
					OFF	OFF				
					Lightning Rate	Sea State Level				
					OFF	OFF				
Outside Air Conditions					Current Wind Layer					
Sea Level Air Temperature (C)		Precipitation State		Precipitation Type		Precipitation Level				
0		Sea Level Press (inHg)		NONE		OFF				
0.00										
Wind Layers					Floor (ft)	Thickness (ft)				
					STATUS	Speed (kts)				
					OFF	0	Direction (deg)	Gust (kts)	Lapse Rate (kft/f)	Turbulence (%)
						0	0	0.00	0	
Storm Settings					Selected Storm Properties		Selected Storm Location			
Storms		Length (m)	0	Height (ft)	0	Absolute	Relative			
		Width (m)	0	Radius (m)	0					
		Status	OFF	Storm Severity	TRACE					
		Altitude (ft)	0	Visibility (m)	0					
						Latitude	Distance (nm)			
						Longitude	Bearing (deg)			
							0			
OVERWRITE WEATHER SCENARIO							RESUME WEATHER SCENARIO			

Şekil 1. Örnek bir eski sayfa

Şekil 2. Tasarlanmış yeni sayfa

3.5. Sonraki adımlar

Çalışmanın bir sonraki adımını kullanıcı tabanlı testler oluşturacaktır. Bu testlerde yaklaşık 10 eğitmen pilotla çalışılacaktır. Pilotlar hem eğitmen konsol yazılımı konusunda deneyimli hem de deneyimsiz olabileceklerdir. Pilotlar iki gruba ayrılarak,

bir grup pilot yeni tasarlanmış ekranlar üzerinde çalışırken diğer grup eski tasarım üzerinde görevleri tamamlayacaklardır. Çalışma sırasında bir kullanılabılırlik test ortamı yazılımı olan CogTool kullanılacak ve taşınabilir göz izleme cihazı ile de veri toplanacaktır. Katılımcılara hazırlanan görevler atanacak ve, sınırsız süre verilecektir. Görevi yapma süresince “sesli düşünme” protokolü uygulanacaktır. Görevi bitirme süresi, hata sayısı, toplam adım sayısı gibi unsurlar kaydedilerek kullanılabılırlik için sayısal veriler elde edilecektir. Çalışmanın bulguları düzenlendikten sonra, kılavuzu göre hazırlanmış tasarımların kullanılabılırlığının iyi olması durumunda kılavuzun geçerlenmesi sağlanmış olacaktır.

4. KAYNAKÇA

- [1] ISO 9241 (1992/2001). Ergonomics Requirements for Office with Visual Display Terminals (VDTs), Geneva: International Organization for Standardization.
- [2] Nielsen, J. (1993), *Usability Engineering*, Academic Press: Boston
- [3] Avery, L. W., & Bowser, S. E. (Eds.). (1996). *Department of Defense human-computer interface style guide (Version 2.0, DOE HFDG ATCCS V3.0 also known as DOD HCISG V3)*. Washington, DC: Defense Information Systems Agency.
- [4] Geddie, J. C. , Boer, L. C., Edwards, R. J., Enderwick, T. P. & Graff, N. (2001). North Atlantic Treaty Organization, Research and Technology Organization. NATO guidelines on human engineering testing and evaluation (Tech. Report RTO-TR-021). Neuilly-Sur-Seine Cedex, France: NATO Research and Technology Organization
- [5] Tullis, T. S., and Kodimer, M. L. A Comparison of Direct-Manipulation, Selection, and Data-Entry Techniques for Reordering Fields in a Table. Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting, Atlanta, GA, Oct. 1992.
- [6] Yıldırım, G., Bikmaz, I., Cagiltay, K., & Isler, V. (2007) Savunma Sistemleri Tasarımında İnsan Bilgisayar Etkileşimi Çalışmalarının Rolü."Ulusal Savunma Uygulamaları Modelleme ve Simülasyon Konferansı", 1, s.200-208.
- [7] Avery, L., Sandquist, T., O'Mara, P., Shepard, A. & Donohoo, D. (1999). *U.S. Army Weapon System Human-Computer Interface Style Guide*; (3 ed.) Richmond, VA: The Pacific NorthwestNational Laboratory.

SAĞLIK SEKTÖRÜNDE MODELLEME VE SİMULASYON: HASTANE RÖNTGEN SERVİSİ UYGULAMASI

H.Umut AKIN ^(a), Altan ÖZKİL ^(b)

^(a) Atılım Üniversitesi MODES, İncek Gölbaşı - Ankara, uakin@hotmail.com

^(b) Atılım Üniversitesi End. Müh.liği, İncek Gölbaşı - Ankara, aozkil@atilim.edu.tr

ÖZ

Hastane ortamındaki hastaların iyi bir tedavi görebilmeleri için hassas ve zamanında teşhis konulması hayatı öncemi haizdir. Bu anlamda, hastanelerin röntgen servisleri önemli bir rol oynarlar ve bu servislerden hastalara yüksek kaliteli bir hizmet sunmaları beklenir.

Söz konusu servislerdeki en önemli problemlerden birisi, servis içerisindeki süreçlerin iyi tanımlanmamış olması sonucunda röntgen cihazlarında uzun kuyruklar oluşması ve hastaların sonuç raporlarını alabilecekleri için uzun süreler beklemeleridir.

İstenmeyen böylesi bir durumdan kurtulabilmek için, röntgen servisindeki süreçler iyi analiz edilmeli, makine ve personel kaynakları hastalara en süratli hizmeti verebilecek tarzda etkin kullanım için en iyilenmelidir.

Bu çalışmanın amacı: simülasyon konusunda gelişmekte olan ulusal yeteneklerin arttırılmasını hedefleyen USMOS konferansı ortamından yararlanarak, kesikli olay sistem simülasyon modeli geliştirmedeki adımların uygulanışını örnek bir çalışma ile simülasyon konusunda çalışmalarına yeni başlayan öğrenci ve genç analistlere göstermektedir. Çalışmanın sonucunda elde edilecek kesikli olay sistem simülasyon modeli bu alanda çalışan analistlerin, çeşitli süreçleri modelleyebilmelerine, röntgen servisindeki bekleme zamanlarını en aza indirebilmek için en uygun personel ve röntgen cihazı seçeneklerini bulabilmelerine imkan sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Kesikli Olay Sistem Simülasyonu, Modelleme, Sağlık Sistemleri, Süreç Eniyileme, Süreç Modellemesi

MODELING AND SIMULATION IN HEALTH SECTOR: HOSPITAL X-RAY SERVICE APPLICATION

ABSTRACT

An accurate and timely diagnosis is vital for a good treatment of patients in a hospital. X-ray imaging services play an important role in diagnosing and they should give good quality of service to the patients.

The most important problem is ineffective operating procedures within the X-ray service which resulting the long waiting queues in X-ray machines and times spent to prepare reports after taking X-rays of the patients. For this reason, the processes should be analyzed and organized in such a way that the machine and personnel resources should be used effectively to be able to give a fast service to the patients.

The aim of this study is to provide better service to the patients by minimizing long queues waiting times at the X-ray service. The output of the study is a simulation model which will enable the analysts to model different processes and analyze the alternatives of minimum number of staff needed to reduce the waiting times at X-ray service and the number of x-ray machines needed.

Keywords: Discrete Event System Simulation, Modeling, Health Systems, Process Modeling, Process Optimization

1. GİRİŞ

Simülasyon gerçek hayat işlemlerinin veya sistemlerinin değerlendirilebilmesi amacıyla taklit edilmesidir [1]. Gerek elle gerek bilgisayarla yapılsın, simülasyon bir sistemin yapay tarihinin çıkarılması, ve gerçek sistemin çalışma özellikleri ile ilgili çıkarımlar yapmak için bu yapay tarihin incelemesini içerir.

Zaman içerisinde gelişen bir sistemin davranışını bir simülasyon modeli geliştirilmesiyle incelenebilir. Bu model genelde sistemin çalışmasıyla ilgili tahminler şeklindedir. Bu tahminler sistem ile ilgili cisimler veya objeler arasındaki matematiksel, mantıksal ve sembolik ilişkilerle ifade edilir. Geliştirilen model sistemdeki potansiyel değişikliklerin sistem performansına etkilerinin tahmini için kullanılabilir. Simülasyon aynı zamanda sistemlerin inşa edilmeden, tasarım aşamasında incelenmesi için de kullanılabilir. Böylece, simülasyon modellenmesi hem varolan sistemler üzerindeki değişikliklerin incelenmesi için bir analiz aracı olarak hem de yeni sistemlerin değişen şartlar altındaki performans tahminleri için bir tasarım aracı olarak kullanılabilir.

Sağlık kurumlarında kesikli olay simülasyonu kullanımının doğrusal programlama gibi tekniklere göre üstün olmasının nedeni: değişik servisler arasında karmaşık hasta hareketlerini modelleyebilme yeteneğine sahip olması ve hasta hareketleri ile ilgili akış ve politikaların değiştirilebilmesine olanak sağlayarak "ya böyle olursa" (what if) türü incelemeleri mümkün kılmıştır [2].

Literatürde sağlık kurumlarında simülasyon uygulamaları özellikle acil servis modellemesi üzerinde yoğunlaşmaktadır. Örneğin Brenner ve dig. geliştirdikleri acil servis modeliyle ele aldıkları sistemdeki dar boğazları incelemişler ve acil servisteki süreçlerin iyileştirilmesi için gerekli personel ve ekipman ihtiyaçlarını ortaya koymuşlardır [3]

2. PROBLEM TANIMI

Hastane ortamındaki hastaların iyi bir tedavi görebilmeleri için hassas ve zamanında teşhis konulması hayatı öncemi haizdir. Bu anlamda, hastanelerin röntgen servisleri önemli bir rol oynarlar ve bu servislerden hastalara yüksek kaliteli bir hizmet sunmaları beklenir. Söz konusu servislerdeki en önemli problemlerden birisi, servis içerisindeki süreçlerin iyi tanımlanmamış olması sonucunda röntgen cihazlarında uzun kuyruklar olması ve hastaların sonuç raporlarını alabilmeleri için uzun süreler beklemeleridir.

Bu çalışmada; simülasyon modellemesindeki adımlar izlenerek, kesikli olay sistem simülasyonu yaklaşımı ile bir hastanenin röntgen servisi modellenmeye çalışılmıştır. Çalışmanın sonucunda geliştirilen genel model bu alanda çalışan analistlerin ilave edecekleri özelliklerle, çeşitli süreçleri modelleyebilmelerine, röntgen servisindeki bekleme zamanlarını en aza indirebilmek için en uygun personel ve röntgen cihazı seçeneklerini bulabilmelerine imkân sağlayacaktır.

Hastane röntgen servisindeki bekleme sürelerini etkileyen en önemli faktörler; röntgen servisi çalışma programı, görüntüleme ünitesi sayısı ve çekim süreleri ile rapor yazım süreleridir. Çalışmada mevcut personel ve çalışma programı dikkate alınmış, hastane yönetimince yapılacak personel planlaması ve çalışma programı düzenlemeleri hariç tutulmuştur. Aynı şekilde, personel gelişimine ve yeni görüntüleme ünitesi teminine yönelik yatırımların etkileri de zaman sınırlaması nedeniyle dikkate alınmamıştır.

3. GİRDİ ANALİZİ

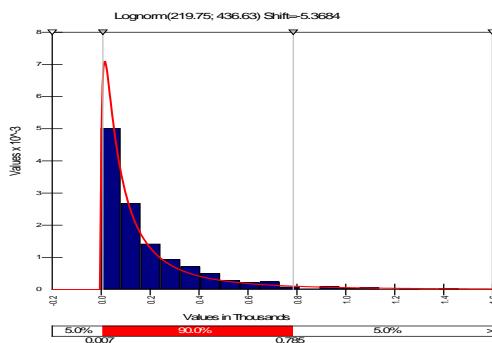
3.1. Girdi Veri Setleri

Simülasyon girdi veri setleri on çalışma günü için hastane bilgi sisteminden temin edilmiştir. Model için ihtiyaç duyulan girdi veri setleri aşağıya çıkarılmıştır.:

- Röntgen servisi varişlar arası zamanları
- Röntgen servisi kayıt süreleri
- Konvansiyonel cihaz görüntüleme zamanları
- Konvansiyonel ilaçlı cihaz görüntüleme zamanları,
- Sayısal görüntüleme cihazı görüntüleme zamanları,
- Tomografi cihazı görüntüleme zamanları,
- Ultrason cihazı görüntüleme zamanları,

3.2. Girdi Veri Analizi

Toplanan veri setlerinin bağımsızlığının belirlenmesine ilişkin serpme diyagramları çizilmiştir. Bağımsız olduğu belirlenen veri setleri sezgisel tekniklerle incelenerek aday dağılımlar ve aday dağılımlara ilişkin parametreler tahmin edilmiştir. [4]. Röntgen servisi varişlar arası zamana ilişkin histogram örnek olarak Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Röntgen servisi varişlar arası zamanlar histogramı

Ayrıntılı girdi analizi her bir etkinlik ölçüyü için BestFit yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Girdi analizi sonucunda her bir etkinlik ölçüyü için uygun girdi aday dağılımları tespit edilerek Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Girdi veri setleri

Veri Seti	Uygun Girdi Dağılımı
Röntgen servisi varişlar arası zamanları	Lognormal (219.75 , 436.63)
Röntgen servisi kayıt süreleri	Beta (8.17 , 18.93 , 23.55 , 137.78)
Konvansiyonel cihaz görüntüleme zamanları	Lognormal (220.49 , 147.20)
Konvansiyonel ilaçlı cihaz görüntüleme zamanları	Beta (0.84 , 0.86 , 121.3 , 599.31)
Sayısal görüntüleme cihazı görüntüleme zamanları,	Uniform (120.25 , 299.59)
Tomografi cihazı görüntüleme zamanları	Beta (0.62 , 0.56 , 370.08 , 1468.90)
Ultrason cihazı görüntüleme zamanları,	Uniform (575.94 , 1388.47)

4. MODELLEME

Hastane sisteminin bir parçası olan röntgen servisinde idari görevler haricinde sadece işlevsel olanlar görevler dikkate alınmıştır. Sistemdeki varlıklar hastalar olarak kabul edilmiş ve varlıkların temel özellikleri ise hastalardan istenen görüntüleme türleridir. Kaynaklar; doktorlar, hemşireler ve görüntüleme cihazları ve bunların operatörleridir.

Simülasyon zamanı, varışlar arası zamanlar, sistemdeki hasta sayısı, cihazlarda bekleyen hasta sayıları, atıl durumdaki operatör sayısı, cihazların arızalar arası ortalama zamanları ve cihaz görüntüleme süreleri modelde kullanılacak bazı değişkenlerdir. Sistemdeki temel olaylar; yeni bir hasta gelişisi, görüntüleme cihazının ve operatörünün hizmete başlaması ve cihaz arızası vb. olaylardır. Etkinlikler ise kayıt, cihaz ile çekim ve rapor üretilmesi olarak belirlenmiştir.

Çalışma kapsamındaki tüm varlıklar ve özellikleri, kaynaklar, değişkenler, olaylar, etkinlikler ile bunların arasındaki ilişkiler ARENA geliştirme ortamında modellenmiştir [4]. Girdi veri analizinde belirlenen dağılım fonksiyonları, ilgili oldukları kaynaklar, olaylar ve varlıklarla ilişkilendirilmiştir. Anılan modele ilişkin belirlenen etkinlik ölçütleri aşağıya çıkarılmıştır.

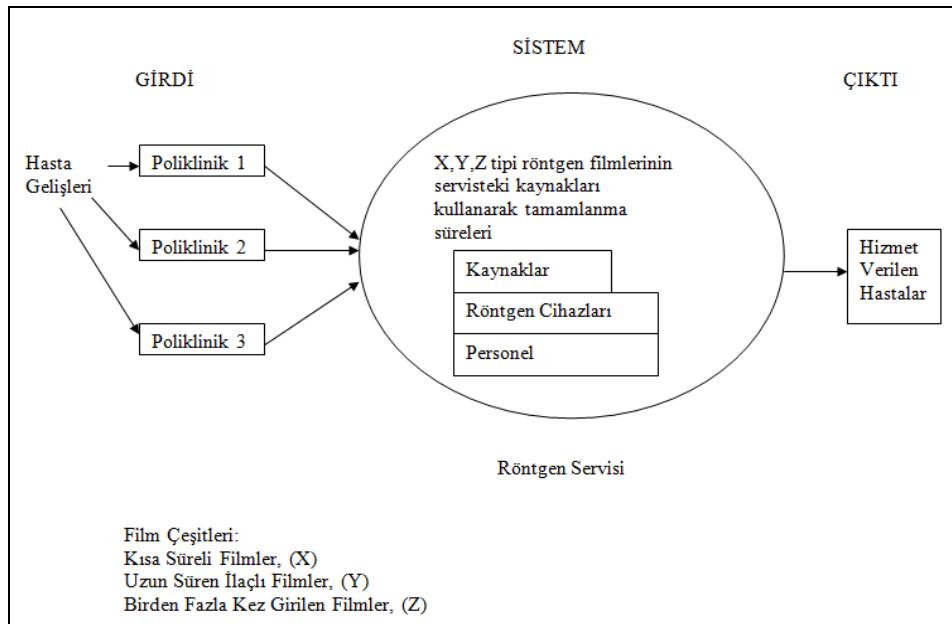
- Sistemde geçen zaman
- Kuyruklardaki hasta bekleme süreleri
- Kaynak kullanım oranları
- Belli bir sürede hizmet alan hasta sayısı

Röntgen servisinde ilaçlı görüntüleme için de kullanılabilen iki konvansiyonel görüntüleme cihazı ve bunları kullanan iki operatör modellenmiştir. Sayısal görüntüleme için bir cihaz ve iki operatör düşünülerek modellenmiştir. Serviste ayrıca birer uzman tarafından kullanılan tomografi ve ultrason cihazları da modellenmiştir.

Konvansiyonel, ilaçlı konvansiyonel ve sayısal görüntüleme cihazları çekimlerinin raporları için bir uzman, tomografi ve ultrason cihazları çekimleri raporları için ise ikinci bir uzman modele dahil edilmiştir.

4.1. Kavramsal Model

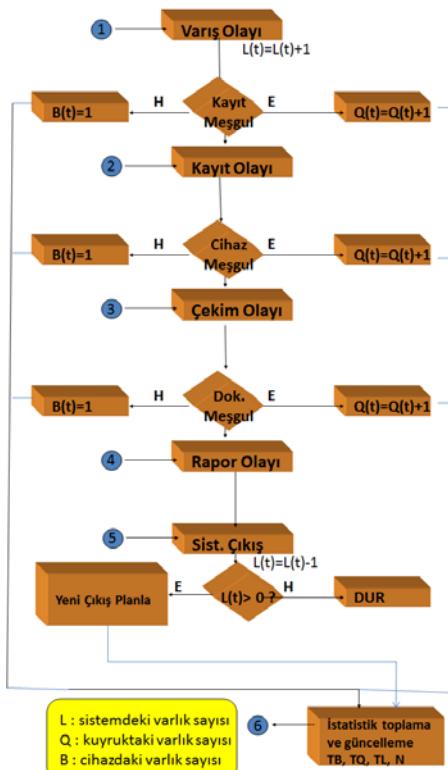
Sisteme ilişkin kavramsal model Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Kavramsal model

4.2. Mantıksal Model

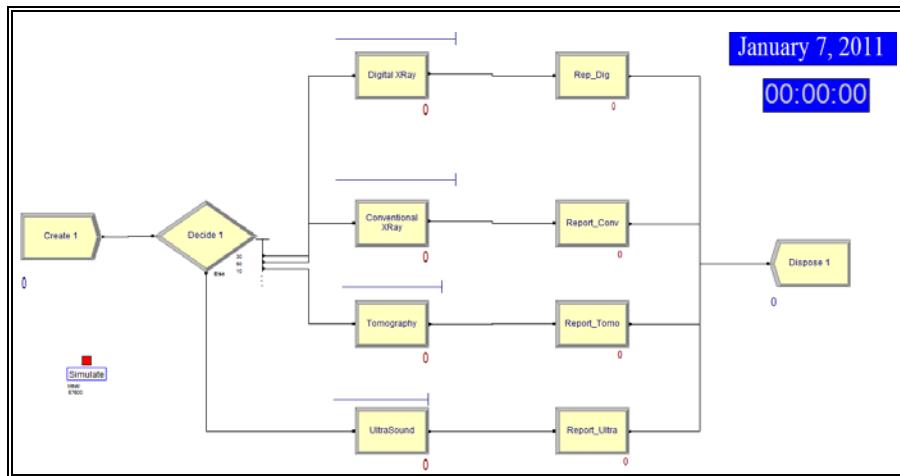
Sistemin mantıksal modeli Şekil 3'de sunulmuştur.



Şekil 3. Mantıksal Model

4.3. Simülasyon Modeli

ARENA ortamında geliştirilen simülasyon modeli Şekil 4'de sunulmuştur.



Şekil 4. Simülasyon Modeli

5. MODELİN DOĞRULAMA VE GEÇERLEMESİ

5.1. Modelin Doğrulaması

Doğrulama amacı ile geliştirilen model, model değişkenleri, kaynak kullanım oranları ve varlık durumları gözlenerek kontrol edilmiş ve hatalar düzelttilmiştir. Varlık hareketleri animasyonlarla izlenerek gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Ayrıca kod rassal (stokastik) yerine gerekirci (deterministik) verilerle çalıştırılarak sonuçların analitik sonuçlara uygunluğu kontrol edilmiştir. Model ARENA geliştiricisi diğer bir ekip tarafından da değerlendirilmiş ve önerileri doğrultusunda değişiklikler yapılmıştır.

5.2. Modelin Geçerlemesi

Modelin geçerlenmesi amacı ile sistemde 10 günlük bir veri daha tutularak sisteme giren hasta sayıları belirlenmiştir. Bu veriler modelin birer günlük 10 deneme sonucu oluşturulan verilerle karşılaştırarak iki veri seti arasında paired-t testi kullanılarak $\alpha = 0.1$ seviyesinde belirgin bir farklılık olmadığı tespit edilmiştir. Çizelge 2'de yer alan veri setleri kullanılarak eşleştirilmiş t testi yapılmış, $\alpha = 0.10$ güven seviyesinde güven aralığı [-168.98 , 119.18] olarak tahmin edilmiştir. 0 değerinin güven aralığı içinde kapsanmasından ötürü geliştirilen modelin geçerli bir model olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 2. Geçerleme Veri Setleri

Gün	Gerçek Hasta Sayısı	Model Hasta Sayısı
1	148	164
2	123	171
3	129	136
4	137	172
5	153	177
6	124	157
7	139	174
8	135	164
9	139	160
10	160	161

6. ÇIKTI ANALİZİ

Röntgen servisi sabah 08:00 akşam 17:00 olmak üzere 9 saat süresince çalışmaktadır. Gün içerisinde çekilen röntgenler yine aynı gün içerisinde raporu yazılarak teslim edilmektedir. Sistem her akşam boşalmakta ve hastalar ertesi gün yine belirlenen varışlar arası zamanlarla röntgen servisine gelmekte ve belirlenen yüzdelere uygun olarak farklı tipte röntgen hizmeti talep etmektedirler. Bu nedenle sistemiz sonlu bir sistem olarak kabul edilmiştir.

6.1. Deneme Sayısının Belirlenmesi

Cıktı analizinde kullanılmak üzere sistemde performans ölçütü olarak röntgen servisindeki hasta bekleme süreleri belirlenmiştir. Deneme sayısının tespiti için mutlak hata oranı $\beta=3.5$ dk. olarak seçilmiş, $\alpha=0.1$ güven seviyesinde başlangıç için 10 deneme yapılmış, bu denemelerden elde edilen varyans dikkate alınarak tekrar sayısı;

$$n2 = (t_{9, (0.95)})^2 S^2 / \beta^2$$

eşitliğinden 20 olarak bulunmuştur. İlave 10 tekrar daha yapılarak performans ölçütü olan sistemdeki toplam bekleme süresi ortalaması 24.65 , varyansı ise 80.06 olarak hesaplanmıştır.

6.2. Seçilen Performans Ölçütü İçin Güven Aralığının Belirlenmesi

Sistemdeki toplam bekleme süresi için güven aralığı aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır.

$$\bar{x}(n) \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{S^2(n)}{n}}, \quad 24.65 \pm t_{19, 0.95} \sqrt{\frac{80.06^2}{20}}$$

Sistemde toplam bekleme süresinin $\alpha = 0.1$ güven seviyesinde (21.19, 28.11) dakikaları arasında olacağı tahmin edilmiştir.

6.3. Mevcut durum ve alternatiflerin karşılaştırılması

Temel sistemdeki personel ve cihaz kaynaklarının sayıları değiştirilerek üç alternatif model oluşturulmuştur. Kaynakların durumu Çizelge 3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3. Temel Model ve Alternatifler

Kaynaklar	Temel	Alt.1	Alt.2	Alt.3
Personel				
Operatör	2	3	2	3
Radyolojist	1	1	1	1
Doktor	1	1	1	1
Cihazlar				
Konvansiyonel	2	2	3	3
Ultrasan	1	1	1	1
Sayısal	1	1	1	1
Tomografi	1	1	1	1

Alternatif modellerin karşılaştırılabilmesi için $90\% \alpha = 0.1$ güven seviyesinde üç güven aralığı ($c=3$) oluşturulması gereklidir. Bonferroni [5] eşitsizliği kullanılarak üç güven seviyesi aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$1-(\alpha/c) = 0.9667$$

Bonferroni eşitsizliğinin oldukça genel olması nedeniyle güven aralıklarının nasıl oluşturulduğu önemli değildir. Her modelde aynı sayıda deneme olması da zorunlu değildir. Ortak rassal değişken kullanılması ve yüksek varyansa sahip modeller için daha fazla deneme yapılması mümkündür [4]. Güven aralıkları oluştururken varyans azaltma tekniği olarak ortak rassal değişken kullanılmıştır. Temel model ve üç alternatif model 20 deneme olarak çalıştırılmıştır. Deneme sonuçları ve alternatiflerin temel modelden farkları alınarak belirlenen güven aralıkları Çizelge 4'de sunulmuştur.

Çizelge 4. Alternatifler İçin Güven Aralıkları

Alternatif	$X_{alt.ort} - X_{tem.ort}$	Yarı Aralık	GA	
1	6.033	3.72	(-2.31 - 9.76)*	önemli
2	0.122	2.45	(-2.32 - 2.57)	önemsiz
3	4.036	4.78	(-0.74 - 8.81)	önemsiz

Sonuç olarak Alternatif 2 ile temel model arasında belirgin bir farklılık görülmüş diğer alternatifler ile temel sistem arasında ise belirgin bir farklılık görülmemiştir.

7. SONUÇ

Bu çalışmada; simülasyon modellemesindeki adımlar izlenerek, kesikli olay sistem simülasyonu yaklaşımı ile bir hastanenin röntgen servisi modellenmeye çalışılmıştır. Çalışmanın sonucunda geliştirilen genel model bu alanda çalışan analistlerin ilave edecekleri özelliklerle, çeşitli süreçleri modelleyebilmelerine, röntgen servisindeki bekleme zamanlarını en aza indirebilmek için en uygun personel ve röntgen cihazı seçeneklerini bulabilmelerine imkân sağlayacak bir modelleme ortamı geliştirilmiş ve personel ve cihaz kaynaklarının sayıları değiştirilerek oluşturulan üç alternatif modelin karşılaştırması yapılmıştır.

İkinci alternatifin güven aralığı pozitif değerleri kapsadığından ve temel sistem ortalaması eksü alternatif sistem ortalaması kullanılarak güven aralığı oluşturulduğundan temel sistemdeki ortalama bekleme sürelerinin alternatif ikideki bekleme sürelerinden daha büyük olduğu anlaşılmıştır. Bu durumda minimum bekleme süresi arandığından alternatif iki tercih edilmiştir. Bu benzetim modeli sonuçlarına dayanılarak yöneticilere röntgen servisine bir adet konvansiyonel röntgen cihazı alınması tavsiye edilmektedir.

8. KAYNAKÇA

- [1] Goldsman, D. (2007), Introduction to Simulation, *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*, 26-37.
- [2] Jacobson SH, Hall SN, Swisher JR. (2006) Discrete-event simulation of health care systems. In: Hall RW, ed. *Patient Flow: Reducing Delay in Healthcare Delivery*. New York, Springer, 211-52.
- [3] Brenner S, Zeng Z, Liu Y, Wang J, Li J, Howard PK, 2010, Modeling and analysis of the emergency department at University of Kentucky Chandler Hospital using simulations, *Journal Of Emergency Nursing: JEN: Official Publication Of The Emergency Department Nurses Association [J Emerg Nurs]*, ISSN: 1527-2966, 2010 Jul; Vol. 36 (4), pp. 303-10
- [4] Law, A. M., and Kelton, W. D. (1991). *Simulation modeling and Analysis : McGraw-Hill*, New York.
- [5] Bonferroni, C. E. (1937). Teoria statistica delle classi e calcolo delle probabilità. *Volume in Onore di Ricarrdo dalla Volta*, Universita di Firenza, 1-62.

LOJİSTİK DAĞITIM SİSTEMİ İÇİN SİMÜLASYON OPTİMİZASYON UYGULAMASI

Yunus Emre KARAMANOĞLU^(a), Coşkun KARACA^(b)

^(a) J.Binbaşı, KHO Savunma Bilimleri Enstitüsü Harekat Araştırması ABD.
ykaramanoglu@kho.edu.tr

^(b) P.Yüzbaşı, KHO Savunma Bilimleri Enstitüsü Harekat Araştırması ABD.
coskar2003@yahoo.co.uk

ÖZ

Simülasyon optimizasyonu, optimizasyon alanında bir çok faydalı uygulamaya sahiptir. Fakat simülasyon yoluyla optimizasyon ilave bir karmaşıklığa neden olur çünkü belli bir modelin performansı tam olarak hesaplanamaz, sadece tahmin edilebilir. Bu çalışmada uygulanan metodoloji simülasyon optimizasyonunun değişik bir kullanımıdır. Burada geliştirilen metodolojide, bir simülasyon optimizasyon aracı olan OPTQUEST® çözümcsü, küçük ölçekli bir firmanın müşterilerine en etkin dağıtımları yapabilmesi için ihtiyaç duyduğu en uygun araç filosunun belirlenmesi maksadıyla kullanılmıştır. Optimizasyon problemi için çözümler elde edilmiş, aynı zamanda Arena 10.0'da modellenerek simülasyon optimizasyon yaklaşımıyla model için en iyi ya da en iyiye yakın çözüm değerleri elde edilmiştir. Optimizasyon ve Simülasyon Optimizasyonu metodolojisinin beraber kullanımıyla yaklaşık % 5-8 oranında tasarruf sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: CPLEX, Lojistik Dağıtım, Optimizasyon, OPTQUEST ®, Simülasyon, Simülasyon Optimizasyonu.

A SIMULATION OPTIMIZATION APPLICATION FOR A LOGISTICS DISTRIBUTION SYSTEM

ABSTRACT

Simulation optimization has many useful applications in optimization area. But optimization via simulation adds an additional complication because the performance of a particular design cannot be evaluated exactly, but instead must be estimated. The methodology described in this paper is a different way of using simulation-optimization process. In the methodology developed here, a simulation optimization tool OPTQUEST® is used to find the optimal vehicle fleet for a

small scaled company. We tried to find optimal or near optimal values for an optimization problem, and also implemented this problem into the Arena 10.0 and by using simulation optimization approach we found optimum or near optimum values for our model. We saved approximately % 5-8 of cost (distance) by using optimization and simulation-optimization methodology together.

Keywords: CPLEX, Logistics Distribution, Optimization, OPTQUEST ®, Simulation, Simulation Optimization.

1. GİRİŞ:

Günümüzde, simülasyon bir çok karar verici tarafından yönetimde ve endüstride operasyonel ve organizasyonel etkinliği artırmak maksadıyla çok yaygın olarak kullanılan bilgisayar tabanlı güçlü bir araçtır. Simülasyonda temel fikir; gerçek sistemin içinde olan belirsizliklerle birlikte fiziksel bir prosesi bilgisayarda modellemektir. Simülasyonun en önemli avantajı, parametre değerlerinin kolayca değiştirilebilmesi nedeniyle sistem performansının farklı koşullarda denenmesine imkan tanımıştır. Bu da, doğal olarak sistem performansını optimize edecek parametre değerlerinin bulunmasına olanak sağlamaktadır.

Simülasyonun bu şekilde kullanılması literatürde **Simülasyon Optimizasyonu** olarak adlandırılmaktadır. SO, çözülmesi zor olan önemli problemlere çözüm aramak için modelin çıktısının kullanıldığı bir optimizasyon türü olup klasik problemlerin sahip olduğu karar değişkeni, amaç fonksiyonu ve kısıtlardan oluşmaktadır.

SO, geleneksel optimizasyon yaklaşımlarından farklı olarak çok fazla senaryonun etkin bir şekilde ele alınmasına imkan vermektedir. Bu nedenle, sadece çözümlerin kalitesi açısından değil aynı zamanda pratik olması, kolay modellenebilir ve yorumlamasının basit olması bakımından da diğer yaklaşımlara nazaran daha avantajlı bir metot olarak karşımıza çıkmaktadır. Uygulamada SO problemlerinin amacı optimalliği araştırmak veya kanıtlamaktan ziyade gelişmiş ayarları belirlemektir. Öncelikle optimizasyon modelinin parametrelerini tahmin etmek için simülasyon yeter sayıda çalıştırılır ve genelde ortalama ve varyans kullanılarak en uygun değerler seçilir.

Bu faydalalarının yanında, simülasyonun limitlerinden biri pratik uygulamalarda en iyi kararı tam anlamıyla gösterememesidir. Bunun nedeni, uygun olan seçeneklerin çok geniş bir alana yayılmış olmalarından ve bu kadar geniş çözüm noktalarının her birinin değerlendirilmesinin zaman ve maliyet açısından karşılanamamasındandır. Teorik olarak; en iyi seçeneği bulma, optimizasyonun alanı içine girmektedir. Optimizasyon metodları gerçek hayatı problemlerin sahip oldukları belirsizliklerle ve karmaşıklıklarla baş edemezler, burada da simülasyon aracı devreye girer ve bunları göz

önüne alabilir. Bu tip problemlerin çözümü için simülasyon metodunun seçilmesinin temel nedeni problemde var olan belirsizlikler ve karmaşıklıklardır.

Son yıllarda özellikle metasezgisel alandaki gelişmeler simülasyon ve optimizasyonu başarılı bir şekilde birleştiren ve SO adı verilen yeni bir yaklaşımı ortaya çıkarmıştır. Bu metot aynı zamanda işletme ve endüstri alanlarında geçmişte uğraşılamayan karar verme problemleriyle uğraşmaya kapı açmıştır. Yakın geçmişe kadar simülasyon modelleyicisi önerilen sistemin sadece bazı değerlendirmelerine ilişkin sonuçlara ulaşabilmekteydi. Şimdi ise, SO uygulaması yardımıyla optimizasyon uygulamacıları simülasyon modellerinde en iyi sonuçlar için girdi değerlerini bulabilmektedir.

SO'da, bir veya daha fazla kesikli-olay simülasyon modelleri analitik amaç fonksiyonu yerine konulmakta ve kısıtlamalar geleneksel optimizasyon probleminde olduğu gibi olmaktadır. Karar değişkenleri, simülasyon modelini çalıştırıldığında kullanılan girdi değişkenleri olmakta, performans ölçütleri ve karşılıkları simülasyon modelinden elde edilmektedir. Optimizasyon probleminin çözümü; dizayn değişkenlerinin sayısının çok olması, problemin farklı dizayn değişken tiplerini içermesi ve performans fonksiyonunun yapısı hakkında az bilgiye sahip olunması durumlarında zor olabilmektedir. SO, belli bir çözüm alternatifinin çözüm performansının (veya sistem dizaynı) tam olarak değerlendirilememesi, sadece tahmin edilebilir olması nedeniyle bu duruma ilave bir zorluk daha katmaktadır. Bu tahminler dolayısıyla, bir dizaynın diğerinden daha iyi olup olmadığına tam anlamıyla karar verilememekte, bu ise gelişen çözümlere doğru hareket eden optimizasyon algoritmalarını başarısızlığa uğratmaktadır.

Bu çalışmada; ev ve sanayide kullanılan tüpleri üreten küçük ölçekli bir firmaya ait lojistik dağıtım sistemi ele alınmıştır. Mevcut durumda merkezlerden müşterilere ve müşterilerden de merkezlere olmak üzere iki yönlü malzeme akışı bulunmaktadır. Merkezler müşteri taleplerini eldeki araçlarıyla karşılaşırken aynı araçlar müşterilerden merkezlere gönderilen malzemeleri de (iadeler, boşalmış veya doldurulması gereken tüpler vb.) taşımaktadır. Araçların gidiş-gelişlerde mümkün olduğunda dolu olması istenirken mevcut durumda gidiş doluluk oranları ortalama % 80-85, dönüş oranları ortalama % 50-55 arasında kalmaktadır. Farklı coğrafi bölgelerde 3 merkezi bulunan firma için bölgesel ring taşımacılığı uygulaması önerilmiştir.

Firmaya ait merkezler, konusu bulundukları bölgenin özelliklerine göre farklı sayıda istem noktasına ve farklı kapasitelerde 5 araçlık filolalara sahiptirler (Tip-1: 35 ton, Tip-2: 23 ton, Tip-3: 16 ton, Tip-4: 20 ton, Tip-5: 25 ton). Tüm müşteri talepler, araçların ayrılışlarını izleyen gün içinde karşılanmaktadır. Mevcut durumda istem noktaları, her çevirimde ziyaret edilmeleri nedeniyle, istemlerinden ve gönderilerinden merkezi haberdar etmemektedirler. Bu durum araç kapasitelerinde eksik kullanıma neden olmaktadır.

Çalışmada, farklı senaryolar için istem noktalarının taleplerine göre araç sayıları ve kapasiteleri belirlenmeye çalışılmış, böylece her merkezin filo yapısına ilişkin en uygun araç sayısı ve tipleri bulunmuştur. Bulunan uygun filolarla merkezlerde gereğinden fazla araç bulunması engellenmeye ve araç kullanım oranları da artırılmaya çalışılmıştır.

Probleme klasik optimizasyon ve SO uygulaması bir arada kullanılarak çözüm bulunmuştur. Klasik optimizasyon uygulamasında firmanın merkezlerine ait 7 aylık dönemi kapsayan veriler kullanılmış, SO uygulamasıyla da fabrikalar için en uygun araç filo yapısı ortaya çıkarılmaya çalışılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde konuya ilişkin kısa bir literatür araştırması yapılmış, 3'üncü bölümde ise önerilen yaklaşım sunulmuştur. 4'üncü ve 5'inci bölümlerde sırasıyla deneysel ayarlamalar, hesaplama sonuçlarını içeren tablolar ve şekillere yer verilmiştir. Sonuç, değerlendirmeler ve muhtemel çalışma alanlarına 6'ncı bölümde değinilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

SO en uygun girdi parametre değerlerini tanımlamak için yapısal bir yaklaşım sunar. SO'nun literatürde çok geniş bir çalışma alanı olması, simülasyon kullanıcılarını çeşitli simülasyon paket programları geliştirmeye yönlendirmiştir. Son yillardaki teknolojik gelişmelerin de katkısıyla, problemlerin çözümü için daha etkin yeni yöntemler ortaya atılmış ve birçok alanda kullanım imkanı bulunan ticari simülasyon paket programları geliştirilmiştir. AutoMod ve AutoSched yazılımları ile birlikte kullanılan AutoStat; Arena, Flexsim, Micro Saint, ProModel, SIMUL8 ve daha bir çok yazılımla uyumlu çalışabilen OPTQUEST®; Medmodel, ProModel ve ServiceModel yazılımlarına entegre edilmiş SimRunner2 en yaygın olarak kullanılan SO araçlarıdır. [Hong ve Nelson 2009]

Optimallik, simülasyon modeliyle (kararlı durum veya geçici hal) birlikte olan çıktı değişkenlerinin bir fonksiyonuyla ölçülür. Tek amaçlı problemlerin çözümü için Gradyen Tabanlı Araştırma Metodu ve Stokastik Yaklaşım Metodları bazı popüler metodlardandır. Son 20 yıldır ticari yazılım geliştirme grupları simülasyon optimizasyon modüllerinin değerinin farkına varmış ve simülasyon yazılım paketlerine bunu eklemiştir. Akademik araştırmalar için geliştirilen yakınsama özellikle algoritmaların aksine ticari olarak geliştirilen paket programların çoğu sezgisel yöntemlere dayalı olarak çalışmaktadır. Örneğin, SimRunner ile AutoStat evrim algoritmaları ile genetik algoritmaları kullanırken, OPTQUEST® dağıtık arama, tabu arama, sınır ağları tabanlı algoritmalar ile çalışmaktadır. (Olafsson ve Kim, 2002).

Benson(1997), Heflin ve Harrell (1998a, 1998b), Price ve Harrell (1999a, 1999b) Simrunner adı verilen Promodel optimizasyon paketini incelemiştir. Söz konusu

program optimizasyona yönelik çeşitli girdi parametrelerini değiştirerek en iyi amaç fonksiyonuna ulaşmak için gereken çeşitli parametre kombinasyonlarını oluşturur ve etki derecelerini gösterir. En iyi amaç fonksiyonu değerini sağlayan girdi parametrelerinin kombinasyonunu elde etmeye çalışır. Kalasky (1996)'nın tedarik zinciri uygulaması Simrunner'ın kullanımına yönelik güzel bir örnektir.

Sadowksi ve Bapat (1999) Arena'nın optimizasyon sistemi olan OPTQUEST®'in genel kabiliyetlerini belirtmiştir. Bu sistem, analizciye ilgilenilen girdi parametreleri için arama uzayını sınırlama, maksimum arama uzunluğunu ayarlama ve analizcinin kriterlerini karşılayan girdi parametre kombinasyonlarını ortaya çıkarma imkanı vermektedir.

Carson (1996), Automod simülasyon yazılımı için hazırlanan ve kullanıcıya içerisinde derecelendirme ve seçmeyi de içeren bir çok istatistiksel teknikleri kullanma imkanı da sunan AutoStat'ı ele almıştır.

Rawles (1998) ise, kullanıcının bir ya da daha fazla girdi parametre değeri ve çıktı değişkenlerinden oluşan bir amaç fonksiyonu tanımlamasını mümkün kılan Witness Optimizer'ı incelemiştir. Bu optimizasyon aracında, her bir girdi parametresinin muhtemel değerler dizisine sahip olduğu veya kesikli değerler kümesi olduğu farz edilir.

Hong (2005), kesikli SO problemlerinin çözümüne yönelik koordinat arama algoritması önermiş ve COMPASS algoritması ile karşılaştırma yapmıştır. Hong ve Nelson (2006), kesikli SO problemlerine kendine has bir komşuluk yapısı ile çözüm arayan COMPASS algoritmasını geliştirmiştir.

Borton ve Meckesheimer (2006), SO metodlarının sınıflandırılmasına ilişkin bir çalışma yapmış ve bu kapsamda sürekli SO problemlerinin doğrudan gradient ve meta-model metodlar olarak ikiye ayrıldığını ifade etmişlerdir.

Almeder ve Preusser (2007), tedarik zinciri için karmaşık simülasyon modelleri ile optimizasyon modellerinin avantajlarını birleştiren melez bir SO yaklaşımı önermişlerdir.

3. ÖNERİLEN ÇALIŞMA

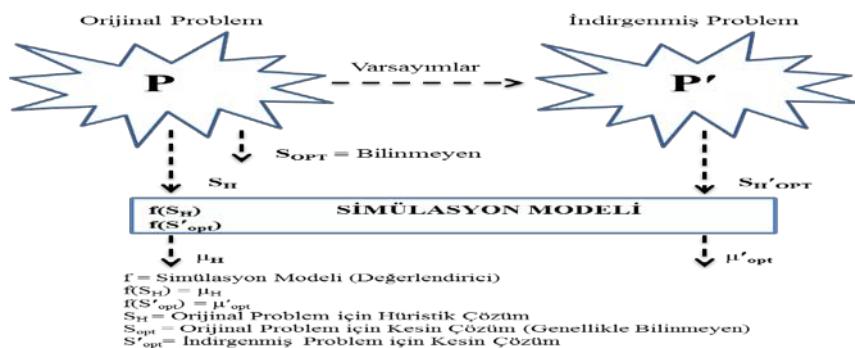
Çalışmada firmanın dağıtım sistemi, her merkeze ait mevcut 7 aylık veri kullanılarak belirli varsayımlar altında optimizasyon alanında çözülebilir hale getirilerek formüle edilmiş ve CPLEX çözümcsüsü ile çözümler elde edilmiştir. Aynı zamanda ARENA programı içerisinde yer alan OPTQUEST® kullanılarak sistemin simülasyon tabanlı optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Geliştirilen SO modeliyle, hali hazır sistemin uzun dönem performansına ilişkin en uygun parameter değerleri tahmin edilmeye çalışılmış ve iki modelden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

İzlenen metodoloji Şekil-1'de gösterilmektedir.



Şekil 1. İzlenen Metodoloji akış diyagramı.

Çalışmanın konusu olan ve P olarak adlandırdığımız çözülmesi gereken gerçek problem, NP-Zor sınıfı bir problem olması nedeniyle optimal sonucun (S_{opt}) bulunması neredeyse mümkün olmamaktadır. Bu sebeple, P problemi belirli varsayımlar yardımıyla optimizasyon alanında çözülebilir bir problem haline (P'indirgenmiştir). Indirgenmiş P' problemimizin çözümü olarak elde edilen S'_{opt} , P problemi için optimal olmayı ilemeyecektir. P problemini çözmek için geliştirilen sezgisel yöntemler ile oluşturulan çözümlerin kümesi S_H ise, OPTQUEST® aracı ile ulaşılan çözümlere karşılık gelmektedir. OPTQUEST® modelleme yaklaşımı Şekil-2'de sunulmuştur.



Şekil 2. OPTQUEST® modelleme yaklaşımı.

4. DENEYSEL UYARLAMALAR:

Problemde önerilen yaklaşımın etkinliğini belirlemek için 3 farklı problem alanı (dağıtım merkezi) seçilmiştir. A merkezi toplam 21 noktaya, B ve C merkezleri ise 24'er noktaya hizmet etmektedir. Optimizasyon modeli amaç fonksiyonu (1)'de, OPTQUEST® programında tanımlanan SO modeli amaç fonksiyonu (2)'de verilmiştir.

$$Enk \ Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} \sum_{v=1}^V x_{ijv} \quad (1)$$

X_{ijv} : i noktasından sonra j noktasına uğrayan v aracı
 C_{ij} : i noktasından j noktasına ulaşım süresi

$$\text{MINIMIZE (TOPLAM MESAFE)} \quad (2)$$

Modellemede; tüm taleplerin karşılandığı, taleplerin önceden bilindiği, yükleme ve boşaltma zamanlarının sabit olduğu, zaman aralıklarının sabit ve önceden bilindiği, araç hızlarının sabit olduğu ve merkezlerin aynı yol özelliklerine sahip olduğu varsayılmıştır.

Her problemde farklı taşıma kapasitelerine sahip 5 araç kullanılmıştır. Problemde amaç; her merkez için müşteri isteklerini karşılayan en uygun araç miktarlarını ve tiplerini bulmaktadır. Söz konusu 3 merkezden alınan 7 aylık veriler kullanılarak öncelikle mevcut duruma ilişkin en uygun sonuçlar elde edilmiş, müteakiben sistemin uzun dönem performans sonuçları incelenmiştir.

5. SAYISAL SONUÇLAR

Sayısal sonuçlar elde etmek ve sonuçları kıyaslamak maksadıyla üç farklı senaryo üç farklı merkeze uygulanmıştır. Her senaryoda filoda bulunan araç sayıları değiştirilerek uygun filo tipi ve araç kapasiteleri tespit edilmiştir. ,

1'inci senaryoda üç farklı araç tipi, 2'inci senaryoda 4 farklı araç tipi ve 3'üncü senaryoda ise 5 farklı araç tipi kullanılmıştır. Tüm talep noktalarına iki araçtan oluşan bir filoya bir gün içinde dağıtım yapılamaması nedeniyle iki araçlık filoya ilişkin senaryo oluşturulmamıştır. Araç sayılarının ve kapasitelerinin değişimleri hem optimizasyon modelinde hem de SO modelinde incelenmiştir. OPTQUEST® programı uzun vadede en uygun sonuçları elde edebilmek için senaryolarda kullanılan araçları uygun kombinasyonlar halinde model içerisinde değiştirmekte ve kullanıcıya kolaylık sağlamaktadır. Tablo-1'de 3'üncü senaryoya ilişkin optimizasyon modelinden elde edilen sonuçlar verilmiştir. (1'inci ve 2'inci senaryo sonuçları aynı şekilde elde edilmiştir.)

Tablo 1. Senaryo-3. 5 Araçlık Filo (Tip1=1, Tip2=1, Tip3=1, Tip4=1, Tip5=1)

A Merkezinin Toplam Mesafe ve Maliyeti (7 Aylık)							
AYLAR	1	2	3	4	5	6	7
Halihazır Kat Edilen Mesafe(km)	2320	2320	2320	2320	2320	2320	2320
Senaryo-3 Mesafe(km)	1502	1744	1552	1571	1954	1719	1636
B Merkezinin Toplam Mesafe ve Maliyeti (7 Aylık)							
Halihazır Kat Edilen Mesafe(km)	2890	2890	2890	2890	2890	2890	2890
Senaryo-3 Mesafe(km)	2703	2569	2680	2340	2677	2251	2619
C Merkezinin Toplam Mesafe ve Maliyeti (7 Aylık)							
Halihazır Kat Edilen Mesafe(km)	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100
Senaryo-3 Mesafe(km)	2721	2774	2806	2813	2679	2756	2915

Her merkez için tekrarlanan senaryoların 7 aylık ortalama değerleri ise Tablo-2'de sunulmuştur. (1'inci ve 2'nci senaryo sonuçları aynı şekilde elde edilmiştir.)

Tablo 2. Optimizasyonla Elde Edilen Ortalama Mesafeler (Km)

	A	B	C	Araç Tipleri				
Senaryo-1	1236	1887	--	Tip-1=1	Tip-2=1	Tip-3=1	Tip-4=0	Tip-5=0
Senaryo-2	1545	2163	2334	Tip-1=1	Tip-2=1	Tip-3=1	Tip-4=1	Tip-5=0
Senaryo-3	1668	2548	2781	Tip-1=2	Tip-2=1	Tip-3=1	Tip-4=1	Tip-5=1

Her bir senaryoya yönelik sonuçlar SO yaklaşımıyla da hesaplanmıştır. Tablo-3'te 5 araçlık senaryoya yönelik sonuçlar verilmiş olup, 3 ve 4 araçlık senaryolar için de sonuçlar aynı şekilde elde edilmiştir.

Tablo 3. Senaryo-3 için SIM-OPT Sonuçları.

Senaryo-3 için Elde Edilen Optimum Mesafeler (A) (Araç Filo Sayısı = 5)						
Simülasyon	Amaç Fonksiyonu	Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4	Tip 5
254	1541.09	0	2	0	2	1
Senaryo-3 için Elde Edilen Optimum Mesafeler (B) (Araç Filosu = 5)						
288	2376.64	2	0	0	0	3
Senaryo-3 için Elde Edilen Optimum Mesafeler (C) (Araç Filosu = 5)						
291	2599.20	0	0	1	3	1

Tablo-3'de görüldüğü gibi A Merkezine ait 5 araçlık senaryonun SO uygulamasından elde edilen amaç fonksiyonunun değeri 1541,09 km.dir (% 90 güven aralığı [1530,02-1552,15] olarak bulunmuştur). Aynı araçlardan oluşan filo için optimizasyon modelinin performansı 1668 km'dir.

Klasik optimizasyon uygulamasının belirli bir döneme ait statik veriler kullanarak çözümler ürettiği dikkate alındığında, SO uygulamasının araç filosu için en iyi araç tiplerini kolaylıkla seçme imkanı vermesi uzun dönemli değerlendirmede filo yapılarının nasıl şekillenmesi gerekiğine dair karar vericiye çok daha etkin bir hal tarzı sunabilmektedir.

İki uygulamadan elde edilen sonuçlar Tablo-4'de sunulmuştur.

Tablo 4. Mesafeler (Km.)

Senaryolar	A Merkezi Optimizasyon	A Merkezi SO	B Merkezi Optimizasyon	B Merkezi SO	C Merkezi Optimizasyon	C Merkezi SO
1	1236	1121.67	1887	1620.25	--	--
2	1545	1356.03	2163	1902.44	2334	2015.41
3	1668	1541.09	2548	2376.64	2781	2599.20

5.1. Yeni Araç Tipleriyle Elde Edilen Sonuçlar:

SO uygulaması ile; 3, 4 ve 5 araçtan oluşan filolara ilişkin oluşturulan senaryolar çerçevesinde, en etkin araç kullanımı nasıl olmalı sorusuna cevap aranmış ve önerilen yaklaşımından elde edilen sonuçlara uygun olarak, karma tamsayılı problem yeniden çözülmüştür. Firmanın dağıtım merkezlerindeki araç filolarında bulunan araç tiplerinin değiştirilmesi esasına dayalı yeni çözüm ile elde edilen her aya yönelik toplam mesafeler Tablo-5,6 ve 7'de sunulmuştur.

Tablo 5. Senaryo-1'in CPLEX Çözüm Sonuçları (Km)

	Senaryo-1 için Aylık Toplam Mesafeler (A). (Tip-2=2, Tip-4=1)							
	Aylar							
	1	2	3	4	5	6	7	ORTALAMA
Mesafe	2320	2320	2320	2320	2320	2320	2320	--
En uygun Mesafe	1092	1231	1190	972	1273	1204	951	1130
Senaryo-1 için Aylık Toplam Mesafeler (B). (Tip-1=1, Tip-5=2)								
Mesafe	2890	2890	2890	2890	2890	2890	2890	--
En Uygun Mesafe	1391	1954	1870	1751	2059	1821	1913	1572

Tablo 6. Senaryo-2'nin CPLEX Çözüm Sonuçları (Km)

	Senaryo-2 için Aylık Toplam Mesafeler (A). (Tip-1=1, Tip-4=1, Tip-5=2)							
	Aylar							
	1	2	3	4	5	6	7	ORTALAMA
Mesafe	2320	2320	2320	2320	2320	2320	2320	--
En Uygun Mesafe	1392	1476	1499	1501	1574	1492	1623	1508
Senaryo-2 için Aylık Toplam Mesafeler (B). (Tip-2=2, Tip-3=1, Tip-5=1)								
Mesafe	2890	2890	2890	2890	2890	2890	2890	--
En Uygun Mesafe	1705	2209	2055	1776	2198	2308	2115	2052
Senaryo-2 için Aylık Toplam Mesafeler (C). (Tip-3=3, Tip-5=1)								
Mesafe	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100	--
En Uygun Mesafe	2192	2346	2381	2044	2093	2273	2401	2247

Tablo 7. Senaryo-3'ün CPLEX Çözüm Sonuçları (Km)

	Senaryo-3 için Aylık Toplam Mesafeler (A). (Tip-2=2, Tip-4=2, Tip-5=1)							
	Aylar							
	1	2	3	4	5	6	7	ORTALAMA
Mesafe	2320	2320	2320	2320	2320	2320	2320	--
En Uygun Mesafe	1612	1688	1541	1263	1614	1594	1321	1519
Senaryo-3 için Aylık Toplam Mesafeler (B). (Tip-1=2, Tip-5=3)								
Mesafe	2890	2890	2890	2890	2890	2890	2890	--
En Uygun Mesafe	2049	2343	2119	2455	2302	2243	2577	2298
Senaryo-3 için Aylık Toplam Mesafeler (C). (Tip-3=1, Tip-4=3, Tip-5=1)								
Mesafe	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100	--
En Uygun Mesafe	2630	2641	2597	2658	2421	2566	2773	2612

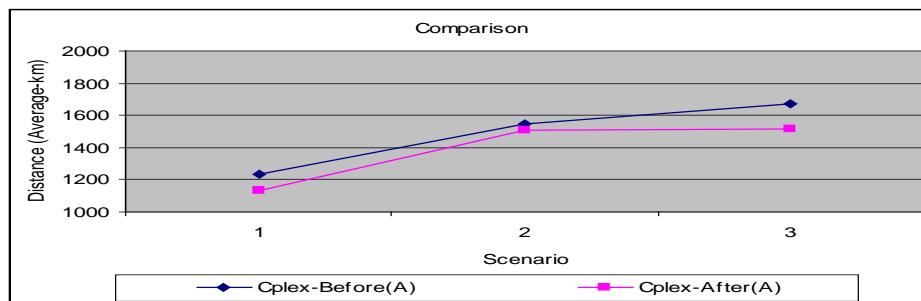
5.2. SO'dan Önce? SO'dan Sonra?

Her merkez için farklı araç tiplerinden oluşan araç filolarının değerlendirilmesine olanak veren SO uygulaması ile bölgelere uygun araç filoları tespit edilmiş ve bu filolar ile

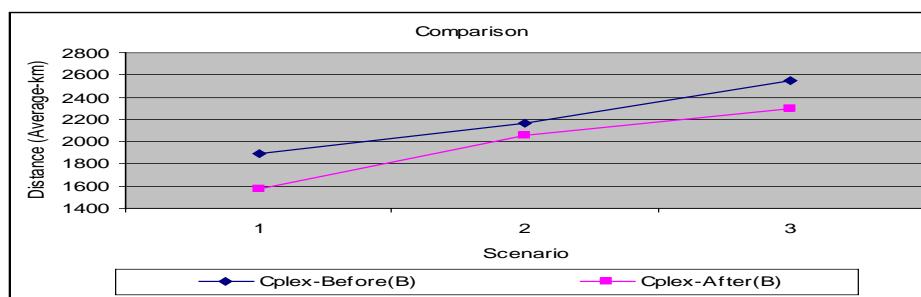
yapılacak bir dağıtımın, hali hazır sisteme göre daha etkin olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

SO uygulamasından sonra geliştirilen yeni çözümler (Tablo-5, 6 ve 7) ile filoların mevcut kullanımına yönelik uygulama öncesi çözümlein (Tablo-2) karşılaştırması Çizelge-1,2 ve 3'de verilmiştir:

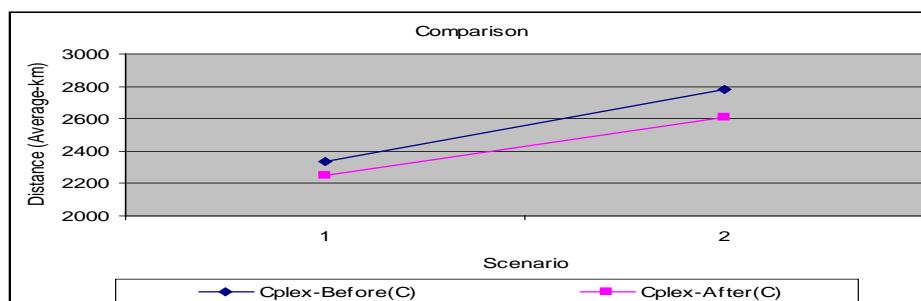
Çizelge 1. A Merkezi.



Çizelge 2. B Merkezi.



Çizelge 3. C Merkezi.



Çizelgelerden de anlaşılabileceği üzere, SO uygulamasından elde edilen uygun filo yapılarıyla ulaşılan sonuçlar, sistemin % 3 ila % 8 oranında iyileşebileceğini ortaya koymaktadır. Örneğin SO uygulamasından önce A merkezi için amaç fonksiyonumuzun ortalaması 1236 km iken SO uygulamasından sonra 1130 km'ye (% 90 güven aralığı [1129,07-1131,32]) inmiştir.

6. SONUÇ:

Her geçen gün, üretim, tedarik zinciri yönetimi, lojistik, finans, iletişim, bilgisayar, proje yönetimi ve hizmet sistemleri gibi karmaşık sistemleri analiz etmeye imkan veren yeni simülasyon modellerinin geliştirilmesi [Hong, 2005], SO'nun gerek araştırma gerekse uygulama alanında hızla gelişen ve dikkat çeken bir konu olarak yer almamasına neden olmuştur. Bu çalışmada da SO kullanımının sonuçları değerlendirilmiştir.

Sezgisel bir prosedürden elde edilen verilerin, matematiksel programlama yaklaşımıyla formüle edilen tipik bir optimizasyon probleminde girdi olarak kullanılmasının her zaman için optimal çözüme ulaşmada etkili bir yol olacağını söylemek mümkün olmamakla birlikte, sistemlere ilişkin belirli dönem performanslarının iyileştirilmesinde ve stokastik parametrelerin de dahil edilmesini gerektiren uzun dönem performansının belirlenmesine yönelik bilgilerin elde edilmesinde büyük kolaylıklar sağlamaktadır.

Önerilen metod araştırmacılara ve karar vericilere bir bakış açısı kazandırmak amacıyla ortaya konulmuş olup, matematiksel modelin içerisinde konulan stokastik yapılar sayesinde sistemin performansını belirlemek için daha esnek bir yapıya kavuşulacağı, bunun da gelişen durumları daha dinamik bir şekilde ele alarak farklı çıkarımlar ve sonuçlar elde edilmesinde katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

SO uygulamasının, müteakip çalışmalarında farklı filo büyütükleri ve araç tiplerinden meydana gelecek farklı senaryolar altında, maliyet ve zamanın da etkinliğini sorgulayacak şekilde daha gerçekçi modellerin çözümü için kullanılabileceği, SO alanında başlıcaları; **AUTOSTAT®**, **OPTIMIZ®**, **SIMRUNNER®** ve **OPTIMIZER®** olmak üzere bulunan programların tipik bir optimizasyon problemine olan bakış açısını değiştirerek araştırmacıya daha gerçekçi sonuçlar sunabileceği mütalaa edilmektedir.

7. KAYNAKÇA

- [1] Almeder, C. ve Preusser, M. (2007), A Hybrid Simulation Optimization Approach for Supply Chains, Proceedings of the 6th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, ARGESIM/ASIM-Verlag, CD, (ISBN: 978-3-901608-32-2).
- [2] Barton, R. R. ve Meckesheimer, M. (2006), Metamodel-based Simulation Optimization, Handbooks in operations research and management science: *Simulation*, 13(18), 535–574.
- [3] Baker, G. S. (1997), Taking the Work Out of Simulation Modeling: An Application of Technology Integration, *Proceeding of the 1997 Winter Simulation Conference*, 1061-1067.
- [4] Benson, D. (1997), Simulation Modeling and Optimization Using ProModel, *Proceeding of the 1997 Winter Simulation Conference*, 587-593.

- [5] Carson, J. S. (1996), AutoStatTM : Output Statistical Analysis for AutoModTM Users, *Proceeding of the 1996 Winter Simulation Conference*, 492-49.
- [6] Fu, M.C. (2002), Optimization for Simulation: Theory and Practice, INFORMS Journal on Computing, 14(3), 192-215.
- [7] Heflin, D. L., Harrell, C. R. (1998(a)), Healthcare Simulation Modeling and Optimization Using ProModel, *Proceeding of the 1998 Winter Simulation Conference*, 185-189.
- [8] Heflin, D. F., Harrell, C. R. (1998(b)), Simulation Modeling and Optimization Using ProModel, *Proceeding of the 1998 Winter Simulation Conference*, 191-197.
- [9] Hong, L.J. (2005), Discrete Optimization via Simulation Using Coordinate Search, Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, 803-810.
- [10] Hong, L.J. ve Nelson, B.L. (2006), Discrete Optimization via Simulation Using COMPASS, Operations Research, 54(1), 115-129.
- [11] Hong, L.J. ve Nelson, B.L. (2009), A Brief Introduction to Optimization via Simulation, *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*, 75-85.
- [12] Kalasky, D. R. (1996), Simulation-based Supply-Chain Optimization for Consumer Products, *Proceeding of the 1996 Winter Simulation Conference*, 1373-1378.
- [13] Olafsson, S. ve Kim, J. (2002), Simulation Optimization, *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, 79-84.
- [14] Price, R., Harrell, C. R. (1999(a)), Simulation Modeling and Optimization Using PROMODEL, *Proceeding of the 1999 Winter Simulation Conference*, 208-214.
- [15] Price, R., Harrell, C. R. (1999(b)), Healthcare Simulation Modeling and Using MEDMODEL, *Proceeding of the 1999 Winter Simulation Conference*, 215-219.
- [16] Rawles, I. (1998), The Witness[®] Toolbox- A Tutorial, *Proceeding of the 1998 Winter Simulation Conference*, 223-226.
- [17] Sadowski, D., Bapat, V. (1999), The Arena Product Family: Enterprise Modeling Solutions, *Proceeding of the 1999 Winter Simulation Conference*, 159-166.
- [18] Savory, R. G. (1995), Using Mathematica to Aid Simulation Analysis, *Proceeding of the 1995 Winter Simulation Conference*, 1324-1328.
- [19] Swisher, J. R., Hyden, P. D., Jacobson, S. H., Schruben, L. W. (2000), Discrete Event Simulation Optimization: A Survey of Recent Advances. *Proceedings of the 32nd conference on Winter Simulation*, 119 – 128.

SERAMİK YÜZEY GEOMETRİSİNİN, BALİSTİK DARBE SONRASINDA DESTEK PLAKASINDA MEYDANA GELEN DEFORMASYON MİKTARINA ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELEMESİ

Y.Müh.Yzb.H. Kemal ŞENYILMAZ^(a), Y.Müh.Bnb.Birsel DEDEHAYIR^(b)

^(a)5'inci Ana Bakım Merkezi Komutanlığı ANKARA, h.senyilmaz@gmail.com

^(b)41'inci Bakım Merkezi Komutanlığı Tuzla / İSTANBUL, bdedehayir@yahoo.com

ÖZ

Bu çalışmada; Seramik-Alüminyum katmanlı bir zırh sisteminde, alüminyum plaka deformasyon miktarı seramik yüzey geometrisine bağlı olarak incelenmiştir. Çalışmanın başlangıcında; önce yüzeyi düzgün alümina seramik kullanılmış, daha sonra seramik yüzeyi belirli bir eğimde oluşturularak analizler tekrarlanmıştır. Seramik yüzey geometrisi ile alüminyum arka yüzeyinde meydana gelen deformasyon arasındaki ilişki incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Seramik, Zırh, Ansys Autodyn

ABSTRACT

In this study; in a Ceramic-Aluminum layered armor system, a degree of deformation on the back side of aluminum plate was examined by the surface geometry of ceramic plate. At the beginning of the study; an aluminum-ceramic plate with a straight surface was used, later the simulation was repeated giving different gradients to the ceramic surface. The relationship between back side of the aluminum plate deformation and the ceramic surface geometry was examined.

Keywords: Ceramic, Armor, Ansys Autodyn

1. GİRİŞ

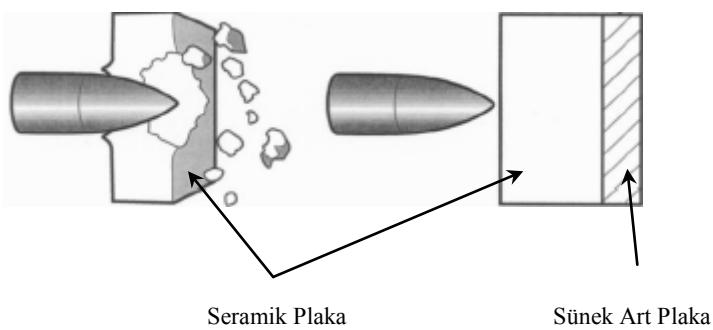
Son yıllarda, zırh delici mermilere karşı hafif ancak etkin bir zırh sisteminin geliştirilmesinde yüksek sertlik değerleri ve düşük yoğunlukları nedeniyle seramik malzemelerden yararlanılmaktadır. 1960'lardan beri süregelen çalışmalar, seramiklerin yüksek sertlikleri sayesinde üzerilerine gelen merminin ucunu aşındırarak kütlesini azalttığını göstermektedir [1,12]. Zırh sistemlerinde genellikle düşük fiyatları nedeniyle Al_2O_3 (alümina) seramikler

kullanılmaktadır. Alümina seramikler haricinde Bor Karbür, Silisyum Karbür vb. seramikler de zırh sistemlerinde kullanılmakla birlikte daha üstün mekanik özellikleri ve hafiflikleri yanında yüksek fiyatları nedeniyle kullanım alanları daha sınırlıdır [13] (Tablo 1).

Tablo 1. Zırh Seramiklerinin Karşılaştırması [13]

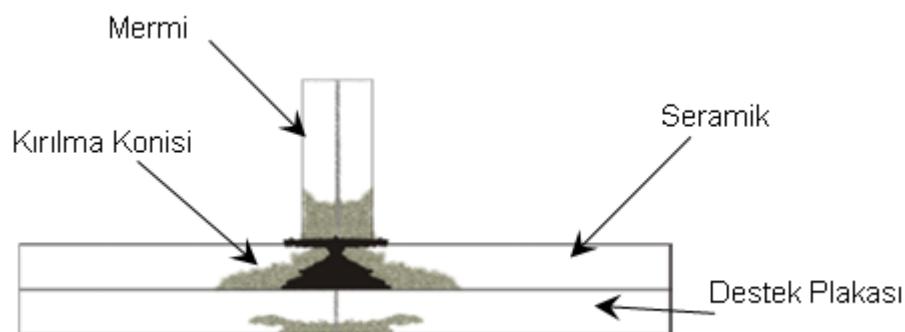
Malzeme	Eğme Mukavemeti [MPa]	Sertlik HV [kg/mm ²]	Yoğunluk [g/cm ³]	Kırılma Tokluğu [MPa m ^{1/2}]	Sonik Hız (km/s)
Al ₂ O ₃	460	1600	3.98	3.80	5.0
SiC	380-634	2300-2600	3.15-3.20	2.50-4.30	12.4
Si ₃ N ₄	700-930	1800	3.10-3.30	5.0-6.0	-
B ₄ C	410	3200	2.48-2.50	2.50	13.7
TiB ₂	365	2100	4.50	5.47	11.3
AlN	310	1300	3.25	3.7	11.0

Seramik plakaların balistik amaçlı kullanımı esnasında mermi çarpmasının etkisi ile seramikten çok sayıda parçacık saçılmakta ve bu parçacıklar korunması istenen yüzeyde hasar meydana getirebilmektedir [14]. Bu hasarın önlenmesi için kopan parçacıkları tutması ve merminin artık kinetik enerjisini emmesi maksadıyla seramik plakaların arkasına sünek bir plaka yerleştirilmelidir [11] (Şekil 1). Bu art plaka metal olabileceği gibi, plastik matrisli kompozitlerden de yararlanılabilmektedir.



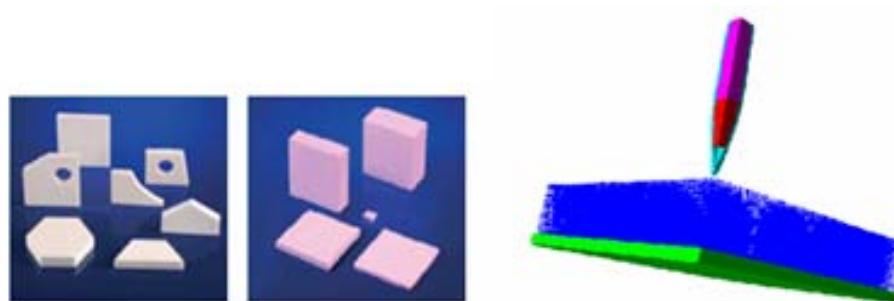
Şekil 1. Balistik darbe, Seramik Saçılması ve Sünek Art Plaka [11]

Balistik darbe esnasında oluşan bası dalgaları hem mermi hem de seramik üzerinde oluşmaktadır [15]. Bu bası dalgaları; seramik kalınlığı boyunca ilerlemekte, seramik arka yüzeyine ulaştığında bir kısmı arka destek katmanına iletilmektedir. Bası dalgalarının arka destek katmanına iletilemeyen kısmı, seramik arka yüzeyinde çeki dalgalarına dönüşerek tekrar üst yüzeye doğru ilerlemektedir. Seramik malzemelerinin bası gerilmelerine dayanımlarının yanında çeki gerilmelerine dayanımı çok düşüktür. Oluşan çeki gerilmeleri seramiğin çeki gerilmesine gösterdiği dayanımı aştığı anda kırılma başlamakta ve kırılma konisi meydana gelmektedir [16] (Şekil 2).



Şekil 2. Balistik darbe, Seramik Saçılması ve Sünek Art Plaka [16]

Balistik amaçlı kullanılan seramikler genellikle 50x50 mm boyutlarında olmakla birlikte kalınlıkları tehdit seviyesine ve seramiğin cinsine göre değişmektedir. Çeşitli zırh seramigi üreticilerinin katalogları ve literatür incelendiğinde seramiklerin hangi cins olursa olsun yüzeylerinin düzgün olarak imal edildiği ve sayısal çalışmalarında düzgün yüzeye sahip seramik modelleri kullanıldığı görülmektedir (Şekil 3). Yüzeyine farklı geometrik şekil verilmiş seramiklerin balistik performansına yönelik çalışmalara literatürde rastlanmamıştır.



Şekil 3. Düzgün Yüzeyli Seramikler ve Sayısal Analiz Örneği

Bu çalışmada; seramik-alüminyum katmanlı bir zırh sisteminde, seramik yüzey şeklinin, arka plaka deformasyon miktarına etkisi olup olmadığıının incelenmesi maksadiyla;

çalışmanın ilk bölümünde, zırh sisteminde kullanılan seramik yüzeyi düz olarak modellenmiş ve mermi çarpması benzetimi yapılarak arka plakadaki deformasyon miktarı ölçülmüştür. Daha sonra seramik aynı ağırlıkta olacak şekilde yüzeyi farklı yarıçaplarda dışbükey modellenerek benzetim tekrarlanmıştır.

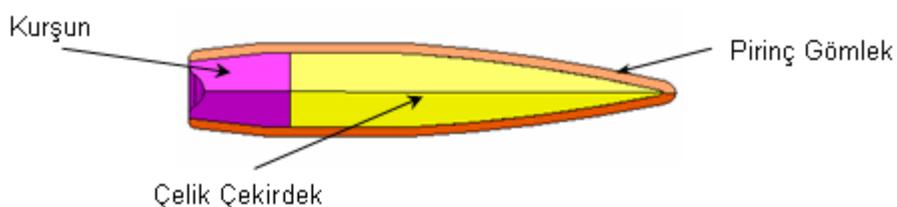
2. SAYISAL ÇALIŞMALAR

Çalışmada sayısal analizlerinin yapılması için Ansys Workbench programı kullanılmış, 7,62 mm zırh delici mermi ve seramik-alüminyum zırh sisteminin benzetimi Ansys Autodyn programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Autodyn, bu tip askeri maksatlı problemlerin çözümünde oldukça sık kullanılan analiz programlarından birisidir. Analizlerin kısa süresi maksadıyla, model Y ve Z eksenine simetri verilerek oluşturulmuştur [17].

2.1. Malzeme Modelleri

2.1.1. 7,62 mm Zırh Delici Mermi Modeli

7,62 mm. zırh delici mermi, üç kısımdan oluşmaktadır. Pirinç kaplama içerisinde çelik çekirdek ve arkasında kurşun bir ağırlık bulunmaktadır. Çelik çekirdek zırhı delmek için kullanılırken, kurşun malzeme mermi ağırlığını artırrarak merminin toplam kinetik enerjisini artırmak için kullanılmaktadır. Mermi, Ansys Design Modeller programı ile modellenmiştir (Şekil 4). Modelleme sonrasında 556 adet tetrahedral eleman kullanılarak çözüm ağı oluşturulmuştur. Son olarak Ansys Autodyn programına aktarılan mermiye ait malzeme modelleri literatürden alındığı şekliyle kullanılmıştır [18,19]. Mermi için hız, 850 m/s olarak belirlenmiştir. Mermi için sınır şartı belirlenmemiştir.

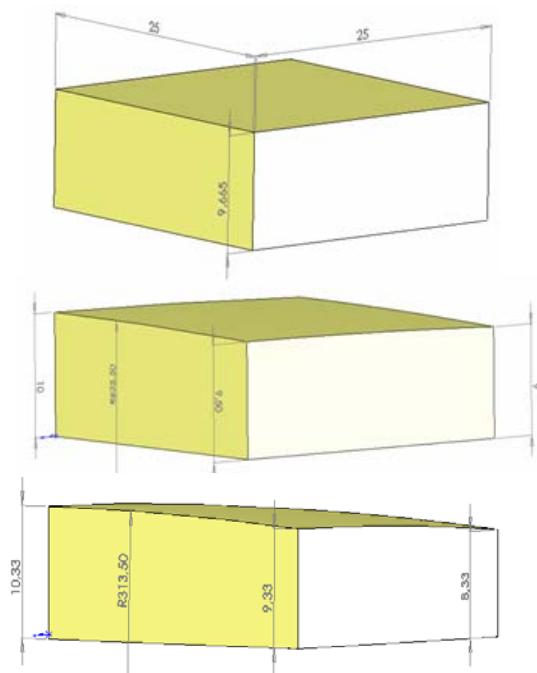


Şekil 4. Zırh Delici Mermi Modeli

2.1.2. Seramik Plaka Modeli

Seramik plakalar genellikle zırh plakalarında 5x5 cm olarak kullanıldığından, analizlerde de bu boyutlara sadık kalınmıştır. Design Modeller programı ile seramik plaka modellenmiş, Mesher programı kullanılarak çözüm ağı oluşturulmuştur. Dörtte bir model olarak 2,5x2,5 cm şeklinde boyutlandırılan seramik plakaya Ansys Autodyn programı ile Y ve Z eksenlerinde simetri tanımlanmıştır. İlk yapılan analizde seramik,

toplam ağırlığı 82,88 g olacak şekilde 9,665 mm kalınlığında modellenmiştir. Sonraki benzetimlerde seramik yüzeyine 313,5 ve 625,5 mm'lik radyus verilerek, orta eksende 10,33-10 mm, kenarlarda ise 8,33-9 mm kalınlığa sahip olması sağlanmıştır (Şekil 5). Sırasıyla seramikler 6250, 6760 ve 6084 hegzahedral eleman kullanılarak modellenmiştir. Seramikler için kullanılan malzeme modeli Tablo 2' de verilmiştir.



Şekil 5. Seramik Plaka Modelleri

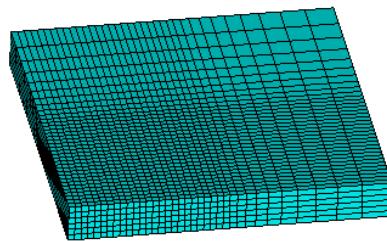
Tablo 2. Seramik Malzeme Modeli

Malzeme Modeli	Birim	Değer
Durum Denklemi		
Lineer		
Yögunluk	g/cm ³	3.43E+00
Hacim Modülü	(kPa)	1.54E8
Dayanım		
Mohr-Coulomb		
Kayma Modülü	(kPa)	8.30E7
Bozunma		
Birikimli Hasar		
Erozyon		
Geometrik Gerinme		
Erozyon Gerinimi		1.5
Geometrik Gerinme Tipi		Artımlı

2.1.3 Alüminyum Plaka Modeli

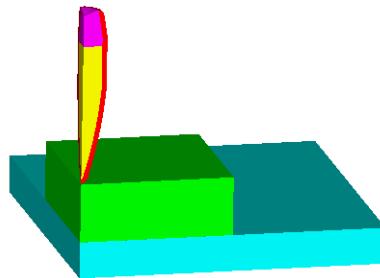
Bu çalışmada arka destek katmanı olarak T6 ısıl işlemeli Al-6061 plaka kullanılmıştır. Plaka modellenirken, yoğunluk 2,7 g/cm³, hacim modülü 70 GPa, kayma modülü 32 GPa, akma gerilmesi 300 MPa olarak kabul edilmiştir. Plaka, dörtte bir model olarak 50x50 mm ölçülerinde modellenmiş, çözüm ağı 7350 adet hegzahederal eleman

kullanılarak oluşturulmuştur. Alüminyum plaka için sınır şartları uygulanarak, plaka iki kenarından X, Y ve Z yönlerinde tutulmuştur. Plakaya ait hassasiyetin artırılması bakımından 25x25 cm' lik bölgede çözüm ağı sıklaştırılmıştır (Şekil 6). Çalışma sonucunda deformasyon değerlerinin alınabilmesi maksadıyla alüminyum plaka üzerine hareket edebilen gauge eleman yerleştirilmiştir. Gauge eleman X: -5,504 mm Y=Z= 0 koordinatlarına sahiptir.



Şekil 6. Alüminyum Plaka Modeli

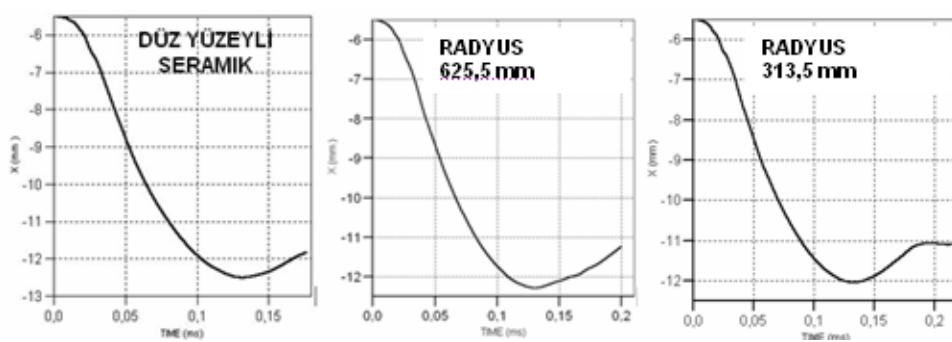
Mermi, seramik ve alüminyumdan oluşan model Şekil 7' te sunulmuştur.



Şekil 7. Seramik-Alüminyum Zırh Modeli

3. DEĞERLENDİRME

Çalışma sonucunda deformasyon değerlerini gösteren deformasyon miktarı-zaman grafikleri Şekil 8' sunulmuştur.



Şekil 8. Deformasyon Miktarı – Zaman Grafikleri

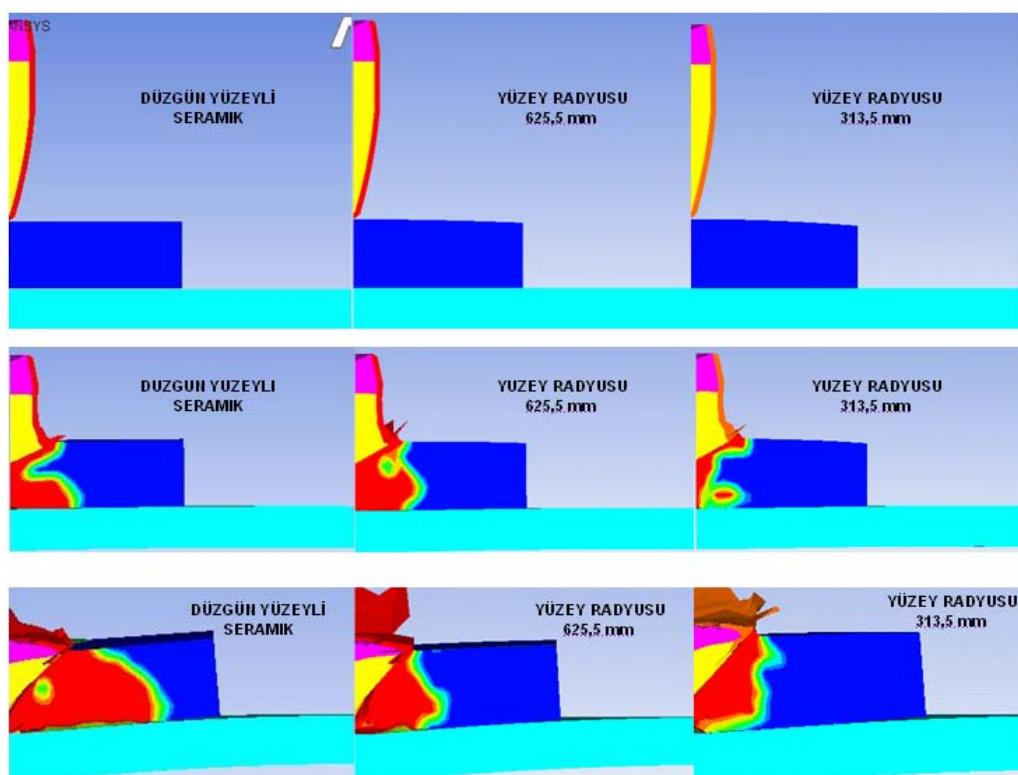
Grafikler incelendiğinde yüzeyine bükey eğim verilmiş seramiklerle oluşturulan zırh sistemlerindeki alüminyum plakanın, yüzeyi düz seramikle oluşturulmuş zırh sistemindeki alüminyum plakaya göre daha az deformasyona uğradıkları belirlenmiştir. Zaman-Deformasyon Miktarı değerleri Tablo 3' de görülmektedir.

Tablo 3. Deformasyon Miktarı – Zaman Değişimi Değerleri

SERAMİK YÜZEV DURUMU	ZAMAN (ms)	DEFORMASYON MIKTARI
YÜZEY RADYUSU 313,5 mm	0.00	-5,504 mm*
	1.33066E-01	-12,0457 mm
YÜZEY RADYUSU 625,5 mm	0.00	-5,504 mm*
	1.30392E-1	-12,2881 mm
DÜZGÜN YÜZEYLİ SERAMİK	0.00	-5,504 mm*
	1.31712E-1	-12,5076 mm

*Deformasyon miktarı tespitinde kullanılan Gauge eleman X: -5,504 mm Y=Z= 0 koordinatlarına sahiptir.

Her üç seramik-alüminyum zırh sisteminde merminin çarpması sonucu oluşan konik kırılmalar Şekil 9' de sunulmuştur.



Şekil 9. Kırılma Konisi Oluşumu

4. SONUÇ

Bu çalışmada; seramik-alüminyum zırh sistemlerinde, seramik yüzey geometrisinin arka plaka deformasyonuna etkisi incelenmiştir. Düzgün yüzeyli seramikle oluşturulan zırh sistemine nazaran, yüzeyine dış bükey olacak şekilde eğim verilen seramiklerle oluşturulan sistemlerde arka plaka deformasyonunun azaldığı görülmüştür. Radyusun yukarıda verilen ölçülerden daha çok artırılması, seramik kenarlarının çok fazla incelmesine sebep olduğundan tercih edilmemiştir. Böylece radyusun artırılması ile deformasyon miktarında oluşan farklılık % 4 civarlarında kalmıştır. Ancak kırılma konileri incelendiğinde, yüzeyi düzgün olan seramikte oluşan kırılma konisinin literatürle uyumlu olduğu görülmektedir. Yüzeyi radyuslu seramiklerde ise yüzey eğimi arttıkça kırılma konisi oluşumu bozulmaktadır. Kırılma konisinin uygun şekilde oluşmamasına rağmen, seramik yüzey eğiminin artışının deformasyon miktarını düşürdüğü gözlenmektedir.

TEŞEKKÜR

Çalışmada kullanılan Ansys Workbench programı ile ilgili desteklerinden dolayı ANOVA MÜHENDİSLİK firmasına teşekkür ederiz.

5. KAYNAKÇA

- [1] Wilkins ML, Honodel CA, Swale D., (1967), "An approach to the study of light armour." Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, UCRL-50284
- [2] Wilkins ML, Cline CF, Honodel CA, (1969), "Fourth progress report of light armour program." Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, UCRL-50694
- [3] Wilkins ML, Landingham RL, Honodel CA, (1971), "Fifth Progress Report of Light Armour Program." Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, UCRL-50980
- [4] Cline CF, Wilkins ML.,(1969), "The importance of material properties in ceramic armour." Proceedings of the ceramic armour technology symposium (USA);January 13–18
- [5] Sadanandan S, Hetherington JG., (1997), "Characterisation of ceramic/steel and ceramic/ aluminium armours subjected to oblique impact.", Int J Impact Eng, 19:811–819
- [6] Hetherington JG., (1992), "The optimization of two component composite armours." Int J Impact Eng,12:409–414.
- [7] Hetherington JG, Rajagopalan BP., (1991), "An investigation into the energy absorbed during ballistic perforation of composite armours." Int J Impact Eng, 11:33–40
- [8] Horsfall I, Buckley D., (1996), "The effect of through-thickness cracks on the ballistic performance of ceramic armour systems." Int J Impact Eng, 18:309–318

- [9] Edwards MR., (2000), “Land-based military applications.” Comprehensive composite materials. Elsevier Science, 681–699
- [10] Hazell PJ, Fellows NA, Hetherington JG., (1998), “A note on the behind armour effects from perforated alumina/aluminium targets.” Int J Impact Eng, 21:589–595
- [11] Aydinel, A., Yıldırım, R. O. ve Ögel, B., (2004), “Sabit Kalınlıktaki CTP ile Farklı Kalınlıklardaki Alümina Seramikten Olusan Zırh Sisteminin 7,62 mm AP Mermisi için Balistik İncelemesi”, Savtek 2004, Savunma Teknolojileri Kongresi, 179-187, (2004)
- [12] Chung, S., (1990), “Fracture Characterization of Armor Ceramics.” Ceramic Bulletin, Volume 69 (3), pp. 358-366
- [13] Ceradyne.com
- [14] Şenel F., BALYA B., PARNAS L., (2006), “Zırhlı Araçlarda Kompozit Parçacık Kalkanı (SPALL LINER)”, Savunma Teknolojileri Kongresi, Bildiriler Kitabı, 1:355-362
- [15] Weinong W. Chen, A. M. Rajendran, Bo Song and Xu Nie, (2007), “Dynamic Fracture of Ceramics in Armor Applications”, J. Am. Ceram. Soc., 90 [4] 1005–1018
- [16] D.P. Gonçalves, F.C.L. de Melo, A.N. Klein, H.A. Al-Qureshi, (2004), “Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 307–316
- [17] Century Dynamics, Autodyn Users Manual
- [18] P.J. Hazell, M.R. Edwards, H. Longstaff, J. Erskine, (2008), “Penetration of a glass-faced transparent elastomeric resin by a lead–antimony-cored bullet”, International Journal of Impact Engineering, 1–7
- [19] M. Grujicic, P.S. Glomski, T. He, G. Arakere, W.C. Bell, and B.A. Cheeseman, (2007), “Material Modeling and Ballistic-Resistance Analysis of Armor-Grade Composites Reinforced with High-Performance Fibers”, Journal of Materials Engineering and Performance, 10.1007/s11665-009-9370-5

7,62 mm ZIRH DELİCİ MÜHİMMATA KARŞI PERFORE ZIRH PLAKALARININ BALİSTİK DAVRANIŞI

**Namık Kılıç^(a), Yılmaz Erbil^(b), Atıl Erdik^(c) Doç.Dr.Bülent Ekici^(d)
Prof.Dr.Abdulkadir Ekşi^(e)**

^(a) Otokar Otomotiv ve Savunma Sanayi A.Ş., Arifiye/Sakarya, nkilic@otokar.com.tr

^(b) Otokar Otomotiv ve Savunma Sanayi A.Ş., Arifiye/Sakarya, yerbil@otokar.com.tr

^(c) Otokar Otomotiv ve Savunma Sanayi A.Ş., Arifiye/Sakarya, aerdik@otokar.com.tr

^(d) Marmara Üniversitesi Makine Müh., Göztepe/İstanbul, bulent.ekici@marmara.edu.tr

^(e) Çukurova Üniversitesi Makine Müh., Adana, akeksi@cu.edu.tr

ÖZ

Perfore zırh plakalarının ilave zırh olarak kullanılması mühimmatta ilave eğme gerilmeleri ve açısal yörunge değişimleri oluşturarak baz zırhın delme derinliğini azaltmaktadır. Bu çalışmada ticari bir sonlu elemanlar yazılımı olan Ls-Dyna kullanılarak 7,62x54 kalibre zırh delici mühimmattın perfore zırh plakaları üstündeki etkileri incelenmiştir. Analizlerde malzemenin yüksek gerimme hızlarındaki davranışını doğru modellemek adına çelik çekirdekli mühimmatt ve ısıl işlemeli çelik zırh plakalar için Johnson-Cook malzeme modelleri kullanılmıştır. Sayısal benzetim modeli, yapılan atış testleri ile doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Balistik, Perfore Plakalar, Eksplisit Analiz, JC Malzeme Modeli

BALLISTIC BEHAVIOR OF PERFORATED ARMOR PLATES AGAINST 7,62 MM AP PROJECTILE

ABSTRACT

Use of perforated armor plates as applique armor induces bending stress mainly to break incoming projectile core or at least divert it from its incident trajectory and thus substantially reduce its residual penetration capability through base armor. In this paper, the ballistic resistance of perforated plates made of high hardness armor steel was investigated with an commerical explicit code, Ls-Dyna. The Johnson-Cook material model is used for target and projectile material as it is well suited to model metals that are subjected to high strain rate loading. Numerical results correlated with tests.

Keywords: Ballistics, Perforated Armor Plates, Explicit Simulation, JC Material Model

1. GİRİŞ

Hem askeri hem de ticari uygulamalar açısından, zırh ve mühimmat geliştirme çalışmalarında gerçekçi bir hesaplama yöntemin geliştirilmesi mühendisler için uzun yıllardır geçerliliğini koruyan bir çalışma alanı olmuştur. Yüksek hızlarda çarpmalar ve penetrasyon problemleri yüksek hızda deformasyon, erime, malzeme davranışının gerinme hızına ve oluşan şok dalga yayınına bağlı doğrusal olmayan davranışlarını içermektedir. Oldukça kompleks girdileri olan balistik performans problemlerinin analizinde, yaklaşım olarak üç temel analiz metodu bulunmaktadır. Bunlar; ampirik, analitik ve sayısal yöntemlerdir. Zırh ve mühimmatın balistik performansının incelenmesi deneysel çalışmalar dahil oldukça karmaşık yöntemlerin geliştirilmesini gerektirmiştir. Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen testler doğrultusunda elde edilen verilerle pek çok ampirik model geliştirilmiş ve bazı problemlerinin çözümünde kullanılmıştır [1]. Balistik performans probleminin analitik yollardan çözülmesi içeriği yüksek hızda deformasyon, doğrusal olmayan malzeme davranışları sebebiyle oldukça zor bir yaklaşım olsa da bu konuda güncellliğini koruyan pek çok çalışma göze çarpmaktadır[2]. Numerik yöntemler ve bilgisayar teknolojilerindeki gelişmeler tüm mühendislik problemlerinde olduğu gibi balistik analizlerde daha hassas ve gerçekçi sonuçların elde edilmesinde gelişmeler sağlamıştır.

Zırhlı araçların balistik korumasında sonradan eklenebilir zırh plakalarının kullanılması pasif koruma seviyesinin arttırılmasında tercih edilen bir yöntem olagelmiştir. İlave zırh uygulamaları, ağırlık artışının getirdiği mobilite sınırlamaları veya ağırlığın aracın diğer komponentleri üzerinde oluşturacağı ömür azalması sebebiyle bazı problemleri de beraberinde getirmektedir. Öncelikle seçilecek ilave zırh çözümünün aracın yapısal dayanımını oluşturan baz zırha göre daha yüksek ağırlık verimine sahip olması gerekmektedir. Perfore yapılar temelde mühimmatla ilave eğme gerilmeleri ve açısal yörünge değişimleri oluşturarak baz zırhin delme derinliğini azaltmaktadır. Perfore plaka zırhlar, çeşitli zırh paketlerinde kullanıldığı gibi, ilave zırh olarak mekanik bağlantılar yapılarak aracın gövdesini oluşturan baz zırha eklenmektedir. Literatürde bu konuda çeşitli çözümleri içeren patentler [3,4,5] olmakla beraber çok fazla yayına rastlanmamıştır. Balos ve arkadaşlarının testlerler perfore plakaların davranışlarını çeşitli zırh sertlikleri için inceleyerek hangi malzemelerin kullanılabileceğini araştırdılar. [6] Perfore zırh çalışmalarına fayda sağlayacak bir diğer çalışmada Chocron ve arkadaşları 7,62 zırh delici merminin kernalar birleşimlerine yapılan atışlarda mühimmat üstüne gelen eğme gerilmelerini simülasyonlarla incelemiş ve RHA plakalara yapılan atış testleriyle karşılaştırmıştır. [7]

Bu çalışmada ticari bir sonlu elemanlar yazılımı olan Ls-Dyna kullanılarak 7,62x54 kalibre zırh delici mühimmatı tutacak perfore zırh paketi geliştirilmesi hedeflenmektedir. Analizlerde malzemenin yüksek gerilme hızlarındaki davranışını

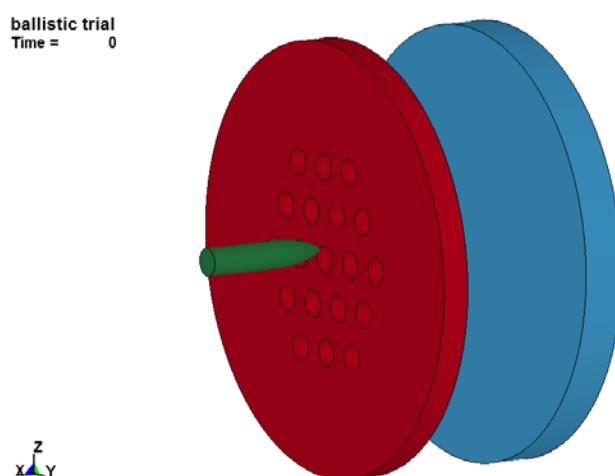
doğru modellemek adına çelik çekirdekli mühimmat ve ıslı işlemeli çelik zırh plakalar için Johnson-Cook malzeme modelleri kullanılmıştır. Sayısal benzetim modeli, yapılan atış testleri ile doğrulanmıştır.

2. SAYISAL BENZETİM MODELİ

Yüksek sertlik değerlerine sahip, ıslaklı yapı çelikleri sivil uygulamaların yanında yaygın olarak balistik koruma amaçlı olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada bu tür yüksek sertlikli çeliklerden biri olan S500 kullanılmıştır. Gerek üreticinin verdiği balistik koruma tablolarından gerekse yapılan atış testlerinden Nato Stanag 4569 seviye 3 için tehditin yaklaşık 16 mm kalınlıkla tutulabileceği tespit edilmiştir. [8] Gerek simülasyonlarda gerekse gerçekleştirilen testlerde hem baz zırh hemde perfore plakalarda S500 kullanılmıştır. Daha önce gerçekleştirilen sayısal benzetim çalışmalarıyla 7,62x54 zırh delici mühimmatın yüksek serlikte zırh plakalarına olan delici etkileri incelenmiş ve deneysel verilerle doğrulanmıştır. [9,10] Bu çalışmada hedef ve mühimmat Lagrange eleman tipleri kullanılarak modellenmiştir.

2.1 Geometrik Model

Geometrik model onde 5,5 mm perfore zırh çeliği arkasında 30 mm boşlukla yerleştirilmiş 9 mm baz zırh ve hedefe atılan 7.62x54R AP zırh delici mühimmatı içermektedir. Benzetimlerde kullanılan zırh delici mermi; çelik çekirdek, ceket malzemesi olarak fişek pirinci ve dolgu malzemesi olarak antimон-kurşun alaşımı malzemelerinden oluşmaktadır. Sayısal benzetimlerde modelleme kolaylığı oluşturması açısından mühimmat sadece çelik çekirdek olarak sayısal benzetim modelinde kullanılmıştır. Perfore zırh plakası üstünde 6 mm çapındaki delikler 10 mm aralıklarla yerleştirilmiştir.



Şekil 1. Perfore Plakaya Atış Modeli

Zırh delici mühimmatın toplam ağırlığı 10,04 g dır. Hedefe çarpması Stanag 4569'da verildiği üzere 854 m/s alınmıştır. Hedef modelinde dairesel Lagrange katmanları iki bölgeye ayrılmıştır. Yarıçap yönünde çözüm ağı sıklığı içерden dışarıya doğru giderek arttırılmıştır.

2.2 Malzeme Modeli

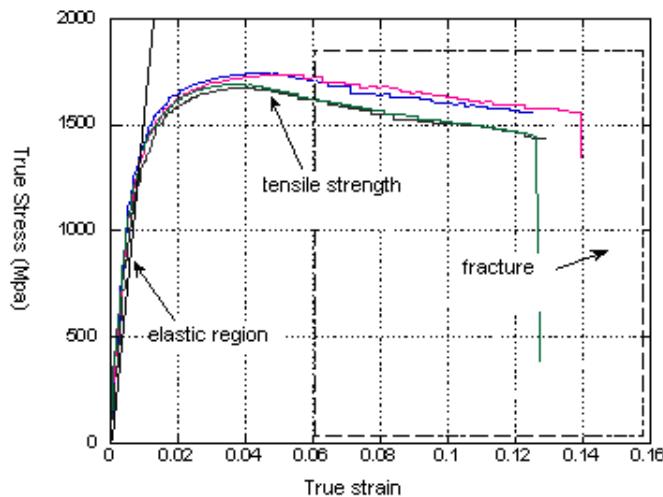
Hedef ve mühimmat için yüksek gerinim hızlarında davranışları uygun yansitan Johnson-Cook malzeme modeli kullanılmıştır. Malzemenin akma dayanımı sıfırdan farklı gerinim hızlarında gerinme sertleşmesi, gerinim hızı sertleşmesi ve sıcaklık yumuşaması etkilerini dikkate alarak [11] ifade edilir:

$$\sigma_y = \left[A + B \varepsilon_p^n \right] \left[1 + C \log \dot{\varepsilon}_p^* \right] \left[1 - T_H^m \right]$$

Eşitlikte ε_p eşdeğer plastik gerinme, $\dot{\varepsilon}_p^*$ boyutsuz plastik gerinme, T_H homolog sıcaklığıtir $\{ T_H = (T - T_{room}) / (T_{melting} - T_{room}) \}$. A, B, C, n ve m malzeme sabitleridir. İlk parantez statik gerilmeyi ifade eder. İkinci ve üçüncü parantezler sırasıyla gerinim hızı ve termal yumuşama etkilerini tanımlar. Kırılma kriteri hasar ilerlemesini temel alır ve malzemeden hasar (D: Damage) şu şekilde ifade edilir:

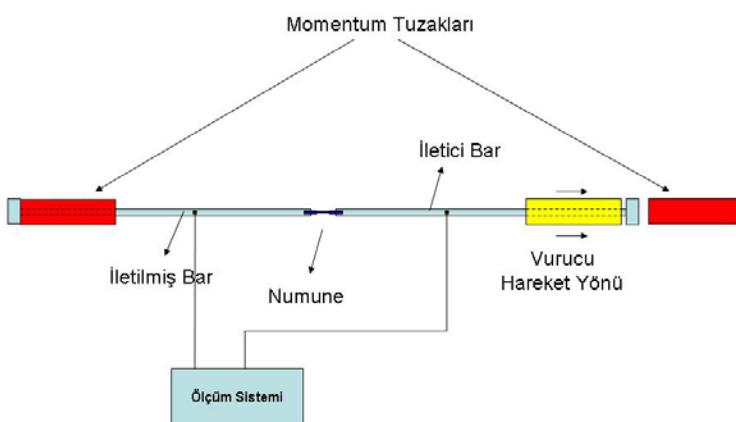
$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon^f} \quad \text{ve} \quad \varepsilon^f = \left[D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*) \right] \left[1 + D_4 \ln \left| \dot{\varepsilon}_p^* \right| \right] \left[1 + D_5 T_H \right]$$

σ^* hidrostatik gerilmenin etkin gerilmeye oranı olarak tanımlanır. D1-D5 ise test sonuçlarına göre belirlenen malzeme sabitleridir. Burada $\Delta \varepsilon$, etkin plastik gerinim için her bir integrasyon çeviriminde oluşan artımdır. D=1 olunca, malzemede kırılmanın gerçekleştiği varsayılar. Balistik testlerde kullanılan zırh, alaşımı ya da serleştirelim temperlenmiş ve sivil uygulamalar için geliştirilmiş bir çeliktir. Ölçülen sertlik değerleri, tablollanmış mekanik ve kimyasal özelliklerini Skoglund ve arkadaşları tarafından malzeme modeli olarak Armax 500'e çok yakındır. Bu sebeple simülasyonlarda JC parametreleri olarak Skoglund tarafından belirlenmiş A = 1470 MPa, B = 702 MPa, n = 0.199, C = 0.00549 m = 0.811 kullanılmıştır [12]. Kırılma parametreleri D1=0,068, D2=5,382 D3=-2,554 Skoglund'un bir başka çalışmasından elde edilerek çekme testi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Skoglund çalışmasında S500 için triaxialitenin kırılma davranışından strain hızından daha etkin olduğunu çıkardığı için D4=0 alınmıştır. Termal yumuşama etkisi D5=0 alınarak gözardı edilmiştir.



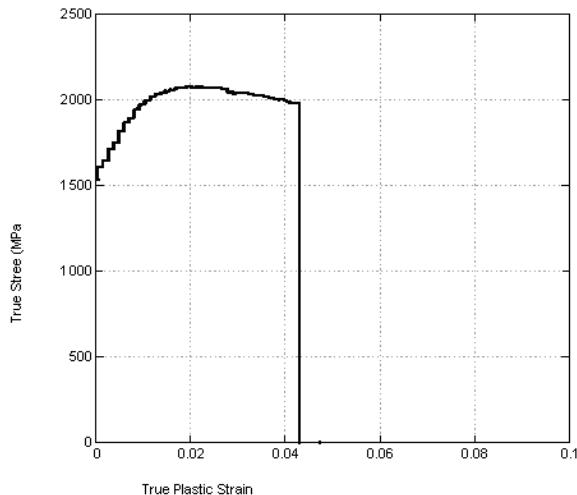
Şekil 2. Zırh Çeliği Çekme Test Sonuçları

Çekirdeğin JC malzeme modeli İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Dinamik Malzeme Labaratuvarında gerçekleştirilen deneylerle oluşturulmuştur. Yüksek hızlarda gerinme ve gerilim testleri Split Hopkinson Basınç Bar (SHPB) düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. (Şekil 3).



Şekil 3. SHPB metodunun şematik gösterimi

Yapılan statik testlerde yaklaşık 4% uzamada ve 2.1 GPa civarında malzemenin koptuğu görülmektedir. Çekme numuneleri çekirdeğin düz kısmında işlenerek elde edilmiştir. Yapılan sertlik ölçümelerinde delme ve penetrasyonda daha etkin olan çekirdeğin uç kısmında sertlik değerlerinin test numunelerinin işlendiği bölgeye göre yaklaşık 4-5 HRc daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Oluşturulan malzeme mukavemet modeli Buchar ve arkadaşları tarafından elde edilen değerlerle karşılaştırıldığında bezner sonuçlar elde edildiği görülmüştür. [13]



Şekil 4. Çelik Çekirdek Çekme Testi

2.3 Hal Durum Denklemleri

Kullanılan hidrokod yazılımı, çözüm sırasında toplam gerilme tensörünü sapma gerilmesi (deviatoric stress) ve basınç bileşeni (hidrostatik basınç) olarak ikiye ayırrı. Hidrostatik basınç, lokal yoğunluk ve lokal özgünlük enerji arasında bağ kurmak için durum denklemi (EOS) kurulmalıdır. Hedef plaka için Mie-Gruneisen durum denklemi kullanılmıştır.

$$P = \frac{\rho_0 C^2 \mu (1 + (1 - \gamma/2)\mu - (\alpha/2)\mu^2)}{[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \mu^2 / (\mu + 1) - S_3 \mu^3 / (1 + \mu)^2]} + (\gamma + \alpha\mu)E_0$$

Eşitlikte E_0 hacimsel iç enerji, C şok ve parçacık hızının kesişim noktası, S_1, S_2, S_3 şok parçacık hız eğrisini oluşturan katsayılar, γ Gruneisen sabitidir. α hacim düzeltme ve $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ sıkışma faktörüdür. Hedef malzeme için Mie Gruneisen EOS sabitleri [14] kullanılarak oluşturulmuştur. Çekirdek malzemesi için, doğrusal durum denklemi kullanılmıştır. Doğrusal durum denklemi basınç ve yoğunluk arasında aşağıdaki gibi bir ilişki tanımlar:

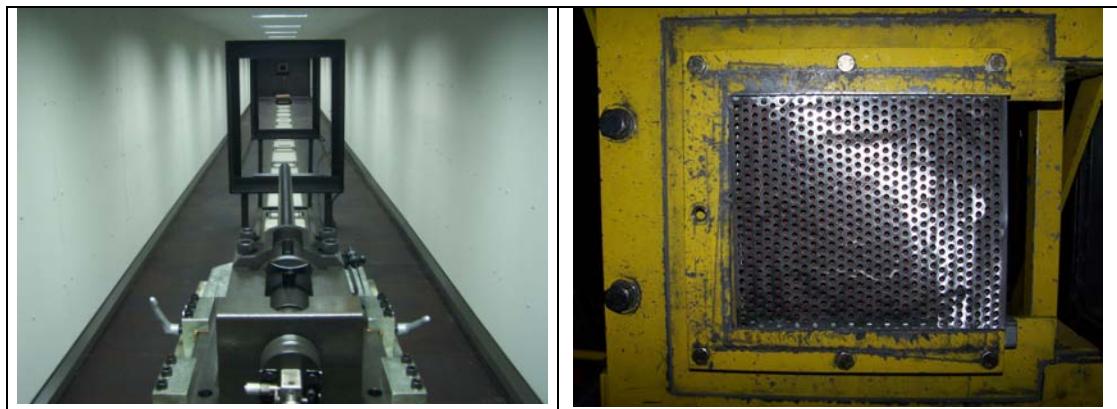
$$P = K\mu$$

Eşitlikte K değeri hacim modülüdür.

3. TESTLER

Balistik atış testleri, Otokar bünyesinde bulunan balistik atış laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Testler sırasında baz zırh plakası arkasına yerleştirilen alüminyum şahit plaka ile parçacık etkileri takip edilmiştir. Testler sırasında mühimmat hızı plaka ile namlu arasına yerleştirilen sensörlerle ölçülmüş ve Stanag 4569 da belirtilen hız seviyeleri $+/-5$ m/s hassasiyetle sağlanmıştır. Kullanılan perfore çapı mühimmat

çapından daha dar tutulduğu için mühimmatın perfore zırha deðmeden baz zırhı delip geçmeyeceği düşünülmüþtür.



Şekil 5. Atış Test Düzeneği

Testlerde edilen sonuçlar oldukça başarılıdır. Beklenildiği üzere normalde 16 mm kalınlık ile tutulan tehdit, 9 mm baz zırh olmak üzere 5 mm lik bir perfore plaka ile kolayca tutulmuştur. Oluşturulan çözümün alan yoğunluğu 31 kg/m^2 azalmıştır. Mühimmatın perfore plaka üzerinde oluşturduğu deformasyon Şekil 6'da verilmektedir. Balistik plakalara yapılan atışların genelinde resimlerde görülen kırılma şekli baskın olurken sadece bir atışta mühimmat deliği merkezleyerek geçmiştir, bu durumda bile perfore zırh görev yapıp mermiyi saptırdığı için baz zırh üzerinde delici bir etki oluþturmamıştır.



Şekil 6. Atış Sonrası Perfore Plakada Deformasyon

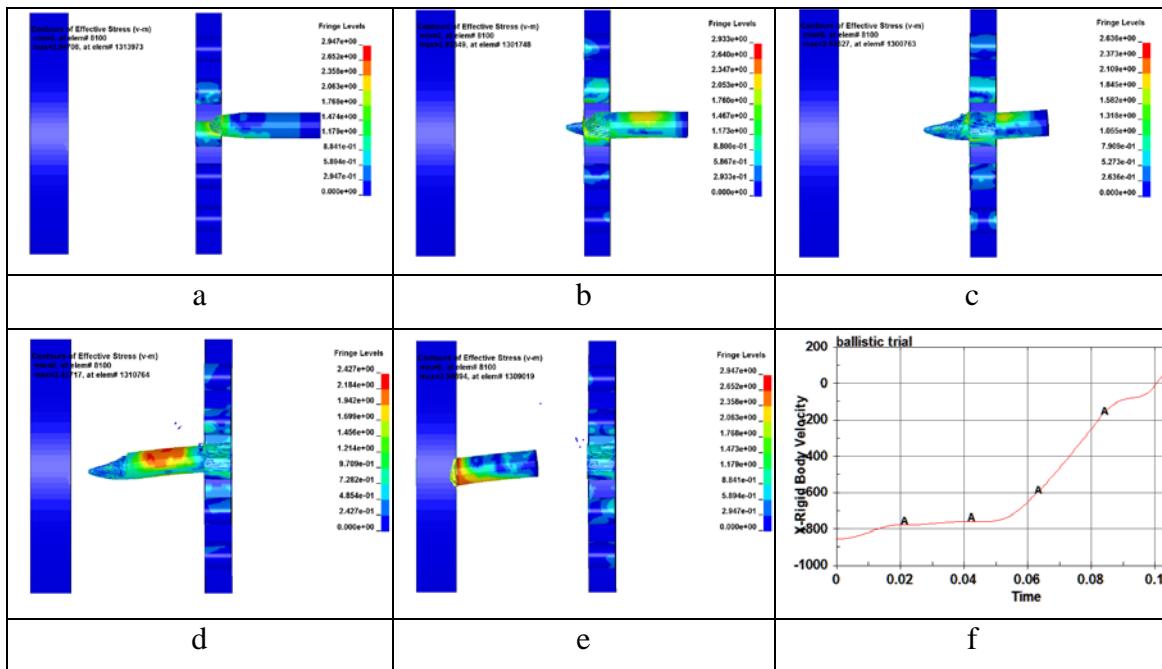
Benzer şekilde baz zırh üzerindeki deformasyon incelenmiştir.



Şekil 7. Atış Sonrası Baz Zırhta Oluşan Deformasyon

4. SONUÇ

Sayısal benzetimlerde öncelikli olarak, mühimmat üzerinde oluşan eğilme ve yörünge saptırma davranışının görülmesi beklenmektedir. Şekil 8 a,b,c'de görüldüğü üzere, mühimmat perfore plakaya çarptığı andan itibaren ucta erime başlamakta ve oluşan yanal yükler mühimmatı eğerek yörünge içinde sapma oluşturmaktadır. Uçtaki erimeye paralel olarak, mühimmatın delici etkisi azalmakta ve baz zırha açılı olarak girmesi sebebiyle delme derinliği düşmektedir.



Şekil 8. Sayısal Bezetim Sonuçları

Deneysel test sonuçları ile analiz sonuçları karşılaştırıldığında, baz zırh üzerinde oluşan deformasyon derinliği yakalanmasına rağmen perfore plaka üzerindeki yırtılma seviyesinin analizlerde yakalanamadığı görülmektedir. Hedef plaka üstüne mühimmat çarپı küçük bir hızla geri sekmektedir.(Şekil 8 f)

Bu çalışma ile sayısal benzetimlerle, perfore plakaların balistik performansa etkilerini inceleyerek, alternatif yerleşimler ve geometriler oluşturulabileceği görülmüştür.

5. KAYNAKÇA

- [1] Bangash M.Y.H., "Shock, Impact and Explosion Structural Analysis and Design", Springer 2009
- [2] Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T., "Ballistic Impact: Recent Advances in Analytical Modelling of Plate Penetration Dynamics", ASME Applied Mechanics Reviews Nov 2005 Vol.58 pp 355-371
- [3] Patent No: WO 21010/036411 A2 "Perforated Armor With Geometry Modified for Lighter Weight" 29 May 2008
- [4] Patent No: US 2006/0213360 A1 "Perforated Armor Plates", 28 Sep 2006
- [5] Patent No: 5,014,593 "Perforated Plate Armor" 14 May 1991
- [6] Balos S., Grabulov V., Sidjanin L. Pantic M., Radisavljevic I. "Geometry, mechanical properties and mounting of perforated plates for ballistic application" Materials and Design, Vol 31 pp.:2916-2924, Dec 2009
- [7] Chocron S., Anderson C.E., Grosch D.J., Popelar C.H., "Impact of the 7,62 mm APM2 projectile against the edge of a metallic target", International Journal of Impact Engineering Vol 25, pp.:423-437, Oct 2000
- [8] Thyssen Krupp Material Specification for Secure 500, Aug 2006
- [9] Deniz T., Kılıç N., Yıldırım O.R, "Monolitik Rha Zırh Plakalarının 7.62 Mm Zırh Delici Mühimmat Karşısındaki Davranışlarının Bilgisayar Benzetimleri İle Belirlenmesi" USMOS 2009,
- [10] Deniz T., Kılıç N., Erdik A, Bedir S, Yıldırım R.O "Balistik Problemlerinin Sayısal Benzetiminde Ağ Örgüsü (Meshless) Yöntemlerin Kullanılması" SAVTEK 2010
- [11] Johnson G.R., Cook W.H., "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures",
- [12] Skoglund P., Nilsson M., Tjernberg A., "Fracture Modelling of a High Performance Armour Steel", J.of Physic IV France Vol 134, 2006, pp197-202
- [13] Buchar J., Voldrich J., Rolc S., Lisy J., "Ballistic Performance of Dual Hardness Armor", 20th International Symposium on Ballistics Orlando, 23-27 Sep 2002
- [14] Li J., Li X.J., Zhao Z., Ou Y.X., Jiang D.A., "Simulation on Projectile with High Rotating Speed Penetration into the Moving Vehicular Door", Theoretical and Applied Fracture Mechanics Vol 47, 2007, pp113-119

**TEK VE İKİ PARÇALI FÜZELERİN HAREKETLİ VE MANEVRA
YAPAN YER HEDEFLERİNE KARŞI BAŞARIM
ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI**

Bülent Özkan ^(a), M. Kemal Özgören ^(b), Gökmen Mahmetyazıcıoğlu ^(c)

^(a) TÜBİTAK-SAGE, P.K. 16 06261 Mamak/ANKARA, bozkan@sage.tubitak.gov.tr

^(b) ODTÜ Makina Mühendisliği Bölümü, 06531 ANKARA, ozgoren@metu.edu.tr

^(c) TÜBİTAK-SAGE, P.K. 16 06261 Mamak/ANKARA, gmahmut@sage.tubitak.gov.tr

ÖZ

Hareketli ve manevra yapan hedeflerin göz önüne alındığı füze-hedef eşleşmesi senaryolarında belirlenen hedefin istenilen doğrulukta vurulabilmesi pek çok durumda mümkün olmamaktadır. Hedefin hareketi ve bazı durumlarda ivmesinin sebep olduğu bu istenmeyen durum, füzenin başlangıçta görüş çizgisinden sapması ve mevcut güdümdenetim sisteminin istenilen hızda çalışamamasından da kaynaklanabilmektedir. Bahsedilen sorunun üstesinden gelmek amacıyla çeşitli güdüm ve denetim algoritmaları geliştirilmiştir. Bunun yanı sıra, geleneksel tek parçalı füzelere alternatif olarak itkiden kaynaklanan yuvarlanma momentinin etkisini asgarî düzeye indirecek iki parçalı füze konfigürasyonları da son yıllarda ele alınmaya başlamıştır. Bu çalışmada, göz önüne alınan hareketli ve manevra yapan yer hedeflerine karşı kullanılmak üzere geliştirilen geleneksel tek parçalı bir füze ile belirtilen yapıya alternatif olarak önerilen iki parçalı bir füzenin başarım özellikleri incelenmektedir. Bahsedilen kapsamda her iki tip füze ile ifade edilen hedeflerin modelleri çıkarılmış; ayrıca füze için öngörülen güdüm ve denetim şeması ile füze-hedef eşleşme geometrisi oluşturulmuştur. Çalışmada ortaya konulan modeller kullanılarak ilgili bilgisayar benzetimleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Güdüm ve denetim, tek parçalı füze, iki parçalı füze, hareketli hedef ve manevra yapan hedef.

COMPARISON OF THE PERFORMANCE PROPERTIES OF SINGLE- AND TWO-PART HOMING MISSILES AGAINST MOVING AND MANOEUVRING TARGETS

ABSTRACT

Many times, it becomes not possible to hit the target precisely in missile-target engagement scenarios in which moving or manoeuvring targets are taken into consideration. This undesired situation may occur due to the initial heading error of the missile and insufficient operating speed of the designed guidance and control system as well as the motion and, in some cases, acceleration of the target. Several guidance and control algorithms have been developed in order to overcome that issue. Moreover, two-part missile configurations have also been considered in recent years as an alternative to conventional single-part missiles so as to minimize the roll moment effect caused by the thrust of the missile. In this study, the performance properties of a single- and two-part missiles which are developed against moving and manoeuvring ground targets under consideration are investigated. In this extent, the models of both missiles and targets are first derived, then the guidance and control scheme of the missiles and missile-target engagement model are constructed. Having conducted the computer simulations relevant to the models obtained within the work, the attained results are discussed.

Keywords: Guidance and control, single-part missile, two-part missile, moving target, and manoeuvring target.

1. GİRİŞ

Uçak ve helikopter gibi hava platformlarından belirlenen yer hedeflerine doğru fırlatılan füzelerin hedefleri istenilen doğrulukta vuramamasına neden olan etkenlerden en önemlileri füzenin görüş çizgisinden başlangıçtaki sapma açısı ve hedefin hareketidir. Bahsedilen hareket sabit bir hız şeklinde olabileceği gibi hedefin fiziksel sınırları dâhilinde gerçekleştirebileceği manevraları da içerebilir. Bu durumda, göz önüne alınan füze için oluşturulan güdüm ve denetim algoritmasının belirlenen hız ve doğrulukta çalışması oldukça büyük önem arz etmektedir [1], [2].

Öte yandan, sağladığı kuvvetle hedefe yönlenmiş füzenin menzilini artıran itkinin kaçıklığından kaynaklanan yuvarlanma etkisi, bahsedilen güdüm ve denetim işlemi üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Füzenin yandönme ve yunuslama düzlemlerindeki denetiminin istenilen doğrulukta sağlanabilmesi için, bahsedilen yuvarlanma hareketinin en kısa sürede sıfırlanması gereklidir [1]. Bu amaçla, genellikle bant genişliği yandönme ve yunuslama denetim sistemlerinin en az 3-4 katı olan yuvarlanma denetim sistemleri (otopilotları) kullanılmaktadır [2]. Yuvarlanma eksenindeki açısal hareketin füze denetimi üzerindeki etkisini en aza indirmek amacıyla son yıllarda uygulanan

yaklaşımlarından biri de, itkiyi sağlayan roket motoru ile güdüm ve denetim birimlerini birbirinden ayırmaktır. Oluşturulan bu iki parçalı geometride, güdüm ve denetim birimini taşıyan ön kısımla roket motorunun bulunduğu arka kısım, sürtünme katsayısı düşük bir rulmanla birbirine bağlanmaktadır [2], [3], [4].

Bu çalışmada, klasik tek parçalı füzelerle bu yapılara alternatif olarak geliştirilen iki parçalı füzelerin sabit hızla hareket eden ve manevra yapan yer hedeflerine karşı başarımları incelenmiştir. Füzelerin belirlenen hedeften nihaî sapması, toplam eşleşme süresi ve yanal ivme gereksinimi karşılaştırma kıtasları olarak kullanılarak gerçekleştirilen bilgisayar benzetimlerinde, füzeye yuvarlanma ekseninde sabit hızlı bir dönüş sağlayan kuyruk kanatçıları eğim açısının da iki parçalı füze üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

2. FÜZELERİN DİNAMİK MODELİ

Bu çalışmada, sabit kuyruk kanatçılarının eğim açıları sıfır olan aerodinamik denetimli tek parçalı bir füze ile kanatçılarının eğim açıları sıfır ve sıfırdan farklı şekilde tasarlanan iki parçalı füzeler ele alınmış olup, şematik gösterimi Şekil 1'de verilen iki parçalı füzeyi oluşturan ön ve arka parçalar birbirine düşük sürtünmeli bir rulman aracılığıyla tutturulmuştur. Buradan, Newton-Euler kuvvet ve moment eşitlikleri kullanılarak, iki parçalı füzenin hareket denklemleri aşağıdaki gibi çıkartılabilir [2]:

$$\dot{u} - r v + q w = (X + X_T) / m + g_x \quad (1)$$

$$\dot{v} + r u - p w = (Y + Y_T) / m + g_y \quad (2)$$

$$\dot{w} - q u + p v = (Z + Z_T) / m + g_z \quad (3)$$

$$\dot{p} = (L_1 + b_t \dot{\phi}_s) / I_{a1} \quad (4)$$

$$\dot{p}_2 = (L_2 + L_T - b_t \dot{\phi}_s) / I_{a2} \quad (5)$$

$$\dot{q} - p r (1 - (m_1 / m_2)) + p_2 r (I_{a2} / I_t) = (M + M_T - \lambda Z_T) / I_t \quad (6)$$

$$\dot{r} + p q (1 - (m_1 / m_2)) - p_2 q (I_{a2} / I_t) = (N + N_T + \lambda Y_T) / I_t \quad (7)$$

Burada m , m_1 ve m_2 sırasıyla füze bütünü ile ön ve arka kısımın kütlesini; I_t füze bütününe yanal eylemsizlik momentini; I_{a1} ve I_{a2} de ön ve arka kısımın eksenel eylemsizlik momenti bileşenlerini göstermektedir. Ayrıca, b_t ve λ sembollerile ön ve arka kısmı birbirine bağlayan rulmanın viskoz sönütleme sabiti ve füze ağırlık merkezinden (C noktası) arka kısım ağırlık merkezine olan uzaklık ifade edilmektedir. Füze üzerine yapışık eksen takımındaki bileşenleri cinsinden olmak üzere, p , q ve r açısal hız, u , v ve w doğrusal hız, X , Y ve Z aerodinamik kuvvet, L_1 , L_2 , M ve N

aerodinamik moment, X_T , Y_T ve Z_T itki kuvveti, L_T , M_T ve N_T itki kaçıklığı momenti ve g_x , g_y ve g_z de ağırlık merkezine etkiyen yerçekimi ivmesi terimlerini temsil etmektedir. Denklemlerde yer alan sembollerden p_2 ve ϕ_s de, sırasıyla füzenin arka kısmının yuvarlanma eksenindeki açısal hız bileşeni ve arka kısmın ön kısma göre bağıl açısal konumunu göstermektedir.

(1)'den (3)'e kadar olan ve füzenin doğrusal hareketini tanımlayan denklemler tek parçalı füzeler için de aynen kullanılabilirken, füzeyi oluşturan kısımların birbirine göre bağıl hareketini de içeren ve (4)'ten (7)'ye kadar olan açısal hareket denklemleri, tek parçalı füzeler için aşağıdaki gibi basitleştirilebilir [2]:

$$\dot{p} = L/I_a \quad (8)$$

$$\dot{q} - p r = (M + M_T)/I_t \quad (9)$$

$$\dot{r} + p q = (N + N_T)/I_t \quad (10)$$

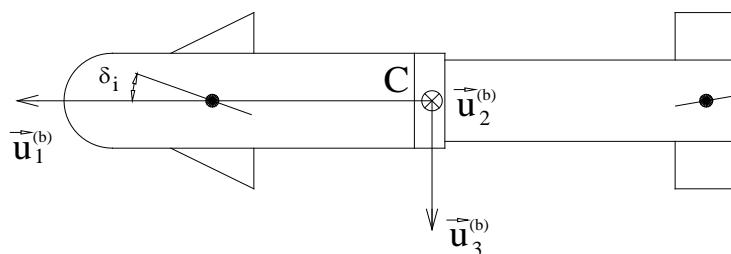
Burada I_a füzenin eksenel eylemsizlik momenti bileşeni olup, yuvarlanma yönündeki açısal hareketinin yunuslama ve yandönme hareketlerine başlamadan önce yuvarlanma otopilotu tarafından sıfırlandığı ($p \approx 0$) kabul edilirse, itki etkisinin sona ermesinden sonraki durum için her iki tip füzenin yunuslama ve yandönme düzlemlerindeki hareket denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\dot{w} - q u = (Z/m) + g_z \quad (11)$$

$$\dot{q} = M/I_t \quad (12)$$

$$\dot{v} + r u = (Y/m) + g_y \quad (13)$$

$$\dot{r} = N/I_t \quad (14)$$



Şekil 1. İki parçalı füze modeli

3. FÜZELERİN AERODİNAMİK MODELİ

(11)'den (14)'e kadar olan denklemlerde yer alan aerodinamik kuvvet ve moment bileşenleri (Y , Z , M ve N) aşağıdaki gibi ifade edilebilir [5]:

$$Y = C_y q_\infty S_M \quad (15)$$

$$Z = C_z q_\infty S_M \quad (16)$$

$$M = C_m q_\infty S_M d_M \quad (17)$$

$$N = C_n q_\infty S_M d_M \quad (18)$$

Yukarıdaki denklemlerde yer alan q_∞ , S_M ve d_M sırasıyla füze üzerine etkiyen dinamik basınç, füze kesit alanı ve füze çapını göstermekte olup, C_y , C_z , C_m ve C_n sembollerleri, Mach sayısı (M_∞) ile yükseliş dümeni açısı (δ_e), yandönme dümeni açısı (δ_r), hücüm açısı (α) ve yana kayma açısı (β) parametrelerinin doğrusal bir fonksiyonu olarak ifade edilen aerodinamik katsayılardır [2].

4. GÜDÜM KURALI

Bu çalışmada, her iki tip füzeyi de hedefe yönlendirmek için gerekli güdüm komutları oransal seyrüsefer güdüm kuralına göre oluşturulmuştur. Buna göre güdüm komutları, yanız ivme bileşenleri cinsinden yunuslama ve yandönme düzlemleri için aşağıdaki gibi elde edilir [2]:

$$a_p^c = -N_p v_M \dot{\lambda}_p \cos(\lambda_y - \eta_m) \quad (19)$$

$$a_y^c = N_y v_M [\dot{\lambda}_y \cos(\gamma_m) - \dot{\lambda}_p \sin(\gamma_m) \sin(\lambda_y - \eta_m)] \quad (20)$$

Yukarıdaki eşitliklerde yer alan p ve y yunuslama ve yandönme düzlemlerini göstermek üzere, a_p^c ve a_y^c füze denetim sistemi referans ivme sinyallerini, N_p ve N_y etkin seyrüsefer oranını, λ_p ve λ_y görüş çizgisi açısı bileşenlerini ve γ_m ve η_m de füzenin yunuslama ve yandönme düzlemlerindeki uçuş yönüğü açılarını ifade etmektedir.

5. YANAL DENETİM SİSTEMLERİ

Burada göz önüne alınan füzelerin yuvarlanma eksenindeki açısal hareketi 20 Hz bant genişliğine göre tasarlanan bir denetim sistemi tarafından kısa sürede sıfırlanmaktadır. Yandönme ve yunuslama düzlemlerinde oransal seyrüsefer güdüm kuralı tarafından oluşturulan komut sinyallerini gerçekleyecek denetim sistemleri, yunuslama/yandönme hızı geribeslemesiyle oransal ve tümlevsel (integral) (PI) denetim kuralına göre ve 5 Hz bant genişliğini sağlayacak şekilde, sistemin kararlılığını sağlamak üzere denetleyici katsayıları M_∞ değerine göre anlık olan güncellenen uyarlamalı bir yapı olarak oluşturulmuştur. Buna göre, yandönme ve yunuslama denetim sistemleri için aşağıda verilen transfer fonksiyonları elde edilmiştir [2]:

$$\frac{a_z(s)}{a_{zd}(s)} = \frac{(T_p s + 1)(n_{p2} s^2 + n_{p1} s + 1)}{a_{p3} s^3 + a_{p2} s^2 + a_{p1} s + 1} \quad (21)$$

$$\frac{a_y(s)}{a_{yd}(s)} = \frac{(T_y s + 1)(n_{y2} s^2 + n_{y1} s + 1)}{a_{y3} s^3 + a_{y2} s^2 + a_{y1} s + 1} \quad (22)$$

Yukarıdaki transfer fonksiyonlarında görülen katsayılar füze çapı, füze kütlesi, füze eylemsizlik momenti ve hız bileşenleri ile aerodinamik katsayıların fonksiyonu olup, denetim sistemini kararlı kılacek katsayılar, (21) ve (22) numaralı denklemlerde verilen transfer fonksiyonlarının karakteristik polinomunun (payda polinomunun) (23) numaralı denklemdeki gibi üçüncü dereceden Butterworth polinomuna eşitlenmesi ile elde edilebilir [2].

$$B(s) = (1/\omega_c^3)s^3 + (2/\omega_c^2)s^2 + (2/\omega_c)s + 1 \quad (23)$$

Burada ω_c , rad/s cinsinden kapalı çevrim denetim sisteminden istenen bant genişliğini göstermektedir.

6. HEDEF KİNEMATİĞİ

Normal ve teğetsel ivme bileşenleri (a_T^n ve a_T^t) ile doğrusal hız ve uçuş yörüngesi açısının başlangıç değerleri (v_{T0} ve γ_{t0}) belirlendiğinde, hedef doğrusal hızı ve uçuş yörüngesi açısı (v_T ve η_t), zamana bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir [2]:

$$v_T(t) = v_{T0} + \int_{t_0}^t a_T^t(s) ds \quad (24)$$

$$\eta_t(t) = \eta_{t0} + \int_{t_0}^t [a_T^n(s)/v_T(s)] ds \quad (25)$$

Burada t_0 füze-hedef eşleşmesinin başlangıç anını göstermekte olup, s tümlev değişkeni olmak üzere (24) ve (25) numaralı denklemlerinin zamana göre tümlevleri alınarak, belirlenen yatay düzlemdeki başlangıç konumu (x_{T0} ve y_{T0}) değerleri için hedef konumunun zamana göre değişimini veren eşitlikler aşağıdaki gibi elde edilmektedir [2]:

$$x_T(t) = x_{T0} + \int_{t_0}^t v_T(s) \cos(\eta_t(s)) ds \quad (26)$$

$$y_T(t) = y_{T0} + \int_{t_0}^t v_T(s) \sin(\eta_t(s)) ds \quad (27)$$

Çalışmada göz önüne alınan yer hedefinin yataydaki konum değişkenlerine nazaran çok daha küçük olan düşey konum bileşeni, gerçekleştirilen bilgisayar benzetimlerinde ihmal edilmiştir [$z_T(t) = z_{T_0}$].

7. FÜZE-HEDEF EŞLEŞMESİ MODELİ

Füze ve hedef arasındaki uzaklık ($r_{T/M}$) ve $r_{T/M}$ 'nin yandönme ve yunuslama düzlemlerinde yatayla yaptığı ve görüş çizgisi açısı olarak tanımlanan açılar (λ_y ve λ_p), aşağıdaki eşitliklerden hesaplanabilir [2]:

$$r_{T/M} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (28)$$

$$\lambda_y = \arctan(\Delta y / \Delta x) \quad (29)$$

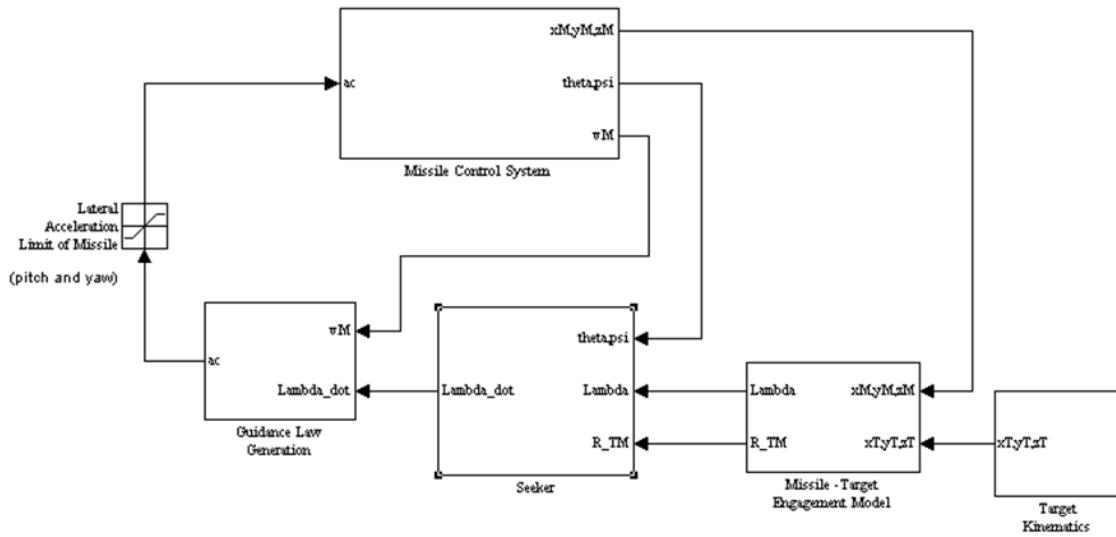
$$\lambda_p = \arctan(-\Delta z \cos(\lambda_y) / \Delta x) \quad (30)$$

Burada Δx , Δy ve Δz hedefle füze arasındaki bağıl konum bileşenlerini göstermektedir. Eşleşme sonundaki ($t=t_F$) toplam hedeften sapma miktarı (d_{miss}), $\Delta z=0$ koşulu sağlandığı anda aşağıdaki ifadeden bulunabilir [2]:

$$d_{miss} = \sqrt{\Delta x^2(t_F) + \Delta y^2(t_F)} \quad (31)$$

8. BİLGİSAYAR BENZETİMLERİ

Yukarıdaki bölümlerde ifade edilen modeller esas alınarak, uygun şekilde seçilen boyutsal ve kütlesel büyülüklüklerin yanı sıra ilgili parametreler için Çizelge 1'de verilen değerler kullanılmak suretiyle MATLAB® SIMULINK® ortamında bilgisayar benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Söz konusu benzetim modelinin genel görünüşü Şekil 2'de verilmektedir.



Şekil 2. MATLAB® SIMULINK® ortamında oluşturulan bilgisayar modeli

Benzetimlerde ele alınan durumların tamamında füzelerin görüş çizgisinden başlangıçtaki sapma açlarının -20° olarak dikkate alındığı benzetimlerde, kuyruk eğim açısı sıfır olan tek parçalı füze modelinin yanı sıra eğim açısının sıfır ve 1° olduğu iki farklı iki parçalı füze konfigürasyonu kullanılmıştır. Oluşturulan senaryolarda iki parçalı füzelerin itki birimini taşıyan arka kısımlarının yuvarlanma eksenindeki açısal hızlarının güdüm ve denetim birimlerini içeren ön kısımlarının yuvarlanma hızından daha büyük olduğu hesaba katılmış ve eşleşme esnasında yan rüzgârı füzeler üzerindeki etkisi ihmali edilmiştir. Çizelge 1'de v_{M0} simbolü, füzenin başlangıçtaki doğru hız değerini göstermektedir.

Çizelge 1. Bilgisayar benzetimlerinde ilgili parametreler için kullanılan sayısal değerler

Parametre	Sayısal Değer	Parametre	Sayısal Değer
b_t	$4 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$	v_{T0}	25 m/s
$N_p = N_y$	3	a_T^t	0
v_{M0}	408 m/s	a_T^n	$0.5g$

Gerçekleştirilen bilgisayar benzetimleri sonucunda ele alınan her üç farklı füze tipi için elde edilen hedeften nihaî sapma, eşleşme süresi ve azamî yanal ivme gereksinimi parametreleri Çizelge 2'de sunulmaktadır.

Çizelge 2. Göz önüne alınan füzelerin belirlenen yer hedeflerine karşı başarımları için bilgisayar benzetimlerinden elde edilen sonuçlar

Füze Tipi	Hedef Tipi	Hedeften Nihaî Sapma (m)	Eşleşme Süresi (s)	Azamî Yanal İvme Gereksinimi (g)
Tek Parçalı	Sabit Hızlı	6.857	3.613	16.528
	Manevra Yapan	6.972	3.656	
İki Parçalı (Sıfır Kuyruk Eğim Açısı)	Sabit Hızlı	5.578	3.288	16.528
	Manevra Yapan	5.597	3.306	
İki Parçalı (Sıfırdan Farklı Kuyruk Eğim Açısı)	Sabit Hızlı	5.025	3.295	16.528
	Manevra Yapan	5.096	3.312	

9. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Çalışma kapsamında göz önüne alınan her üç tip füze için gerçekleştirilen bilgisayar benzetimlerinden elde edilen ve Çizelge 2'de verilen sonuçlar incelendiğinde, sabit hızlı hedeflere karşı elde edilen nihaî sapma ve eşleşme süresi değerlerinin manevra yapan hedeflerinkinden daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun yanında aynı hedef tipi için en düşük hedeften sapmanın kuyruk kanatçığı eğim açısının sıfırdan farklı olduğu iki parçalı füzelerle elde edildiği, bu bakımından en kötü konfigürasyonun tek parçalı füze olduğu anlaşılmaktadır. Eşleşme süresi açısından ise en kısa sürelerde kuyruk kanatçığı eğim açısı sıfır olan iki parçalı füzelerle ulaşıldığı, en uzun eşleşme süresinin ise yine tek parçalı füzelerle ortaya çıktıgı sonucuna ulaşmaktadır. Çalışmadan elde edilen ilginç bir sonuç da, azamî yanal ivme gereksiniminin göz önüne alınan her üç füze için de aynı çıkmasıdır.

Yukarıdan çıkan sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, hedeften nihaî sapma ve füze-hedef eşleşme süresi kıstasları bakımından iki parçalı füzelerin tek parçalı füzelerden daha üstün olduğu ifade edilebilir.

10. KAYNAKÇA

- [1]. Zarchan, P. (1994), *Tactical and Strategic Missile Guidance*, Vol. 157, Progress in Aeronautics and Astronautics, AIAA, Washington DC, ABD.

- [2]. Özkan, B. (2005), *Dynamic Modeling, Guidance, and Control of Homing Missiles*, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- [3]. Özkan, B., Özgören, M. K. ve Mahmutyazıcıoğlu, G. (2007), Tek ve iki parçalı füzelerin hareketli yer hedefleri üzerindeki başarımlarının incelenmesi, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK'07)*, Sabancı Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
- [4]. Özkan, B., Özgören, M. K. ve Mahmutyazıcıoğlu, G. (2008), Tek ve iki parçalı füzelerin manevra yapan yer hedeflerine karşı başarımlarının incelenmesi, *4. Savunma Teknolojileri Kongresi (SAVTEK2008)*, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
- [5]. Mahmutyazıcıoğlu, G. (1994), *Dynamics and Control Simulation of an Inertially Guided Missile*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

DÖNGÜDE DONANIM SİSTEMİ SİMÜLASYONU

Aylin HATİP^(a), Serkan BAŞARAN^(a), Birkan KURŞUN^(a)

^(a) ROKETSAN Roket Sanayii ve Ticaret A.Ş., P.K.:30, 06780, Elmadağ-ANKARA

{ahatip, sbasarany, bkursun}@roketsan.com.tr

ÖZ

Döngüde Donanım Sistemi, savunma sanayinde geliştirilen füze tasarımları ve testleri kapsamında maliyet etkin bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bu sistem ile gerçek uçuş ortamındaki senaryoların benzetimleri laboratuvar ortamında gerçekleştirilebilmektedir. Döngüde Donanım Sistemi, benzetimi yapılacak silah sistemine özel olarak tasarlanmış alt-sistemlerden oluşmaktadır. Bu kapsamda yüksek sadakat seviyeli modellerin kullanıldığı testler gerçekleştirilebilmek için alt-sistemlerin spesifikasyonlarının belirlenmesi gerekmektedir. Döngüde Donanım Sistemi'nin modellenerek, senaryo koşulları gerçekleştirip alt-sistemlerin davranış ve performanslarının değerlendirilmesi ile alt-sistem spesifikasyonlarının doğru ve güvenilir şekilde belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu makalede bu amaçla hazırlanmış Döngüde Donanım Sistemi'ni modelleme kabiliyetine sahip Döngüde Donanım Sistemi Simülasyonu anlatılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Döngüde Donanım, Modelleme, Paylaşımı Bellek, Simülasyon, Uçuş Hareket Simülatörü

HARDWARE IN THE LOOP SIMULATOR SIMULATION

ABSTRACT

Hardware-in-the-loop (HIL) Simulation has been proven to be a cost-effective method for design, development and testing of various missiles in Defense Industry. By using such systems, engagement scenarios could be realized in laboratory environment. Since the specifications of these simulators depend on the type of Unit Under Test, HIL Simulators are mostly comprised of custom designed sub-systems. In order to perform high fidelity tests, specifications of the sub-systems should be well defined. A solution to this issue is to create a model of HIL Simulator and run scenarios with this model to evaluate the performance of the sub-systems.

In this paper, Hardware in the Loop Simulation tool which has the capability to simulate different HIL Simulators is described.

Keywords: Flight Motion Simulator, Hardware in the Loop, Modeling, Reflective Memory, Simulation

1. GİRİŞ

Döngüde Donanım Sistem'leri savunma sanayinde füzelerin geliştirme ve/veya test aşamalarında kullanılan bir test sistemidir. Bu sistem gerçek ortamdaki füze – hedef angajmanın laboratuvar ortamında kullanılan alt-sistemler ile benzetilmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda Döngüde Donanım Sistem'leri, kontrol sistemlerinin geliştirilmesinde ve test edilmesinde kullanılan güncel ve yaygınlığı gittikçe artan gerçek zamanlı bir benzetim tekniğidir [1], [3].

Döngüde Donanım Sistemi Simülasyonu, Döngüde Donanım Sistem'lerinin modellenerek performanslarının analiz edilmesinde kullanılmak amacıyla geliştirilen bir sistemdir. Döngüde Donanım Sistemi'nde olduğu gibi, hareket simülatörü, hedef görüntü oluşturma sistemi, kontrol sistemi, test kalemi (füze) donanım modeli gibi alt-sistemlerden oluşmaktadır. Hareket simülatörü donanım modeli, test kaleminin (füze) ataletsel koordinat sistemindeki hareketlerini benzetmektedir, hedef görüntü oluşturma sistemi ise test kaleminin güdüm şecline göre füze arayıcısı tarafından algılanacak uygun sahneyi yaratmaktadır. Kontrol sistemi, spesifik füze modellerine uyarlanabilecek temel uçuş dinamiği modellerine ait mühendislik algoritmalarını içerir. Tüm bu alt sistemler kapalı döngüde gerçek zamanlı olarak çalışmaktadır [1], [2].

Döngüde Donanım Sistemi Simülasyonu, sistemin genel olarak ya da analizi gerçekleştirmek istenen alt sistemin performansının değerlendirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Aynı zamanda gerçek Döngüde Donanım Sistemi'ni oluşturan donanımlar bu amaca özel tasarlanmış ve Rafta-Hazır-Ticari(COTS) olmayan ürünlerdir. Döngüde Donanım Sistemi Simülasyonu ile özel olarak tasarımlı gerçekleştirilen bu donanımlar modellenerek; özelliklerinin sisteme uygunluğu ve yeterliliği test edilmektedir [4].

Döngüde Donanım Sistemi Simülasyonu tasarım zorlukları içeren kritik bir sistemdir. Alt sistemler arasındaki senkronizasyonun sağlanması ve verilerin performans gereksinimlerini karşılayacak hızda iletilebilmesini bu zorluklara örnek olarak verebiliriz. Yaptığımız bu simülasyon çalışması ile gerçeğe yakın sonuçları hesaplayan, yüksek sadakat değerine sahip bir ürün elde edilmesi hedeflenmiştir. Bu nedenle hesaplama algoritmalarının zaman adım süresinin yeterince kısa olması ve bu algoritma zaman adımını koşturabilecek bir donanımın temin edilmesi de gerekmektedir.

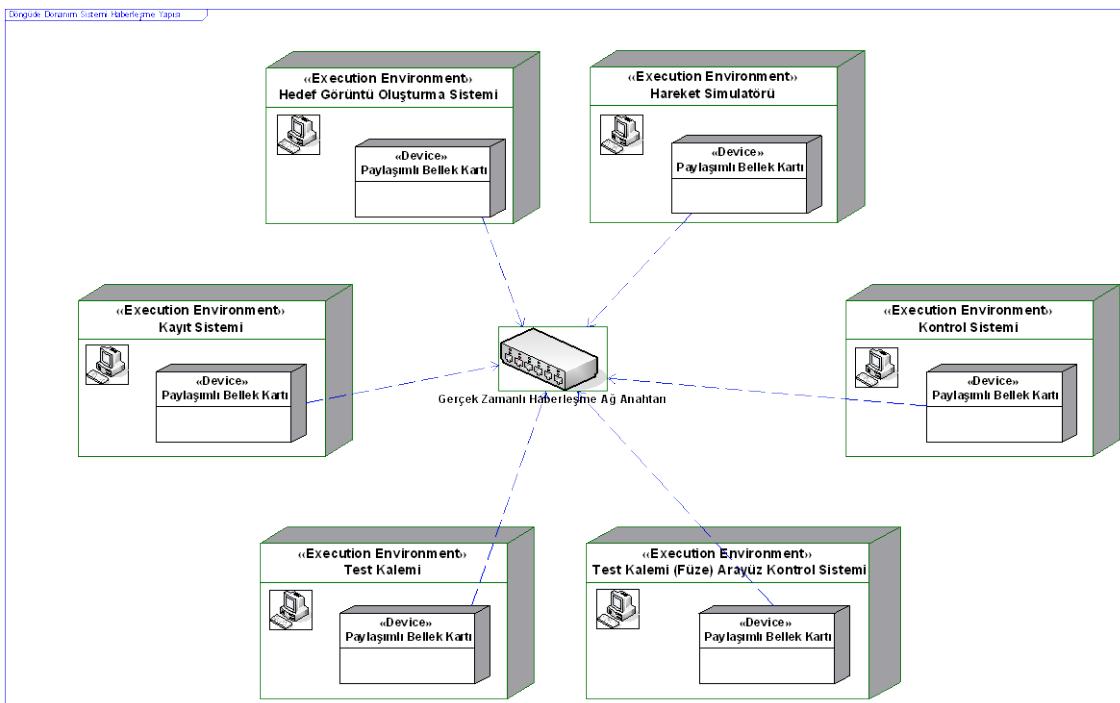
Döngüde donanım simülasyon sistemi geliştirme çalışması kapsamında:

1. Alt sistem yazılımları geliştirilmiştir.

2. Donanımlara ait teknik şartnamelere uygun olarak donanım modelleri oluşturulmuştur.
3. Alt sistem yazılım kalemleri ve alt sistemi oluşturan donanımlara ait modeller arasındaki arayüzler gerçek zamanlı simülasyon ortamında entegre edilmiş ve doğruluğu test edilmiştir.
4. Alt sistemler arasındaki arayüzler gerçek zamanlı simulasyon ortamında entegre edilmiş ve doğruluğu test edilmiştir.
5. Alt sistemlere ait belirleyici değerler değiştirilerek farklı donanım modelleri oluşturulmuş ve yeni donanım modeli davranışına karşılık sistemin davranışını analiz edilmiştir
6. Sistemin genel performansı ölçülecek değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre donanım modellerinde ve yazılım kalemlerinde iyileştirmeler yapılmıştır.

2. DÖNGÜDE DONANIM SİSTEMİ SİMÜLASYONU MİMARİSİ

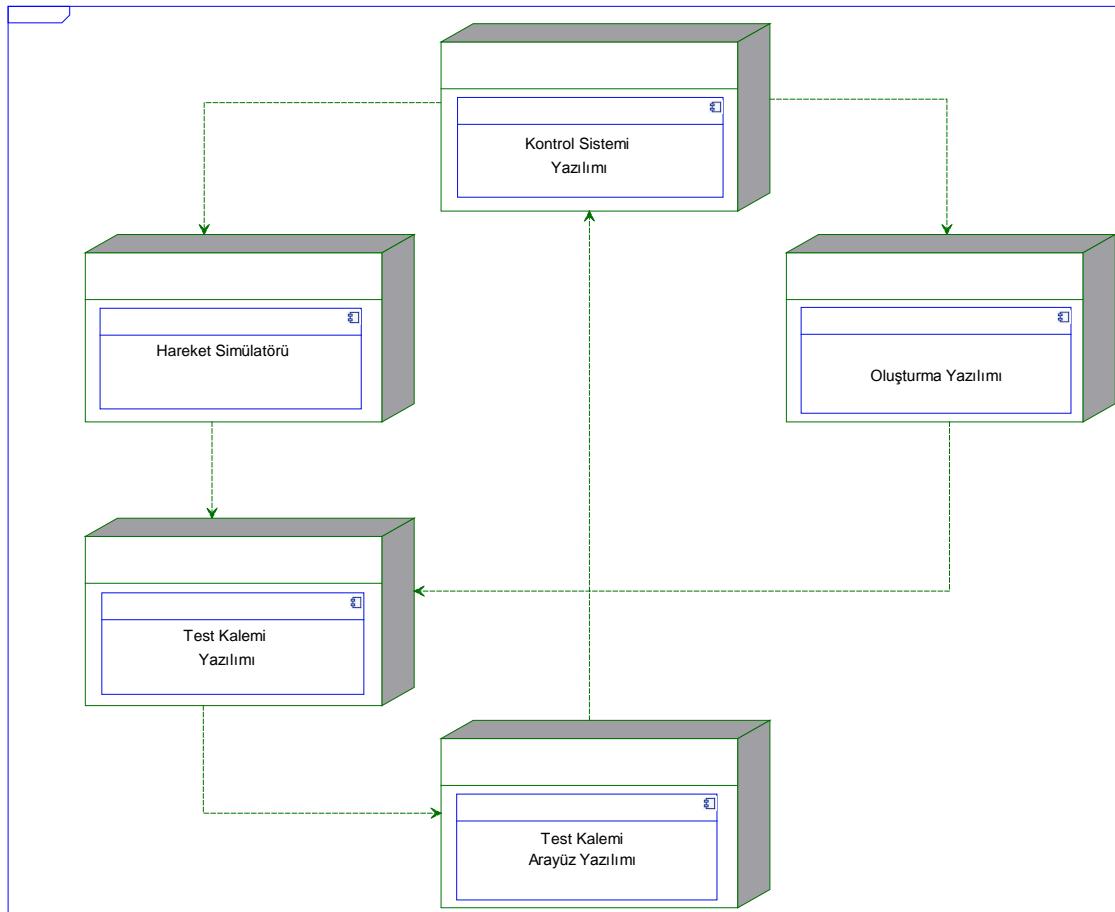
Döngüde Donanım Simülasyon Sistemi’ni oluşturan alt sistem yazılımları ve donanım modelleri, paylaşımı bellek üzerinden haberleşmektedirler. Her bir alt sistem bilgisayarı paylaşımı bellek kartına sahiptir. Şekil 1’de görüldüğü gibi kartların her biri fiber optik kablo ile ağ anahtarına bağlıdır. Bir paylaşımı bellek kartının belleğindeki belirli bir adrese veri yazıldığında ağa bağlı diğer tüm paylaşımı bellek kartlarının belleklerindeki aynı adrese de aynı veri otomatik olarak yazılmaktadır. Bu sayede alt sistemler veri paylaşımı yapabilmektedir.



Şekil 1 Döngüde Donanım Sistem Simülasyonu Haberleşme Yapısı

Paylaşımı bellek üzerinde, Döngüde Donanım Simülasyon Sistemi’ni oluşturan alt sistemler arasında gerçekleşen veri alışverişi aşağıdaki gibidir ve Şekil 2’de gösterilmiştir :

- Kontrol Sistemi tarafından “Hedef Görüntü” bilgisi hesaplanarak, Hedef Görüntü Oluşturma Sistemi’ne ilettilir.
- Hedef Görüntü Oluşturma Sistemi tarafından gerçekleştirilen “Hedef Görüntü” bilgisi Test Kalemi Alt Sistemi’ne ilettilir.
- Kontrol Sistemi tarafından “Füze Açısal Hız ve Pozisyon” bilgisi hesaplanarak Hareket Simülörü’ne ilettilir.
- Hareket Simülörü tarafından gerçekleştirilen “Füze Açısal Hız ve Pozisyon” bilgisi Test Kalemi alt sistemi’ne ilettilir.
- Test Kalemi (Füze) Donanım Modeli tarafından “Füze Açısal Hız ve Pozisyon” ve “Hedef Görüntü” bilgileri kullanılarak; füzenin kanatçık pozisyonları ve arayıcı posisyonları hesaplanır.
- “Arayıcı Açı\Posisyon ve Kanatçık Komut” bilgileri Test Kalemi (Füze) Arayüz Sistemi tarafından Kontrol Sistemi’ne ilettilir. Bu sayede döngü kapatılmış olur.



Şekil 2 Döngüde Donanım Simülasyon Sistemi Veri Akış Diyagramı

3. DÖNGÜDE DONANIM SİSTEMİ SİMÜLASYONU BİLEŞENLERİ

Döngüde Donanım Sistemi Simülasyonu'nu oluşturan alt sistemlere ait detay bilgiler aşağıda yer almaktadır :

3.1.1. Senaryo üreteci

Senaryo Üretici, senaryo oluşturmak amacıyla senaryo katılımcılarına ait değerlerin girileceği kullanıcı arayuzlerine sahiptir. Koşumu gerçekleştirilecek senaryoya ait kullanıcı tarafından girilen senaryo başlangıç değerlerini Kontrol Sistemi'ne aktaran yazılım kalemidir.

3.1.2. Kontrol sistemi

Gerçek zamanlı çalışacak ve spesifik füze modellerine uyarlanabilecek temel uçuş dinamiği modellerine ait mühendislik algoritmalarını içeren yazılım kalemidir. Test

Kalemi (Füze) Donanım Modeli tarafından hesaplanan arayıcı gimbal açıları ve Kontrol Tahrik Sistemi (KTS) komut bilgilerini kullanarak aşağıda yer alan hesaplamları yapar:

- Hedef görüntü oluşturma sistemi tarafından oluşturulacak her zaman adımındaki görüntü bilgisi
- Füze dinamiğinin simülle edilmesini sağlayacak ataletsel eksende açısal pozisyon ve hız bilgisi
- Füze dinamiğinin simülle edilmesini sağlayacak ataletsel eksende gimbal açısal pozisyon ve hız bilgisi

Kontrol Sistemi, gerçek zamanlı haberleşmeleri gerçekleştirmek için paylaşımı bellek kartına sahip bilgisayar ve gerçek zamanlı işletim sistemi üzerinde koşan bir yazılımdan oluşur.

3.1.3. Hareket simülatörü (FMS) donanım modeli

Hareket Simülatörü Donanım Modeli ataletsel eksende füze açısal pozisyon ve hız bilgisini hesaplar. Hareket Simülatörü; güdümlü füzeler, mühimmat vb. sistemlerin kapalı döngüde donanımlı simülasyonunu yapmak için bir platform oluşturmaktadır. 5 Eksenli Hareket Simülatörü'nün iç üç eksen (yuvarlanma, yanal, yunuslama eksenleri) füze uçuş dinamiğini simülle etmek için kullanılmaktadır. Hareket Simülatörü'nün dış iki eksen (istikamet ve yükseliş eksenleri) ise Hedef Görüntü Oluşturma Sistemi tarafından oluşturulan sahneyi arayıcının karşısında görüntülenebilmesi amacıyla kullanılmaktır. Hareket simülatörü, en iç eksenine (yuvarlanma eksenine) "test kalemi" olarak adlandırılan füze donanımı entegre edilmektedir.

Üç eksenli füze hareket simülatörünün en dış eksenin yunuslama eksenidir. Simülatörün orta eksen ise yunuslama eksenine ve yuvarlanma eksenine dik olarak pozisyonlandırılan yanal eksendir. En içte ise yuvarlanma eksenin bulunmaktadır. İki eksenli hedef hareket simülatörünün dış eksenin yükseliş eksenini, iç eksenin ise yükseliş eksenine dik olarak pozisyonlandırılan istikamet eksenidir.

Hareket Simülatörü Donanım Modeli Sistemi, gerçek zamanlı haberleşmeleri gerçekleştirmek için paylaşımı bellek kartı'na sahip bilgisayar ve gerçek zamanlı işletim sistemi üzerinde koşan bir yazılımdan oluşur.

3.1.4. Hedef görüntüsü oluşturma sistemi

Hedef Görüntü Oluşturma Sistemi, hedef görüntünün oluşturulması için kullanılan elektro-mekanik elemanlara ait donanım modelleri ve bu donanım modellerini kontrol eden yazılım kaleminden oluşmaktadır.

"Hedef Görüntü" bilgisi Kontrol Sistemi Yazılımı tarafından her zaman adımında hesaplanarak Hedef Görüntü Oluşturma Sistemi'ne paylaşımı bellek üzerinden iletilir.

Bu hedef görüntü bilgisi değeri Hedef Görüntü Oluşturma Sistemi tarafından komutlara dönüştürülerek ilgili donanım modellerine gönderilir.

Hedef Görüntü Oluşturma Sistemi, gerçek zamanlı haberleşmeleri gerçekleştirmek için paylaşımı bellek kartına sahip bilgisayar ve gerçek zamanlı işletim sistemi üzerinde koşan bir yazılımdan oluşur.

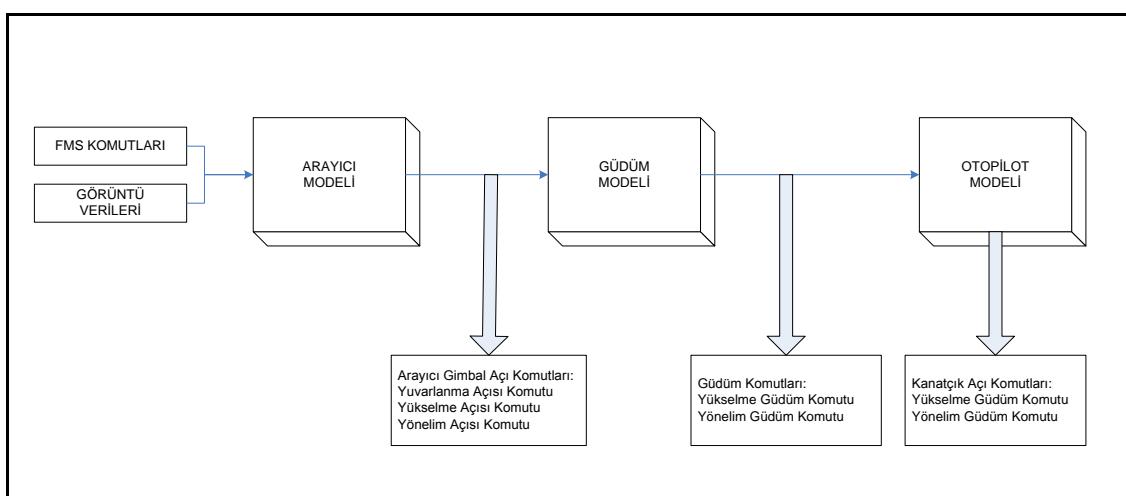
3.1.5. Test kalemi (Füze) arayüz kontrol sistemi

Füze Arayüz Kontrol Sistemi, Test Kalemi (Füze) Donanım Modeli'nin hesapladığı arayıcı ve kontrol tahrif sistemi verilerini Kontrol Sistemi'ne aktarılmasından sorumludur. Füze Arayüz Kontrol Sistemi, gerçek zamanlı haberleşmeleri gerçekleştirmek için paylaşımı bellek kartı'na sahip bir bilgisayar ve gerçek zamanlı işletim sistemi üzerinde koşan yazılımdan oluşur.

3.1.6. Test kalemi (Füze) donanım modeli sistemi

Füze Donanım Modeli, 5 eksenli Hareket Simülatörünün iç eksenine takılacak olan füze donanımını benzetmek amacıyla Döngüde Donanım Simülasyon Sistemi çalışmaları kapsamında geliştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında yer alan Füze Donanım Modeli, arayıcı algoritmalarını içermektedir.

Füze Donanım Modeli, Döngüde Donanım Simülasyon Sistemi'nde Hareket Simülatörü Donanım Modeli'nden aldığı ataletsel eksendeki açısal pozisyon ve açısal hız değerleri ile Hedef Görüntü Oluşturma Sistemi'nden aldığı hedef görüntü verilerine göre otopilot komutları üretmektedir.



Şekil 3 Test Kalem (Arayıcı, Gündüm ve Kontrol) Donanım Blok Şeması

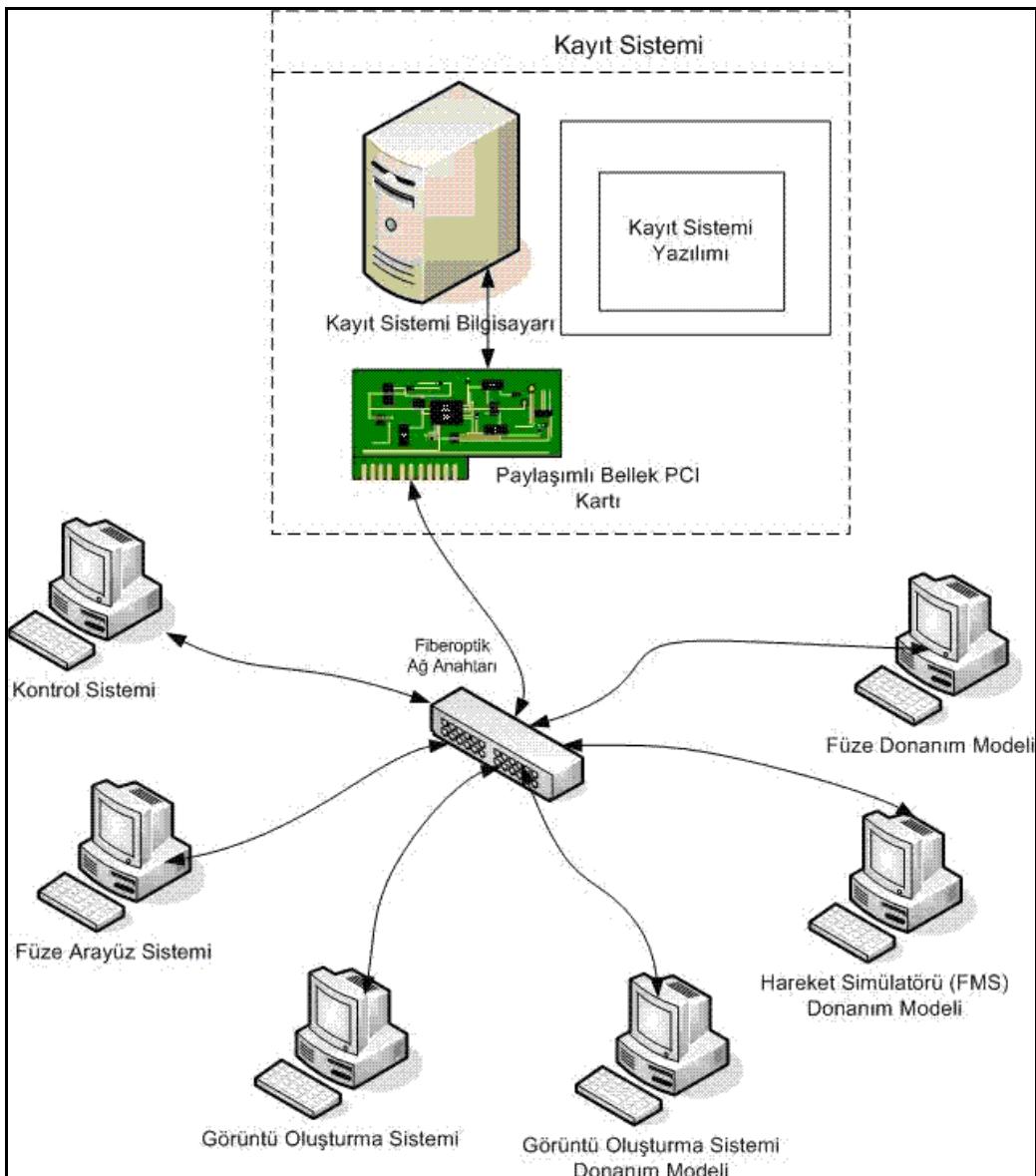
Füze Donanım Modeli Sistemi, gerçek zamanlı haberleşmeleri gerçekleştirmek için paylaşımı bellek kartı'na sahip bir bilgisayar ve gerçek zamanlı işletim sistemi üzerinde

koşan yazılımdan oluşur.

3.1.7. Kayıt sistemi

Her bir yazılım kaleminin ve donanım modelinin bütün veri akışını kendisinin kaydetmesi durumunda, nihai ürünle simülasyon ürünü arasında performans farkları ortaya çıkması kaçınılmazdır. Bu durum simülasyon sonuçlarının gerçek durumda olduğundan daha farklımasına neden olmaktadır. Böyle bir farkın oluşmaması için alt sistemlerin verilerini kendilerinin kaydetmesi yerine dışarıdan bir alt sistemin paylaşımı bellek üzerinde gerçekleşen veri iletişimini dinleyerek kaydetmesinin uygun olacağı değerlendirilmiştir.

Kayıt Sistemi yazılımı paylaşımı bellek üzerinde gerçekleşen iletişim'in kayıtlarını tutmakla sorumludur. Kayıt Sistemi, Şekil 4'te görüldüğü gibi fiber optik ağ üzerindeki haberleşmeyi dinleyen ve kaydeden bir sistemdir. Kayıt Sistemi, gerçek zamanlı haberleşmeleri gerçekleştirmek için paylaşımı bellek kartı'na sahip bilgisayar ve gerçek zamanlı işletim sistemi üzerinde koşan bir yazılımdan oluşur.



Şekil 4 Kayıt Sistemi Harici Arayüzleri

Ardışık gelen verileri kaçırılmamak için mikrosaniyeler mertebesinde bir hassasiyet gerektirmektedir. Bu gereksinimi karşılayabilmek için Kayıt Sistemi yazılımı, gerçek zamanlı bir işletim sistemi üzerinde koşturulmaktadır. Ayrıca performası artırmak için paylaşımı bellek kartından DMA (Direct Memory Access) veri aktarım metodunu kullanarak okuma işlemi yapılmaktadır. Dinlenen veriler öncelikle hafızaya kaydedilmekte daha sonra simülasyon sonunda sabit diske tek bir dosya halinde yazılmaktadır. Paylaşımı bellekten verilerin doğrudan hafızaya alınması sayesinde veri aktarım hızı büyük ölçüde artmıştır. Simülasyon sonunda kayıt dosyası analiz işleminin gerçekleştirileceği bilgisayara aktarılmaktadır.

Böylece :

- Kayıt Sistemi, döngüde donanım simülasyon sistemi için gerekli olan hızda ve doğrulukta verileri kaydedebilmektedir.
- Kayıt Sistemi kullanılarak döngüde donanım simülasyon sistemi performans analizleri yapılmaktadır.
- Alt sistemlerin işleyişlerinin doğruluğu, senkronizasyonda hata olup olmadığı incelenemektedir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada, füze geliştirme ve/veya test aşamaları için Döngüde Donanım Sistem Simülasyonu geliştirilmiştir. Döngüde Donanım Sistem'leri geliştirilen füzelerin tasarım ve/veya test süreçlerinde yaygın olarak kullanılmakta olan önemli bir araçtır. Bu sistemler, füzelerin uçuş ortamındaki farklı durumlarını benzettiğinden birçok özel tasarım alt sistemden oluşmaktadır. Alt sistem tasarımlarında ve kullanılan komponent performanslarında çıkabilecek sorunların önceden tespit edilerek uygun bir sistem çözümü üretilmesi önemlidir. Döngüde Donanım Sistemi Simülasyonu ile sistemde yer alan alt sistem donanımları modellenmiş, özelliklerinin sisteme uygunluğu ve yeterliliği test edilerek modeller doğrulanmıştır. Bu kapsamında kapalı döngü bir koşum ortamı geliştirilerek, alt sistemlerin tek başlarına test kaleminin (füze) gereksinimlerini birebir sağlayabilmelerinin yanı sıra birbirleri ile de uyumlu çalışmaları test edilmiştir.

Bu bildiride anlatılan Döngüde Donanım Simülasyon Sistemi çalışması ile elde edilen kazanımlar aşağıda yer almaktadır :

1. Alt sistemler arasında belirlenen arayüzler test edilerek birbirleri ile uyumlu olarak çalışma durumları değerlendirilebilmiştir.
2. Alt sistemler arasında senkronizasyonun sağlanması ve verilerin performans gereksinimlerini karşılayacak hızda iletilmesi test edilebilmiştir.
3. Döngüde Donanım Sistem çözümünün modellenerek istenilen performans değerlerini karşılayıp/karşılayamama durumları değerlendirilebilmiştir.
4. Koşturulan senaryoların sonuçları incelenerek,
 - o Tüm sistem bazında döngünün ne kadar sürede kapatıldığı belirlenmiştir.
 - o Alt-sistemler bazında yazılım ve donanım kalemlerinin ne kadar sürede komut ürettiği belirlenmiştir.
 - o Gönderilen komuta yazılım ve donanım kalemlerinin ne kadar sürede tepki verdiği belirlenmiştir.

5. Döngüde Donanım Simülasyon Sistemi ile yukarıda belirtilen durumlar test edilerek Döngüde Donanım Sistemi'nin entegrasyon aşamasında karşılaşılabilen sorunlar tasarım aşamasında belirlenip, gerekli düzeltmeler gerçekleştirılmıştır. Böylece nihai sistem performansındaki risk azaltılmıştır.

5. KAYNAKÇA

- [1] Jim A. Ledin, “Hardware in the Loop Simulation” Embedded Systems Programming, February, 1999.
- [2] Darry Bullock, Brian Johnson, Richard B. Wells, Michael Kyte, Zhen Li, Hardware in the Loop Simulation, 2004.
- [3] Bo J. Naasz, Richard D. Burns, David Gaylor, John Higinbotham, “Hardware-In-The-Loop Testing Of Continuous Control Algorithms For A Precision Formation Flying Demonstration Mission”, 18TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPACE FLIGHT DYNAMICS, 2008.
- [4] Martin Gomez, “Hardware-in-the-Loop Simulation”,
<http://www.eetimes.com/design/embedded/4024865/Hardware-in-the-Loop-Simulation>, 2001.

TÜRK İNSANSIZ HAVA ARACI ANKA'NIN UÇUŞ SİMÜLASYON ORTAMI

Deniz KARAKAŞ^(a), Mehmet KARAKAŞ^(b),
Hakan TİFTİKÇİ^(c), Özkan KARAGÖZ^(d)

^(a) TUSAŞ, ANKARA, dkarakas@tai.com.tr

^(b) TUSAŞ, ANKARA, mkarakas@tai.com.tr

^(c) TUSAŞ, ANKARA, htiftikci@tai.com.tr

^(d) TUSAŞ, ANKARA, okaragoz@tai.com.tr

ÖZ

TUSAŞ'ın geliştirmekte olduğu Özgün Türk İnsansız Hava Aracı ANKA, MALE (Medium Altitude Long Endurance – Orta İrtifa-Uzun Süre Havada Kalış) olarak bilinen sınıfta yer alan bir insansız bir hava aracıdır. ANKA geliştirme projesinde uçuş fazları öncesi, tümleşik sistem ve yazılım entegrasyonu ve doğrulaması, Sistem Entegrasyon Laboratuvarı (SEL) olarak adlandırılan ortamda yapılmaktadır. Bu ortamda, hava aracı dinamiğinin yerde ve havada benzetimini sağlayan modelleme yazılımı (“PLANT”), hava aracının alt sistem ve ekipmanlarının benzetimini sağlayan ekipman simülasyon yazılımları, hava aracının uçuş fonksiyonlarını yöneten Uçuş Kontrol Bilgisayarı (UKB), hava aracını yerden kontrol etmeyi sağlayan Hava Aracı Kontrol Bilgisayarı (HAKB), uçuş görev planının oluşturulmasını ve haritadan takip edilebilmesini sağlayan GPY (Görev Planlama Yazılımı) yazılımı ve bu yazılımların üstünde koştugu sistemler mevcuttur. Bu bildiri kapsamında ANKA SEL ortamında yer alan sistem ve yazılımlar hakkında bilgiler verilmiş, bunlar arasındaki arayzlere de degenilerek, uçuş simülasyon ortamının bir bütün olarak nasıl çalıştığı ve testlerin nasıl yapıldığı anlatılmıştır. SEL bütününe yanı sıra, SEL'in ANKA'ya özel çekirdeğini oluşturan hava aracı modelleme yazılımı (“PLANT”) ile hava aracı ekipman simülasyon yazılımları da ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hava aracı modelleme, hava aracı tasarımlı, MATLAB, Simulink, simülasyon altyapı yazılımı, sistem entegrasyon laboratuvarı, uçuş simülasyonu

FLIGHT SIMULATION ENVIRONMENT OF THE INDIGENOUS TURKISH UNMANNED AERIAL VEHICLE (ANKA)

ABSTRACT

Indigenous Turkish Unmanned Aerial Vehicle ANKA, which is developed by TAI (Turkish Aircraft Industries) is a MALE (Medium Altitude Long Endurance) class UAV (Unmanned Aerial Vehicle). In ANKA development project, before the flight phases,

system and software integration and verification is done in an environment called System Integration Laboratory (SIL). In this environment, modeling software (“PLANT”) to simulate air vehicle dynamics on ground and in air, sensor simulation software to simulate sub-systems and equipments of air vehicle, Flight Control Computer to manage the flight functions, Air Vehicle Control Computer to control the air vehicle from ground, Mission Planning Software to create mission plans and follow air vehicle from map and systems on which all these software runs, are available. Within the scope of this paper, information about systems and software in ANKA SIL environment is given, the interfaces between software and systems are mentioned, how the flight simulation environment works as a whole and how the tests are done, are explained. Beside ANKA SIL as a whole, air vehicle modelling software (“PLANT”) and air vehicle sensor simulation software, which forms the core speciality of ANKA SIL, are explained in detail.

Keywords: Air vehicle modelling, air vehicle design, MATLAB, Simulink, simulation framework software, system integration laboratory, flight simulation

1. GİRİŞ

TUSAŞ’ın Özgün Türk İnsansız Hava Aracı projesi kapsamında geliştirmekte olduğu ANKA, MALE (Medium Altitude Long Endurance – Orta İrtifa Uzun Süre) olarak bilinen İHA (İnsansız Hava Aracı) sınıfında yer almaktadır. ANKA hava aracı, 200 km’lik bir menzilde 24 saat havada kalabilecek, 30.000 ft servis tavanı olan, otonom uçuş ve seyrüsefer kapiliyeti olan, gündüz ve gece her türlü hava koşulunda; keşif, gözetleme ve hedef tespiti görevlerini yerine getirebilecek bir insansız hava aracıdır [1]. Bu kapsam ve büyülükte bir projede, sistem ve yazılımın tümleşik tasarım, geliştirme, doğrulama çalışmalarının ve pilot intibakının uçuş fazları öncesi yapılabilmesi için Sistem Entegrasyon Laboratuvarı (SEL) olarak adlandırılan bir laboratuvar kurulmuş ve bu ortama gerçek sistemlerin yanında, uçuş simülasyon ortamını oluşturmak amacıyla modelleme ve simülasyon yazılımları da ilave edilmiştir. Uygulanan genel çözüm, gerçek sisteme çok benzer bir ortamda, uçuş simülasyonu yapılabilmesini sağlamaya yönelikir. Gerçek sisteme yakın olması, gerçek sistemde kullanılan UKB (Uçuş Kontrol Bilgisayarı), HAKB (Hava Aracı Kontrol Bilgisayarı), ekranlar (LCD, MFD - “Multi Function Display”), girdi cihazları (lövye, gaz kolu), veri link sistemi ve kablajın SEL ortamında da tamamen aynı şekilde kullanılmasıyla sağlanmıştır. Bu ortamda en kritik bileşenler olan UKB, HAKB, hava aracı modelleme yazılımı, ekipman simülasyon yazılımları ve veri link sistemi tamamen özgün ve milli ürünlerdir. Uçuş simülasyon ortamını oluşturan kritik bileşenler hakkında genel bilgiler 2 no.lu başlıkta, bu bileşenler arasındaki arayüzler ve sistemin çalışma mantığı ise 3 no.lu başlıkta ayrıntılı olarak anlatılacaktır. 4 ve 5 no.lu başlıklarda da hava aracı modelleme yazılımı (“PLANT”) ve ekipman simülasyon yazılımlarından ayrıntılı olarak bahsedilecektir.

2. ANKA SEL'i Hakkında Genel Bilgi

Şekil 1'de gösterilen ANKA SEL'i temel olarak yer ve hava kısmı olmak üzere 2 parçadan oluşmaktadır.

2.1. Yer Kısmı

Yer kısmında, Yer Kontrol İstasyonu (YKİ) içinde yer alan sistemler ve yazılımlar mevcuttur.

1. HAKB Yazılımı

- Gerçek zamanlı bir yazılım olan HAKB yazılımı, hava aracını yerden kontrol eder ve hava aracının durum bilgilerini ekranlarda gösterir.
- Hava aracından gelen telemetri ve videoyu üst üste bindirerek pilot kamera ekranında (PİKA) gösterir.
- Görev planını hava aracına yükler.

2. GPY (Görev Planlama Yazılımı) ve GÖRSİS (Görev Sistemleri) Yazılımı

- Görev planını oluşturur ve harita üzerinden takibini sağlar.
- Haberleşme, faydalı yük kontrol/takip ve test takip fonksiyonlarını yerine getirir.

3. Ekranlar ve Girdi Cihazları

- İnsan makine arayüz (İMA) ekranları, hava aracının kontrolünü sağlayan lövye, pedal, gaz kolu gibi girdi cihazları.

2.2. Hava Kısmı

1. UKB Yazılımı

- Gerçek zamanlı bir yazılım olan UKB yazılımı, hava aracının temel uçuş fonksiyonlarını yönetir.
- Uçuş kritik alt sistemleri (motor, iniş takımları, aviyonik üniteler vb.) kontrol eder ve yönetir.
- Otopilot ve uçuş yönetim sisteminin içrasını sağlar.
- Hata yönetim mekanizmalarını işletir.

2. Gerçek alt-sistemler ve aviyonik üniteler

3. Ekipman simülasyon yazılımları

4. Hava aracı modelleme yazılımı ("PLANT")

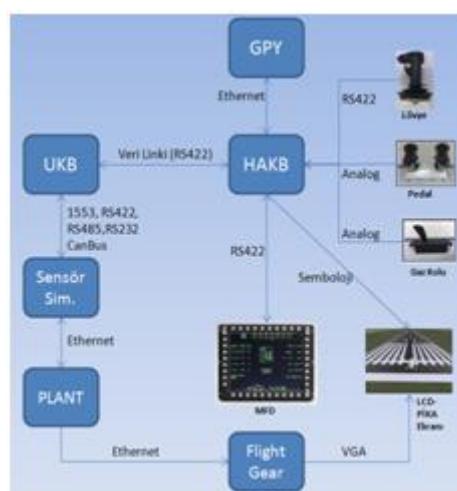


Şekil 1. ANKA SEL’i ve Yer Kontrol İstasyonu

3. ANKA SEL’indeki Uçuş Simülasyon Ortamı

Şekil 2’de genel mimarisi verilmiş olan ANKA SEL’i, aşağıdaki sıradüzensel mantığa göre çalışmaktadır:

1. UKB ve HAKB bir veri linki üzerinden birbirlerine bağlıdır. Telemetri (havadan yere) ve telekomut (yerden havaya) haberleşmelerini bu link üzerinden yaparlar.
2. Bir görev planına bağlı olarak uçulmak istenirse, GPY yazılımı aracılığıyla bir görev planı oluşturulur, HAKB’ye ve veri linki üzerinden UKB’ye yüklenir.
3. HAKB, lövye, pedal ve gaz kolu gibi girdi cihazlarından ve insan makine arayüzünden (MFD ekranlarından) aldığı komutları veri linki üzerinden UKB’ye gönderir.



Şekil 2. ANKA SEL’i genel mimarisi

4. UKB, veri linki üzerinden aldığı kontrol komutlarını işleyerek, MIL-STD-1553 arayüzü üzerinden ekipman simülasyon yazılımlarına gönderir.

5. Ekipman simülasyon yazılımları, UKB'den aldığı kontrol komutlarını ethernet arayüzü üzerinden “PLANT” hava aracı modelleme yazılımına gönderir.
6. “PLANT” yazılımı, ekipman simülasyon yazılımlarından aldığı kontrol komutlarını kullanarak uçuş verilerini (pozisyon, irtifa, hız, sensör verileri vb.) üretir ve ethernet üzerinden FlightGear [2] programının ethernet arayüzüne ve ekipman simülasyon yazılımlarına gönderir. “PLANT” yazılımı yer yüksekliği bilgisini ise FlightGear programından geri besleme yoluyla alır.
7. Açık kaynak kodlu FlightGear programının içine bir takım pistler (ANKA'nın ilk uçuşunu yaptığı Sivrihisar pisti gibi) ve ANKA uçağının üç boyutlu modeli eklenmiştir. FlightGear programı, “PLANT” kaynaklı uçuş verilerini kullanarak, üç boyutlu ANKA uçak modelinin görsel benzetim arayüzüne sağlar. FlightGear ekran görüntüsü aynı zamanda, uçuş yapmakta olan pilotun önündeki LCD'lere de yansıtılır.
8. Ekipman simülasyon yazılımları, “PLANT” yazılımından aldığı uçuş verilerini çeşitli arayüzler (RS422, RS232, RS485, CanBus, MIL-STD-1553) üzerinden UKB'ye gönderir.
9. UKB, ekipman simülasyon yazılımlarından gelen uçuş verilerini kullanarak, kendi içinde bir takım süreçler (hava aracı yönetimi, çoklu sensör yönetimi, algılayıcı yönetimi, uçuş yönetimi, otonomi yönetimi, hata yönetimi vb.) işlettikten sonra, HAKB'ye telemetri verilerini (ekipmanların durum ve sağlık bilgileri, her türlü uçuş verisi vb.) veri linki üzerinden gönderir.
10. HAKB, UKB'den gelen telemetri bilgilerini insan makine arayüz ekranları (MFD) üzerinde pilota gösterir.
11. HAKB, FlightGear programından gelen ekran görüntüsü üzerine, UKB'den gelen telemetri verisinden faydalananak oluşturduğu sembolojiyi (ufuk çizgisi, hız, irtifa, yön vb.) bindirerek LCD ekranlarda pilota gösterir.

Bu ortamda hava aracı ve hava aracı ekipmanları olmadan uçuş bazlı testlerin ve pilot intibak eğitiminin yapılabilmesini simülasyon ve modelleme yazılımları sağlamaktadır. Bu yazılımlar hakkında ayrıntılı bilgi 4 ve 5 no.lu başlıklarda verilecektir.

4. Hava Aracı Modelleme (“PLANT”) Yazılımı

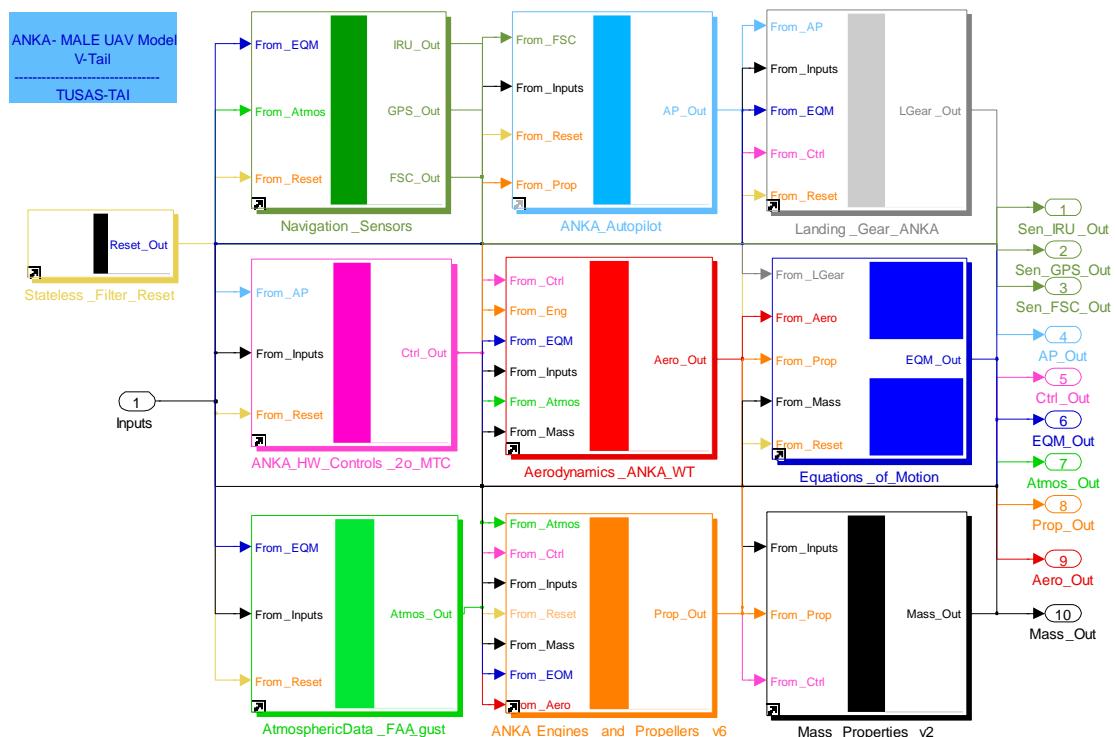
4.1. ANKA Uçuş Dinamiği Modeli

“PLANT” yazılımı, ANKA projesi Genel Tasarım Grubu/Uçuş Mekanığı ve Kontrol birimi tarafından geliştirilen ANKA uçuş dinamiği modeli kullanılarak elde edilmektedir. Doğrusal olmayan, esnemesiz gövde dinamiğini yansıtan 6 serbestlik dereceli ANKA uçuş dinamiği modeli, Matlab®/Simulink® ortamında, sürekli zamanda ve 10 ms sabit adım boyunda oluşturulmuştur. Modelleme yapısı, ANKA

konfigürasyonunun yanı sıra, konvansiyonel ve özel farklı hava aracı konfigürasyon modellerini geliştirmeye olanak tanımaktadır.

“PLANT” yazılımını elde etmede kullanılan uçuş dinamiği modelinin bileşenleri, iniş takımı dinamiği, yerde yönlendirme, kontrol yüzeyi dinamik modelleri, aerodinamik etkiler, 6 serbestlik dereceli hareket denklemleri, ISA (International Standard Atmosphere) atmosfer modeli, rüzgar/turbülans/sağanak modelleri, itici konfigürasyonda ANKA motor/itki modeli, kütle/eylemsizlik momentleri/ağırlık merkezi etkilerinden oluşmaktadır. ANKA uçuş dinamiği modeli genel mimarisi ve bileşenleri Şekil 3 ile gösterilmiştir.

Modelde, ANKA'nın değişken ağırlık merkezi üzerine etkiyen, aerodinamik, yer, itki dış kuvvet ve moment etkileri ile yer çekimi dış kuvveti hareket denklemlerinde kullanılarak, Euler açıları (Φ , Θ , Ψ), gövde ekseniinde açısal hızlar (p , q , r), doğrusal ivme (\dot{u} , \dot{v} , \dot{w}) ve hız (u , v , w) değerleri ile yer ekseniinde hava aracı hızı (V_{x_E} , V_{y_E} , V_{z_E}) ve pozisyonu (X_E , Y_E , Z_E) hesaplanmaktadır. Hareket denklemlerinin çıktıları olan temel değişkenler, bunlardan türetilen diğer hava aracı dinamiği değişkenleriyle birlikte analiz, simülasyon amaçlarıyla kullanılmaktadır.



Şekil 3. Doğrusal olmayan ANKA uçuş dinamiği modeli genel görünüm

Atmosfer modeli olarak deniz seviyesinden 20 km'ye kadar olan irtifalarda, dış hava sıcaklığını, basıncını, yoğunluğunu ve ses hızını deniz seviyesinden yüksekliğin bir fonksiyonu olarak veren ISA modeli kullanılmıştır [3]. ISA modeline ek bir özellik

olarak, farklı atmosfer koşulları etkilerini analiz edebilmek amaçlı, standart dış hava sıcaklığına eklenen ve nominal değeri sıfır olan Δ ISA etkileri de yansıtılmıştır.

ANKA uçuş dinamiği modelinde, gövde ekseninde türbülans hızlarını hesaplayan Von Kármán türbülans modeli kullanılmıştır [4]. Bu model hava aracının yerden yüksekliği, etkin rüzgâr hızı ve yönü ve gerçek hava hızı girdilerini kullanarak, normal dağılımlı hız sapmaları üretir. Türbülans etkileri hafif, orta seviyeli ve kuvvetli olarak seçilebilmektedir. Yerden yükseklik 1000 ft değerinin altındaysa, türbülans modeli rüzgar hızı ve yüksekliğe bağlı olarak türbülans şiddetini belirler. 1000 ft üzerindeki yükseklikler için türbülans şiddetini değiştirebilen “Probability of Exceedance” girdileri kullanılmaktadır. Türbülans etkilerinin yanı sıra, ANKA simülasyon analizleri için modelde ayrık sahanak bileşenini etkinleştirebilmek de bir seçenektedir. Ayrık sahanak modeli [4] referans alınarak modellenmiştir.

İtki hesabı, ANKA motorunun ve pervanesinin üreticilerinden sağlanan veritabanları kullanılarak yapılmaktadır. İtki ve yanı sıra elde edilen yakıt akışı değerleri, RPM, deniz seviyesinden yükseklik, Δ ISA gibi koşullara göre değişmektedir. Modelde, verilen gaz kolu komutlarına karşılık alınan motor tepkisi arasındaki dinamik ilişki 1. dereceden bir transfer fonksiyonuyla temsil edilmektedir. Motor dinamiği, statik motor testlerinden elde edilen veriler kullanılarak Sistem Tanımlama yöntemi ile oluşturulmuştur. Motor matematik modeli ayrıca tork etkisi, pervane jiroskopik etkileri ve pervane üzerinde oluşan aerodinamik etkileri (“p-factor”) de içermektedir.

ANKA kontrol yüzeyi ve burun iniş takımı eyleyicilerinin dinamik modelleri de benzer şekilde eyleyici Sistem Tanımlama testleri sonuçlarıyla elde edilmiş ve 2. dereceden transfer fonksiyonlarıyla modele yansıtılmıştır. Sistem Tanımlama yöntemini uygulayabilmek amaçlı, basamak test girdileri yüksüz eyleyicilere beslenmiş ve zamana bağlı elde edilen çıktılarıyla birlikte kullanılmıştır. Eyleyici maksimum hızları, yüklü test sonuçlarına göre elde edilmiştir. Yüksüz testlerden elde edilen model, yüklü test sonuçlarıyla da karşılaştırılarak, ANKA eyleyici dinamığını uygun bir şekilde yansıtığı doğrulanmıştır.

ANKA iniş takımı matematik modelinde, hava aracı yerdeyken, iniş takımı üzerinde oluşan kuvvet ve momentler hesaplanmaktadır. Iniş takımı modeli, diferansiyel fren etkilerini, iniş takımı yönlendirme dinamığını ve operasyonel kullanıma göre ihtiyaç duyulan “sarhoş teker” seçeneğini içermektedir.

ANKA otopilotu, Matlab[®]/Simulink[®] ortamında 20 ms adım boyu ile ayrık olarak modellenmekte ve sürekli uçuş dinamiği modeli ile uyumlu olarak “Single Tasking” seçeneğinde çalıştırılmaktadır. ANKA otopilotu temel modları, Uçuş Yolu, Varyo, Kayış, Yatış, Baş, İrtifa, Sürat ve Yerde Yönlendirme kontrollerini sağlamaktadır. Bu modlar dışında yanal ve boylamasına eksende ayrı olarak etkinleştirilebilen Kararlılık Arttırıcı Sistem (SAS) ve Uçuş Zarfi Koruma (FEP) işlevlerine sahiptir. Otopilot

bileşeni, SEL ortamında “PLANT” yazılımına dâhil edilmemiş, UKB’nin bir parçası olarak sisteme bütünlüğünü sağlanmıştır.

4.1.1. Aerodinamik Veritabanı

Aerodinamik veritabanı, uçuş dinamiği modelinin çekirdeğini oluşturmaktadır. Hava aracı konfigürasyonuna bağlı olarak, hûcum açısı (α), kayış açısı (β) ve kontrol yüzeyi sapma değerlerine göre değişen boyutsuz aerodinamik kuvvet ve moment katsayıları bu model bileşeninde yer almaktadır. Hesaplanan aerodinamik kuvvet ve momentler hava aracı ağırlık merkezine taşınarak hareket denklemlerine beslenir.

Statik aerodinamik katsayılar veritabanı, Şekil 4 ile gösterilen ölçekli ANKA modelinin kullanıldığı rüzgâr tüneli testleri ile elde edilmiştir. Bu katsayıların yanı sıra aerodinamik veritabanına, Digital Datcom [5] empirik yöntemi ile elde edilen dinamik türev katsayıları ve ESDU [6] empirik yöntemi ile elde edilen yer etkisi katsayıları da dahil edilmiştir. Aerodinamik bileşen ayrıca kuyruk kontrol yüzeyleri için rüzgâr tüneli testleri, kanatçık/flap yüzeyleri için ise HAD (Hesaplamlı Akışkanlar Dinamigi) yöntemi ile elde edilen menteşe moment katsayılarını içermektedir.



Şekil 4. ANKA rüzgâr tüneli ölçek modeli

Statik aerodinamik katsayıların uçuş dinamiği modeline entegrasyonu, gövde/kanat, sağ/sol kuyruk ve kontrol yüzeyi etkileri ayrıstırılmış olarak yapılmış ve modelde toplanarak herhangi bir uçuş koşulu/konfigürasyondaki etkileri hesaplanmıştır. ANKA aerodinamik veritabanı içeriği kaynaklarıyla birlikte Şekil 5’teki diyagramda gösterilmiştir.

4.1.2. Trim/Benzetim Kabiliyeti

Doğrusal olmayan benzetim modeli bir kez oluşturulduktan sonra simülasyon analizleri, doğrusallaştırma, statik ve dinamik kararlılık, kontrol edilebilirlik vb. analizlerin yapılabilmesi için öncelikle hava aracının belli denge koşullarının belirlenebilmesi gerekmektedir. Bu amaçla yine Matlab[®] ortamında oluşturulan “trim” kodları kullanılmaktadır. ANKA uçuş dinamiği modeli “trim” kabiliyeti ile, 1g düz uçuş, 1g tırmanma/alçalma, koordineli dönüş, “Pull-up”/“Push-over” manevraları, sabit baş açısı-sabit kayış açısı ve sabit yatis uçuş koşullarının başlangıç değerleri belirlenebilmektedir.

**Statik aerodinamik katsayıları -
LAGG Rüzgar Tüneli**

- CL (Re düzeltmesi ekli), CD (Re düzeltmesi ve anten etkileri ekli), CM, CN, CY, CR katsayıları
- $C_{tüm_statik} = C_{kanat-gövde}(\alpha, \delta_{flap}, \beta) + \Delta C_{kuyruk}(\alpha, \delta_{flap}, \beta) + \Delta C_{sağ_dümen}(\alpha, \delta_{flap}, \beta, \delta_{dümen}) + \Delta C_{sol_dümen}(\alpha, \delta_{flap}, \beta, \delta_{dümen}) + \Delta C_{inis_takımı}(\alpha, \delta_{flap}, \beta, \delta_{inis takımı})$

**Dinamik türev katsayıları -
Digital Datcom**

- Rüzgar tüneli verisinden elde edilen kanat-gövde katsayılarının deneySEL kanat girdileri olarak kullanılması sonucu elde edilen CL_q , CM_q , CL_{α_dot} , CM_{α_dot} , CR_p , CY_p , CN_p , CN_r , CR_r , CY_r türev katsayıları
- $C_{dinamik_türev}(\alpha, \delta_{flap})$

**Yer etkisi katsayıları -
ESDU**

- Rüzgar tüneli verisinden elde edilen "downwash", CL, CD ve CM girdileri ile ESDU yöntemi kullanılarak yer etkisi altında oluşan, yerden kanat açıklığına denk gelen yükseklüğe (h) kadar azalan ve sıfırlanan ΔCL , ΔCM , ΔCD
- $\Delta C_{yer_etkisi}(\alpha, \delta_{flap}, h)$

Şekil 5. ANKA aerodinamik veritabanı bileşenleri

Matlab®/Simulink® ortamında, 100 Hz hızda, "ODE5" integral çözümçüsü seçeneği kullanılarak benzetim yapılmaktadır. ANKA uçuş dinamiği modeli çıktıları kullanılarak FlightGear görsel arayüzü beslenmekte, benzetim analizlerinin uygulanmasına katkı sağlanmaktadır.

4.2. "PLANT" Yazılımı Kod Üretimi

SEL ortamında hava platformu dinamiği, ancak uçuş benzetimi ile sağlanabilmektedir. Bu nedenle tasarım ve analiz araçları ile geliştirilen ANKA uçuş dinamiği modelinden kod üretimi ve üretilen kodun matematik modellerle doğrulanması ve SEL ortamına entegre edilmesi önem arz etmektedir. ANKA uçuş dinamiği modelinin oluşturulduğu Matlab®/Simulink® ortamının eklentisi olarak çalışan "Real Time Workshop" (RTW) kod üretimi için en uygun çözüm olarak seçilmiş ve kullanılmıştır.

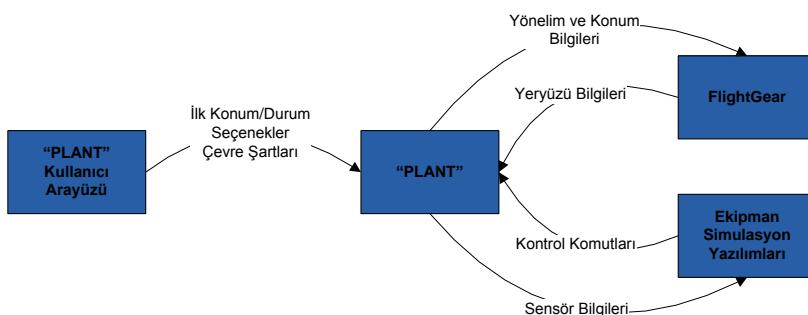
RTW ile kod üretiminde, "Embedded Coder" kodlayıcı seçeneği kullanılmaktadır. Modelin içeriği sürekli elemanlar nedeniyle "Support Continuous Time" seçeneği etkinleştirilmiştir. SEL denemelerinde model parametrelerinden pek çögünün değiştirilmesi gerekli olduğundan, veri değişim modu ("data exchange mode") "C-API" olarak, diferansiyel denklem çözümçüsü ise "ODE5" olarak seçilmiştir.

Matlab®/Simulink® uçuş dinamiği modelinden üretilen kod, uçak sürekli değişkenlerinin (" X_i " (konum, yönelim...), belirli bir girdi vektörü " U_i " ve parametre seti " Θ ") "h" zaman aralığı boyunca değişimini hesaplamakta ve bir sonraki durumu:

$$X_{i+1} \leftarrow X_i + \Phi(X_i, U_i, \Theta, h) \quad (1)$$

güncellemesiyle oluşturmaktadır. Gerçek zamanlı bilgisayarların çalıştığı SEL ortamında “Time Predictability” özelliğini sağlamak üzere, zaman adım boyu “h” belli bir çözüm hassasiyetini sağlayacak şekilde sabit alınmış ve sürekli döngü (“polling”) teknigi kullanılarak gerçek zamana yakın çalışma elde edilmiştir.

Üretilen hava platformu kaynak koduna, Şekil 6’da görüldüğü üzere, SEL’de yer alan iletişimde olduğu ilgili diğer sistemler ile haberleşmesini sağlamak üzere eklentiler yapılmıştır. “PLANT” yazılımı, uçuş kontrol algılayıcı ekipman verilerini gerçek sistemdeki birimlerine (Volt, derece vb.) çevirip ekipman simülasyon yazılımlarına göndermekte ve ekipman simülasyon yazılımları aracılığı ile gerçek UKB’nin bu sensör verilerine karşılık ürettiği otopilot kontrol komutlarını almakta, bu komutları gerçek dünya değişkenlerinden (volt, vb.) benzetim modeli değişkenlerine (derece, vs.) çevirdikten sonra, hava platformunu, bir örnekleme zamanı kadar ilerleterek döngüyü tamamlamaktadır.

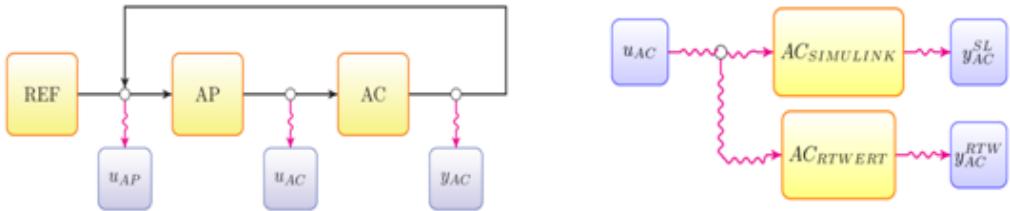


Şekil 6. “PLANT” ile diğer sistemlerin haberleşmesi

Gerçek uçuşlarda karşılaşılabilen kamera görüntüsü ve haberleşme gecikmelerini benzetim ortamına katabilmek için, FlightGear görüntüsünde ve servolara giden komutlarda değiştirilebilir gecikmeler sisteme eklenmiştir. ANKA Matlab®/Simulink® uçuş dinamiği modelinde yer alan rüzgâr, kütle verileri ve diğer parametreler, gerçek zamanlı çalışma sırasında kullanıcı arayüzü üzerinden değiştirilebilmektedir.

4.3. “PLANT” Yazılım Doğrulaması

ANKA uçuş dinamiği modelinin ve bu modelden üretilen “PLANT” yazılımının aynı dinamiğe sahip olduğunun doğrulanması, Matlab®/Simulink® ortamında tasarlanan otopilot tasarımının SEL ortamında doğru bir şekilde değerlendirilmesinde ilk adımı teşkil etmektedir. Bu sebeple ANKA uçuş dinamiği modeli ile kaynak kodun aynı girdiler ile ürettiği çıktıların (y_{AC}^{SL} ile y_{AC}^{SL} , y_{AC}^{RTW}) karşılaştırması Şekil 7’de gösterildiği gibi yapılmaktadır. Doğrulamada kullanılacak girdi/cıktı verileri tümleşik otopilot+ANKA modelinden kaydedilmektedir. Böylece Matlab®/Simulink® modelinde tümleşik çalışmanın, platform ayrık çalışmasında çıkarabilecegi farklılıkların da tespit edilebilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 7. “PLANT” doğrulama verilerinin üretimi ve platform koduna beslenmesi

5. Ekipman Simülasyon Yazılımları

ANKA projesi uçuş simülasyon ortamı kapsamında, hava aracı ekipman ve alt sistem benzetimini yapmak üzere, ekipman simülasyon yazılımları geliştirilmiştir. Bu yazılımlar, UKB'nin yerden alıp MIL-STD-1553 arayüzü üzerinden gönderdiği kontrol komutlarını okur ve “PLANT” yazılımına gönderirler. “PLANT” kaynaklı aldıkları her türlü uçuş verisini ise UKB'ye ekipman simülatörleri aracılığıyla çeşitli arayüzler üzerinden sağlarlar. ANKA projesi kapsamında EGI (Embedded GPS/INS), ADC (Hava Veri Bilgisayarı), UBB (Uçuş Bağlantı Birimi), yakıt, iniş takımları, FADEC (motor), LA (Lazer Altimetre), FSSK (Fren Sürücü Kartı), PDU (Güç Dağıtım Ünitesi), HVT (Hava Veri Terminali) gibi birçok simülatör yazılımı geliştirilmiştir. Ekipman simülatör yazılımları Windows işletim sistemi üzerinde gerçek zamanlıya yakın olarak çalışmaktadır ve ANKA projesinde, uçuş simülasyon ortamının bir parçası olması dışında aşağıdaki amaçlarla da kullanılmaktadır:

1. Gerçek ortamla benzer bir ortamda olası tüm cihaz ve iletişim hata senaryolarının oluşturulması, test edilip doğrulanması ve erken aşamalarda hataların giderilmesi
2. Aviyonik yazılımların veri limit kontrollerinin yapılması [7]
3. Sağlamlığa yönelik senaryoların [7] oluşturulması ve koşturulması
4. Performans ve zamanlamaya yönelik senaryoların oluşturulması ve koşturulması
5. Yedekliliğe yönelik senaryoların oluşturulması ve koşturulması
6. Gerçek aviyonik ekipmanların tedarikinde veya teslimatında yaşanacak sıkıntılar sonucu yaşanması olası proje risklerinin azaltılması [8], gerçek sistemlere bağımlılığı azaltmak suretiyle proje maliyetinin azaltılması.
7. Etkin bir entegrasyon ve test ortamı yaratarak proje süresinin azaltılması

Ekipman simülasyon yazılımlarının geliştirilmesinde, yeniden kullanılabilirliği artırmak ve kaynak kodunun bakımını kolaylaştırmak amacıyla nesneye yönelik programlama ve C++ dili tercih edilmiştir [9]. Performans kriterlerini karşılayabilmek adına çoklu iş parçacıklı programlama (Multithreading) tekniklerinden yararlanılmıştır.

Kullanıcı ekran panelleri için MFC (Microsoft Foundation Classes) ve DirectX teknolojileri kullanılmıştır.

Ekipman simülasyon yazılımlarında genellikle “State Machine” tasarım deseni uygulanmıştır. Bu desen, çalışma zamanında bir nesnenin tipini değiştirmenin en iyi yöntemidir [10]. Doğaları gereği state geçişleri barındıran ekipmanlar, en iyi bu şekilde benzetilmiştir.

6. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında Türk İnsansız Hava Aracı ANKA’nın uçuş simülasyon ortamı ve bu ortamı oluşturan bileşenler ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Sıfırdan bir hava aracı tasarlamak ve üretmek çok kapsamlı ve zor bir iştir. Hava aracının ilk uçuşunu gerçekleştirmeden önce, tüm sistem gerçek ortama benzer bir ortamda çok iyi test edilmeli ve doğrulanmalıdır. Bunu yapabilmek için de geliştirme, entegrasyon, doğrulama, pilot intibak eğitimi gibi birçok zorlu aşamada faydalanailecek, efektif bir simülasyon ortamı kurmak zorunlu olmaktadır.

7. KAYNAKÇA

- [1] www.tai.com.tr
- [2] <http://www.flightgear.org/>, The Flight Gear
- [3] The MathWorks, Inc. (2002), *The MathWorks: Aerospace Blockset User's Guide, For Use with Simulink*, Version I.
- [4] U.S. Military Specification MIL-F-8785C (1980), *Flying Qualities of Piloted Airplanes*.
- [5] McDonnell Douglas Corporation, Douglas Aircraft Division and Flight Control Division, Air Force Flight Dynamics Laboratory (1978), *The USAF Stability and Control DATCOM*, Wright-Patterson Air Force Base, OH.
- [6] ESDU, Esdu International (1972), *Low-Speed Longitudinal Aerodynamic Characteristics of Aircraft in Ground Effect*, Item no. 72023.
- [7] Cary R. Spitzer, *Digital Avionics Handbook*, Second Edition - 2 Volume Set (Electrical Engineering Handbook).
- [8] McMahon, R., *Modeling and Simulation Return on Investment (ROI) “Real Savings” Vs. Indirect Savings and Cost Avoidance*, US Army Research Laboratory, Human Research and Engineering Directorate.
- [9] Ambler, Scott (1998-01-01). *A Realistic Look at Object-Oriented Reuse*, [www.drdobbs.com](http://www.drdobbs.com/184415594). <http://www.drdobbs.com/184415594>. Retrieved 2010-07-04.
- [10] Gamma, Erich; Richard Helm, Ralph Johnson, John M. Vlissides (1995). *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*. Addison-Wesley. pp. 395. ISBN 0201633612.

ÇOKLU İNSANSIZ HAVA ARACI SİMÜLASYONLARI İÇİN ALTYAPI ÇÖZÜMÜ

Hüseyin Bacanak^(a), Hatice Güder^(b), Uğur Arıkan^(c), Umut Durak^(d)

^(a) ODTÜ Bilgisayar Mühendisliği, P.K. 06531 Ankara, hbacanak@hotmail.com

^(b) ODTÜ Bilgisayar Mühendisliği, P.K. 06531 Ankara, hghguder@gmail.com

^(c) ODTÜ Endüstri Mühendisliği, P.K. 06531 Ankara, arikan@ie.metu.edu.tr

^(d) TÜBİTAK-SAGE, PK.16 06261 Mamak Ankara, udurak@sage.tubitak.gov.tr

ÖZ

İnsansız Hava Araçlarının (İHA) harekat ortamında kullanılması söz konusu olduğu günden bu yana birden fazla İHA'nın birlikte kullanımı, İHA takımlarının hatta İHA sürülerinin oluşturulması tartışılagelmektedir. Tek İHA ile yapılacak harekattan, çoklu İHA ile yapılacak harekata doğru, seçilecek denetim mekanizmaları, tasarlanaacak otonomi düzeyleri ve öz denetim algoritmaları karmaşıklaşmaktadır. Bir yandan birbirlerinden oldukça farklı yeteneklerde ve özelliklerde İHA'ların geliştirildiği, öte yandan da geliştirilen bu platformların keşif, gözetleme ile başlayıp hava-yer, hatta hava-hava muharebelerindeki rollerinin tasarlandığı bu günlerde, tekli ve çoklu İHA'ların harekat senaryolarındaki etkinliklerinin çözümlenmesine olanak sağlayacak simülasyonların öneminin arttığı değerlendirilmektedir. Bununla paralel olarak simülasyonların üstünde koşacağı simülasyon altyapılarına olan ihtiyaç da daha görür hale gelmiştir. Bu altyapıların birçok sistemin ve sistemler sisteminin etkileşimde olduğu karmaşık harekat ortamının yapısal bir şekilde modellenmesine olanak sağlamak için yapılandırılabilir etmen tabanlı mimariyi desteklemeleri gerekmektedir. Öte yandan insan faktörünü senaryo içine dahil edebilmesi için sanal simülatörler ile arayüzlerinin olması beklenmektedir. Son olarak da simülasyondaki unsurların ortam etkileşimlerinin çözümlenebilmesi ve taktik resmin sunulabilmesi için Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) tarafından desteklenmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu bildiride açık kaynak simülasyon ve CBS araçları olan Repast, OpenMap ve FlightGear kullanılarak çoklu İHA simülasyonu için tasarlanan simülasyon altyapısı sunulacaktır.

Anahtar Kelimeler: Çoklu İHA, Simülasyon Altyapısı, Repast, OpenMap, FlightGear.

SIMULATION INFRASTRUCTURE SOLUTION FOR MULTI UNMANNED AIR VEHICLE SIMULATION

ABSTRACT

Since the early days of Unmanned Air Vehicles (UAVs), the utilization of UAV teams or swarms in operations has always been discussed. The complexity of control algorithms, methodologies and autonomy levels to be designed increases dramatically with multi UAV approaches. With the development of various UAVs and the specification of new roles for UAVs in reconnaissance, surveillance, air-to-ground and air-to-air operations, the interest for the simulations that will be used to assess effectiveness of single or multi UAV deployment in operations get increment. In parallel, the requirements for simulation infrastructures get evident. These infrastructures are expected to support agent based architecture in order to enable structured modeling of operational arena. On the other hand, to support incorporating human factors in the scenarios, these infrastructures are required to have virtual simulator interfaces. And lastly Geographical Information Systems (GIS) support is required from these infrastructures to enable analysis of environment interactions and present simulation results over tactical picture.

This paper presents a design for multi UAV simulation infrastructure that is constructed using open source simulation and GIS tools namely Repast, OpenMap and FlightGear.

Keywords: Multi UAV, Simulation Infrastructure, Repast, OpenMap, FlightGear

1. GİRİŞ

İnsansız Hava Araçları (İHA) 20. yüzyılın başlarından itibaren kullanılmaktadır. Birinci Dünya Savaşında kullanıldıkları bilinen ilk İHA’ları uzaktan kumanda edilebilen uçaklar[1] olarak tanımlamak yanlış olmayacağındır. İnsansız platformlar erken dönemlerinden bu yana birçok savaşta farklı görevleri yürütmek üzere kullanılmışlardır. Pilot kaybetme riskinin ortadan kaldırılması ve yüksek tehlike içeren görevlerin etkin bir şekilde tamamlanabilmesi, bu teknolojiye olan ilgiyi ve yatırımı arttırmıştır.

İHA’lar çeşitli görevler için kullanılır ve genellikle görevlerine göre sınıflandırılırlar. Değişik sınıflardaki İHA’lar kendi görevlerini yürütebilmek için donanımlandırılırlar. Bu nedenle birbirlerinden çok farklı hız, manevra, yakıt kapasitesi, radar, korunma ve saldırı özelliklerine sahiptirler.

İHA’ların kullanıldığı görevlerden birisi düşman bölgelerde keşif uçuşlarının gerçekleştirilmesidir. Keşif uçuşları savaş alanının algılanabilmesi ve zeki hamleler yapılabilmesi için önemlidir. Düşman bölgelerde radarların yerleri tahmin edilebilse de, dinamik savaş alanında öngörülemeyen savunma hamleleri ile karşılaşılabilir. Bu

nedenle keşif uçuşları yüksek risk içerir. İHA'lar saldırı görevleri için de kullanılmaktadır. Çeşitli silahlarla donatılan İHA'lar silahlı keşif, devriye veya yakın hava desteği gibi görevlerde düşman unsurlarını tespit edip saldırabilir. Öte yandan muharebe alanında düşman unsurları için sadece hedef oluşturmak için kullanılan İHA'lar da bulunmaktadır. Bazı İHA'lar ise görece düşük risk içeren arama kurtarma veya lojistik görevleri için tasarlanmıştır.

Yüksek risk içeren görevlerde kullanılan İHA'ların başarı ihtimalini artttırmak için tek bir İHA yerine İHA takımı kullanılması uzun zamandır üzerinde çalışılan bir yöntemdir[2][3]. Birden fazla İHA kullanmak, farklı yeteneklere sahip İHA'ların aynı görevde kullanılabilmesini sağlayarak yürütülebilecek görevlerin çeşitliliğini de artırmaktadır[4].

İHA'lar zaman içinde sadece uzaktan kumanda edilebilen uçaklar olmaktan çıkmış, kendi rotasını çizebilen ve kendilerine atanan görevleri icra edebilen akıllı platformlara dönüşmüştür. Çevresini (tehdit alanlarını, hedefleri, bölgenin coğrafi durumunu) algılayan İHA'ların iki nokta arasındaki rotalarını çizebilmeleri için örnekleri [5][6] ve [7]'de verilen grafik arama veya evrimsel algoritmalar gibi yöntemleri kullanan birçok rotalama algoritması çalışması yapılmıştır.

Çoklu İHA görevlerinde kullanılan İHA'lar ise çevre algılama ve rotalama yetilerinin yanı sıra haberleşme ve koordineli hareket etme yeteneklerine sahiptirler. Takım içindeki koordinasyonu sağlamak için kullanılan iki uç strateji vardır. Birincisi tamamen merkezileşmiş koordinasyondur. Bu stratejide takımındaki İHA'lar algıladıkları çevre bilgisini merkezi bir yöneticiye iletirler. Merkezi yönetici takımından topladığı bütün bilgileri kullanarak görev atamasını yapar. Görev alanındaki belirsizlik genellikle bütün planın görev öncesinde yapılmasına izin vermez ve uçuş esnasında, çevre algılandıkça görev atamalarının yapılmasını ve güncellenmesini gerektirir. Örnek bir çalışması[9]'de sunulan görev atama problemi, rotalama problemi gibi iyi çalışılmış bir problemdir.

İkinci uç strateji ise tamamen özerk koordinasyondur. Bu stratejilerde, görev için kullanılan İHA'lar belli bir seviyeye kadar birbirleri arasında iletişim geçebilir ve algıladıkları çevre bilgisini birbirleri ile paylaşabilirler. Ancak bazı görevlerde, saptanma riskini arttırdığı için iletişimden tamamen vazgeçilebilir. Her özerk İHA'nın, bilgilerini kullanarak kendisi için görev atamasına karar vermesi ve tüm İHA'ların verdikleri kararların takım amacına hizmet ediyor olması gerekmektedir. İhale (bidding) algoritmaları bu amaç için kullanılan yöntemlerden birisidir. [9] ve [10]'da bu yöntem üzerine örnek çalışmalar sunulmuştur.

Öte yandan İHA takımlarının insanlı platformlar ile birlikte kullanımı ise başka bir problem alanı olarak ortaya çıkmaktadır [11]. Otonom harekat yetenekleri tasarlansa dahi geliştirilen İHA'ların tek başlarına veya takımlar halinde var olan insanlı platformlar ile görev icra edebilecek yeteneklere sahip olmaları önemini korumaktadır.

Bu insanlı – insansız sistemlerin birlikte çalışmaları kendine has denetim ve koordinasyon problemlerini ortaya çıkarmaktadır.

Çoklu İHA takımlarını otonom olarak veya insanlı platform denetiminde ve koordinatesinde kullanabilmek için gereken algoritmaların çeşitliliği ve çözülmesi gereken problemlerin karmaşıklığı, bu alanda simulasyona duyulan ihtiyacı artırmaktadır. Algoritmaların ve yöntemlerin geliştirilmeleri ve başarılarının doğrulanması için çeşitli senaryolarda denenmelerine gereksinim duyulmaktadır. Örnek olarak [12]’de sunulan çoklu İHA simülasyonu, Flames adı verilen ticari bir altyapı kullanılarak bu gereksinimleri karşılamıştır. Bu çalışmada geliştirilmekte olan altyapı ise açık kaynaklı bileşenler kullanarak çok çeşitli harekat senaryolarında çoklu İHA görevlerinin simulasyonuna imkan sağlamayı amaçlamaktadır.

2. ALTYAPI GEREKSİNİMLERİ

Niland’ın [12]’de anlattığı SEAD (*Ing. Suppression of Enemy Air Defenses*) senaryosu gibi İHA takımlarının kullanıldığı birçok harekatta, İHA’lar sıkı bir tehdit ortamında görev icra ederler. Bu tehditler içinde, radarlar, satıhtan havaya hava füze sistemleri veya hava savunma topları gibi unsurlardan oluşan değişik büyülüklük ve yetenekteki hava savunma sistemleri önemli bir yer tutar. Çoklu İHA kullanım yöntemlerinin ve algoritmalarının geliştirilmesi ve doğrulanması için yürütülecek simülasyonlarda bu tehdit ortamının da modellenmesi elzemdır.

Simülasyonlar temelde *canlı*, *sanal* ve *yapilandırılabilir* olarak sınıflandırılmaktadır. *Canlı*, gerçek sistemlerin gerçek insan tarafından kullanıldığı uygulamaları; *sanal*, benzetim sistemlerinin gerçek insan tarafından kullanıldığı uygulamaları; *yapilandırılabilir* ise benzetim sistemlerinin benzetim insanlar tarafından kullanıldıkları uygulamalarıdır [13]. Çoklu İHA simülasyonu için kullanılacak alt yapının tehditlerin, İHA’ların ve birlikte hareket yapılan dost unsurların benzetimi için yapılandırılabilir bir ortama, İHA’lardan bir kısmının veya denetim için kullanılacak insanlı platformların benzetiminde insan faktörünü de kullanabilmek amacıyla de sanal simülatörler ile entegrasyon özelliklerine sahip olması gerekmektedir.

Etmen tabanlı simülasyon, benzetimi yapılan unsurların kendilerine atanan görevleri icra edebilmek için karar mekanizmaları işleyen, birbirleri ve çevre ile etkileşebilen yazılım birimleri olan etmenler olarak modellendikleri bir yaklaşımdır [13]. Yapılandırılabilir ortam içinde benzetimi yapılacak dost ve düşman unsurların etmenler olarak modellenmesi muharebe simülasyonlarında kullanılagelen bir yöntemdir[14]. Bu çalışma kapsamında kurulacak çoklu İHA simülasyon altyapısının da bu iyi pratiği takip ederek etmen tabanlı olması kurgulanmıştır.

3. SİSTEM ÇÖZÜMLEMESİ

Çoklu İHA simülasyon altyapısı için önerilen sistemin mimarisi üç ana araçtan oluşmaktadır. Bu araçlar sırası ile etmen tabanlı simülasyon altyapısı, Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ve uçuş simülatöründür. Bu çalışma açık kaynak projelerden seçilecek bu üç ana aracın entegrasyonunu ve entegre birçok İHA simülasyon altyapısı haline getirilmesini hedeflemektedir. Açık kaynak etmen tabanlı simülasyon altyapıları incelenmiş, MASON, Swarm ve Repast[15] arasından diğerlerine göre daha aktif kullanıcı grubuna sahip olan Repast seçilmiştir. Repast ile uyumlu olarak da CBS çözümü OpenMap seçilmiştir [16]. Açık kaynak uçuş simülatörü olarak ise en bilinen çözüm olan FlightGear[17] seçilmiştir. Bu unsurların birlikte çalışabilmeleri için yönetim ve arayüz bileşenleri öngörlülmektedir.

Repast, Şikago Üniversitesi’nde geliştirilen Java tabanlı ve açık kaynak etmen tabanlı bir simülasyon alt yapısıdır [18]. Repast etmenlerin modellenmesine ve aralarındaki ilişkilerin tanımlanmasına imkan vermesinin yanı sıra, simülasyon koşumunu da sağlayan bir altyapıdır. Otomatik Monte Carlo koşumu, kayıt ve görselleştirme araçları, nesne tabanlı programlama desteği, etmen şablonları, CBS entegrasyonu gibi özellikleri vardır. Geliştirilecek çoklu İHA simülasyon altyapısı harekat ortamındaki unsurların etmenler olarak modellenmesi için Repast şablonlarını kullandırmayı, simülasyon koşumu için de Repast motorunu ve araçlarını kullandırmayı planlamaktadır.

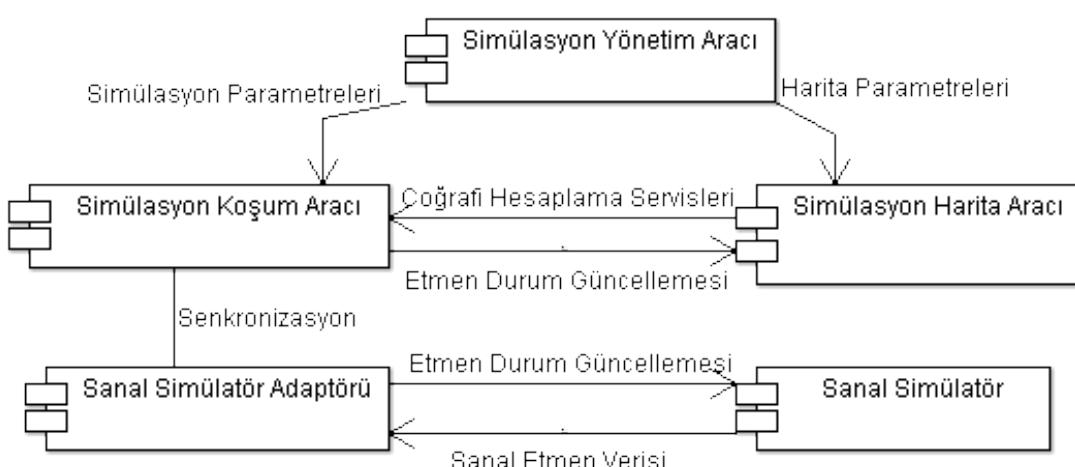
OpenMap coğrafi bilgi yönetimi ve görselleştirmesi gerektiren uygulamalar geliştirmek için tasarlanmış Java Beans tabanlı bir kütüphanedir. İç yapısına bakıldığında OpenMap coğrafi koordinatları algılayabilen Swing bileşenlerinden oluşur. Bu bileşenler coğrafi veriyi harita üzerinde görselleştirmeye ve bu verilerin üzerinde çalışmaya olanak sağlarlar. Repast ile entegre edilecek OpenMap’ın temelde iki temel işlev için kullanılması öngörlülmektedir. İlk olarak Repast üzerinde koşan etmenlerin harita üzerinde görselleştirilmesi, bir başka deyişle, simülasyon boyunca gerçek zamanlı taktik resmin çizilmesi için kullanılırken, ikinci olarak da Repast üzerinden koşan etmenlere coğrafi hesaplama servisleri sunacaktır. Görüş hattı çözümlemesi, mesafe ve açı ölçme bu servislerin ilk akla gelenleridir.

FlightGear açık-kaynak kodlu esnek ve ihtiyaca göre uyarlanabilir bir uçuş simülatöründür. Ağ üzerinden iletişim kurulabilir bir simülasyon olan FlightGear roll, gyro reading, heading, yükseklik, ivme, hız gibi uçuş bilgilerini toplayabilecek, bu bilgiyi veri paketleri halinde gönderebilecek ve dış kaynaklardan uçuş kontrol girdilerini alabilecek bir iletişim sistemine sahiptir [20]. Bütün bunlar daha önceden tanımlanmış “xml” tabanlı protokol dosyalarıyla icra edilir. Veri alışverişinde soketler kullanılır ve sistemler arasında aktarılan veri paketleri tanımlanmış protokol dosyalarına göre organize edilir. Bunun yanında yeni uçaklar/platformlar tanımlamak ve uçaklar için pilot arayızları geliştirmek de mümkündür. Daha önce de İHA benzetimleri için

kullanılan [21] FlightGear, çoklu İHA simülasyon altyapısında sanal simülatörleri desteklemek için seçilmiştir. Repast ile entegrasyonu tasarlanan FlightGear ile sanal olarak uçurulan hava platformlarının etmen tabanlı olarak koşturulan harekat senaryosunun bir parçası olması sağlanacaktır.

4. SİSTEM MİMARİSİ

Bu bölümde anlatılan sistem çözümlemesinde seçilen ürünler Repast, OpenMap ve FlightGear ve bu ürünleri destekleyen bileşenlerden kurulan sistem mimarisi sunulacaktır. Bu mimari içindeki bileşenler ve ilişkileri anlatılacaktır.



Şekil 1. Çoklu İHA Simülasyon Altyapısı Mimarisi

Şekil 1'de, önerilen çoklu İHA simülasyon altyapısının bileşenleri ve bu bileşenler arasındaki ilişkiler sunulmaktadır. Simülasyon Yönetim Aracı yeni senaryo yaratma, daha önce kaydedilmiş senaryoyu yükleme, etmen ekleme/çıkarma, başlangıç koşullarını tanımlama, koşum başlatma/bitirme, koşum takibi gibi temel yönetim işlevlerinin yürütüleceği kullanıcı arayüzü sunmakla sorumludur.

OpenMap tabanlı olarak geliştirilen Simülasyon Harita Aracı bileşeninin temel işlevi simülasyon koşumundaki etmenleri taktik resim üzerinde göstermek ve coğrafi hesaplama servisleri sunmak olarak özetlenebilir.

Simülasyon Koşum Aracı ise Repast temel alınarak geliştirilen bileşendir. Tanımlanan senaryonun koşumunu sağlayan bu araç aynı zamanda etmenlerin geliştirileceği etmen şablonlarını da sağlar. Etmen tabanlı simülasyon altyapısı olarak değerlendirilebilecek Simülasyon Koşum Aracı üzerinde geliştirilen ve senaryoya dahil edilen etmenler koşturulur.

Sanal Simülatör Adaptörü, Sanal Simülatör bileşenini başlatır ve bir ağ kanalı açarak sürekli olarak Sanal Simülatör ile etmen tabanlı simülasyonu koştururan Simülasyon Koşum Aracı arasındaki veri alışverişini sağlar.

Son olarak dephinilecek Sanal Simülatör bileşeni, FlightGear üzerinde koşan uçak simülatöridür. Sanal Simülatör sayesinde gerçek insanların kullandığı platformlar etmen tabanlı simülasyon altyapısında koşan harekat simülasyonuna dahil edilecektir.

5. SONUÇ

Bu bildiride çoklu İHA benzetimlerinde kullanılması için tasarlanmış olan simülasyon altyapısı tanımlanmıştır. Çoklu İHA benzetim gereksinimleri ile başlayan bildiri seçilen açık kaynak altyapı bileşenlerinin tanıtımı ile devam etmiştir. Son olarak da bu bileşenler ile kurulan sistem mimarisi sunulmuştur. Bu çalışmada geliştirilmekte olan çoklu İHA simülasyon altyapısı kullanılarak bir çok benzetim kurulacak ve çoklu İHA denetim yöntem ve algoritmalarının geliştirilmesi olanaklı kılınacaktır. Geliştirilecek yöntem ve algoritmalar gerçekçi harekat senaryolarında, insan tarafından kullanılan simülasyon unsurları da dahil edilerek denenecektir. Bu altyapı kullanılarak benzetimler kurulduğunca altyapının gelişeceği ve olgunlaşacağı değerlendirilmektedir. Repast etmen şablonlarının hava muharebesindeki etmenleri temel olarak genişletilmesi, OpenMap için taktik resim gösterimine yönelik şablon katmanlarının tanımlanması ve FlightGear'da kullanılabilecek insanlı platform kütüphanelerinin geliştirilmesi planlanmaktadır.

6. KAYNAKÇA

- [1] Pearson, L. (1969) Developing the Flying Bomb, *Naval Aviation in World War I*, Washington DC.
- [2] Ryan, A., Zennaro, M., Howell, A., Sengupta, R., Hedrick, J.K., (2004), An overview of emerging results in cooperative UAV control, *43rd IEEE Conference on Decision and Control*, Nassau
- [3] Banda, S., (2002), Future Directions in Control of Unmanned Air Vehicles, *Proceedings of AFOSR Workshop on Future Directions in Control*, Arlington, VA.
- [4] Jin, Y., Liao, Y., Minai, A. A., & Polycarpou, M. M. (2006). Balancing search and target response in cooperative unmanned aerial vehicle (UAV). *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part B: Cybernetics*, 36(3).
- [5] Tulum,K., Durak,U, İder, S.K., (2009), Situation Aware UAV Mission Route Planning, *2009 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, Montana, USA.
- [6] Zheng, C., Li, L., Xu, F., Sun, F., Ding, M., (2005), Evolutionary Route Planner for Unmanned Air Vehicles, *IEEE Transactions on Robotics*, 21(4), 609-620

- [7] Meng, H., Xin, G.,(2010), UAV route planning based on the genetic simulated annealing algorithm, 2010 *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, Xi'an.
- [8] Shima, T., & Schumacher, C. (2005). Assignment of cooperating UAVs to simultaneous tasks using genetic algorithms. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. San Francisco, California.
- [9] Jin, Y., Minai, A. A., & Polycarpou, M. M. (2003). Cooperative real-time search and task allocation in UAV teams,*Proceedings of 42nd IEEE Conference on Decision and Control*, Hawaii.
- [10] Mes, M., van der Heijden, M., van Harten, A. (2007). Comparison of agent-based scheduling to look-ahead heuristics for real-time transportation problems. *European Journal of Operational Research*, 181, pp. 59-75.
- [11] Valenti, M., Schouwenaars, T., Kuwata, Y., Feron, E., How, H., (2004) Implementation of a Manned Vehicle – UAV Mission System, *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, Rhode Island.
- [12] Niland, M.W., (2006) The Migration of A Collaborative UAV Testbed into the Flames Simulation Environment, *Proceedings of the 38th conference on Winter Simulation Conference*, Monterey, CA.
- [13] Sokolowski, J.A., Banks, C.M., (2010), *Modeling and Simulation Fundamentals: Theoretical Underpinnings and Practical Domains*, Jon Wiley & Sons Inc., New Jersey.
- [14] Kewley, R., Larimer, L., (2003), An Agent-Based Modeling Approach to Quantifying the Value of Battlefield Information, *PHALANX, The Bulletin of Military Operations Research Society*, 10(13), 25-26
- [15] Macal, C.M., North, M.J., (2009), Agent Based Modeling and Simulation, *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*, Austin, TX.
- [16] Najlis, R., North, M.J., (2005), Repast Vector GIS integration, *14th Annual NAACOS Conference*, Notre Dame, 2005
- [17] Pery, A.R.,(2004), The Flightgear Flight Simulator, *USENIX Annual Technical Conference*, Boston.
- [18] North, M.J., Macal,C.M., (2010), Foundations of and Recent Advances in Artificial Life Modeling with Repast 3 and Repast Simphony,*Artificial Life Models in Software*, 2nd ed., Springer, Heidelberg.
- [19] OpenMap Projesi, <http://www.openmap.org/>
- [20] FlightGear Developer Portal, <http://wiki.flightgear.org/index.php/Portal:Developer>
- [21] Sarton, E.F., Hammaker, S.,(2005), Simulated Flight Testing of an Autonomous Unmanned Air Vehicle Using FlightGear, *Infotech@Aerospace*, Arlington, VA.

ÜÇ BOYUTLU CEVHER YATAĞI MODELLEME VE MADEN OCAĞI TASARLAMA

**Prof.Dr.Erhan TERCAN ^(a), Prof.Dr. Bahtiyar ÜNVER ^(b), Y.Doç.Dr. Mehmet Ali
HİNDİSTAN ^(c)**

^(a) Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, erhan@hacettepe.edu.tr

^(b) Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, unver@hacettepe.edu.tr

^(c) Hacettepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, hmalı@hacettepe.edu.tr

ÖZ

Cevher yataklarının 3 boyutlu modellenmesi ve ocak tasarımlı, madencilik endüstrisinin karşılaştığı en zor ve karmaşık problemlerden birisidir. Madenler, üretildiğinde bir daha yerine konulamayan doğal varlıklar olduğundan bunların çağdaş madencilik bilim ve teknolojisine uygun bir şekilde çıkarılması gereklidir. Bu ise cevher yataklarının modellenmesi ve işletme tasarımda 3 boyutlu görselleştirme yeteneğine sahip, kullanıcı dostu, hızlı ve güvenilir yazılımların kullanılmasını gerektirmektedir. Makale, bu tür uygulamaların temel ilkelerini vermekte ve örnekler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Blok Model, Görselleştirme, Jeolojik Katı Model, Jeostatistik, Veri Tabanı.

THREE DIMENSIONAL OREBODY MODELLING AND MINE DESIGN

ABSTRACT

3D orebody modelling and mine design is one of the difficult and challenging tasks that mining industry faces with. Mines are non-renewable natural resources so that they should be extracted based on modern mining science and technology. This requires to use fast, user friendly, reliable computer programs that have an ability to visualize in 3D in orebody modelling and mine planning. The paper gives basic principles of these kinds of applications and presents some examples.

Keywords: Block Model, Data Base, Geological Solid Model, Geostatistics, Visualization.

1. GİRİŞ

Mineral kaynakları, üretildiğinde bir daha yerine konulamayan doğal varlıklardır. Yenilenemez özelliklerinden dolayı bunları en yüksek fayda ile toplumun kullanımına sunmak gereklidir. Madencilik şirketleri bu durumun farkında olup madenleri günümüz bilim ve teknolojisine uygun bir şekilde işletmek istemektedir. Çağdaş madencilik bilim ve teknolojisi, madenlerin çıkarılmadan önce üç boyutlu olarak modellenmesini ve ocak tasarımlarının yapılmasını gerektirir. Bunun için aramadan kapatmaya kadar bütün madencilik süreçlerinin modellenip tasarlandığı bütünsel bilgisayar programlarına gereksinim vardır.

Cevher yatağı modelleme ve ocak planlamaya temel olan verilerin yönetimi, üç boyutlu jeolojik katı modelleme, blok modelleme, mineral kaynak kestirimini, yer altı ve yerüstü madenciliği bütünsel madencilik yazılımlarının temel bileşenleridir. Bildiri, bu bileşenleri oluşturmada temel gereksinimleri ve ilkeleri ortaya koymakta ve bunlara ilişkin görsel örnekler vermektedir. Bu bildiri, NETPRO/Mine adlı madencilik modelleme ve tasarım yazılımının geliştirilmesi sürecinde edinilen deneyimlere dayanmaktadır. Bununla birlikte burada belirtlen bir çok genel kural diğer yazılım platformlarına da uygulanabilir.

Üç boyutlu cevher yatağı modelleme ve ocak tasarım yazılımlarının geliştirilmesi ile ilgili olarak literatürde çok sayıda çalışma vardır. Sides [1], Henley [2], Mallet [3], Turner [4] ve Caumon [5] bu çalışmalara birer örnektir.

Sides [1] cevher yatağı modellemeye kullanılan klasik yöntemleri gözden geçirmiştir ve üç boyutlu jeolojik modellemenin verimliliğini artırmayı araştırmıştır. Henley [2], geçmiş yirmi yılda cevher yatağı modelleme ve ocak tasarım yazılımlarının geliştirilmesinde karşılaşılan zorlukları incelemiştir ve gelecekte bu yöndeki gelişmelere ilişkin kestirimlerde bulunmuştur. Turner [4], üç boyutlu jeolojik modelleme ve görselleştirmedeki problemleri ve yeni gelişmeleri gözden geçirmiştir. Caumon [5], jeolojik verilerin üç boyutlu yapısal modellere dönüştürülmesinde dikkate alınması gereken pratik kuralları ve ilkeleri vermiştir.

Bildiride önce cevher yatağı modelleme ve ocak tasarımında kullanılan temel veri yapıları tanıtılmış daha sonra jeolojik katı modelleme süreci açıklanmıştır. Katı model içinde blok modellemenin ilkeleri ve blok değerlerinin kestirimi incelenmiştir. Bu bağlamda mineral kaynak kestirim yöntemleri tanıtılmıştır. Madenler bulundukları yerin konuma bağlı olarak yer altı ya da yerüstü madencilik yöntemleri ile işletilirler. Son aşamada bu yöntemlerin üç boyutlu ortamda tasarımları süreci kısaca açıklanmış ve her bir bileşenle ilgili görsel uygulamalar sunulmuştur.

2. VERİ TABANI

Cevher yatağı modelleme ve ocak tasarımasına temel olan veriler genellikle sondajlardan elde edilen bilgilere dayanır. Bunlar kabaca üç gruba ayrılabilir: geometrik, litolojik ve öznitelik verileri. Geometrik veriler, sondajların x, y, z koordinatları, derinliği, eğimi ve çapı gibi geometrisi ile ilgili bilgileri içerir. Litoloji ve öznitelikle ilgili veriler sondajdan alınan her bir karot örneği ile ilişkili olup sondaj boyunca jeoloji ve kalite değişimini temsil eder. Örneğin litoloji her bir karotun jeolojik birimini, karot verimini içerirken öznitelik yine her bir karot için analiz edilen öznitelik değerlerini (kömürde ısıl değer, kül, nem ve kükürt içerikleri, metal madenlerinde tenör ve yoğunluk) içerir.

Bir veri tabanının sondajla ilgili verilerin girilmesinde etkili araçları sunabilmesi gereklidir. Örneğin böyle bir veri tabanında öznitelik ve litolojiler, kullanıcı tanımlı olarak girilebilir, bu tanımlar bir veri kütüphanesinden seçilebilir ve farklı kullanıcılar arasında paylaşılmalıdır. Hem litoloji hem de öznitelik için gösterim rengi ve desen tanımlanabilmelidir. Bir öznitelijke birden çok öznitelik (Çinko+Kurşun gibi) kazandırılabilmelidir.

Veri kontrolü yapılabilmelidir. Bunlar, hatalı girilmiş koordinatların tesbiti, olanaklı değerler aralığı dışında kalan öznitelik değerlerinin saptanması, farklı özniteliklerin toplamlarının belirli bir üst değeri aşmaması gibi kontrolleri içerir. Ham verilerden kompozit (eşit uzunlukta tanımlanmış) veriler üretebilmelidir. Kompozitler, variogram hesaplama ve krigleme gibi daha çok blok modellemeye kullanılan veri tipidir. Bu veri tipinin üretiminde litoloji, karot verimi gibi faktörler dikkate alınmalıdır. Ham veriler ile kompozitler ayrı ayrı saklanabilmelidir. Verilere ait özet istatistikler hesaplanabilmeli ve histogramlar çizilebilmelidir. Bu tür hesaplama ve çizimler ham ve kompozit edilmiş veriler üzerinde yapılabilmelidir.

Sondaj verileri üç boyutlu olarak gösterilmelidir (Şekil 1). Sondajların üç boyutta gösterimi veri girişi ile eşzamanlı olarak gerçekleştirilebilir. Veri tabanı konumsal olmalı, farklı formattaki (TXT, CVS, LAS gibi) veriler okunup yazılabilmelidir. Veri aktarımı etkileşimli olmalı, veri aktarımında sorun yaratan kayıtlar kullanıcıya rapor edilmelidir.

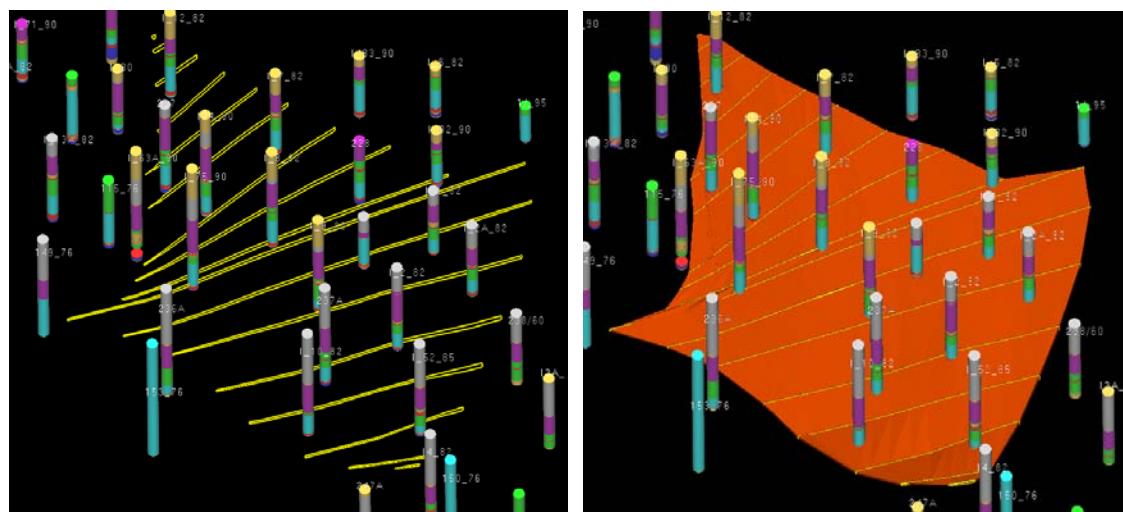
Veriler süzgeçlenebilmelidir. Süzgeçleme, sondaj geometrisi, öznitelik ve litoloji gibi her türlü veriye uygulanabilmelidir. Verilerden rapor alınabilmelidir. Raporlar, sondaj listesi olacağı gibi sondaj log raporu da olabilir. Log raporları kullanıcı tanımlı şablonlara göre üretilmeli ve raporlama istenen formatta (pdf, doc, xls vb) yapılabilmelidir.



Şekil 1. Sondajların üç boyutlu gösterimi. Litolojiler farklı renklere boyanmıştır.

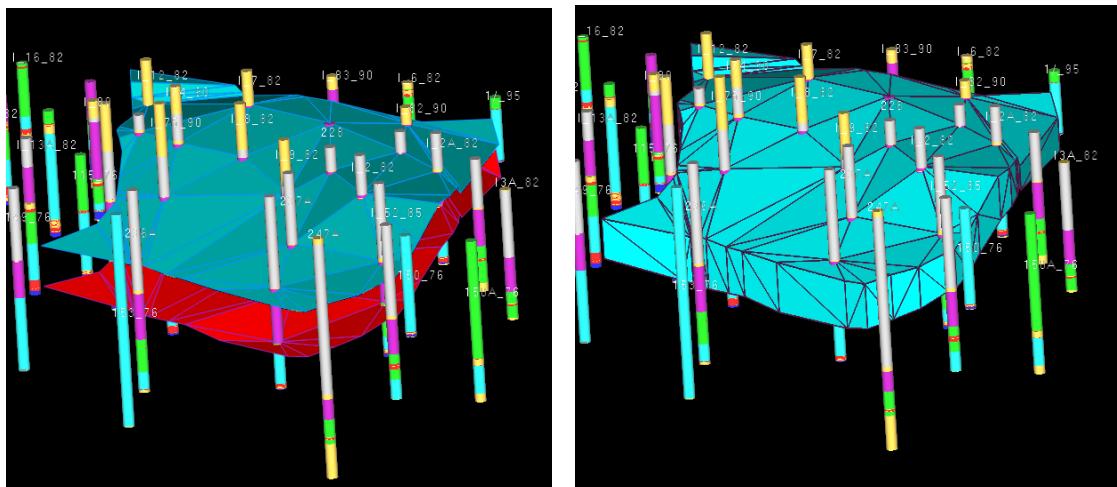
3. JEOLOJİK KATI MODELLEME

Maden yatağı gibi yer ile ilintili objelerin üç boyutta büyülüklük, şekil, uzanım ve geometrisinin çıkarılması jeolojik katı (wireframe) modelleme olarak bilinir. Bu amaçla kömür ve metalik madenlerde kullanılan yaklaşımlar birbirinden farklılık gösterir. Kömür yataklarının modellenmesi iki boyutta yapılan geometrik kestirimlerin üç boyuta taşınması esasına dayanır. Bunun için iki farklı yaklaşım kullanılır: 1) Kesit yöntemi, 2) Tavan-taban yöntemi. Kesit yönteminde genellikle düşey yönde kesitler alınır, her kesit içinde kömürün geometrik sınırları belirlenir ve son olarak kesitlerdeki iki boyutlu şekiller üç boyutta jeo-objeler oluşturmak üzere birleştirilir (Şekil 2).



Şekil 2. Kesit yöntemi; a) Kesitlerin alınması, b) Katı modelin oluşturulması.

Tavan-taban yönteminde ise damarın tavan ve taban yüzeyleri sayısal arazi modeli şeklinde modellenir daha sonra bu iki yüzey, katı bir model oluşturacak şekilde birleştirilir (Şekil 3).



Şekil 3. Tavan-taban yöntemi; a) Tavan ve taban yüzeyleri, b) Katı model.

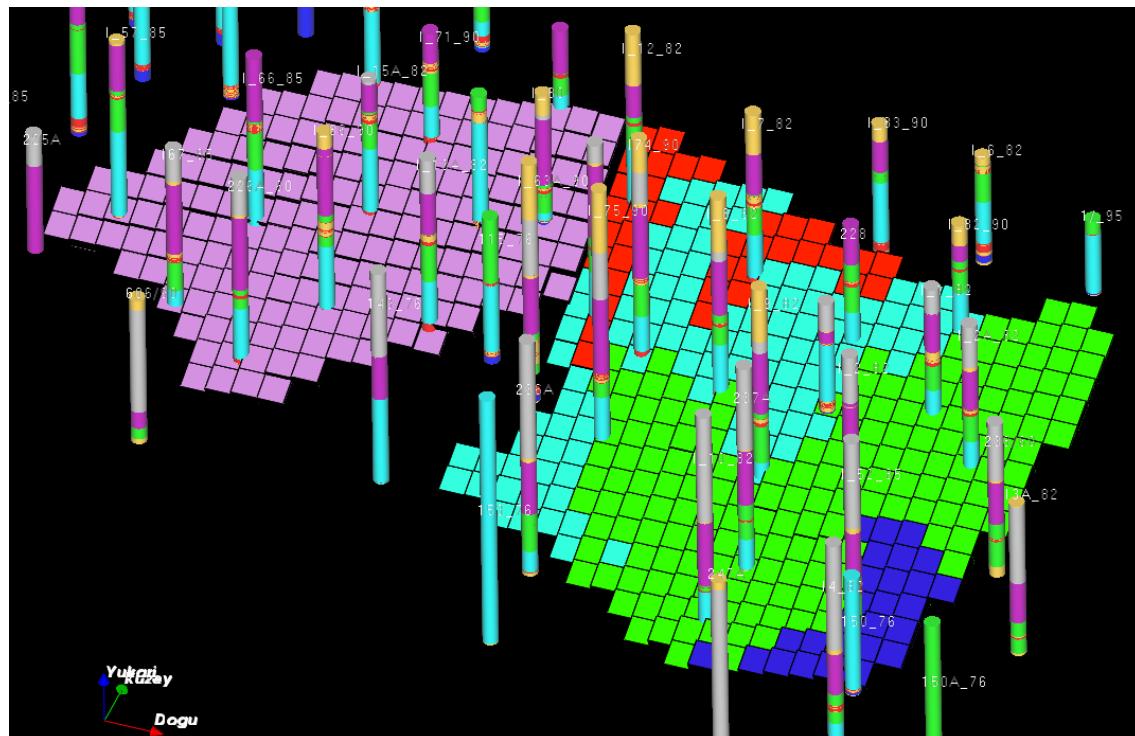
Metal madenlerinde üstte verilen modelleme yaklaşımları yanında metal tenörü de dikkate alınır. Cevher sınırları, ekonomik metal tenörüne göre belirlenip bu tenörün üstündeki kaynaklar cevher olarak alınır. Metal madenlerinin jeolojik katı modellemesinde yalnızca ekonomik tenörün dikkate alındığı yaklaşımlar da vardır (Örneğin Covas et. al. [6]). Burada sınır tenöre bağlı olarak cevher sınırları belirlenir. Sınır tenör pek çok parametreye bağlı olduğu için bu tür yöntemlere ihtiyyatla yaklaşmak gereklidir.

Jeolojik katı modelleme yapılan bir uygulamada her iki yönteme ilişkin araçların olması gereklidir. Bu araçlar kesit alma, fay modelleme ve farklı içkestirim yöntemleri ile desteklenmelidir. Kırık kesitler alınabilmeli, fay düzlemleri jeolojik katı modellemeden sonraki uygulamalarda kullanılabilir, içkestirimde en yakın değer yöntemi, uzaklığın tersi ile ağırlıklandırma yöntemi ve krigleme yöntemi uygulanabilmelidir.

4. BLOK MODELLEME

Blok modelleme, katı model içinde cevher kalitesinin değişimine yönelik bir modellemedir. Bu amaçla katı model bloklara ayrılır, her bloğun ortalama tenör değeri içkestirim ya da benzetim yöntemi ile hesaplanır. Blok boyutları ve şekli sabit olabileceği gibi değişken de olabilir. Blok tenörleri, en yakın komşu, ters uzaklık ve jeoistatistiksel yöntemlerle kestirilebilir. Jeoistatistik yöntemler ortalamalı krigleme,

ortalamasız krigleme, eşkrigleme gibi doğrusal teknikleri içerebileceği gibi indikatör krigleme gibi doğrusal omayan teknikleride içerebilir. Benzetim yöntemleri olarak ardışık normal ve ardışık indikatör benzetimler gözönüne alınabilir. Bunlara ek olarak benzetim öncesi ve sonrası işlemlere ilişkin araçlara gereksinim duyulabilir.



Şekil 4. Blok modelleme. Soldaki model, içkestirimin yapılmadığı sağdaki ise içkestirimin yapıldığı blokları göstermektedir.

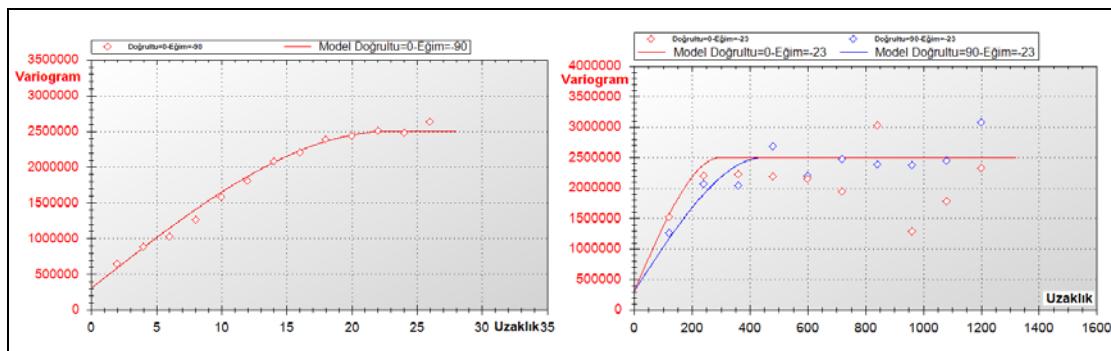
Şekil 4, içkestirim yapılan ve yapılmayan blok modelleri göstermektedir. İç kestirimde ortalamasız krigleme teknigi kullanılmıştır. Gerek içkestirim gerekse benzetim için değişkenin uzaklığa bağlı değişimlerini üç boyutta modelleyen variogram analizlerine gereksinme vardır. Blok modelleme araçları variogram modelleme yapan araçları içermelidir. Bu araçlar, deneysel variogramları hesaplayabileceği gibi modellerde üretebilmelidir. Şekil 5, düşey ve yatay yönlerde hesaplanan deneysel ve model variogramları göstermektedir.

Variogram araçları küresel, yuvalı yapı, üstel, Gaussian gibi temel modelleri desteklemeli ayrıca uzaklığa bağlı değişkenlik, variogram yanında kovaryans, koreogram ve çapraz variogram gibi araçlarla ölçülebilmelidir.

Blok modelleme uygulamaları, variogram model parametrelerinin tutarsız olmadığını test eden çapraz doğrulama gibi teknikleri içermelidir.

5. MİNERAL KAYNAK KESTİRİMİ

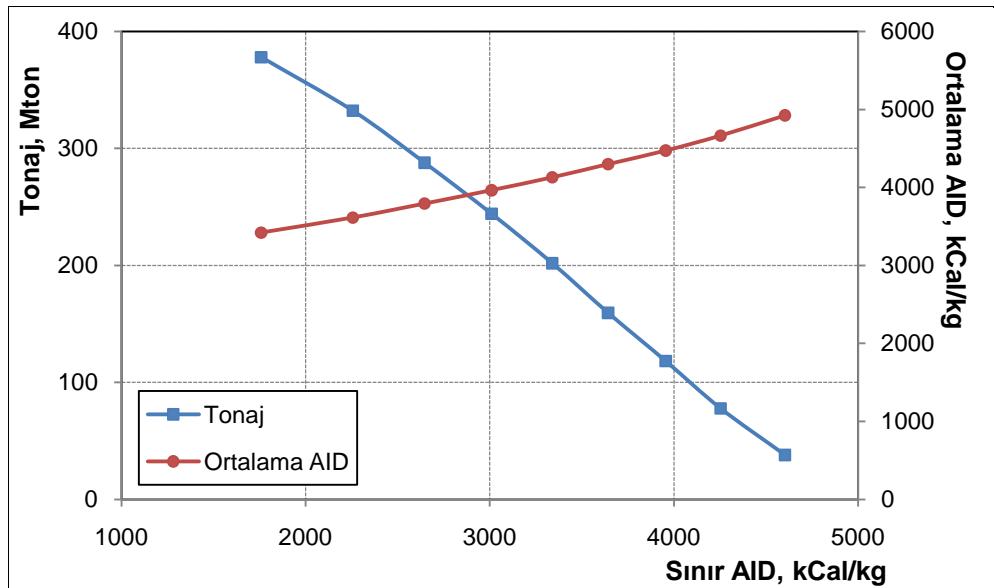
Kaynak terimi çoğu zaman rezerv terimi ile karıştırılmaktadır. Mineral kaynağı, yerkabuğu üzerinde yada içinde bulunan, ekonomik öneme sahip bir zuhur yada konsantrasyondur. Bu zuhur yada konsantrasyondan, nihai aşamada ekonomik olarak üretilebilecek şekil ve miktar belirlenir. Rezerv, kaynağın ekonomik olarak işletilebilir bölümündür. Madenin üretiminde olacak kayıpları ve seyrelmeleri de içerir. Diğer bir ifade ile maden kaynağı terimi, arama ve örneklemme ile tanımlanan ve kestirilen cevherleşmeyi, maden rezervi ise bu cevherleşme içinde madencilikle ilgili faktörlerin gözönüne alınmasıyla elde edilen varlığı ifade eder.



Şekil 5. Düşey (solda) ve yatay (sağda) yönlerde hesaplanan deneyel ve model variogramlar.

Mineral kaynağı genellikle cevher miktarı (tonaj) ve bunun ortalama kalitesi (tenör) ile karakterize edilir. Bu parametreler aynı zamanda sınır tenöre bağlıdır. Sınır tenör arttıkça tonaj azalır, ortalama tenör artar. Tonaj ve ortalama tenörün sınır tenörün bir fonksiyonu olarak grafiksel gösterimi tenör-tonaj eğrisi (Şekil 6) olarak bilinir.

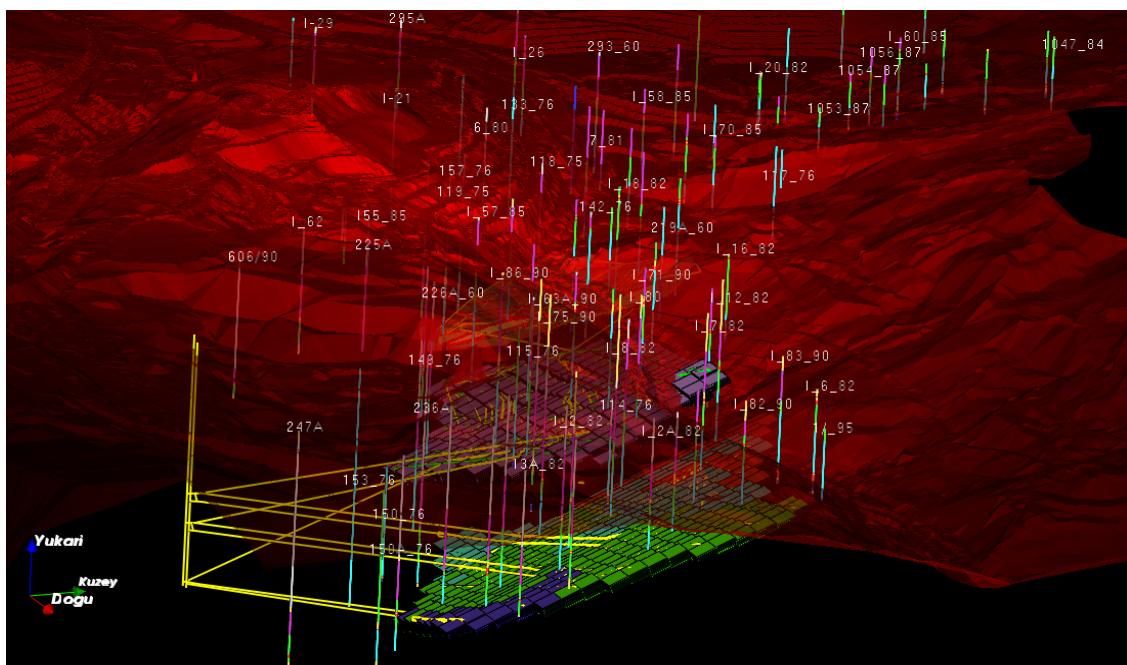
Standart bir cevher yatağı modelleme programı blok modelden tonaj, ortalama tenör ve tenör-tonaj eğrisi gibi raporları üretebilmelidir. Uygulamada tonaj hesaplanırken sabit bir yoğunluk değeri kullanılır. Bununla birlikte yoğunluk cevherin kalitesine bağlıdır. Örneğin bir demir cevheri yatağı için cevherin Fe içeriği değişirken yoğunluğun da değişmesi kaçınılmazdır. Benzer şekilde kömürde ıslı değer ile yoğunluk arasında ters bir ilişki vardır. Bu nedenle modelleme uygulamaları, tonaj raporu alınırken yoğunluğun kaliteye bağlı olarak değişimini dikkate alan araçları içermesi gereklidir.



Şekil 6. Tipik bir kalite-tonaj eğrisi.

6. YER ALTI OCAK TASARIMI

Bir yeraltı ocak işletmesi ayak, taban yolları, galeri ve kuyu gibi maden yatağını yüzeye bağlayan her türlü açılığın toplamı şeklinde düşünülebilir. Şekil 7, bir kömür madeninde tasarılmış kuyu, galeri ve taban yollarını göstermektedir.

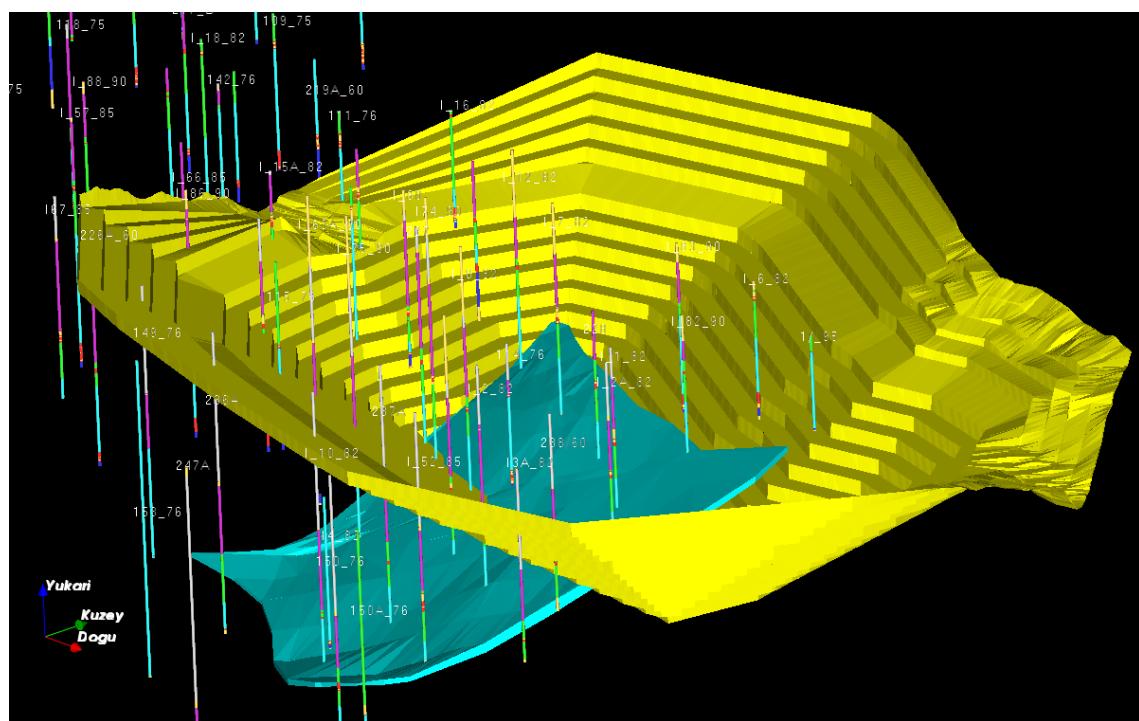


Şekil 7. Yer altı ocak tasarımı.

Bunun için bu açıklıklar, uygun koordinatlar ile tanımlanabilmeli, içersinde yer alan her çeşit altyapı elemanı (bant konveyör, enerji hattı, basınçlı hava borusu ve su borusu vb) modellenebilmeli ve bunların geometrik özellikleri (metrajları) alınabilmelidir. Ayrıca havalandırma şebeke analizi yapabilmeli, nakliyat sistemi planlanabilmeli ve patlatma tasarımı yapılabilmelidir.

7. YERÜSTÜ OCAK TASARIMI

Açık ocak tasarımında yatay ve düşey güzergah tanımları yapılabilmeli, yol güzergahının profili tanımlanabilmeli, platform ve şev tanımları yapılabilmelidir. Şablon platform tanımları hazır olmalı, istendiğinde bu şablon platformlar seçilebilmelidir. Tasarlanan yol, enkesit ve yüzey haline getirilebilmelidir. Şekil 8, klasik bir açık ocak tasarımını göstermektedir.



Şekil 8. Yerüstü ocak tasarımı.

8. SONUÇ

Cevher yatağı modelleme ve ocak tasarımlı, temel olarak veri tabanı oluşturma, jeolojik katı modelleme, blok modelleme, kaynak/rezerv kestirimi, yeraltı/yerüstü ocak tasarımlı süreçlerinden oluşmaktadır. Standart bir jeoloji ve maden modelleme yazılımının bu süreçleri bütünlüğe getirmesi ve bütünlük bu yazılımların madencilik şirketlerinin 3-B görselleştirme, hız ve güvenilirlik gibi gereksinimlerini karşılayacak araçlara sahip olması gereklidir. Gelecekte bu tür yazılımların ne yönde evrileceğine modellemede belirsizliğin en çok olduğu süreçler etkileyecektir. Şu anda modelleme sürecinde en büyük belirsizlik jeolojik yorumlamadan ortaya çıkmaktadır. Gelecekte jeolojik yorumlama sürecinde yazılımların daha çok rol üstleneceği açıktır.

9. KATKI BELİRTME

Bu çalışma 108G036 nolu TÜBİTAK-KAMAG Projesi kapsamında desteklenmiştir.

10. KAYNAKÇA

- [1] Sides, E.J., (1997), Geological Modelling of Mineral Deposits for Prediction in Mining, *Geol Rundsch*, 86: 342-353.
- [2] Henley, S. (1998), Mining software and computing into the next milenium, *APCOM 1998*, London, 337-354.
- [3] Mallet, J.L. (2002), *Geomodelling*, Applied Geostatistics, Oxford University Press, New York.
- [4] Turner, A.K. (2006), Challenges and Trends for Geological Modelling and Visualisation, *Bull. Eng. Geol. Env.*, 65:109-127.
- [5] Caumon, G., Collon-Drouaillet, P., ve Sausse, J. (2009), Surface-Based 3D Modeling of Geological Structures, *Math. Geosci.* 41: 927-945.
- [6] Covell, E.J., Beatson, R.K., Ross, H.J. (2003), Practical Implicit Geological Modelling, *5th International Mining Geology Conference*, Bendigo, 89-99.

POLİGONLAR İÇİN FARKLI KESİNTİSİZ DÖNÜŞÜM YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Hacer İlhan ^(a), Zümra Kavafoğlu ^(b), Haşmet Gürçay ^(c)

^(a) Hacettepe Üniversitesi, Matematik Bölümü, Ankara, hacerilhan@hacettepe.edu.tr

^(b) Hacettepe Üniversitesi, Matematik Bölümü, Ankara, zdemir@hacettepe.edu.tr

^(c) Hacettepe Üniversitesi, Matematik Bölümü, Ankara, gurcay@hacettepe.edu.tr

ÖZ

Bu çalışmada, bir kaynak poligonun başka bir hedef poligona aşamalı olarak düzgün sürekli dönüşümü için kullanılan üç farklı kesintisiz dönüşüm yöntemi incelenmiştir. İlk yöntem, ara poligonlar olarak kaynak ve hedef poligonların simetrik farklarının budanmış iskeletlerini kullanmayı esas alır. Diğer yöntemlerden farklı olarak, iskelet tabanlı kesintisiz dönüşüm yönteminde tanımlanan ara poligon üretme işlemi, ara poligonların bir dizisini bulmak için özyineli olarak uygulanır. İkinci yöntem, problemi uyumlu düzlemsel üçgenleştirmelerin kesintisiz dönüşümü problemine dönüştürür ve daha sonra düzlemsel üçgenleştirmelerin köşelerinin komşularına göre barisentrik koordinatları ile oluşturulan matris gösterimlerinden yararlanır. Üçüncü yöntem, poligonları tahmini Fourier parametrelerine dayanan parametrik eğri gösterimi ile tanımlar ve böylece kesintisiz dönüşüm işlemini Fourier parametrik uzayına taşır. Bu yöntemlerin farklı özellikleri ve karşılaştırmalı sonuçları, değişik örneklerle yapılan testler ile gösterilmiştir. Bu çalışmada belirtilen üçüncü yöntem TÜBİTAK tarafından desteklenen Madencilik Otomasyon ve Tasarım Yazılımı (MOTAY) Geliştirme Projesi kapsamında karşılaşılan özel bir problem için kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fourier parametreleştirme, İskeletler, Kesintisiz dönüşüm, Poligonlar, Uyumlu üçgenleştirme.

THE COMPARISON OF THE DIFFERENT POLYGON MORPHING METHODS

ABSTRACT

In this work, three different morphing methods which are used for gradually smooth and continuous transformation of one source polygon into another target polygon are examined. The first method is based on utilization of the trimmed skeleton of the symmetric difference of the source and target polygons as an intermediate polygons.

Differently from other methods, the process described in the method of skeleton-based polygon morphing for generation an intermediate shape is applied recursively to produce any number of intermediate polygons. The second method reduces the problem to the problem of morphing compatible planar triangulations and utilizes the representation of planar triangulations as a matrix constructed using barycentric coordinates of the planar triangulations vertices relative to their neighbors. The third method describes the polygon by the parametric curve representation based on estimated Fourier parameter and thus transfer the morphing process to the Fourier parametric space. The different features and comparative results of these methods are showed by the tests with the different examples. The third method defined in this work is used for a specific problem faced as part of MOTAY Project supported by TUBİTAK.

Keywords: Fourier parameterization, Skeletons, Morphing, Polygons, Compatible triangulation.

1. GİRİŞ

Kesintisiz dönüşüm ya da başkalaşım, bir kaynak nesnenin başka bir hedef nesneye aşamalı olarak düzgün sürekli dönüşümür. Kesintisiz dönüşüm işlemi, bilgisayar grafiği ve animasyonu, modelleme, film, televizyon, endüstriyel tasarım gibi kullanım alanlarına sahip olmakla beraber yüksek derecede doğruluğun gerektiği biyomedikal alanında da önemli bir rol oynamaktadır.

Kesintisiz dönüşüm problemi, görüntü tabanlı ve nesne-uzay tabanlı olmak üzere iki farklı tekniği içerir. Görüntü tabanlı kesintisiz dönüşüm tekniğinde, kaynak ve hedef nesnenin geometrik şekilleri önemli ölçüde aynı olmazsa işlemler kullanıcı müdahalesi gerektirebilir. Bu teknikte, iki boyutta düzlemsel görüntüler, üç boyutta ise hacimsel veriler ele alınmaktadır. Nesne-uzay tabanlı kesintisiz dönüşüm tekniğinde ise, nesnelerin açık gösterimi kullanılmaktadır. Bu teknikte iki boyutta poligonlar, parçalı doğrusal eğriler, serbest çizimli eğriler, üç boyutta ise çokyüzlüler ele alınmaktadır.

Kesintisiz dönüşüm işlemi, her zaman birbirinden bağımsız iki ardışık temel problemden oluşur. İlk problem, nokta eşleme problemi olarak adlandırılır ve iki nesnenin gösterimlerinin geometrik öğeleri arasında eşleme bulmayı amaçlar. İkinci problem, nokta yolu problemi olarak adlandırılır ve karşılıklı eşlenen elemanların birbirlerine doğru hareket ederken izleyecekleri yörüngeleri bulmayı amaçlar.

Nokta eşleme probleminin çözümünün sonuçları, kesintisiz dönüşüm işleminin sonucunu çok büyük oranda değiştirecek etkiye sahiptir. Genellikle nokta eşleme problemi, kısmi veya tam kullanıcı müdahalesi gerektirir ya da deneye dayalı algoritmalarla desteklenebilir.

Nokta yolu probleminin çözümüne en sade yaklaşım, yörunge olarak düz doğru kullanmaktadır. Bu durumda ilk nesnenin her bir geometrik ögesi, ikinci nesnenin karşılık gelen geometrik ögesine doğru sabit hızla dönüşür. Bu yaklaşımla üretilen kesintisiz dönüşüm doğrusal kesintisiz dönüşüm denir. Fakat bu basit yaklaşım, oluşması gereken ara nesnelerin kaybolması yani tek noktadan oluşması, kendini kesmesi, hedef ve kaynak nesneye benzememesi gibi istenmeyen sonuçlara neden olabilir.

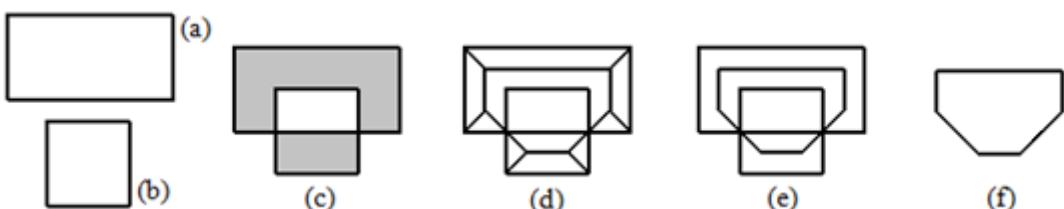
Kesintisiz dönüşüm problemi bir çok farklı yaklaşım ile ele alınmıştır. Bu farklı yöntemler [1], [2], [3], [4], [5], [7] çalışmalarında incelenmiştir. Kesintisiz dönüşüm fonksiyonu tek değildir fakat kısıtlamalar getirilerek bazı özelliklere sahip olunması beklenir. Örneğin, hedef poligon ara poligonlarla kaynak poligona kesintisiz dönüşürken, poligonların alanlarının da sürekli olarak değişmesi istenir. Ayrıca kaynak ve hedef poligonlar kapalı ve basit ise ara poligonların da kapalı ve basit olması gereklidir.

2. POLİGONLARIN KESİNTİSİZ DÖNÜŞÜMÜ

Verilen P_0 ve P_1 poligonlarının kesintisiz dönüşümü, P_0 kaynak poligonunun P_1 hedef poligonuna aşamalı olarak düzgün sürekli dönüşümüdür. Bu dönüşüm $0 \leq t \leq 1$ olmak üzere $\mathcal{P} : t \rightarrow P_t$ sürekli fonksiyonu olarak tanımlanırsa, $\mathcal{P}(0) = P_0$ kaynak poligonu, $\mathcal{P}(1) = P_1$ hedef poligonu ve her $0 < t < 1$ için $\mathcal{P}(t) = P_t$ ise ara poligonları verir. Ayrıca $t \rightarrow 0$ iken $\mathcal{P}(t) = P_t$ ara poligonu $\mathcal{P}(0) = P_0$ kaynak düzlemsel üçgenleştirmesine ve $t \rightarrow 1$ iken $\mathcal{P}(t) = P_t$ ara poligonu $\mathcal{P}(1) = P_1$ kaynak düzlemsel üçgenleştirmesine benzer.

2.1. İskelet tabanlı kesintisiz dönüşüm

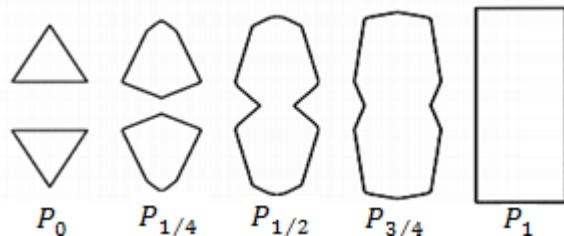
İskelet tabanlı kesintisiz dönüşüm yöntemi [2], kaynak ve hedef poligonların simetrik farklarının iskeletlerini kullanmayı esas alır. Bir şeklin iskeleti [6], şeklin en az iki sınır noktasına eşit uzaklıkta bulunan iç noktaların geometrik yeridir ya da başka bir ifadeyle, şeklin sınırlarının en az iki noktasına temas eden ve şeklin içine sıkıştırılan en büyük boyutlu çemberlerin merkez noktalarının kümesidir ve orta eksen olarak da bilinir. Şekil 1 (d)'de simetrik farkın bir iskeleti görülmektedir.



Şekil 1. İskelet tabanlı kesintisiz dönüşüm yöntemi adımları

Kesintisiz dönüşüm işlemi ile kaynak poligon hedef poligona düzgün sürekli dönüşürken ortadaki adımda yer alan ara poligonun sınır noktalarının, kaynak ve hedef

poligonun karşılık gelen sınır noktalarından neredeyse aynı uzaklıkta olması beklenīinden, kaynak ve hedef poligonların simetrik farklarının iskeleti, ortadaki adımda yer alan ara poligonu oluşturmak için kullanılabilir.

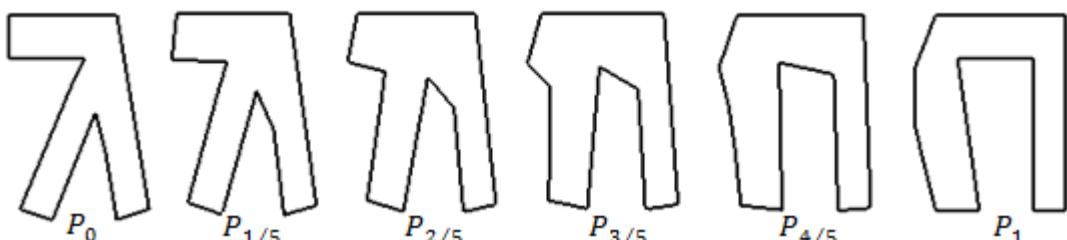


Şekil 2. Iskelet tabanlı kesintisiz dönüşüm yöntemi

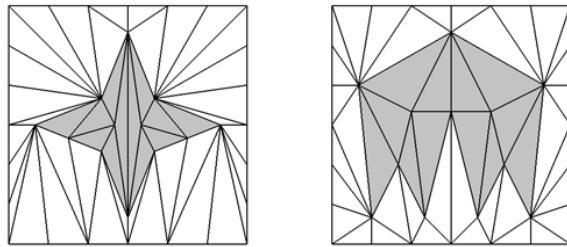
Iskelet tabanlı kesintisiz dönüşüm yönteminde, ilk önce $\mathcal{P}(0) = P_0$ kaynak poligonu ve $\mathcal{P}(1) = P_1$ hedef poligonu kullanılarak $\mathcal{P}(1/2) = P_{1/2}$ ara poligonu üretilir. Bunun için ilk önce iki poligonun simetrik farkının iskeleti alınır [6]. Simetrik farkın en az iki sınır noktasına eşit uzaklıkta bulunan iç noktaların geometrik yerinden oluşan iskeletten, yalnız bir poligonun en az iki sınır noktasına eşit uzaklıkta bulunan noktaların geometrik yerleri çıkartılarak iskeleti budama işlemi yapılır. Bu adımlar şekil 1'de görülmektedir. Bu şekilde yapılan budama sonucunda iskelet üzerinde her iki poligona da eşit uzaklıkta bulunan noktalar kalır. Elde edilen budanmış iskelet ise $\mathcal{P}(1/2) = P_{1/2}$ ara poligonu olarak alınır. Daha sonra benzer şekilde, $\mathcal{P}(0) = P_0$ ve $\mathcal{P}(1/2) = P_{1/2}$ poligonları kullanılarak $\mathcal{P}(1/4) = P_{1/4}$ ara poligonu ve ayrıca $\mathcal{P}(1/2) = P_{1/2}$ ve $\mathcal{P}(1) = P_1$ poligonları kullanılarak $\mathcal{P}(3/4) = P_{3/4}$ ara poligonu üretilir ve bu şekilde özyineli olarak istenilen ara poligonlar üretilir.

2.2. Uyumlu düzlemsel üçgenleştirmelerle kesintisiz dönüşüm

Poligonların kesintisiz dönüşümü problemini ortak dışbükey sınırlı ve uyumlu düzlemsel üçgenleştirmelerin kesintisiz dönüşümü problemine dönüştürerek çözmek, poligonların kesintisiz dönüşümü için kullanılan yöntemlerden biridir [5], [8], [9].



Şekil 3. Uyumlu düzlemsel üçgenleştirmelerle kesintisiz dönüşüm yöntemi

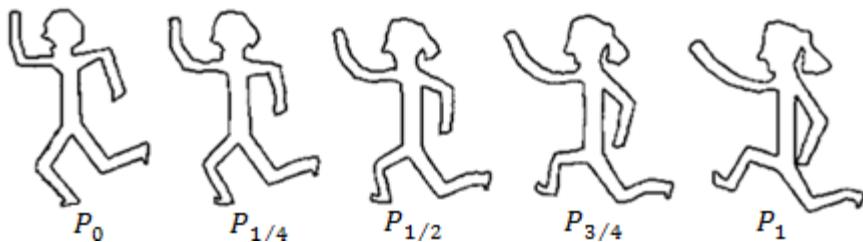


Şekil 4. Uyumlu düzlemsel üçgenleştirmeler

Uyumlu düzlemsel üçgenleştirmelerle kesintisiz dönüşüm yönteminde, $0 \leq t \leq 1$ olmak üzere $\mathcal{P} : t \rightarrow P_t$ sürekli kesintisiz dönüşüm fonksiyonu oluşturmak için ilk önce $\mathcal{P}(0) = P_0$ kaynak ve $\mathcal{P}(1) = P_1$ hedef poligonlarının iç bölgeleri uyumlu üçgenleştirilir. Daha sonra elde edilen uyumlu üçgenleştirilmiş $\mathcal{P}(0) = P_0$ ve $\mathcal{P}(1) = P_1$ poligonları, sırasıyla birbirinin aynı olan dışbükey Q_0 ve Q_1 poligonları ile çevrelenir ve sırasıyla Q_0 ve P_0 poligonları ve Q_1 ve P_1 poligonları arasında kalan halka şekilli bölgeler uyumlu üçgenleştirilir (Şekil 4). Elde edilen ortak dışbükey sınırlı düzlemsel üçgenleştirmeler, düzlemsel üçgenleştirmelerin köşelerinin komşularına göre barisentrik koordinatları ile oluşturulan komşuluk matrisleri kullanılarak kesintisiz dönüştürülür. İstenilen adımdaki ara üçgenleştirmelerin $\mathcal{P}(0) = P_0$ ve $\mathcal{P}(1) = P_1$ poligonlarına karşılık gelmeyen kenarları kaldırılarak istenilen adımdaki ara poligonlar üretilir.

2.3. Fourier parametreleştirmesiyle kesintisiz dönüşüm

Fourier parametreleştirmesiyle kesintisiz dönüşüm yöntemi [3], kesintisiz dönüşüm işlemini Fourier parametrik uzayına taşıyarak problemi daha basit bir yaklaşımla çözmeyi amaçlar.



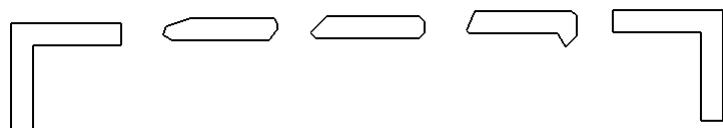
Şekil 5. Fourier parametreleştirmesiyle kesintisiz dönüşüm

Fourier parametreleştirmesiyle kesintisiz dönüşüm yönteminde, ilk önce $\mathcal{P}(0) = P_0$ kaynak ve $\mathcal{P}(1) = P_1$ hedef poligonları karşılıklı eşlenen elemanları ile karşılıklı eşlenen parçalara ayrılır. Karşılıklı eşlenen her bir poligon parçasına koordinat dönüşümü uygulanır ve bu parçaların noktalarının eğriliklerine göre düzenleme yapılır. Daha sonra karşılıklı eşlenen her poligon parçasına Fourier parametreştirmeleri ile yaklaşılır ve Fourier parametreleri doğrusal olarak kesintisiz dönüştürülerek istenilen

adımdaki ara poligonun Fourier parametreleri ile yaklaşımı ve dolayısıyla istenilen adımdaki poligonlar elde edilir.

2.4. Kesintisiz dönüşüm yöntemlerinin karşılaştırmalı sonuçları

İskelet tabanlı kesintisiz dönüşüm yönteminde, diğer iki kesintisiz dönüşüm yöntemlerinden farklı olarak ara şekiller özyineli olarak oluşturulmaktadır ve nokta eşleme problemine kesintisiz dönüştürülecek poligonların üst üste yerleştirilmesi dışında ihtiyaç yoktur. Ayrıca iskelet tabanlı kesintisiz dönüşüm yönteminde aynı kaynak ve hedef poligonlar farklı birleştirilerek farklı sonuçlar elde edilebilir ve Şekil 2'de görüldüğü gibi topolojik olarak farklı poligonal bölgeler de bu yöntem ile kesintisiz dönüştürülebilir. Ancak bu yöntem ile kesintisiz dönüşüm işlemi sırasında poligonların boyutlarının diğer yöntemlere göre daha az korunduğu karşılaştırmalı olarak Şekil 6, Şekil 7'te görülmektedir.



İskelet tabanlı kesintisiz dönüşüm



Uyumlu düzlemsel üçgenleştirmelerle kesintisiz dönüşüm

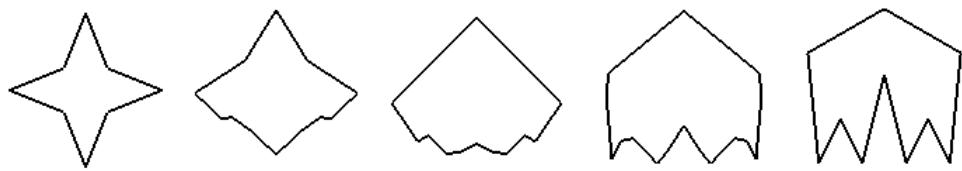


Fourier parametreleştirmeyle kesintisiz dönüşüm

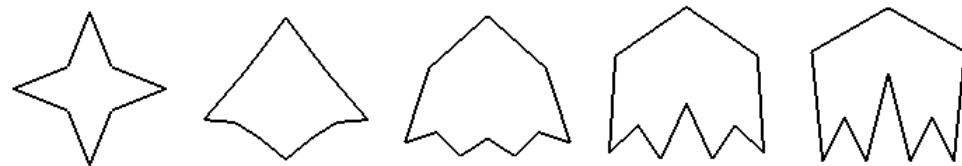
Şekil 6. Yöntemlerin karşılaştırılması

Fourier parametreleştirmeyle kesintisiz dönüşüm yönteminde ise, Şekil 7'da görüldüğü gibi eğer hedef poligon kaynak poligonun döndürme ve ötelemesi ile oluşuyorsa, her adımdaki ara poligon da kaynak poligonun bir döndürme veya bir ötelemesi ile oluşur.

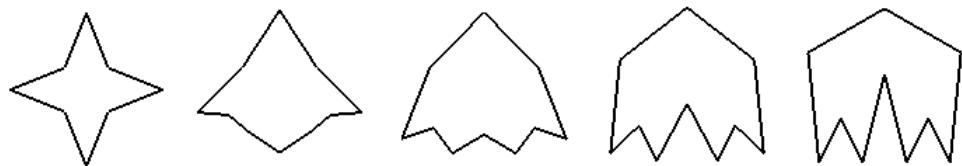
İncelenen üç kesintisiz dönüşüm yönteminde de, kaynak ve hedef poligonlar basit ise, tüm ara poligonlar da basittir yani kendi ile kesişmez.



İskelet tabanlı kesintisiz dönüşüm



Uyumlu düzlemsel üçgenleştirmelerle kesintisiz dönüşüm

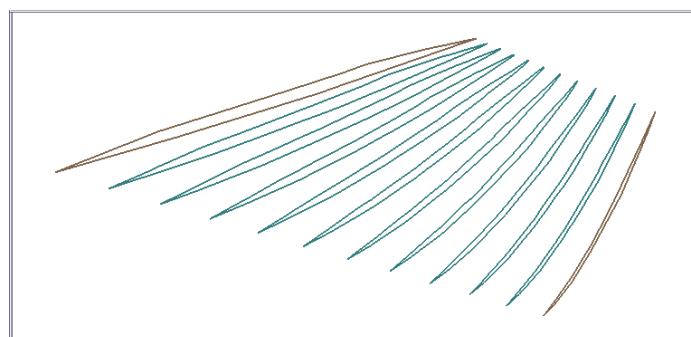


Fourier parametreleştirmesiyle kesintisiz dönüşüm

Şekil 7. Yöntemlerin karşılaştırılması

3. POLİGONLARIN KESİNTİSİZ DÖNÜŞÜM YÖNTEMİNİN ÖZEL BİR UYGULAMASI

Bu çalışmada, Fourier parametreleştirmesiyle kesintisiz dönüşüm yönteminden faydalananlarak, TÜBİTAK tarafından desteklenen Madencilik Otomasyon ve Tasarım Yazılımı (MOTAY) Geliştirme Projesi kapsamında karşılaşılan özel bir problem için, VTK (The Visualization Toolkit) yazılım sisteminin bileşenleri ve C++ programlama dili kullanılarak bir algoritma hazırlanmıştır.

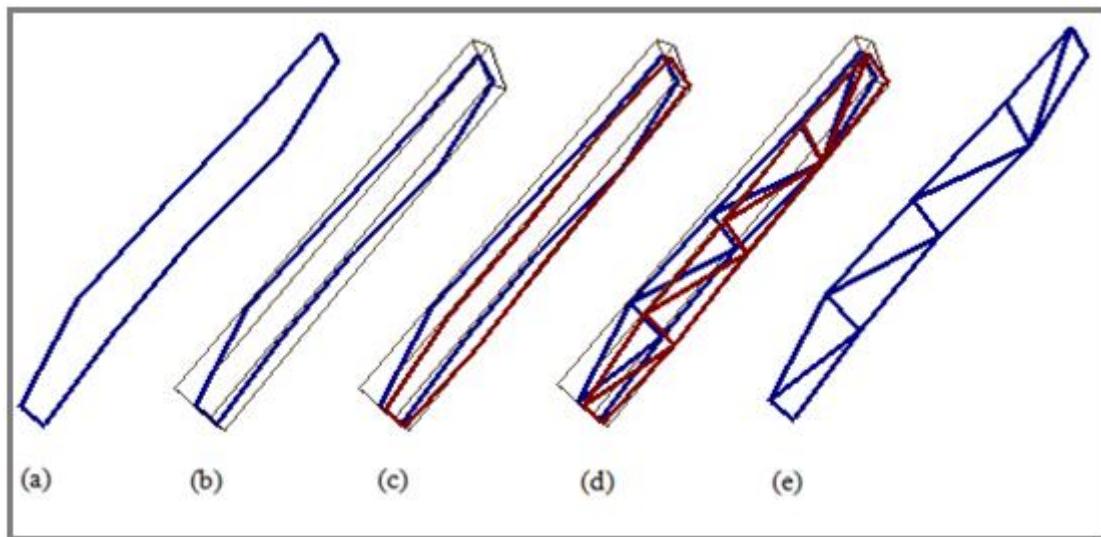


Şekil 8. Cevher kesitleri ve kesintisiz dönüşüm ile üretilen ara cevher kesitleri

Cevher kesitleri arasında üç boyutlu hacim oluşturulurken karşılaşılan problemlerden biri cevher kesitlerinin birbirlerine uzak konumlarda bulunması durumunda ortaya çıkmaktadır. Bu durumda cevher kesitleri kesintisiz dönüştürülerek, ara cevher kesitleri Şekil 8'de görüldüğü gibi oluşturulmuştur.

Verilen C_0 ve C_1 cevher kesitlerinin kesintisiz dönüşümü, $0 \leq t \leq 1$ olmak üzere $\mathcal{C} : t \rightarrow C_t$ sürekli fonksiyonu olarak tanımlanırsa, $\mathcal{C}(0) = C_0$ kaynak cevher kesiti, $\mathcal{C}(1) = C_1$ hedef cevher kesiti ve her $0 < t < 1$ için $\mathcal{C}(t) = C_t$ ise ara cevher kesitleri verecektir.

Cevher kesitlerinin kesintisiz dönüşümünde, poligonların Fourier parametreleştirmesiyle kesintisiz dönüşüm yönteminden yararlanmak için, ilk önce cevher kesitleri üçgenleştirilecektir. Bir cevher kesitini üçgenleştirmek için, vtkOBBTree sınıfı kullanılarak cevher kesitinin yönlü sınırlayan kutuları (oriented bounding box) oluşturulur (Şekil 9 (a)). Yönlü sınırlayan kutu yüzlerinden, cevher kesitinin kendini kesmeden izdüşüğü bir yüzü seçilir ve cevher kesitinin bu yönlü sınırlayan kutu yüzündeki izdüşüm poligonu vtkDelaunay2D sınıfı kullanılarak üçgenleştirilir. Düzlemsel bölgedeki bu izdüşüm üçgenleştirimesi ve bu üçgenleştirmedeki nokta ilişkileri bozulmadan tekrar üç boyutlu uzaydaki cevher kesitine taşınır. Cevher kesitlerinin üçgenleştirilmesi için uygulanan adımlar Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 9. Cevher kesitlerinin üçgenleştirilmesi için uygulanan adımlar

Şimdi, C_0 ve C_1 cevher kesitlerinin yönlü sınırlayan kutuları sırasıyla K_0 ve K_1 , üçgenleştirmeleri sırasıyla T_0 ve T_1 olsun. Burada, C_0 cevher kesitinin T_0 üçgenleştirmesini oluşturan s adet üçgenin normalleri $n_0^0, n_0^1, \dots, n_0^s$ olmak üzere, $n_0 = (n_0^0 + n_0^1 + \dots + n_0^s)/s$ normali, ve benzer şekilde C_1 cevher kesitinin T_1 üçgenleştirmesini oluşturan t adet üçgenin normalleri $n_1^0, n_1^1, \dots, n_1^t$ olmak üzere,

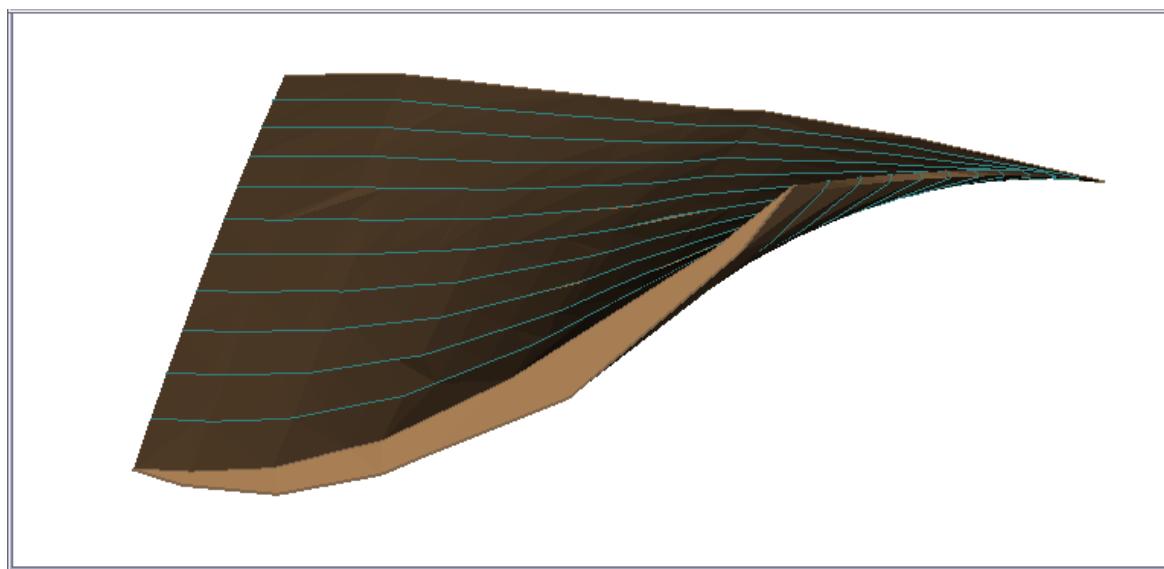
$n_1 = (n_1^0 + n_1^1 + \dots + n_1^t)/t$ normali oluşturular. Normali n_0 vektörü olan bir doğru ile minimum açı yapan K_0 yönlü sınırlayan kutu yüzü D_0 ve normali n_1 vektörü olan bir doğru ile minimum açı yapan K_1 yönlü sınırlayan kutu yüzü D_1 seçilir. Daha sonra, C_0 ve C_1 cevher kesitlerinin sırasıyla D_0 ve D_1 düzlemlerindeki izdüşüm poligonları üç boyutlu uzaydan iki boyutlu uzaya taşınarak, P_0 ve P_1 poligonları oluşturulur.

Oluşturulan P_0 ve P_1 poligonlarının nokta eşleme problemi için ilk olarak, poligonların sol üst köşelerindeki noktalar eşlenir ve bu noktalar başlangıç kabul edilerek, saat tersi yönünde döndürerek poligonlar çevre uzunluklarıyla orantılı uzunluklarda ve eşit sayıda parçaya ayırılır ve böylece karşılıklı eşlenen noktalar oluşturulur.

Daha sonra $0 \leq t \leq 1$ olmak üzere $\mathcal{P} : t \rightarrow P_t$ sürekli kesintisiz dönüşüm fonksiyonu oluşturmak için ilk önce P_0 ve P_1 poligonları tek bir parça halinde eliptik Fourier tanımlayıcısı (descriptor) ile parametrik uzaya taşınır. Parametrik uzayda Fourier katsayıları doğrusal olarak kesintisiz dönüştürüldükten sonra istenilen adımdaki ara poligonun Fourier parametreleri ile yaklaşımı ve dolayısıyla istenilen adımdaki poligonlar elde edilir.

Son olarak, D_0 ve D_1 yüzlerinin merkezleri sırasıyla m_0 ve m_1 ve ayrıca oluşturulacak ara cevher kesiti sayısı S olmak üzere, istenilen t . adımdaki C_t ara cevher kesitini bulmak için, t . adımdaki P_t poligonu, normali $n_t = ((S-s+1)/(S+1)) \cdot n_0 + (s/(S+1)) \cdot n_1$ vektörü ve merkezi $m_t = ((S-s+1)/(S+1)) \cdot m_0 + (s/(S+1)) \cdot m_1$ noktası olan düzleme taşınır. Şekil 8'de kesintisiz dönüştürülen cevher kesitleri ve sonucunda oluşturulan 10 adet ara cevher kesiti görülmektedir.

Şekil 10'da cevher kesitleri, kesintisiz dönüşüm ile üretilen ara cevher kesitleri ile beraber üç boyutlu hacimleştirilmiştir.



Şekil 10. Cevher kesitlerinden hacim oluşturma

4. SONUÇ

Poligonlar için kullanılan iskelet tabanlı kesintisiz dönüşüm yöntemi, Fourier parametreleşirmesiyle kesintisiz dönüşüm yöntemi ve uyumlu düzlemsel üçgenleştirmelerle kesintisiz dönüşüm yöntemi incelenerek ve karşılaştırmalı testleri yapılarak, TÜBİTAK tarafından desteklenen Madencilik Otomasyon ve Tasarım Yazılımı (MOTAY) Geliştirme Projesi kapsamında karşılaşılan daha özel bir kesintisiz dönüşüm problemi için kullanılmak üzere, uygun bir algoritma hazırlanmıştır.

5. KAYNAKÇA

- [1] Alexa, M., Cohen-Or, D. ve Levin, D. (2000). As-rigid-as-possible polygon morphing, In proceedings of SIGGRAPH 2000, (New Orleans, La.), ACM, New York, 157-164.
- [2] Blanding, R.L., Turkiyyah, G.M., Storti, D.W. ve Ganter, M.A. (2000), Skeleton-based three-dimensional geometric morphing, Computational Geometry, 15, 129-148.
- [3] Chen, D.H. ve Sun, Y.N. (2001), Boundary based parametric polygon morphing, IEICE Trans. Inf. & Syst, E84-D (4)
- [4] Goldstein, E. ve Gotsman C. (1995), Polygon morphing using a multiresolution representation, In Proceedings of Graphics Interface (Quebec City, Que., Canada), Morgan Kaufman, 246-254.
- [5] Gotsman, C. ve Surazhsky V. (2001), Guaranteed intersection-free polygon morphing, Computers & Graphics, 25 (1), 67-75.
- [6] Mortara, M. ve Spagnuolo, M. (2001), Similarity measures for blending polygonal shapes, Computers & Graphics 25, 13-27.
- [7] Shapira, M. ve Rappoport A. (1995), Shape blending using the star-skeleton representation, EEE Trans. on Computer Graphics and Application, 15 (2), 44-51.
- [8] Surazhsky, V. ve Gotsman C. (2001), Controllable morphing of compatible planar triangulations, ACM Transactions on Graphics, 20 (5), 203-231.
- [9] Surazhsky, V. ve Gotsman, G. (2004), High quality compatible triangulations, Engineering with Computers, 20, 147–156.

ETMEN TABANLI SİMÜLASYONLARDA FİZİKSEL ÇARPIŞMA TESTLERİ

Anıl Yiğit FİLİZ^(a), Başar KASIM^(a), Burak İLTER^(a), Mehmet Ömer ÖZEK^(a),
Mesut GÖZÜTOK^(a), Şafak TULUMOĞLU^(a)

^(a) HAVELSAN A.Ş., Simülasyon ve Eğitim Sistemleri Grup Başkanlığı, Mühendislik
Grup Müdürlüğü, Eskişehir Yolu 7.Km., Ankara, {ayfiliz, bkasim, bilter, mozek,
mgozutok, stulumoglu} @havelsan.com.tr

ÖZ

Çarpışma, hareket halindeki bir platformun bir yönde ilerleme yaparken başka bir platforma veya durağan nesneye (bina, tel engel, vs.) çarpmasıdır. Etmen tabanlı simülasyon sistemlerinde, yarı otonom platformlar tarafından gerçekleştirilen ilerleme hareketi sırasında çarpışmanın gerçekleşip gerçekleşmediğinin hızlı bir şekilde anlaşılması kadar çarpışmanın, çarışan nesnelerin hangi noktalarında gerçekleştiğinin bulunması ve çarpışma testinin yaptığı hata miktarı da çok önemlidir. Buna ilave olarak dağıtık simülasyon uygulamalarında çarpışma algoritması sonuçlarının işlemci düğümleri arasında paylaşılması ve temsili ortamlar arasındaki senkronizasyonun korunması da önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Bu makalede etmen tabanlı ve analiz maksatlı bir simülasyon olan MGKMOS kapsamında kullanılan hareketlilik çarpışma testleri ve bunların simülasyon sadakati ile performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Çarpışma Testi, Dağıtık Simülasyon, Etmen Tabanlı Simülasyon, Hareketlilik, Sadakat

PHYSICAL COLLISION TESTS IN AGENT BASED SIMULATIONS

ABSTRACT

Collision is the intersection of a moving platform to another platform or stationary object (building, wire, obstacles, etc.) while moving in one direction. In agent-based simulation systems, finding the intersection points of the colliding objects and the amount of error made by the collision tests are very important as much as finding quickly whether the collision is occurred during the movement of the semi-automated platforms. In addition to this, in distributed simulations, sharing the collision results

between the processor nodes and the protection of the synchronization of the simulation environments emerge as other major problems. In this article, swept collision tests used in MGKMOS, which is agent-based analysis simulation, and their effects on the performance and the fidelity of the simulation are assessed.

Keywords: Agent Based Simulation, Collision Test, Distributed Simulation, Fidelity, Movement

1. GİRİŞ

Günümüz varlık tabanlı simülasyonlarında, modellenen her bir varlığın davranışları ve diğer varlıklarla etkileşimi, topluluk düzeyinde değil, bireysel düzeyde canlandırılmaktadır. Etmen tabanlı simülasyonlarda, algılama, karar verme ve harekete geçme yeteneği olan varlıklar aktör olarak ayırt edilmektedir. Aktörlerin modellenmesi ve yazılım olarak gerçekleştirmi etmen tabanlı yöntemlerle yapılmaktadır.[1]

Hareket etme yeteneği bulunan aktörlerin birbirleri ve durağan nesnelerle çarpışma durumunun belirlenmesi, etmen tabanlı simülasyonların en kritik kısımlarından birini oluşturur. Çarpışma, senaryonun tanımlanması sırasında varlıkların araziye yerleştirilmesi aşamasında olabileceği gibi koşum sırasında hareketli aktörlerin birbirlerinin hareketine engel olması sonucunu oluşturabilmektedir. Çarpışma testlerinin sadakati ile simülasyonların güvenilirliği arasında doğru ilişki bulunmaktadır. Çarpışma testlerinin güvenilirliğine ilave olarak bu testlerin aktörler ve durağan nesneler arasındaki çarpışma durumunu ne kadar hızlı belirlediği, simülasyon performansı anlamında değerlendirilmesi gereken bir parametredir. Bu nedenle bazı durumlarda çarpışma testlerinin daha hızlı sonuç verebilmesi amacıyla testlerin sadakatinden tavizler verilebilir. Bununla birlikte çarpışma testlerinde yapılan hataların simülasyona etkilerinin en aza indirilmesi gerekmektedir.

Ayrıca dağıtık simülasyonlarda çarpışma testlerinin sonuçlarının dağıtık işlemci düğümleri arasında dağıtılması ve bu düğümler arasındaki senkronizasyonun korunması da önemli bir problemdir. Bu nedenle özellikle dağıtık simülasyonlarda kullanılan çarpışma testleri belirlenimci (Ing deterministic) olmalıdır. Bu nedenle bu makalede MGKMOS projesi kapsamında kullanılan çarpışma testleri incelenmiş, bu testlerin hata tipleri ve simülasyona etkileri değerlendirilmiştir.

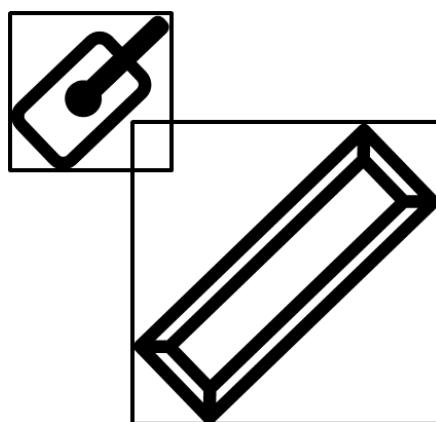
2. SİMÜLASYONLARDA KULLANILAN ÇARPIŞMA TESTLERİ

Hareketli iki aktörünçarpışma sonucunu üreten pek çok çarpışma testi vardır. Bunlardan bazıları hesaplamalarını grafiksel işlemcileriler kullanarak yapmaktadır. Fakat simülasyonlarda çarşımanın oluşup oluşmadığı bilgisinin üretildesinden daha çok

çarpışmanın hangi noktalarda oluştuğunu hesaplanması problemi öne çıkmaktadır. Bu nedenle grafik tabanlı çarışma testleri gibi pek çok test sadece çarpışmanın gerçekleşip gerçekleşmediği bilgisini sonuç olarak üretmektedir. Bu nedenle sadece çarpışmanın gerçekleşme durumunu hesaplayan testler bu makalenin dışında tutulmuştur. Ayrıca MGKMOS projesi kapsamında çarışma testi çok yoğun olarak kullanıldığından basit çarışma testlerine oranla daha çok işlem gerektiren hiyerarşik çarışma testleri de bu makalenin dışında tutulmuştur. Simülasyonlarda kullanılan aktörler ve durağan nesneler çoğunlukla karmaşık yapıda olmaktadır. Bu tip varlıklar kendi vücut yapıları ile çarpmak çok pahalı bir işlem olacağinden simülasyonlarda çarışma testlerini hızlandırmak için varlıklar temel geometrik nesnelerle çevrelemek gerekmektedir. Bunlar çoğunlukla küre (İng Sphere), Eksene Bağımlı Çevreleyen Kutu (İng Axis-Aligned Bounding Box - AABB), Yönelmiş Çevreleyen Kutu (İng Oriented Bounding Box - OBB), 8-Yönlü Kesintili Yönelimli Politop (İng Eight-Direction Discrete Orientation Polytope - 8-DOP) ve Dışbükey Örtü (İng convex hull)'lerdir. Bunlardan en hızlı hesaplama yapılanları küre, AABB ve OBB olduğu için sadece bunlar incelemeye alınmıştır.[2]

2.1. AABB-AABB Çarışma Testi

Bu testte aktörler ve durağan nesneler çevreleyen kutu ile temsil edilir. Bu çevreleyen kutular x eksenine göre belirlenmektedir. Bu nedenle aktörlerin ve durağan nesnelerin yönelimine göre çevreleyen kutularının boyutları değişebilmektedir. Bu test ile aktörlerin ve durağan nesnelerin x eksenine göre belirlenmiş çevreleyen kutularının birbiri içerisinde geçip geçmediği belirlenir.[3]

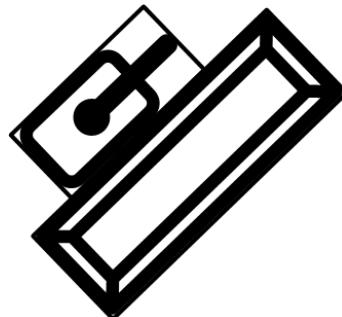


Şekil 1 AABB-AABB Çarışma Testi

2.2. OBB-OBB Çarışma Testi

Bu teste de AABB-AABB çarışma testindekine benzer şekilde aktörler ve durağan nesneler çevreleyen kutu ile temsil edilir. AABB çevreleyen kutusundan farklı olarak bu testteki çevreleyen kutular eksenlerden bağımsız bir şekilde aktörlerin ve durağan nesnelerin yönelimlerine göre belirlenmektedir. Bu nedenle çevreleyen kutuların

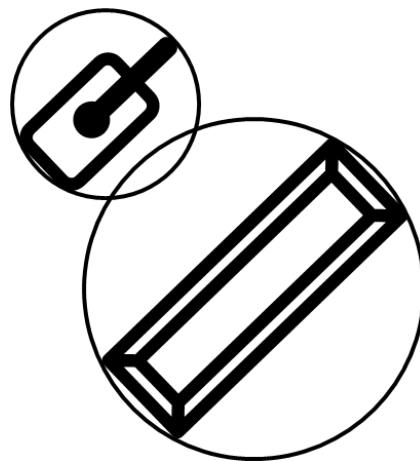
boyutları her zaman aynı büyüklükte belirlenmektedir. Bu test ile de AABB-AABB çarpışma testindeki gibi aktörlerin ve durağan nesnelerin çevreleyen kutularının birbiri içerisinde geçip geçmediğini belirlenir.[3]



Şekil 2 OBB-OBB Çarpışma Testi

2.3. Küre-Küre Çarpışma Testi

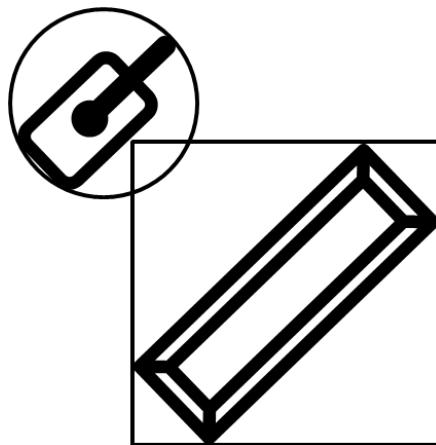
Küre-Küre çarpışma testinde aktörler ve durağan nesneler çevreleyen küre ile temsil edilir. OBB-OBB çarpışma testindekine benzer şekilde testte de varlıkların çevreleyen nesnelerinin büyüklükleri hep sabittir. Bu test ile aktörlerin ve durağan nesnelerin çevreleyen kürelerinin birbiri içerisinde geçip geçmediğini belirlenir.[5]



Şekil 3 Küre-Küre Çarpışma Testi

2.4. Küre-AABB Çarpışma Testi

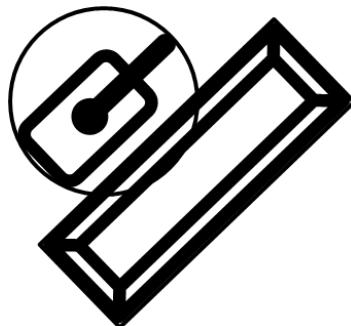
Bu testte kesişimi hesaplanacak aktörler ve durağan nesnelerden biri çevreleyen küre ile diğer ise x eksene göre belirlenen çevreleyen kutu ile temsil edilir. Bu testteki varlıklardan birisinin kutusu x eksene bağlı olarak belirlendiği için çevreleyen kutunun büyülüğu değişebilmektedir. Bu test ile aktörlerin ve durağan nesnelerin çevreleyen küresi ve x eksene bağlı çevreleyen kutusunun birbiri içerisinde geçip geçmediğini belirlenir.[4]



Şekil 4 Küre-AABB Çarpışma Testi

2.5. Küre-OBB Çarpışma Testi

Küre-AABB çarpışma testindekine benzer şekilde bu testte de kesişimi hesaplayacak aktörler ve durağan nesnelerden biri çevreleyen küre diğer ise varlığın yönüne göre belirlenen çevreleyen kutu ile temsil edilir. Bu testte çevreleyen nesnelerinin büyülükleri sabittir. Bu test ile aktörlerin ve durağan nesnelerin çevreleyen külesi ve yönelime bağlı çevreleyen kutusunun birbiri içerisinde geçip geçmediğini belirlenir.[2]



Şekil 5 Küre-OBB Çarpışma Testi

3. CARPIŞMA TESTLERİNİN HIZLARI VE SADAKATİ

Yukarıda açıklanan çarpışma testleri aktörleri ve durağan nesneleri olduklarından daha büyük nesnelerle temsil ettikleri için hatalı sonuçlar üretebilmektedir. Çevreleyen kutu ya da çevreleyen küre ile yapılan testlerin hepsi hatayı yanlış olumlulama olarak yapmaktadır. Başka bir ifadeyle bu testler çarpışma olmadığı bazı durumlarda çarpışma vardır sonucu üretebilmektedir. Ayrıca aktörler hareketli oldukları için bu aktörlerin çevreleyen nesneleri ilerleme koridorlarını içerecek şekilde oluşturulmalıdır. Aktörlerin çevreleyen kutularına ilerleme koridoru da eklendiğinde yine bir çevreleyen kutu

oluşmaktadır. Fakat çevreleyen küreler için bu yapıldığında çevreleyen silindir şeklinde bir çevreleyen nesne elde edilmektedir.

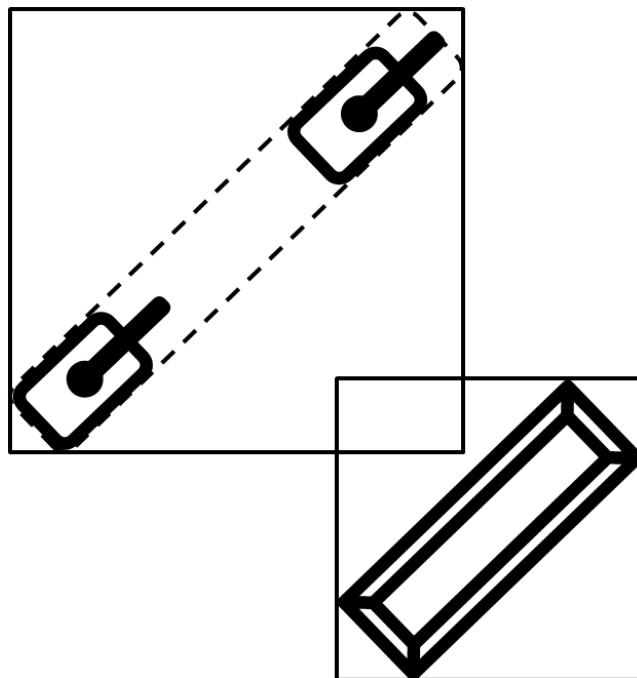
Bu testlerin performanslarını belirlemek amacıyla testlerde kullanılan temel işlemler için Tablo 1 esas alındığında kullanılan işlemleri işlem sürelerine göre 3 bölüme ayıralım. Bunlar toplama çıkarma, karşılaştırma gibi aritmetik işlemler, sinüs, cosinüs hesaplamaları gibi trigonometrik işlemler ve karekök işlemidir. Ayrıca bu 3 temel işlem arasındaki sürelerle baktığımızda 1 trigonometrik işlemin 15 basit işleme, 1 karekök işleminin de 7 basit işleme karşılık geldiği sonucunu çıkarabiliriz.

İşlem Tipi	İşlem Süresi	İşlem Tipi	İşlem Süresi
10000000 kere +	0.03100000 sn.	10000000 kere >=	0.01500000 sn.
10000000 kere -	0.01600000 sn.	10000000 kere ==	0.03200000 sn.
10000000 kere *	0.03100000 sn.	10000000 kere !=	0.03100000 sn.
10000000 kere /	0.03100000 sn.	10000000 kere &&	0.01500000 sn.
10000000 kere sqrt	0.23400000 sn.	10000000 kere	0.03200000 sn.
10000000 kere fabs	0.01600000 sn.	10000000 kere sin	0.46800000 sn.
10000000 kere >	0.03100000 sn.	10000000 kere cos	0.46900000 sn.
10000000 kere >=	0.01500000 sn.	10000000 kere tan	0.57800000 sn.
10000000 kere <	0.03200000 sn.	10000000 kere atan	0.62500000 sn.

Tablo 1 İşlemler ve İşlem Süreleri

3.1. AABB-AABB Çarpışma Testi

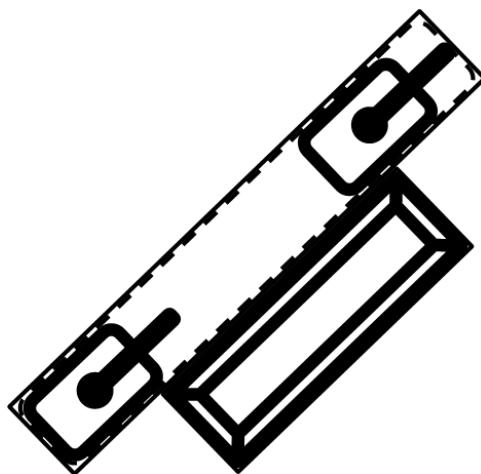
Bu test ile x eksenine bağımlı iki kutunun çarpışması çok basit bir şekilde hesaplanabilmektedir. Çevreleyen kutuların köşe koordinatlarının değerlerinin karşılaştırılması ile iki kutunun kesişip kesişmediğine karar verilebilir. Ayrıca bu teste çarşımanın gerçekleştiği noktaları hesaplamakta az masraflı bir işlemidir. Bu test ile çarpışmayı hesaplamanın performansı yaklaşık olarak 9 basit işlemidir.[2] Bu teste çevreleyen kutular x eksenine bağlı olarak hesaplandığı için çevreleyen kutusu hesaplanan varlığın yönüne göre çevreleyen kutunun büyülüüğü değişmektedir. Bu test varlıkların çevreleyen büyülüklelerini çok artırmaktadır. Varlığın yönü ile x ekseni arasında 45 derece gibi bir açı olduğunda varlığın çevreleyen kutusu en büyük halini almaktadır. Ayrıca aktörlerin ilerleme koridorları da çevreleyen kutuya katıldığında bu hata miktarı artmaktadır. Bu teste ayrıca aktörlerin ilerleme yönüne göre çarışma testinin sonucu değişmektedir. Durağan bir nesneye dik olarak ilerleyen bir aktör durağan nesneye deinceye kadar ilerleyebilmektedir. Fakat bu duruma gelmiş olan aktör durağan nesneye çapraz olarak ilerlemek istediğiinde kutularının birbiri içine geçtiği sonucu alınmaktadır.



Şekil 6 İlerleme Koridorlu AABB-AABB Çarpışma Testi

3.2. OBB-OBB Çarpışma Testi

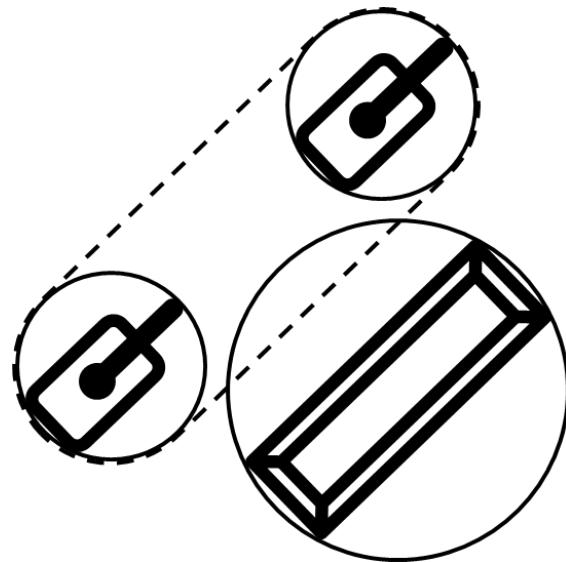
Bu testte etmenlerin çevreleyen kutuları yönelimlerine göre belirlendığından üretilen hata miktarı hep sabittir. Ayrıca aktörlerin ilerleme yönlerine göre çarpışma testinin sonucu da değişmemektedir. Fakat bu çarpışma testi AABB testine oranla hesaplanması daha karmaşık ve çok daha masraflı bir testtir. Bu yöntemde çevreleyen kutu en az hatalı şekilde nesneyi ifade eder.[5] Ayrıca bu testte çarpışmanın gerçekleştiği noktaların hesaplanması da diğer testlere göre daha masraflı bir işlemidir. Bu testin performansı yaklaşık olarak 278 basit işlemidir.[2]



Şekil 7 İlerleme Koridorlu OBB-OBB Çarpışma Testi

3.3. Küre-Küre Çarpışma Testi

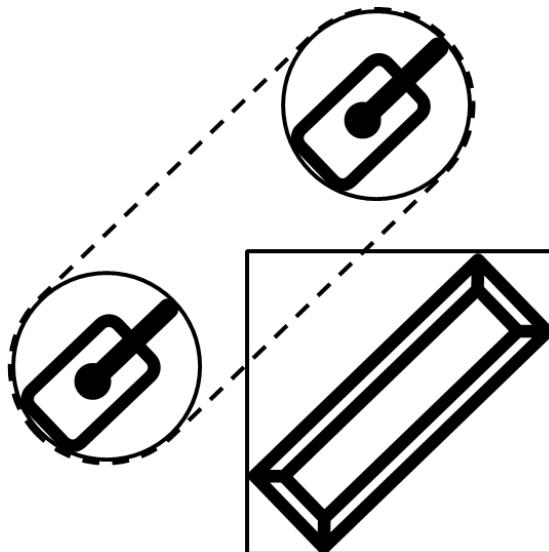
Çevreleyen küre varlıklarını en büyük şekilde ifade etmektedir. Fakat bu testte ilerleyen varlığın çevreleyen nesnesi silindir olduğu için hata miktarı önemli ölçüde azalmaktadır. Bu nedenle yaptığı hata miktarı da AABB-AABB testine göre daha azdır. Bu testin hesaplanması da basit ve az masraflıdır. Ayrıca bu testte çarşmanın gerçekleştiği noktaları hesaplamakta az masraflı bir işlemidir. Bu testin performansı yaklaşık olarak 31 basit, 1 karekök işlemidir. Bu da yaklaşık olarak 38 basit işleme karşılık gelmektedir.[2] Bu testte de varlıkların yönüne göre farklı sonuç üretmesi gibi bir durum olusmamaktadır.



Şekil 8 İlerleme Koridorlu Küre-Küre Çarpışma Testi

3.4. Küre-AABB Çarpışma Testi

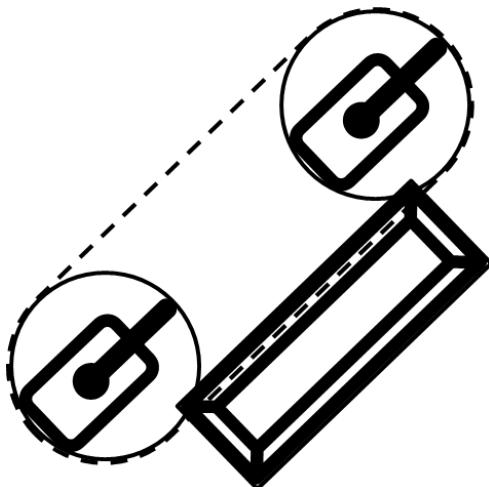
Bu çarpışma testinde de kutu ile ifade edilen varlığın yönüne göre kutusu değişmektedir. Hesaplanması basittir. Bu testte de kutu ile temsil edilen varlığın yönü x eksenine 45 derece olduğunda çarpışma testinin yaptığı hata miktarı en fazladır. Ayrıca bu testte çarşmanın gerçekleştiği noktaları hesaplamak az masraflı bir işlemidir. Bu testin performansı yaklaşık olarak 44 basit işlemidir (Bu hesaplamada AABB'nin köşelerinin yuvarlaklaştırılması işlemi çıkarılmıştır).[2]



Şekil 9 İlerleme Koridorlu Küre-AABB Çarpışma Testi

3.5. Küre-OBB Çarpışma Testi

Bu test kürenin, kutunun eksenine göre transform edilerek Küre-AABB testinin uygulanması şeklinde gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle Küre-AABB testinden daha masraflıdır fakat daha gerçek sonuçlar üretmektedir. Ayrıca bu testte çarpışmanın gerçekleştiği noktaları hesaplamak da biraz daha masraflı bir işlemidir. Bu testin performansı yaklaşık olarak 52 basit, 2 trigonometrik işlemidir. Bu da yaklaşık olarak 82 basit işleme karşılık gelmektedir.[2]



Şekil 10 İlerleme Koridorlu Küre-OBB Çarpışma Testi

4. DAĞITIK SİMÜLASYONLARDA ÇARPIŞMA TESTİ

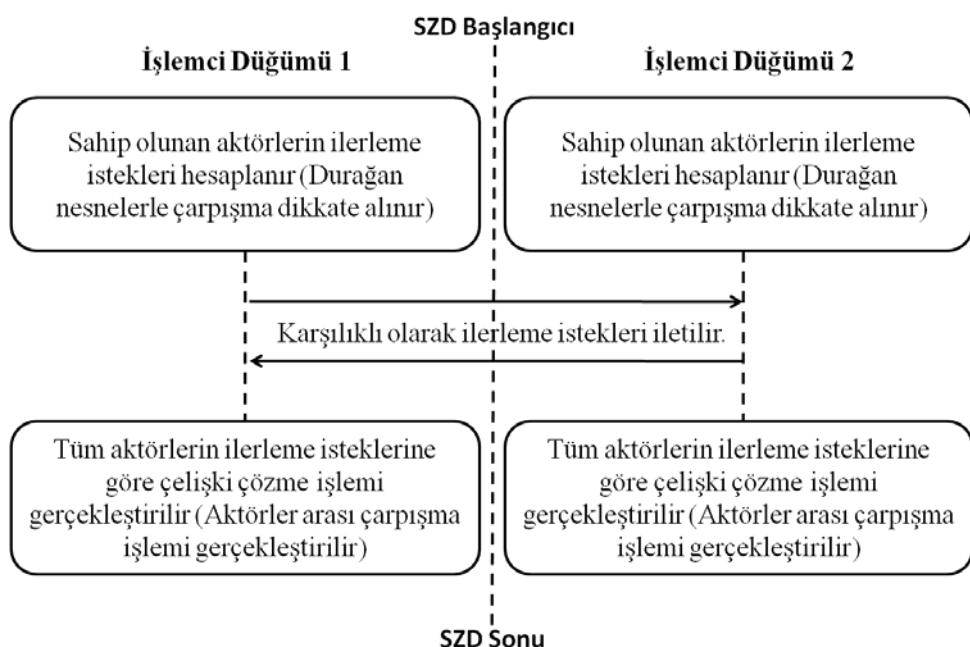
Dağıtık simülasyon uygulamalarında aktör – yetenek eşlemi için iki farklı sistem mimarisini düşünülebilir:

Yetenek Tabanlı Dağıtım: Bir aktöre ait farklı yeteneklerin (algı, müdahale,..v.b.) farklı bilgisayarlarda hesaplanması esas almaktadır. Bu çözümde bir yeteneğe ait hesaplamlar tek simülasyon bilgisayarında gerçekleşebileceğ gibi yeteneğin ihtiyaç duyduğu işlemci gücüne bağlı olarak birden fazla bilgisayarın kullanımı da mümkündür.

Aktör Tabanlı Dağıtım: Bir aktörün tüm yeteneklerinin aynı bilgisayar üzerinde hesaplanması çözümünü adreslemektedir. Bu mimaride aktör yetenek hesaplamlarının sonuçları ağ üzerinden ilgili aktörle etkileşimi bulunan diğer aktörlere ev sahipliği yapan diğer bilgisayarlara da yayılanmaktadır. Yetenek tabanlı dağıtım mimarisine benzer şekilde bu çözümde de bir bilgisayar üzerine atanacak aktör sayısı yapılan hesaplamların yoğunluğuna bağlı olarak belirlenmektedir.[1]

MGKMOS kapsamında aktör tabanlı dağıtım yöntemi benimsenmiştir. Dağıtık simülasyonlarda aktörler işlemciler veya makineler arasında dağıtıldığı için bu aktörlerin hesapları kendi temsili ortamlarında gerçekleştip diğer temsili ortamlara iletmektedirler. Temsili ortamların kendi hesaplamlarını diğer temsili ortamlara iletmeleri SZD (Simülasyon Zaman Dilimi) denilen aralıklarla olmaktadır. Bu şekilde tüm temsili ortamlar birbirleri ile senkronize olabilmektedir. Bir aktör bir harekete karar verdiğiinde bu hareketi gerçekleştirirken diğer aktörlerin yapacakları hareketlerden haberdar olamayacağı için hareketi esnasında kendisine engel olacak aktörleri belirleyebilmesi mümkün olmamaktadır. Yani bir aktör bir noktaya ilerlediğinde başka bir aktör de aynı noktaya ilerlemiş olabilir. İki aktör birbirinden haberdar olmadığı için SZD sonunda bu etmenler konum olarak aynı noktaya hareket edebilirler. Bu nedenle MGKMOS kapsamında bir temsili ortamındaki aktörler diğer temsili ortamlara SZD sonunda olacağı noktayı değil tüm SZD boyunca yapacağı hareketleri bildirmektedir. SZD sonlarında tüm temsili ortamlarda aktörlerin yapacakları hareketlilik işlemlerine göre bir çelişki çözme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu işlemin tüm temsili ortamlarda aynı sonucu üretebilmesi için tüm hareketlilik hesaplaması sonuçlarının temsili ortamlara iletilmesi ve çelişki çözme işleminin tüm temsili ortamlarda aynı sırayla gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Çelişki çözme sırasında her aktörün hareketlilik isteği ile diğer aktörlerin çarpışıp çarpışmadığına karar verilmektedir. Durağan nesneler ile yapılan çalışma işlemi bir farklılık yaratmayacağı ve çelişki çözümler içerisindeki test sayısını azaltmak için her aktörün ilerleme isteği o aktörün atıldığı dağıtık işlemci düğümünde hesaplanmaktadır. Çelişki çözme işlemi, aktörlerin diğer aktörler ile çarpışıp çarpışmadığı test edilmektedir. Bu çalışma testleri sırası ile yapıldığından aynı noktaya gitmek isteyen iki aktörden çelişkisi önce çözülenin o noktaya ilerlemesi esas alınır. Çelişkisi daha sonra çözülen aktör ise o aktöre delegeek şekilde o noktadan daha

geride bir noktaya konumlandırılır. Bu şekilde tüm aktörlerin çelişkileri çözülünceye kadar devam edilir. Bu tip bir yaklaşım o anda çelişkisi çözülen aktörlerin çelişkisi çözülmeyen diğer aktörler ile yaptığı çarpışma testleri aktörlerin eski konumları ile olmaktadır. Başka bir deyişle o SZD içerisinde henüz çelişkisi çözülmemiş aktör hareket edecek dahi olsa çelişkisi daha çözülmemiş ve yeni konumu belirlenmediği için çelişkisi çözülen aktörler o aktörün eski konumu ile çarpışma testlerini gerçekleştireceklerdir. Yaklaşık olarak 1000 aktörün olduğu bir simülasyonda etkileşimin en yoğun olduğu durumda ortalama 500 aktörün birbiri ile çarpışma testi yaptığı düşündüğümüzde bir SZD içerisinde 250000 civarında çarpışma testi yapıldığı hesaplanmaktadır. Aktörlerin kutu ile temsil edildiği çarpışma testlerinde, aktörlerin dönmesi sırasında da çarpışma testi yapıldığından bu sayı 500000'e çıkmaktadır. Çarpışma testleri için harcanan toplam zaman hesaplandığında AABB-AABB testinin 0,144 sn, OBB-OBB testinin 4,448 sn, Küre-Küre testinin 0,304 sn, Küre-AABB testinin 0,352 sn ve Küre-OBB testinin de 0,656 sn sürdüğü görülmektedir.



Şekil 11 Dağıtık Simülasyon Çarpışma Teslerinin Gerçekleştirimi

5. SONUÇ

Bu çalışma ile etmen tabanlı simülasyonlarda kullanılabilenç çarpışma testlerinin incelenmesi ve bu testlerin simülasyonlara etkilerinin neler olacağının aktarılması amaçlanmıştır. Testler incelendiğinde AABB-AABB çarpışma testinin en hızlı fakat en sadaksız test olduğu görülmektedir. OBB-OBB testi ise en yavaş ve en sadakatlı test olarak karşımıza çıkmaktadır. MGKMOS kapsamında aktörlerin çelişkisinin çözülmesi

sırasında çok fazla test yapıldığından ve aktörlerin küresel çevreleyen kutularının yaptığı hataların çok fazla olmayacağı değerlendirildiğinden aktörler arasındaki çarpışma testlerinde Küre-Küre çarpışma testinin kullanılmasının uygun olduğu değerlendirilmiştir. Fakat küre ile temsil etmenin durağan nesnelerin büyülüklüklerini çok artırması ve bu testlerin her aktörün kendi temsili ortamında gerçekleştiriliyor olması nedeniyle aktörlerin durağan nesneler ile yaptığı çarpışma testlerinde Küre-OBB çarpışma testinin kullanılmasının daha uygun olduğu değerlendirilmiştir.[6] Küre-Küre ve Küre-OBB çarpışma testlerinin bir sürümü Müşterek Görev Kuvveti Harekâtının Modellenmesi ve Simülasyonu Projesi (MGKMOS) kapsamında kullanılmaktadır.

6. KAYNAKÇA

- [1] Kasım, B., Gözütok, M., Oğuztüzün,H. (2009), Simülasyon Uygulamalarında Rastlantısal Sayı Kullanımı.
- [2] Ericsson C. (2005), Real-Time Collision Detection, Morgan Kaufmann.
- [3] Lander J. (1999), "When Two Hearts Collide", Game Developer.
- [4] Arvo, J. (1990), A simple method for box-sphere intersection testing, In A. Glassner, editor, Graphics Gems, Academic Press, Boston, MA.
- [5] Gomez M. (1999), Simple Intersection Tests for Games, Gamasutra.
- [6] Havelsan A.Ş. (2007), Müşterek Görev Kuvveti Harekatının Modellenmesi ve Simülasyonu Projesi Kavramsal Modeli, HAVELSAN Hava Elektronik Sanayi ve Ticaret A.Ş.

İNSANSIZ BİR HELİKOPTERİN YANAL UÇUŞ KONTROL SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ VE SİMULASYONU

İbrahim Gökhan GÖKÇELİ ^(a), Yakup ÖZKAZANÇ ^(b)

^(a) TUSAŞ, Türk Havacılık ve Uzay San. A.Ş., ODTÜ Teknokent Nuri Demirağ Binası,
ggokceli@tai.com.tr

^(b) Hacettepe Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara,
yakup@ee.hacettepe.edu.tr

ÖZ

Son yıllarda, insansız hava araçları teknolojisinde önemli gelişmeler olmakta ve bu teknolojiler savunma uygulamalarında sıkılıkla kullanılmaktadır. Hava araçlarında çeşitli uçuş kontrol düzenekleri bulunsa da; insansız hava platformlarında kısmen veya tamamen bir pilot tarafından gerçekleştirilen tüm işlevlerin otomasyonu söz konusudur. Bu çalışma insansız helikopterlerde gerçekleştirilebilecek yanal otomatik uçuş kontrol sistemlerinin modellenmesini ve simulasyonunu konu almıştır. YAMAHA R-50 tipi insansız küçük bir helikopter için geliştirilmiş olan kapsamlı bir doğrusal olmayan model temel alınmış ve bu modele dayanılarak tam otonom bir helikopterde bulunması gereken yanal uçuş kontrol sistemleri geliştirilmiştir. Geliştirilen uçuş kontrol sistemleri helikopter dinamik modeline entegre edilmiş ve doğrusal olmayan simulasyonlarla uçuş kontrol sistemlerinin performansı etüd edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Helikopterler, Helikopter Kontrolü, Helikopter Modellemesi, Helikopter Simülasyonu, Uçuş Kontrol Sistemleri, Yanal Otopilotlar

MODELING AND SIMULATION OF LATERAL FLIGHT CONTROL SYSTEMS OF AN UNMANNED HELICOPTER

ABSTRACT

There have been important improvements on unmanned aerial vehicle technology for several years and unmanned vehicles began playing critical roles in contemporary battlefields. High level autonomy and advanced flight control systems lie at the heart of critical mission requirement for modern UAVs. This study addresses modeling and

simulation of lateral automatic flight control systems of an unmanned helicopter. A comprehensive dynamic non-linear model previously developed for a YAMAHA R-50 type unmanned helicopter is used and lateral flight control systems are developed for this platform. Developed flight control system architectures are integrated into non-linear helicopter dynamic model and performance of the flight control systems are studied.

Keywords: Flight Control Systems, Helicopter Control, Helicopter Modeling, Helicopter Simulation, Helicopters, Lateral Autopilots

1. GİRİŞ

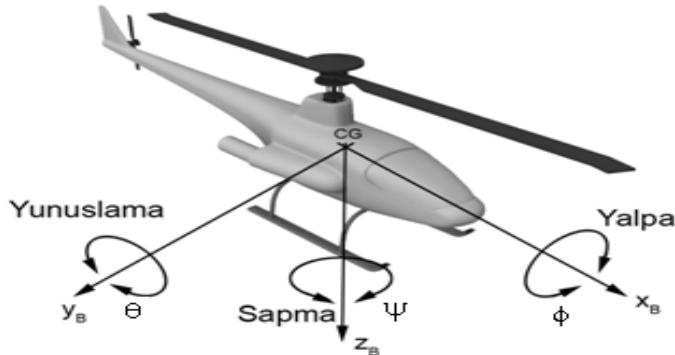
Helikopterlerin uçuş kontrol sistemi olmaksızın uzun süreli uçmalarının zorluğu helikopter uçuş kontrol sistemlerinin ve yöntemlerinin önemini ön plana çıkartmaktadır. İnsansız helikopterlerde otonomi ile ilgili isterler ise; helikopter uçuş kontrol sistemlerinin kritikliğini yalnızca artırmakla kalmıştır. İnsansız helikopterlerin otomatik uçuş kontrol sistemleri de, diğer hava araçlarında olduğu gibi, dikey ve yanal uçuş kontrol sistemleri olarak iki ayrı grup olarak geliştirilmektedir. Bu çalışma insansız bir helikopter modeli (YAMAHA R-50) için yanal uçuş kontrol sistemleri geliştirmeyi hedef almıştır. Kapsamlı ve doğrusal olmayan dinamik bir model [3] esas alınarak, ilgili platformda kullanılabilecek yanal uçuş kontrol sistemleri geliştirilmiştir. Bu çalışma standart sensörler ve eyleyicilere dayanan kontrol mimarilerinin önerilmesi ve bu mimari içindeki kontrolcülerin ayarlanması da içermektedir. Önerilen mimari içerisinde, kontrolcüler R-50 helikopter modeli için ayarlanmış ve kontrol sistemlerinin performansı doğrusal olmayan model ile entegre olarak simülasyonlarla sınanmıştır. Bu bildiride sunulan uçuş kontrol yapıları; yalpa ve sapma kararlılığı güçlendirme sistemleri, yalpa tutma otopilotu, koordineli dönme otopilotu ve rota tutma sisteminden ibarettir. Aynı platform için geliştirdiğimiz dikey otopilotlar ve diğer uçuş kontrol sistemleri için ise [1]'e bakılabilir.

2. HELİKOPTER HAREKETİ

Ağırlık merkezi (CG) noktası etrafında serbestçe dönen katı cisimin yöneliminin belirtilmesinde Euler açıları kullanılmaktadır [1-6]. Katı cisim olarak modellenebilecek olan bir helikopterin yönelimi, Şekil 1'de gösterildiği gibi;

- x_B ekseni etrafında ϕ açısı ile ifade edilen yalpa (roll) açısına
- y_B ekseni etrafında θ açısı ile ifade edilen yunuslama (pitch) açısına ve

- z_B ekseni etrafında ψ açısı ile ifade edilen sapma (yaw) açısına bağlı olarak tanımlanır.



Şekil 1. Bir Helikopterin Yönelim Açıları

Helikopterin gövdesi üzerinde tanımlanmış olan bu eksenler çevresindeki açısal dönüş hızları ise sırası ile yalpa açısal hızı (p), yunuslama açısal hızı (q) ve sapma açısal hızı (r) olarak anılmaktadır.

3. HELİKOPTER OTOMATİK UÇUŞ KONTROL SİSTEMLERİ

Otomatik uçuş kontrol sistemleri; pilotun gerçekleştirmek istediği uçuş için yunuslama, yalpa ve sapma eksenlerinin kararlılığını sağlamak üzere tasarlanmış karmaşık yazılım ve donanım bütünüdür [1-6]. Tam otonom insansız bir helikopter söz konusu olduğunda ise; pilotun yerine çevre ile etkileşim içinde otonom olarak karar alabilecek ve uçuş kontrol sistemlerine kumanda edecek üst seviye bir otomasyon sistemi de resmin bir parçası olarak yorumlanmalıdır.

Uçuş konumundaki değişimlerin algılanabilmesi için anlık uçuş konumu ile istenilen uçuş konumunun sürekli karşılaştırılabilmesi ve hatanın doğru biçimde hesaplanabilmesi gerekmektedir. Otomatik uçuş kontrol sistemi, helikopterin konum ve yönelim bilgisini dikey jiroskopdan, yön jiroskobundan, INS veya GPS gibi navigasyon cihazlarından alırlar. Açısal hızlar ise hız jiroskopları ile ölçülür.

Helikopterlerde uçuş kontrol sistemlerinde üç farklı fonksiyonu gerçekleştiren alt sistemler bulunmaktadır ve bu sistemler entegre bir şekilde çalışmaktadır. Helikopter uçuş kontrol sistemleri;

- Kararlılık Güçlendirme Sistemleri
- Yönelim Tutma Otopilotları ve

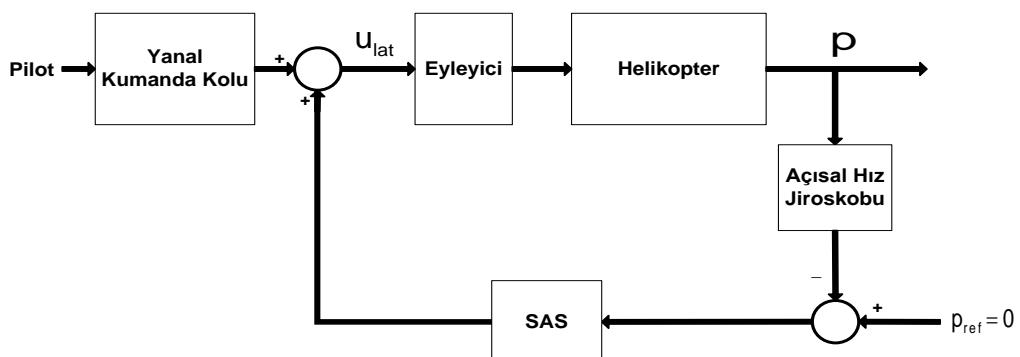
- Üst Seviye Helikopter Otopilotları

hiyerarşisi içinde değerlendirilebilir.

3.1 Kararlılık Güçlendirme Sistemi (SAS)

Hava taşıtinın kararlılığına katkıda bulunan uçuş kontrol sistemi ‘kararlılık güçlendirme sistemi’ veya SAS (Stability Augmentation System) olarak anılır. Bu tür otomatik uçuş kontrol sistemleri uçuş zarfi dahilinde tüm uçuş konfigürasyonu ve koşullarında helikopter platformunun kararlılığını artırmaktadır. SAS modu, entegre helikopter uçuş kontrol sisteminin gerçekleştirdiği en temel işlevdir ve tüm uçuş kontrol sistemi işletim durumlarında ve tüm mod kombinasyonlarında pilottan bağımsız olarak sürekli devrede olmalıdır.

Kararlılık, helikopter gövdesinin denge durumundan veya sabit hareket halindeyken dengesi bozulduğunda; kararlılığın düzeltilmesine yönelik kuvvetlerin ve/veya torkların gövde üzerindeki işlevi sonucu, helikopterin esas konumuna ve hareketine dönmesinin sağlanmasıdır. SAS düzenekleri helikopterin gövde eksenindeki açısal hız değişimlerini ölçen sensörleri ve aerodinamik kontrol yüzeylerini süren servo mekanizmasına ait geri besleme sinyallerini kullanarak; ilgili açısal harekete karşılık gelen kontrol yüzeylerini hareket ettirirler.



Şekil 2. Yalpa SAS Mimarisi

Bu çalışmada SAS’ın yalpa ekseninde sökümlenme sağladığı dinamik kararlılık mimarisi incelenecektir. Şekil 2’de mimarisi verilen yalpa SAS’ın (Roll SAS) amacı, platformda kısa süreli modlarda (short period) yeterli bir doğal frekans ve sökümlenme etkisi oluşturmaktır. Burada u_{lat} yanal kumanda kolu (devri hatve) ile kumanda edilen yalpa tablasının yanal hareketini ifade eden kontrol değişkenidir. Yanal uçuş kontrol sisteminin bir alt bileşeni olarak sapma SAS sistemi de benzer bir yapıya sahiptir. Sapma SAS sisteminde sapma açısal hızı (r) bir açısal hız jiroskopu ile ölçülmemekte,

kontrol değişkeni olarak ise anti-tork pedalları ile kumanda edilen kuyruk rotoru torku kullanılmaktadır.

3.2 Yönelim Tutma Otopilotları (Hold Autopilots)

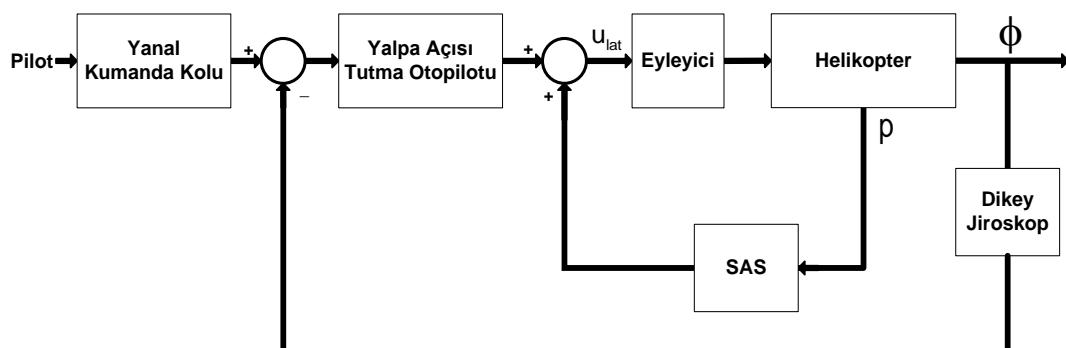
Yönelim Tutma Otopilotları, pilotun (pilotsuz platformlarda ise akıllı kumanda sisteminin) rutin görevlerinin bir bölümünü üstlenmek gibi görevlere sahiptir. Böylece, pilotun yorulmasını geciktirmekte ve daha uzun süreli uçuşları mümkün kılmaktadır.

Bu bölümde, insansız bir helikopterde iki temel yönelim tutma fonksiyonunu gerçekleştiren otopilot yapıları incelenmiştir:

- Yalpa Açısunun Tutulması (Roll Hold) ve
- Koordineli Dönme Otopilotu (Coordinated Turn).

3.2.1 Yalpa Açısunututma Otopilotu (Roll Hold)

Yalpa açısı tutma otopilotu, helikopterin dönüş sırasında pilotun sürekli olarak yalpa açısını ayarlama / kontrol etme zorunluluğunu ortadan kaldırın bir sistemdir.



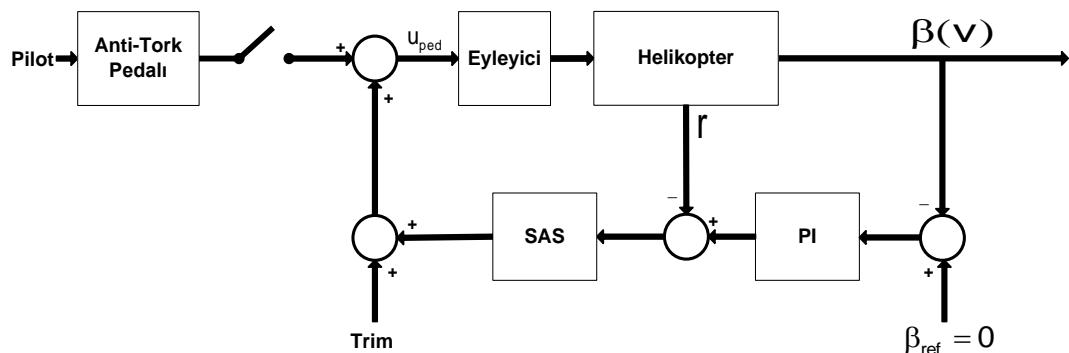
Şekil 3. Yalpa Açısunututma Mimarisi

Bu otopilot devreye alındığında Şekil 3'teki mimari devreye girer. Yalpa açısı dikey jiroskoptan veya varsa ataletsel seyir sisteminden (INS) okunur ve yalpa açısı tutma otopilotu yalpa SAS sistemine kumanda eder. İnsansız bir helikopterde yanal kumanda kolundan gelen sinyal akıllı bir kumanda sisteminden gelecektir. Yalpa açısı tutma otopilotu için PID türü bir kontrolcü yapısının yeterli esnekliği sağladığı görülmüştür.

3.2.2 Koordineli Dönme Otopilotu

Bu otopilot, helikopterin sürüklendirme ve yanal savrulmasını azaltarak koordineli bir dönüş ortaya çıkarmakta, yolculara ve mürettebataya daha fazla konfor sağlamak için kullanılmaktadır. İnsansız bir helikopterde ise, koordineli dönme otopilotu yana kayma

(side-slip) açısının küçük olmasını garantilemeyeceğini ve dönme kararlılığını katkıda bulunmaktadır. Koordineli dönme otopilotu, yalpa açısı tutma otopilotunun uzantısı olmakla birlikte sapma hızı ve yalpa açısı arasında koordinasyon sağlar. Bunun için yana kayma sensörü kullanılır ve yana kayma açısının β sıfır eşitlenmesi hedeflenir. Koordineli dönme otopilotunda bir diğer seçenek ise yana kayma yerine yanal hızı (v) geri beslemek veya yanal hızı sıfırda tutmak olarak özetlenebilir. Şekil 4'te yer alan koordineli dönme otopilotu mimarisinde yalpa açısı tutma otopilotuna paralel olarak yana kayma sensörü ile anti-tork pedallara sinyal gönderilerek sapma açısı SAS sistemine kumanda edilmektedir. Burada u_{ped} anti-tork pedali ile kumanda edilen kuyruk rotorunun hatve açısını ifade eden kontrol değişkenidir. Şekil 3'te yer alan yalpa açısı tutma sistemine yanal kumanda kolu ile kumanda edildiğinde platform kumanda kolu ile verilen değer ile orantılı olarak yana yatmaktadır ve helikopter dönmeye başlamaktadır. Bu dönüş hareketi sırasında oluşabilecek yana kayma ise koordineli dönme otopilotu ile kontrol altında tutulmaktadır. Yapılan simulasyon çalışmalarında, koordineli dönme otopilotunda yana kayma hatası üzerine çalışan kontrolcünün PI türü bir kontrolcü olmasının yeterli olduğu görülmüştür.



Şekil 4. Koordineli Dönme Otopilotu

Şekil 4'te yer alan trim; ana rotorun yarattığı tork nedeni ile helikopterin dönmemesi için sapma SAS devresine bir miktar düzeltme vermek için mimariye eklenmiştir.

3.3 Üst Seviye Otopilotlar

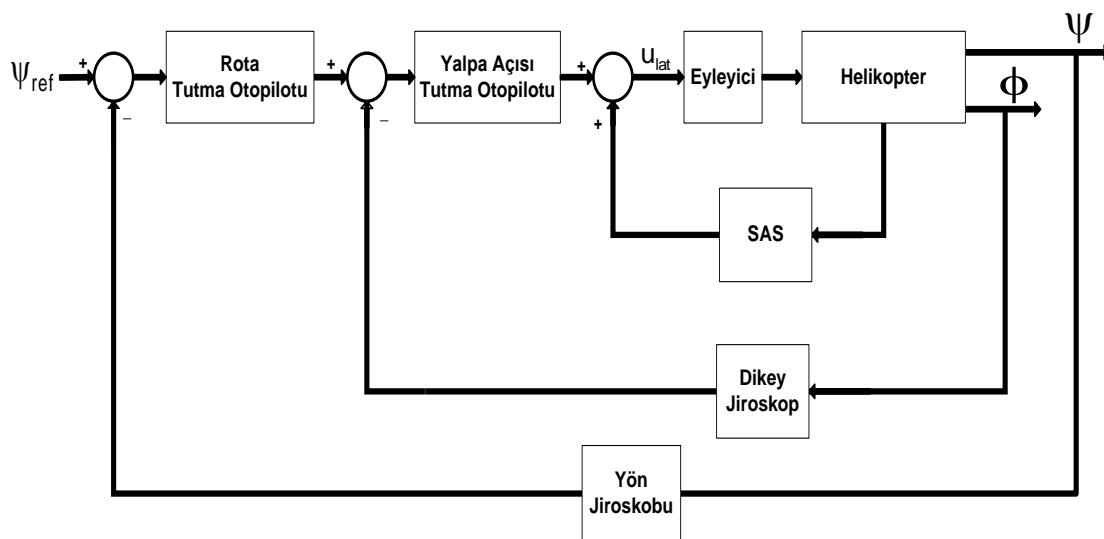
Üst seviye otopilotlar, belirli koşullar altında, helikopterin görevini kolayca gerçekleştirebilmesi için pilota yardımcı olan özel otopilot sistemleridir. Pilotsuz helikopterlerde üst seviye otopilotlar daha da önem kazanmaktadır, çünkü pilotun bazı üst seviye işlevlerinin de otomasyonu söz konusudur. Helikopterlerde pal seviyesi tutma, askıda kalma veya radar altimetreli üst seviye dikey uçuş kontrol sistemleri [1] bulunsa da, burada yalnızca yanal bir sistem olan rota tutma otopilotu ele alınmıştır.

3.3.1 Rota Tutma Otopilotu

Helikopter belirli bir yönde seyir halinde bulunacaksa, rota tutma otopilotu kullanılır. Bu otopilot, helikopterin istenilen koordinata ulaşabilmesi için yalpa ve sapma kanallarının referansının pilot yerine otomatik biçimde gidilecek rotaya göre ayarlanmasını sağlamaktadır. Bu sırada koordineli dönme otopilotu da devrededir.

Pilot ulaşmak istediği noktanın koordinatlarını referans değeri olarak girmektedir. Otopilot, helikopterin bulunduğu nokta ile referans verilen noktanın koordinatları arasındaki hata değerlerine göre helikopteri yönlendirmekte ve helikopteri doğru rotaya sokmaktadır.

Gidilecek yönü belirleyen sapma açısı (azimuth) referansı sabit olarak girilebileceği gibi, eğer harita üzerinde belirli bir hedefe yönelmek isteniyorsa, sapma açısı referansı uçuş yönetim sistemi (Flight Management System) tarafından sürekli olarak güncellenebilir.



Şekil 5. Rota Tutma Otopilotu

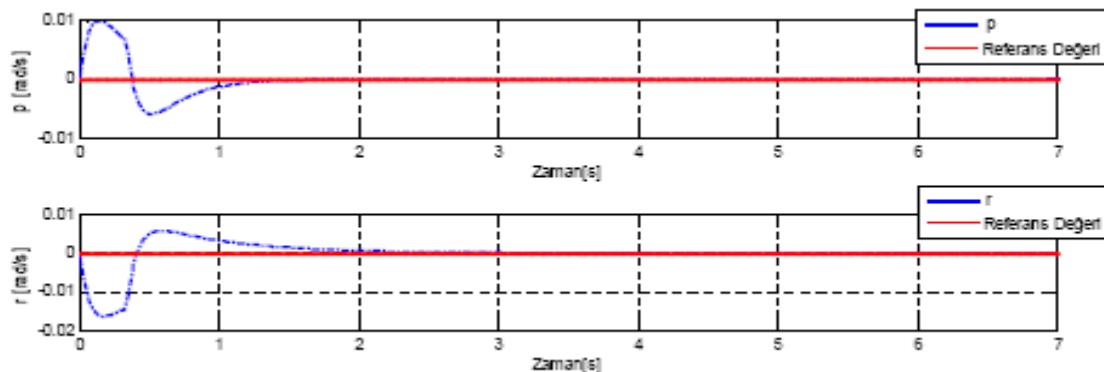
Şekil 5'te görüldüğü gibi rota tutma otopilotu yalpa açısı tutma otopilotuna kumanda etmektedir. Yalpa açısı dönme sağladığından rota tutma otopilotunun koordineli dönme otopilotu ile birlikte çalışmaktadır. Bu açıdan bakıldığından, helikopterin yanal hareketi açısından, rota tutma otopilotu en üst seviye otopilottur. Rota tutma otopilotu yalpa tutma otopilotuna kumanda ederken, yalpa tutma otopilotu da yalpa SAS'a kumanda etmektedir. Tüm bu döngüler sonuç itibarı ile, yalpa tablasının yanal hareketi ile kontrol edilmektedirler. Bu iç içe döngülere paralel olarak kuyruk rotoru ise koordineli dönme otopilotu ile kontrol edilmektedir. Böylece, bir uçuş yönetim sisteminden gelecek azimut komutları ile helikopterin yanal hareketini herhangi bir uçuş operatörüne ihtiyaç

duyulmadan tam otonomi ile gerçekleştirebilecek entegre bir mimari önerilmiş olmaktadır.

4. UÇUŞ SİMULASYONLARI

4.1. Yalpa SAS ile yapılan Uçuş Simülasyonu

Dengede bulunan helikopterin yalpa kanalına ve sapma kanalına 0.3 saniye basamak girdisi uygulanmış ve açısal hızlar gözlemlenmiştir. Açısal hız tepkileri Şekil 6'da verilmiştir.

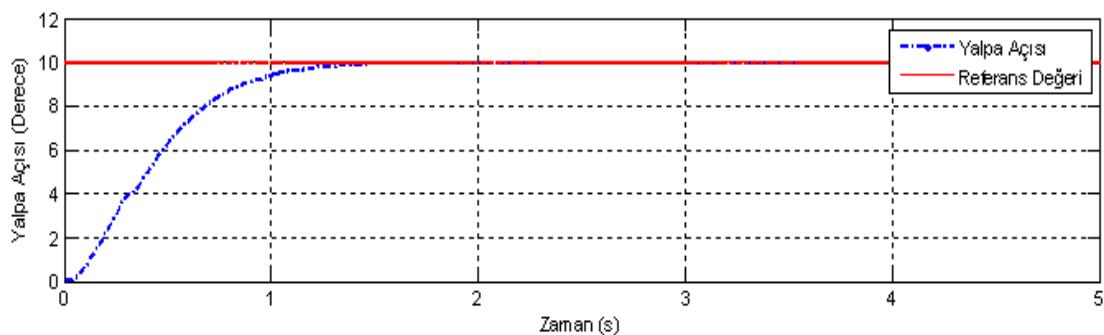


Şekil 6. Yalpa SAS ve Sapma SAS Uçuş Simülasyonu

SAS otopilotu, beklenildiği gibi helikopterin açısal hızlarını 0 değerinde tutabilmektedir. Bu platformun SAS altında kararlı olduğunu göstermektedir.

4.2. Yalpa Açısını Tutma Otopilotu Simülasyonu

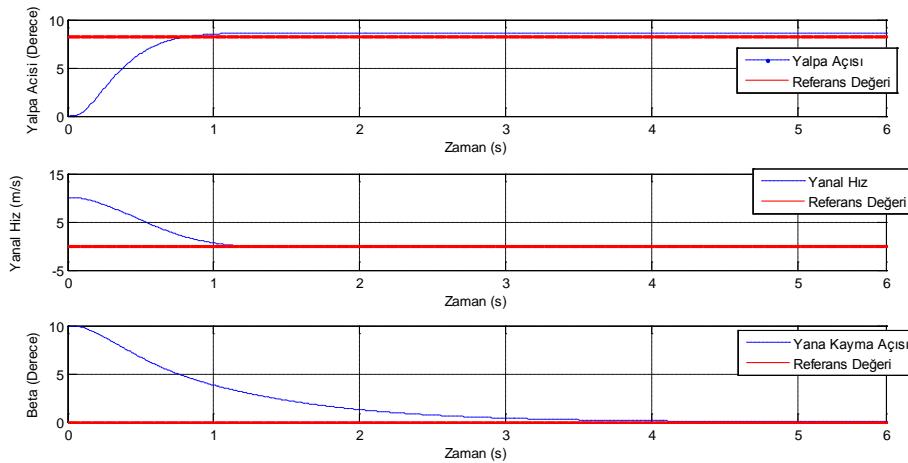
Dengede ve 0° yalpa açısında bulunan helikopterin 10° yalpa açısını tutma testi yapılmıştır. Şekil 7'de modelin tepkisi incelendiğinde, helikopterin 10° lik dönüşü yaklaşık 1,5 saniyede gerçekleştirdiği gözlenmektedir.



Şekil 7. Yalpa Açısı Tutma Otopilotu Simülasyonu

4.3. Koordineli Dönme Otopilotu Simulasyonu

Dengede ve 0° yalpa açısında bulunan helikopterin 8° yalpa açısını koordineli dönüş otopilotu ile tutma testi yapılmıştır. Modelin tepkisi Şekil 8'de verilmiştir.

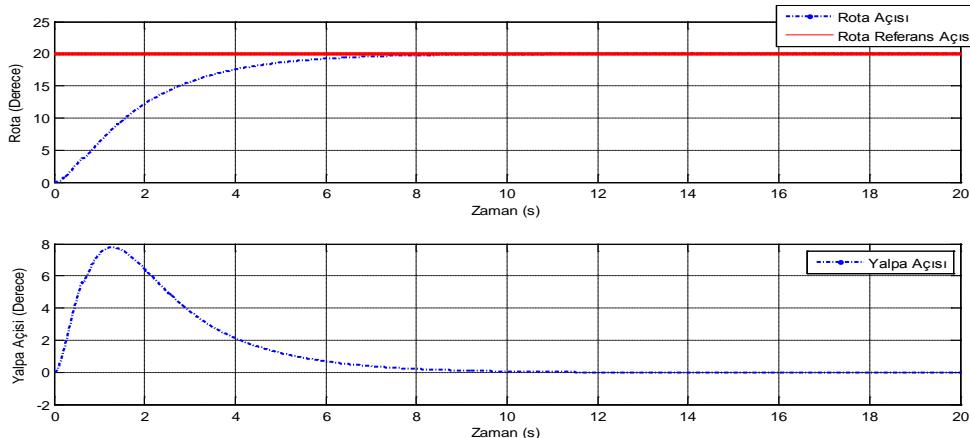


Şekil 8. Koordineli Dönme Otopilotu Simulasyonu

Şekil 8 incelendiğinde, helikopter 8° lik koordineli dönüşü yaklaşık 6 saniyede gerçekleştirmiştir. Bu simulasyon süresince yanal hız ve yana kayma açısının sıfır yaklaştığı gözlemlenmiştir.

4.4. Rota Tutma Otopilotu Simulasyonu

Bu test modelinde, helikopterin 20° lik azimuth referans değeri verilen rotaya oturmak için yalpa açısını koordineli biçimde ayarladığı ve helikopterin rotaya otururken yalpa açısını kademeli olarak düzelttiği gözlemlenmiştir.



Şekil 9. Rota Tutma Otopilotu Simulasyonu

5. SONUÇ

İnsansız bir helikopterin yanal haraketlerini tam otonom bir şekilde kumanda etmeye yönelik olarak yanal uçuş kontrol sistem mimarileri önerilmiştir. Önerilen uçuş kontrol mimarileri elimizde kapsamlı doğrusal olmayan modeli bulunan örnek bir platform için tasarlanmış ve önerilen kontrol sistemlerinin geri besleme döngüleri ayarlanmıştır. Alınan sonuçlar beklenildiği gibi referans değerlerinin hatasız veya ihmali edilebilecek kadar küçük hatayla takip edilebildiğini ve böylelikle kontrolün sağlandığı görülmüştür. Doğrusal olmayan simülasyon çalışmaları ile önerilen mimarilerin insansız helikopterler için etkin bir kontrol sağlayabileceği gösterilmiştir.

6. KAYNAKÇA

- [1] İbrahim Gökçeli, 2010, Helikopter Dinamiğinin Modellenmesi Simülasyonu ve Kontrolü, Hacettepe Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- [2] Özkanç, Y., 2006, Seyir , Gündüm ve Denetim Ders Notları, Hacettepe Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği
- [3] Mustafic, E., Pettersen, R., Fogh, M., 2005, Master Thesis, Nonlinear Control Approach to Helicopter Autonomy, Aalborg University
- [4] Nelson, R. C., 1989, Flight Stability and Automatic Control, McGraw- Hill Book Company
- [5] Stevens, B. L., Aircraft Control and Simulation, 1st Edition, John Wiley& Sons, Inc
- [6] Roskam, J., 2001, Airplane Flight Dynamics and Automatic Flight Controls, 3rd Printing, DARcorporation

İNSANSIZ BİR HAVA ARACI İÇİN YÖNELİM ÇÖZÜMÜ ALGORİTMASI VE OTOMATİK PİLOT UYGULAMASI

Eren Kahraman ^(a), Uğur Zengin ^(b), Volkan Nalbantoğlu ^(c), Nafiz Alemdaroğlu ^(d)

^(a) Aselsan Aş. MGE Grubu Akyurt, 06750, Ankara, ekahrama@mgeo.aselsan.com.tr

^(b) Aselsan Aş. MGE Grubu Akyurt, 06750, Ankara, uzengin@mgeo.aselsan.com.tr

^(c) Aselsan Aş. MGE Grubu Akyurt, 06750, Ankara, vnalbant@mgeo.aselsan.com.tr

^(d) Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Müh. Böl., 06531, Ankara,
nafiz@metu.edu.tr

ÖZ

Günümüzde insansız hava araçlarının güdüm, kontrol ve seyrüsefer sistemlerinde mikro elektro-mekanik sistem (MEMS) ataletsel sensörlerin etkili kullanımı için birçok çalışma yapılmaktadır. Hafif, küçük, enerji tüketiminin az ve maliyetinin düşük olması sebebiyle tercih edilen bu sensörlerin, yüksek gürültü seviyeleri, tek başlarına kullanıldığı zaman büyük hatalara yol açabilmektedir. Bu çalışmada MEMS ataletsel ölçüm birimine sahip, sabit kanatlı insansız bir hava aracı için yükseklik ve kuzey açısı otomatik pilot algoritmaları, yönelim ve kuzey açısı referans çıktıları için seyrüsefer algoritması tasarımları ve uygulaması anlatılmaktadır. Bu uygulama için ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü bünyesinde tasarımlı gerçekleştirilen taktik insansız hava aracı ODTÜ TİHA kullanılmıştır. Otomatik pilot ve seyrüsefer algoritmasının doğrulanması amacıyla, Matlab/Simulink' de ODTÜ TİHA'nın doğrusal olmayan modelinin, yükseklik ve kuzey açısı otomatik pilot döngülerinin, doğrusal olmayan eyleyici, sensör ve seyrüsefer modelinin simülasyon ortamı oluşturulmuştur. Simülasyon uygulamasının ilk kısmında, kontroleü için geri besleme sinyali ataletsel ölçüm biriminden alınmıştır. İkinci kısmda, geri besleme sinyali olarak, yönelim ve kuzey açısı referans modunda, dönüölçer çözümlerinin manyetik sensör ve ivmeölçer ile Kalman filtresi algoritmasından çıkan ölçümler kullanılmıştır. İki durum için kontroleü performansları karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kalman Filtre, Uçuş Kontrol Sistemleri, Manyetik Sensör, Mikroelektro-mekanik sensör, Otomatik pilot

ATTITUDE SOLUTION ALGORITHMS AND AUTOPILOT APPLICATION FOR AN UNMANNED AIRVEHICLE

ABSTRACT

Nowadays, there is a lot work done for the effective use of microelectro-mechanical system (MEMS) inertial sensors in an unmanned aerial vehicles guidance, control and navigation systems. Although, these sensors have high noise characteristics, they are preferable because of their low weight, small size, low power consumption and low cost. This study describes the design and implementation of the altitude and heading autopilot algorithms for a fixed wing unmanned air vehicle which has a MEMS inertial sensors and navigation algorithm for attitude and heading reference outputs. Algorithm development is based on the nonlinear mathematical model of Middle East Technical University Tactical Unmanned Air Vehicle (METU TUAV), which is linearized at a selected trim condition. A comparison of nonlinear and linear mathematical models is also done. Based on the linear mathematical model of the METU TUAV, the classical control methods are applied during the design process of autopilot algorithms. For the confirmation purposes of the autopilot and navigation algorithms, a nonlinear simulation environment is developed in Matlab/Simulink including nonlinear model of the METU TUAV, altitude and heading autopilot loops, nonlinear actuator models, sensor models and navigation model. In the first part, feedback signals for the controller are provided by IMU free measurements. In the second part, the feedback signals are provided by an attitude and heading reference mode, which incorporates the gyroscope solutions with the magnetic sensor and accelerometer sensor measurements by using a Kalman filter algorithm. The performance comparison of the controller is done for both cases where the effects of having different modes of the measurement sources are investigated.

Keywords: Kalman Filter, Flight Control Systems, Magnetic Sensor, Microelectro-mechanical sensor, autopilot.

1. GİRİŞ

Son dönemlerde, dünyada ve ülkemizde askeri ve sivil amaçlı, insansız hava araçlarının kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Operasyonel ve maliyet olarak ucuz, insan hayatı gibi bir risk taşımadığından dolayı kaybı göze alınabilen bu sistemler, keşif, tespit, takip, arama kurtarma ve muharebe gibi birçok görevde kullanılmaktadır. Eskiden uzaktan kumanda ile görüş mesafesinde kontrol edilebilen bu sistemler, artık gelişmiş uçuş kontrol sistemleri sayesinde otomatik olarak kilometrelerce uzakta istenilen görevleri yapabilmektedirler [1]. İnsansız hava araçlarının bu şekilde otomatik

uçuslarının sağlanabilmesi için güvenilir bir kontrol sistemine ve bu kontrol sistemine geri besleme sinyalini sağlayacak ölçüm sistemlerine ihtiyaçları vardır. Bu çalışmada insansız bir hava platformu için yükseklik ve kuzey açısı sabitleyici otomatik pilot modları ve platformun yönelimini hesaplamak için yönelim seyrusefer algoritması tasarımı ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

2. PLATFORM

ODTÜ Taktik İHA, sabit kanatlı, azami kalkış ağırlığı 120 kg, taşıyabildiği faydalı yük ağırlığı 30 kg olan bir hava platformudur. Bu çalışmada referans alınan ODTÜ Taktik İHA'nın özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. ODTÜ Taktik İHA Özellikleri

Kanat Açıklığı:	4.3 m
Uzunluk:	3.0 m
Gövde Genişliği:	0.3 m
Azami Kalkış Ağırlığı:	120 kg
Faydalı Yük Ağırlığı:	30 kg
Azami Hız:	300 km/saat
Seyir Hızı:	145 km/saat
Stall Hızı:	65 km/saat
Azami Menzil:	600 km
Azami Havada Kalma Süresi:	5 saat
Operasyonel Yükseklik:	3000 m
Faydalı Yük:	FLIR Kamera
Motor:	21 HP İki Silindirli Benzinli Motor

Tipik bir İHA uygulamasında, platform içerisinde otonom uçuşa olanak sağlamak amacıyla, işlemci, ataletsel ölçüm birimi, küresel konumlama sistemi (KKS) alıcısı bulunmaktadır [2]. Birçok ticari otopilotda sensörler, işlemci ve yardımcı devreler, ağırlık, boyut gibi kısıtlamalardan dolayı bir birimde toplanmıştır [8, 9]. Bu çalışmada platform içerisinde mikro elektro-mekanik sistem (MEMS) ataletsel sensörlerden oluşan ataletsel ölçüm birimi, küresel konumlama sistemi alıcısı ve manyetik sensör ve otopilot yazılımının koştuğu bir işlemci bulunduğu varsayılmıştır. Çalışmada modellenen ataletsel sensör birimi ve manyetik sensör parametreleri MicroStrain firmasına ait 3DM-GX1 sensörü referans alınarak belirlenmiştir [3].



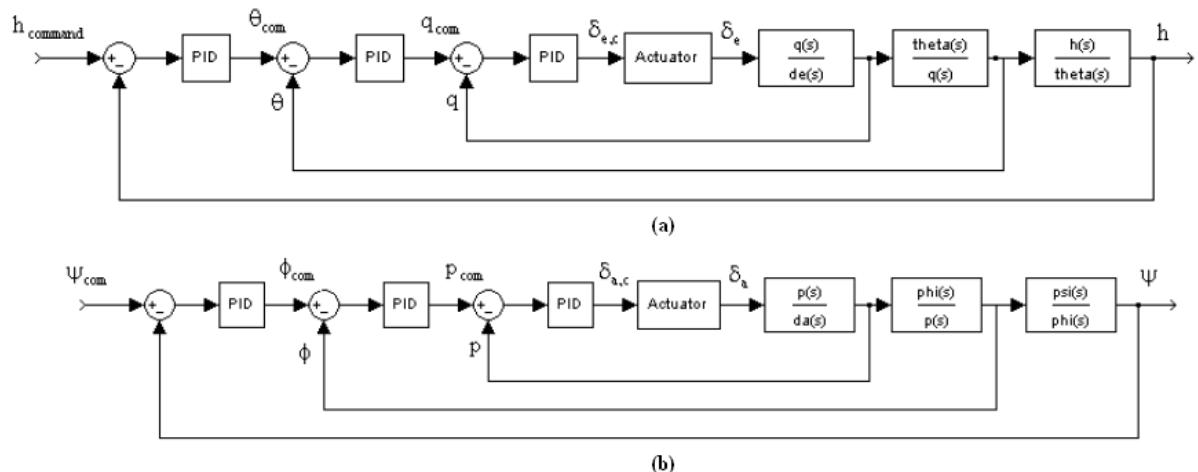
Şekil 1. ODTÜ TİHA

3. KONTROL SİSTEMİ

Yükseklik ve kuzey açısı sabitleyici otomatik pilot modları olmak üzere iki farklı otomatik kontrol sistemi modu tasarlanmıştır. Kontrol metodu olarak PID kullanılmıştır. Tasarımı kolaylaştırmak adına iki basamaklı tasarım yaklaşımı tercih edilmiştir. Yani öncelikli olarak iç döngüler tasarlanmış daha sonra dış döngülerle kapatılmıştır. Şekil 2'de yükseklik(a) ve kuzey açısı(b) sabitleyici otomatik kontrol modları yapısı gösterilmiştir. Yükseklik kontrolü kuyrukta bulunan elevatör, kuzey açısı kontrolü de kanatlarda bulunan eleronlar ile yapılmıştır. Kontrolcü yüzeylerinin hareketini sağlayan servolar $\zeta = 0.7063$ ve $\omega_n = 20\text{Hz}$ olmak üzere

$$G_{act} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

şeklinde modellenmiştir. Kontrol yüzeylerinin azami yer değiştirmesi ± 30 derece ve seçilen servoların hızı da $60^\circ/0.11$ saniyedir [4].



Şekil 2. Otomatik Pilot Yapısı

Analizler sonucunda bulunan kontrol parametreleri Çizelge 2 ve 3'de verilmiştir.

Çizelge 2. Yükseklik Kontrolcü Katsayıları

Kontrol Çevrimi	Oransal Kazanç Katsayısı	Entegral Kazanç Katsayısı	Türevsel Kazanç Katsayısı
Yunuslama Hızı Çevrimi	-1.6072	-3.3671	-
Yunuslama Açısı Çevrimi	0.85179	0.15	-
Yükseklik Çevrimi	0.035282	0.01	0.15

Çizelge 3. Kuzey Açısı Kontrolcü Katsayıları

Kontrol Çevrimi	Oransal Kazanç Katsayısı	Entegral Kazanç Katsayısı	Türevsel Kazanç Katsayısı
Yalpalama Hızı Çevrimi	0.044801	0.1788	-
Yalpalama Açısı Çevrimi	0.065074	0.29874	-
Kuzey Açısı Çevrimi	1.105	0.11347	0.3

4. YÖNELİM KALMAN FİLTRESİ

Hava platformun yönelimi dönüölülerden gelen açısal hız ölçümlerinin yönelim kinematiğiyle ortaya çıkan yön kosinüs denkleminin çözülmesiyle bulunur. Yön kosinüs matrisi dinamiği

$$\dot{C}_B^N = C_B^N \Omega_{NB}^B \quad (2)$$

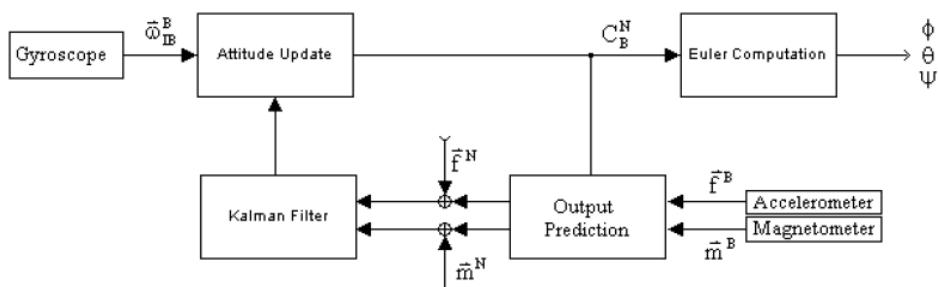
şeklinde ifade edilir [5]. Burada Ω_{NB}^B , gövde açısal hızının ters simetrik matrisidir ve dünya dönüşü ($\bar{\omega}_{IE}^N$) ve taşıma hızı ($\bar{\omega}_{FN}^N$) cinsinden

$$\bar{\omega}_{NB}^B = \bar{\omega}_{IB}^B - C_N^B \left(\bar{\omega}_{IE}^N + \bar{\omega}_{EN}^N \right) \quad (3)$$

hesaplanabilir.

Sadece MEMS dönüölçerlerden elde edilen dönü bilgisi, MEMS sensörlerin karakteristiklerinden dolayı büyük hatalara yol açabilmektedir. Örneğin, 300 derece/saat'lik sabit hata kararsızlığına sahip bir MEMS dönüölçer 5 dakika içerisinde 25 dereceye varan yönelim hatası yapabilmektedir. Bu nedenle, bu sistemler genellikle harici destekler (KKS, Manyetometre, Hava Hız Desteği vb.) ile bütünleşik olarak kullanılmaktadır [6].

Bu çalışmada KKS'nin kullanılamadığı durumda hava platformunun ölçüm hatalarını minimal düzeyde tutmak ve kontrol algoritmalarının çalışmasını doğrulukla sürdürübilmesi için, MEMS dönüölçerlerden gelen dönü bilgisi ivmeölçer ve manyetometre ile Kalman filtre yapısında bütünlendirilerek kullanılmıştır (Şekil 3).



Sekil 3. Yönelim Kalman Filtresi Blok Diagramı

En genel haliyle ayrik Kalman filtre öz yineli denklemleri (discrete Kalman filter recursive equation),

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H_k \hat{x}_k^-) \quad (4)$$

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} \quad (5)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (6)$$

$$\hat{x}_{k+1}^- = \Phi_k \hat{x}_k \quad (7)$$

$$P_{k+1}^- = \Phi_k P_k \Phi_k^T + Q_k \quad (8)$$

şeklinde yazılabilir [7]. Burada “ \hat{x}_k ”, sistem durum vektörünün kestirimi, “ P_k ”, sistem durum vektörü kestiriminin kovaryans değeridir. “ z_k ” ölçüm vektörü, R_k ölçümlerin kalitesini belirleyen ölçüm gürültü kovaryans matrisidir.

Φ_k durum vektörünün zamana bağlı değişimini tanımlayan süreç matrisidir. Q_k ise süreç denklemlerine bozunu olarak giren süreç gürültüsünün kovaryans matrisidir. H_k , ölçümlerin durum parametreleri ile değişimini gösteren ölçüm matrisidir. K_k , Kalman kazanç matrisidir ve ölçümün durum parametre kestirimindeki ağırlığını belirler.

Çalışmada kullanılan Kalman filtre, 9 durumlu bir hata durum filtresidir. 3 durum yönelim açı hatalarını, 3 durum ivmeölçer hatalarını ve diğer 3 durumda dönüölçer hatalarını modellemektedir. Ivmeölçer ve dönüölçer için birçok hata kaynağımasına rağmen bu çalışmada sadece sabit hatalar modellenmiştir. Sabit hatayı oluşturan iki etmen açılıştan açılışa ve çalışma esnasındaki hata değişimi, rastsal sabit ve Gauss-Markov stokastik süreci şeklinde, “w” beyaz gürültü olmak üzere denklem 9 ve 10’deki gibi modellenebilir.

$$\delta\dot{\omega}_{BIAS_OFFSET} = 0.0; \delta\dot{\omega}_{BIAS_STAB} = (-1/\tau_{GBIAS})\delta\omega_{BIAS_STAB} + w_{BIAS_STAB} \quad (9)$$

$$\delta\dot{a}_{BIAS_OFFSET} = 0.0; \delta\dot{a}_{BIAS_STAB} = (-1/\tau_{GBIAS})\delta\omega_{BIAS_STAB} + w_{BIAS_STAB} \quad (10)$$

Tasarımı yapılan Kalman filtre de bu iki model daha sade bir biçimde denklem 11 ve 12’deki gibi rastsal gezinti şeklinde modellenmiştir.

$$\delta\dot{\omega}_{RWBIAS} = w_{RW_GBIAS} \quad (11)$$

$$\delta\dot{a}_{RWBIAS} = w_{RW_ABIAS} \quad (12)$$

Filtrede kullanılan yönelim hata ise modeli denklem 13’de ki gibidir [1].

$$\dot{\psi} = -\omega_{in}^n \times \bar{\psi} + \delta\bar{\omega}_{in}^n - C_b^n \delta\bar{\omega}_{ib}^b \quad (13)$$

İvmeölçer ve manyetometre için ölçüm hata modeli olarak

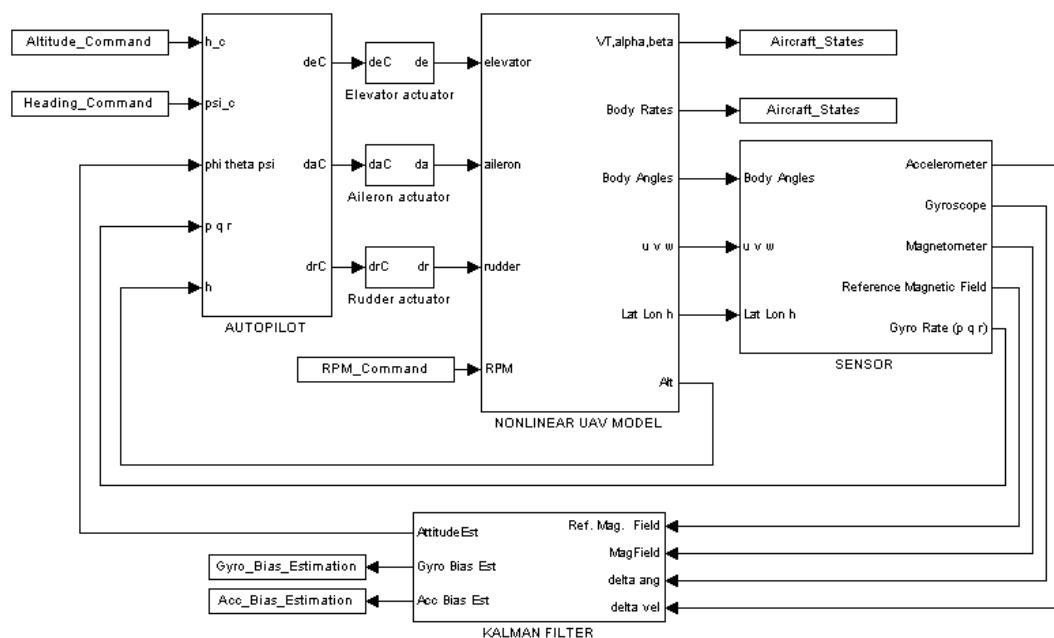
$$\delta \mathbf{a}_{\text{MEA}} = \mathbf{G}_{\text{REF}}^N - \mathbf{C}_B^N \bar{\mathbf{a}}_{\text{ACC}}^B - \Psi \mathbf{C}_B^N \bar{\mathbf{a}}_{\text{ACC}}^B + \mathbf{C}_B^N \delta \bar{\mathbf{a}}_{\text{ACC}} \quad (14)$$

$$\delta \mathbf{B}_{\text{MEA}} = -\Psi \mathbf{C}_B^N \bar{\mathbf{B}}_{\text{MAG}}^B + \mathbf{C}_B^N \delta \bar{\mathbf{B}}_{\text{MAG}} \quad (15)$$

kullanılmıştır.

5. KALMAN FİLTRESİ ve KONTROL SİSTEMİ UYGULAMASI

Çalışmada tasarlanan yükseklik ve kuzey açısı sabit tutucu kontrol sistemleri ve yönelim Kalman filtre algoritması MATLAB/Simulink'de bir araya getirilmiştir ve simülasyon ortamı kurulmuştur(Şekil 4).



Şekil 4. ODTÜ TİHA simülasyon modeli

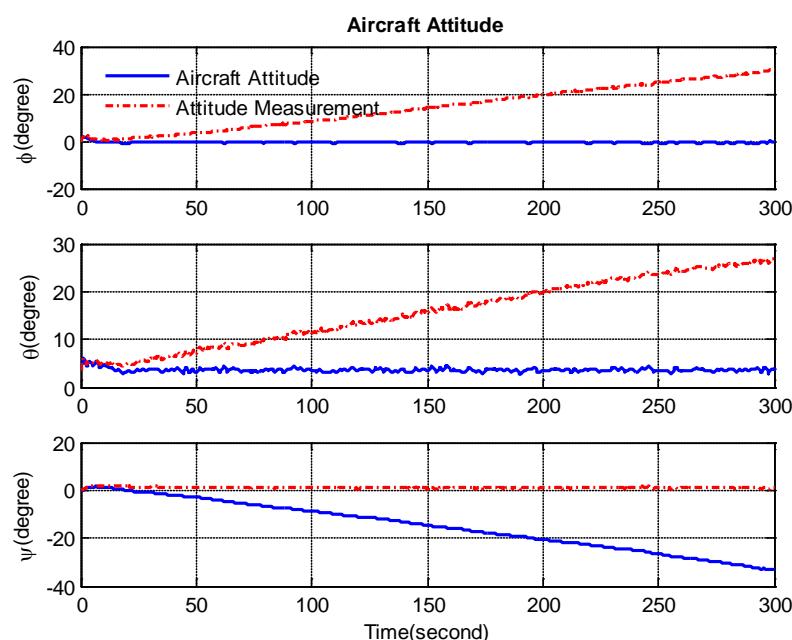
İki farklı koşulda simülasyon yapılmıştır. İlk kısım da dönüölçer çıktıları kontrol sistemine geri besleme olarak verilmiştir. İkinci kısım ise dönüölçer çıktıları, ivmeölçer ve manyetometre ölçümleri ile bütünlüştiren Kalman滤re çıktıları kontrol sistemine geri besleme sinyali olarak gönderilmiştir.

Şekil 5 ve Şekil 6'de denge durumunda seyreden insansız hava aracının 3005 metre yükseklik ve 2 derece kuzey açısı komutu için tepkisi gösterilmektedir. Sisteme geri besleme sinyali olarak dönüölçer çıktıları gönderilmiştir. Şekil 5'da, platformun kuzey açı (ψ) ölçümü sabit olmasına karşı, platform kuzeyde zamanla kaymaktadır. Burada yapılan analizler, kuzey açı komut sinyalinin sabit olduğunu ve kuzey açı ölçümünün

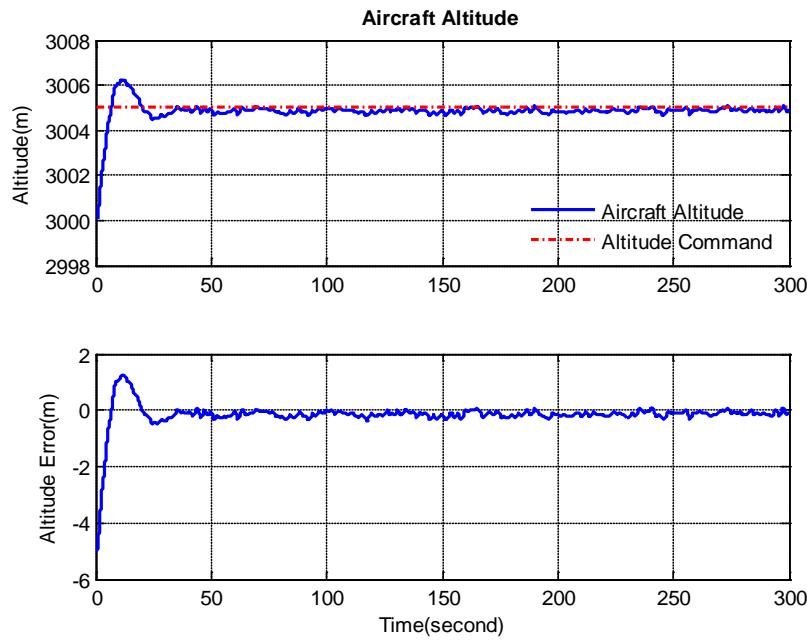
dönüölçer sabit hatası ile kaydığını göstermektedir. Dolayısı ile kontrolcü platformun kuzeyini dönüp sabit hatası kadar ancak ters işaretli olacak şekilde döndürmektedir.

Yine aynı şekilde görüldüğü üzere, platformun yalpa açı (ϕ) ölçümü kaymasına rağmen platform yalpa açısı değişimmemektedir. Burada da yapılan analizlerde, kuzey açısı ölçümünde ki sabit hata ve kuzey açı kontrolcüsünün dış çevrimi, dönüp ölçümüyle eşit bir yalpa açı komutu vermektedir. Kontrolcü çevrimleri de eksik çıkışlı geri besleme sinyalleri olduğundan bu iki değer birbirini yok etmekte ve platformun durağan bir yalpa açısında seyretmesini sağlamaktadır.

Yükseklik kontrol sistemi, dış çevrimi yükseklik ile kapatıldığından, yunuslama açı ölçüm hatası, platformun yunuslama açısını değiştirmemektedir.

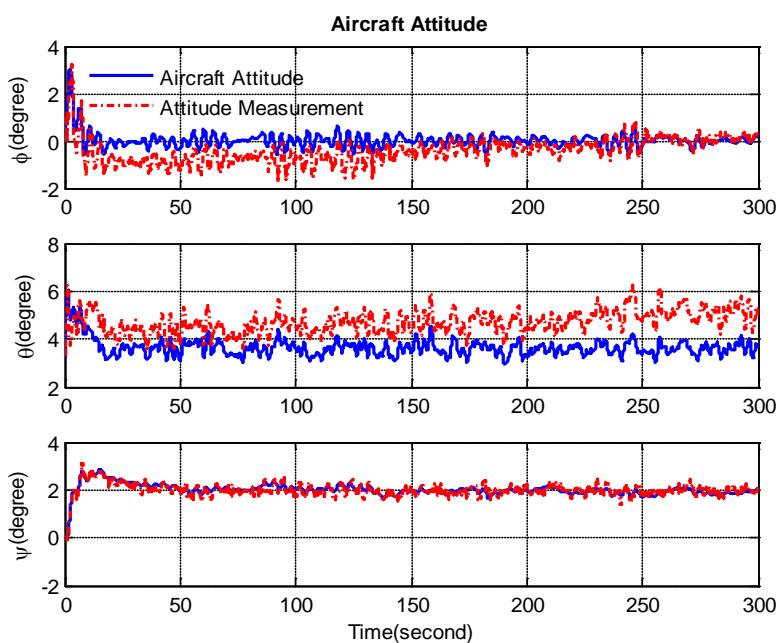


Şekil 5. TİHA Yönelim Tepkisi

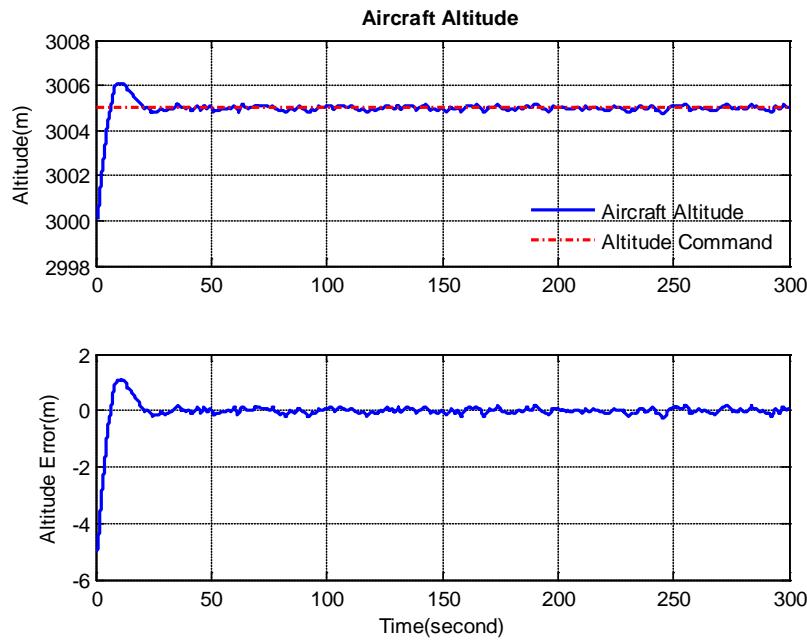


Şekil 6. TİHA Yükseklik tepkisi

Şekil 7 ve Şekil 8'da yine aynı koşullarda, 3005 metre yükseklik ve 2 derece kuzey açısı komutu için tepkisi gösterilmektedir. Sisteme geri besleme sinyali olarak Kalman filtre çıktıları gönderilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi, ivmeölçer ve manyetometre desteği yönelim açı ölçümlerinin hatalarını önlemiş ve platformun seyrine komutlar dahilinde devam etmesini sağlamıştır.



Şekil 7. TİHA Yönelim tepkisi



Şekil 8. TİHA Yükseklik tepkisi

6. SONUÇ

İnsansız hava araçlarının kullanımının her alana yayıldığı bu dönemde, boyut, ağırlık, güç tüketimi, elde edilebilirlik ve maliyet açısından birçok avantajı olan MEMS tabanlı ataletsel ölçüm birimleri her geçen gün önem kazanmaktadır. KKS ile kullanımı ile ortadan kaldırılan yüksek hata karakteristikleri, KKS'nin kullanılmadığı durumlarda telafi edilememekte ve platform için gerekli olan yönelim bilgisi yeterli doğrulukta üretememektedir. Bu çalışmada görüldüğü gibi, ataletsel sensör birimin de bulunan ivmeölçer ve ek bir manyetometre ile Kalman filtre aracılığıyla, MEMS sensörlerin hataları telafi edilmiş ve platform için gerekli yönelim bilgisi sağlanmıştır.

7. KAYNAKÇA

- [1] Barak, J. Carlson, "Past UAV Program Failures and Implications for Current UAV Programs", Air Command and Staff College, Maxwell Air Force Base, AL, Nisan 2001
- [2] HaiYang C., YongCan C., YangQuan C., "Autopilots for Small Unmanned Aerial Vehicles: A survey", International Journal of Control, Automation, and Systems (2010)
- [3] http://www.microstrain.com/pdf/3DM-GX1_Detailed_Specs-Rev1- 070723.pdf, Son Erişim Tarihi : 11.04.2011
- [4] Futaba S9405 Servo Coreless High Torque BB
- [5] Tittertoon, H. David, Weston, L. John, "Strapdown inertial Navigation Technology", The Institution of Electrical Engineers, Second Edition, 2004
- [6] Di Li, Rene Jr. Landry, Philippe Lavoie, "Low-cost MEMS Sensor-based Attitude Determination System by Integration of Magnetometers and GPS: A Real-Data Test and Performance Evaluation", IEEE, 2008
- [7] Brown, G. R., Hwang Y. C. Patrick, "Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering", John Wiley & Sons ,3rd. Edition , 1997.
- [8] <http://www.cloudcaptech.com>, Son Erişim Tarihi : 11.04.2011
- [9] <http://www.micropilot.com>, Son Erişim Tarihi : 11.04.2011

YAKIT PİLLİ İNSANSIZ HAVA ARACI TASARIM VE BENZETİMİ

Emre GÜLEÇ^(a), Semih TEKELİOĞLU^(b), Mehmet Burak SOLMAZ^(c),
Nilay SEZER-UZOL^(d), Ünver KAYNAK^(e)

Makine Mühendisliği Bölümü,
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara

^(a) st05150026@etu.edu.tr, ^(b) st05150307@etu.edu.tr, ^(c) mbsolmaz@yahoo.com.tr
^(d) nsezeruzol@etu.edu.tr, ^(e) ukaynak@etu.edu.tr

ÖZ

Bu makalede bir üniversite - sanayi işbirliği çerçevesinde yüksek kanat açıklık oranlı olarak tasarlanan ve imal edilen yakıt pilli insansız hava aracının (Akbaba İHA) kavramsal tasarımının yanı sıra aerodinamik ve yapısal analizi anlatılmaktadır. Aracın kavramsal tasarımını benzer uçakların fizibilite çalışmalarında kullanılmış parametrik değerlerinden faydalananarak başlatılmış olup, ticari yazılımlar ve internetten erişimi serbestçe sağlanan yazılımlar kullanılarak yapılmıştır. Yüksek kanat açıklıklı olan Akbaba İHA için Eppler 420 profili kanat profili kullanılmıştır. Özellikle düşük Reynolds sayılarında yüksek kaldırma kuvveti katsayısına sahip olduğu için seçilen bu profil için hem 2-boyutlu potansiyel akış çözümleri hem de Reynolds-Ortalama Navier-Stokes çözümleri yapılmış ve aerodinamik performans katsayıları karşılaştırılmıştır. Ayrıca, kavramsal tasarımını yapılan Akbaba İHA'nın tüm gövde etrafındaki 3-boyutlu akış analizleri ve 3-boyutlu yapısal analizleri de yapılarak performans karakteristikleri, 2-boyutlu akış analizleri ile karşılaştırmaları ve sonuçların İHA tasarım kriterleri ve beklenileri ile uygunluğu tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akbaba İHA, İnsansız Hava Aracı (İHA), Kavramsal tasarım, Hesaplamlı Akışkanlar Dinamiği (HAD), Sonlu Elemanlar Metodu (SEM)

DESIGN AND SIMULATION OF A FUEL CELL UNMANNED AERIAL VEHICLE ABSTRACT

This paper describes the conceptual design and aerodynamic and structural analyses of a fuel cell unmanned aerial vehicle which is designed and build with a large-aspect ratio

wing as a university-industry cooperation project. The concept design starts with the sizing of the aircraft based on parameters used for similar aircraft in the literature, and commercial and freely available programs in the internet were used in the process. Eppler 420 wing section was used for the large aspect ratio wing of AKBABA. This profile was specifically selected owing to its high lift characteristics at low Reynolds numbers and both 2-D potential flow and Reynolds-Averaged Navier-Stokes solutions were obtained and aerodynamic performances were compared. Furthermore, having completed the conceptual design and full 3-D fluid flow analysis, and 3-D structural analysis, the performance characteristics and comparison with 2-D analysis were done along with a discussion of whether expectations were fulfilled against the UAV design criteria.

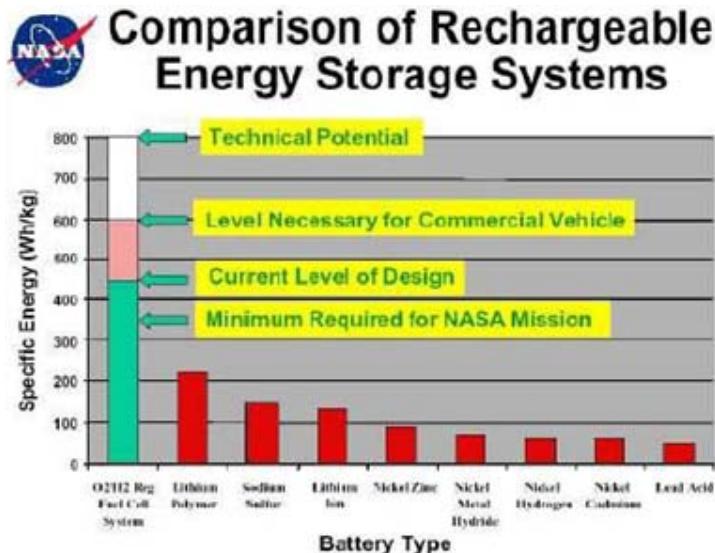
Keywords: Akbaba UAV, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Conceptual design, Computational Fluid Dynamics (CFD), Finite Element Method (FEM)

1. GİRİŞ

İnsansız Hava Araçlarının (İHA) motor seçiminde sahip oldukları yüksek enerji yoğunluğu nedeniyle yakıt pilleri ile çalışabilen elektrik motorları, içten yanmalı motorlara ve pilli elektrik motorlara karşı önemli bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. NASA ERAST yüksek irtifa programı (circa 2005) kapsamında yapılan fizibilite analizine göre Şekil 1'de görüldüğü gibi [1] Li – Po bazlı pillerin özgül enerji seviyeleri 200Wh/kg iken yakıt pillerin mevcut kapasiteleri 450 Wh/kg civarında olduğu, yakıt pillerinin teknik kapasitelerinin 800 Wh/kg'a ulaşabileceği belirtilmektedir. Buna karşılık günümüz lityum temelli bataryaların 250 Wh/kg seviyesine [2], günümüz yakıt pilleri kapasitelerinin ise 1000Wh/kg seviyelerine ulaştığı görülebilir [3]. Böylece, yakıt pilleriyle çalışan uzun seyir süresine sahip hava araçlarının tasarımları [4] ve yüksek irtifa araştırma amaçlı hava araçlarının tasarımları [5] yapılmaya başlanmıştır.

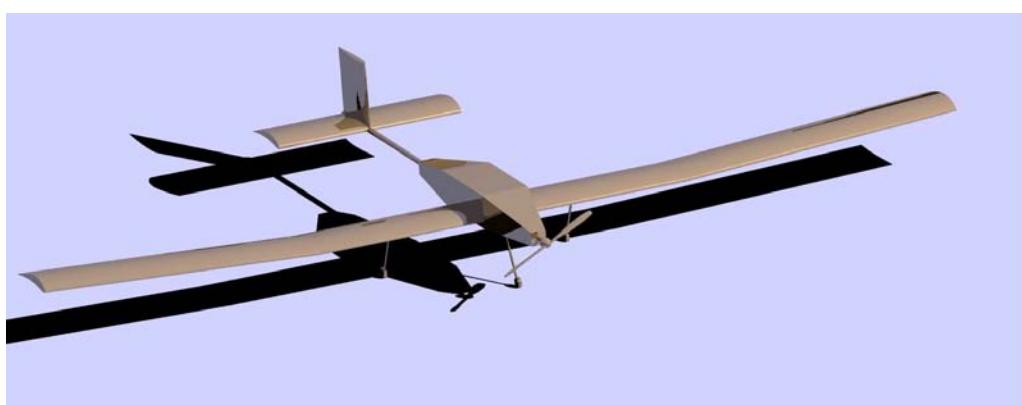
Geleceğin stratejik aracı olması muhtemel havacılık alanında TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde araştırmalara 2008 yılında başlanmıştır. 2009-2010 yıllarında TESEM A.Ş. işbirliği ile ilk tasarım tamamlanarak imal edilmiş ve yakıt pili taşıyacak özellikteki insansız hava aracı AKBABA, 2010 yılında Lityum-Polimer batarya kullanarak iki başarılı test uçuşunu gerçekleştirmiştir [6]. Proje kapsamında mevcut akademik çalışmaların ışığında bir tasarım döngüsü oluşturulmuş ve amaçlar doğrultusunda çeşitli iterasyonlarla optimum tasarım elde edilmiştir. AKBABA İHA'nın ön ölçülendirme analizlerinde ve tasarım sürecinde Raymer [7] ve Roskam [8] yöntemleri kullanılmıştır. Analiz çalışmalarına paralel olarak fakülte laboratuvarlarında yapılan deneylerinden elde edilen ilgili veriler de kullanılarak aracın en verimli geometrik ve yapısal şekli belirlenmiştir. Akabinde imalatına başlanan

AKBABA İnsansız Hava Aracı, imalat sonrasında yaptığı test uçuşlarında başarılı olmuştur.



Şekil 1. Şarj edilebilir enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması

Fizibilite aşamasında dünyada yaygın olarak kullanılan “Response Surface Matrix” veya benzeri değerlendirme yöntemine girilmeden dünyadaki benzer çalışmalarından [9] elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde incelendikten sonra tasarımda konvansiyonel geometri, yüksek en boy oranı, tek yönlü itki ve üç tekerli iniş sistemi kullanabilecek seçenekler arasından seçilmiştir. Raymer [7] ve Roskam [8] yöntemleri bilgisayar ortamındaki Microsoft Excel temelli hesap tablolarına aktarılarak çok süratli biçimde değişik kavramsal tasarımların ön hesaplarının yapılması hedeflenmiştir. Kavramsal tasarım sonucunda açığa çıkan Akbaba insansız hava aracı 5 m kanat açıklığına sahip olmakta ve yaklaşık 5 kg faydalı yük taşıyabilmektedir. Akbaba insansız hava aracının bu tasarım parametreleri, ona sınıfı için örnek alınabilecek bir proje özelliği vermektedir. Akbaba İHA’nın konsept tasarımını sonucu elde edilen veriler ile CATIA V5 ® [10] yazılımı ile uçağın 3-boyutlu katı modeli çizilmiştir (Şekil 2).

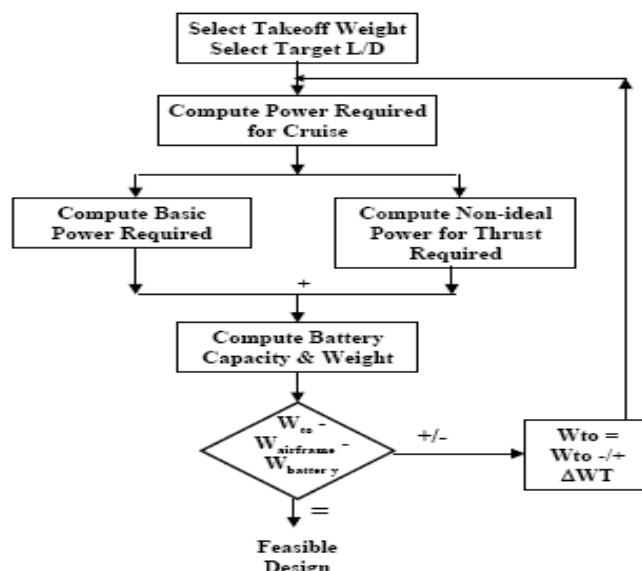


Şekil 2. Akbaba İHA’nın kavramsal tasarım çizimi

Tasarım yöntemi:

Mini ve mikro sınıfı insansız hava araçlarının (İHA) tasarım ve analiz yöntemleri henüz daha üst sınıf insansız uçaklar ve normal uçaklarda olduğu kadar gelişmemiştir. Bunun başlıca sebepleri arasında düşük Reynolds sayılı akış rejimi için başta kanat olmak üzere uçak bileşenlerinin aerodinamik performansıyla ilgili deneysel ve kuramsal yöntemlerin henüz gelişme aşamasında olması gelir. Keza büyük uçaklar için geliştirilmiş olan yarı-deneysel tasarım paket programlarında kullanılan veri tabanları da [11] klasik uçak şekillerine uygunluk göstermektedir. Buna karşılık küçük ölçekli uçaklara yüklenen görevlerin değişik olması dolayısıyla tasarlanan konfigürasyonların normal sınıf uçaklardan bir hayli uzak olması, küçük ölçekli uçak geometrilerinin daha zor modellenmesine sebep olmaktadır. Son olarak, küçük ölçekli İHA'larda çeşitli sebeplerden ötürü kullanılan elektrikli motorlar, klasik içten yanmalı motorlarda sarfedilen yakıtın ağırlığına bağlı olarak görev boyutlandırması yapan tasarım programlarının yapısına uymamaktadır. Bu sebepten ötürü, mevcut tasarım programlarının değiştirilerek veya parametrelerle oynanarak kullanılması zorunluluğu doğmaktadır.

Klasik yakıtlı uçaklarda kullanılan tasarım yönteminde, öncelikle bir W_0 azami kalkış ağırlığı kabul edildikten sonra istatistiksel eğrilerden hareketle bir W_e boş ağırlık hesaplanır ve görev esnasında sarfedilen W_f yakıt ağırlığı değişken parametre olarak alınarak ağırlık denklemi üzerinde iterasyon yapılır [7]. İterasyon sonucunda bulunan ağırlık W_e/W_0 oranı uçağın görev tanımını yerine getiren optimal ağırlık oranıdır. Elektrik motorlu araçlarda ise sarfedilen miktar yakıt değil baryalarda saklanan güç olduğu için ağırlık üzerine iterasyon yapılamaz. Bu sebepten dolayı bir örneği Kaynak [12]'de verilen ve Şekil 3'de gösterilen tarzda bir iterasyon yapılabilir.



Şekil 3. Elektrikli Araç Boyutlandırma Döngüsü

Akbaba İHA tasarım ve analiz sürecinde elektriksel araçlara uygun ve kullanıma uygun bir tasarım yöntemi bulunmadığı için yakıtlı araçlar için geliştirilmiş klasik tasarım yöntemlerinden RDS yöntemi [7] ile program parametrelerinden bazıları üzerinde oynanarak simülasyon yapılmıştır.

Burada mevcut uçaktaki elektrik motoruyla aynı güce sahip içten yanmalı motor ağırlığı kabul edilmek ve yakıt sarfiyatı dolayısıyla değişen ağırlığın faydalı ağırlığa göre oranını tasarım hassasiyeti kabul etmek suretiyle sadece seyir şartlarında tutarlı değerler elde edilecek şekilde program çalıştırılmıştır. Burada karşılaşılan diğer bir zorluk da RDS ve benzeri yöntemlerin optimal değer bulabilmek için iterasyon sırasında motorun “lastik” motor yani değişimle motor olmasını gerektirmesi, halbuki burada mevcut motorlar arasından uygun bir motor seçimi yapıldıktan yani motor “dondurulduktan” sonra, elde edilen performans değerlerinin optimal olamayacağıdır. Bu sebeplerden ötürü, Akbaba İHA’nın ilk tasarım konfigürasyonunda ortalama değerler elde edilmiş olup, uçuş testleri sırasında elde edilen telemetre bilgileri işlendikten sonra yeni nesil tasarımlarda modifikasyona gidilmesi planlanmaktadır.

Kararlılık:

Tasarım ve analiz sürecinde sadece ticari programlar değil, kararlılık ve kontrol için gereken tarafsız nokta (neutral point) hesapları ve benzeri hesaplar için Tablo 1’ de verildiği gibi “spreadsheet analysis” tipi kısa hesap programları geliştirilmiştir. Böylece klasik uçaklarda kullanılan veri tabanına dayalı aerodinamik parametrelerin ve/veya bir İHA’da kullanılabilen sıra dışı tasarımların ve bunların modellenmesindeki kabullerin uçağın kararlılığına getirebileceği etkiler sınanmıştır. Mevcut ortalama yükleme altında uçak statik olarak lövye-sabit %8 ve lövye-serbest %4 oranında kararlıdır.

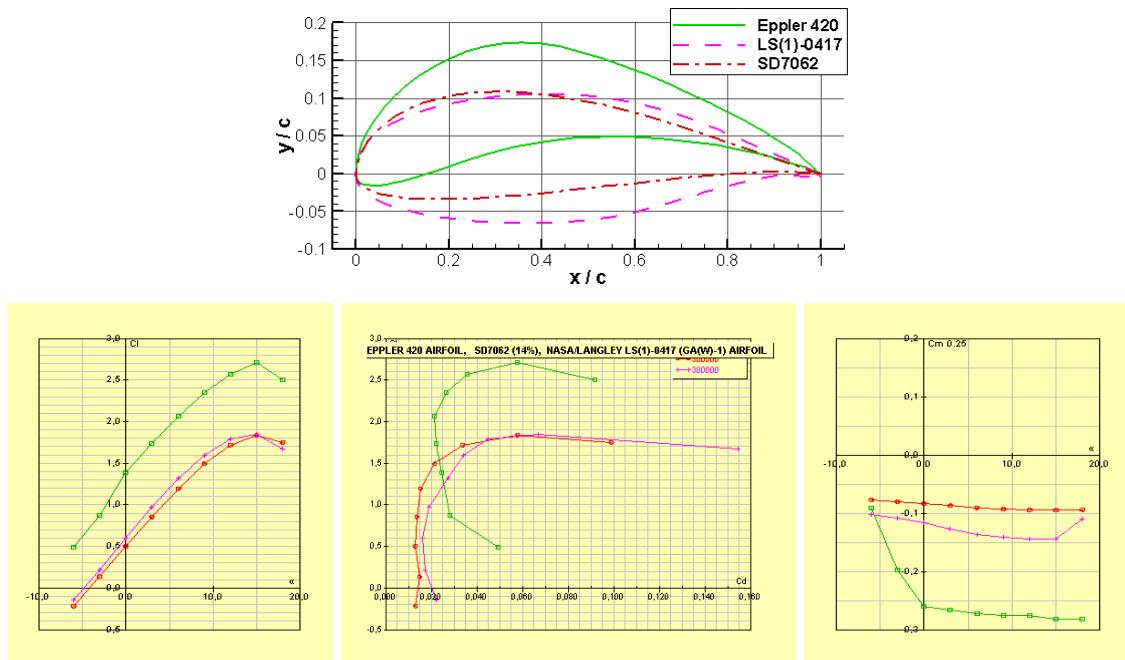
Tablo 1. Uzunlamasına statik kararlılık analizi

AIRCRAFT LONGITUDINAL STABILITY ANALYSIS					
Component	Input	Symbol	Reference	Entry	Unit
Wing	airfoil lift curve slope	Cla	Javafoil	6.28	/rad
	mean aero chord	mac		0.340	m
	most aft cg location	Xcg		0.880	m
	cg_bar loc	X-cg		2.588	
	ac location	Xacw		0.850	m
	ac_bar loc	X-acw		2.500	
	ref area	Sw		1.750	m ²
	exposed area	Sexp		1.700	m ²
	aspect ratio	A		15.00	
	span	b		5.050	m
Fuselage	1-M*2	beta		1.00	
	eta	Cla/2pi/beta		1.00	
	sweep	Λ tmax		1.00	deg
	% pos. of wing ac location	Xacw / Lf		0.369	
	empirical pitch mom. fac.	Kf	Fig. 16.14	0.015	
H. Tail	fus. width	Wf		0.250	m
	fus. length	Lf		2.302	m
	Diameter	d		0.250	m
	airfoil lift curve slope	Clah		6.28	/rad
	ac location	Xach		2.200	m
	ac_bar_loc	X-ach		6.471	
	Tail arm	Lt		1.350	m
	Upwash	d(epsi)/dα	Fig. 16.12	0.200	
	Downwash	d(α_h)/dα		0.800	
	H.Tail eff.	eta_h	Eq. 16.6	0.900	
	ref area	Sh		0.210	m ²
	exposed area	Sexp		0.210	m ²
	aspect ratio	A		4.000	
	span	b		0.916	m
	1-M*2	beta		1.000	
	eta	Cla/2pi/beta		1.000	
	sweep	Λ tmax		0.000	deg
(STICK FIXED AND FREE)					
Formulas		Reference	Results		
Wing terms					
$1+\tan(\Lambda_t \text{tmax})^2/\beta^2$		Denom. Eq. 12.6	1.00		
$\sqrt{4+A^2\beta^2}/2\eta\alpha^2(1+\tan(\Lambda_t \text{tmax}))$		Denom. Eq. 12.6	15.14		
Wing CL _a		Eq. 12.6	6.30		
Fuselage terms					
$F=1.07(1+d/b)^2$		Eq. 12.9	1.18		
$KPVf^2/2\eta\alpha^2/\text{f}/\text{mac}^*\text{Sw}$		Eq. 16.22	0.004		
C _m fus		Eq. 16.22	0.208		
Tail terms					
$1+\tan(\Lambda_t \text{tmax})^2/\beta^2$			1.00		
$\sqrt{4+A^2\beta^2}/2\eta\alpha^2(1+\tan(\Lambda_t \text{tmax}))$			4.47		
H.Tail CL _a		Eq. 12.6	3.88		
Neutral Point Calculation					
Cm-Tail effect		Eq. 16.9	0.34		
Numerator (Stick-fixed)		Eq. 16.9	17.71		
Denominator (Stick-fixed)		Eq. 16.9	6.63		
Numerator (Stick-free)		Eq. 16.9*tail fac 0.8	17.27		
Denominator (Stick-free)		Eq. 16.9*tail fac 0.8	6.57		
Stick-fixed Stability					
Xnp_bar		Eq. 16.9	2.670		
Xnp			0.908		
Static Margin		Xnp_bar - Xcg_bar	0.081		
Cm_alf		Eq. 16.10	-0.512		
Stick-free Stability					
Xnp_bar		Eq. 16.9*tail fac 0.8	2.631		
Xnp			0.894		
Static Margin		Xnp_bar - Xcg_bar	0.042		
Cm_alf		Eq. 16.10	-0.267		

2. AKBABA İHA AERODİNAMİK ANALİZİ

2.1. Kanat profili seçimi

Günümüzde mevcut olan marjinal yakıt pili çıkış gücü kapasitesi göze alındığında, Akbaba İHA için kanat profili seçimi yüksek kaldırma kuvveti olan kanat profili seçilme sınırlaması getirmektedir. Bu sebeple, tasarım sırasında model uçaklarda ve İHA'larda sıkılıkla kullanılan Selig-Donovan SD7062 [13], genel olarak havacılıkta sıkça kullanılan NASA LS(1)-0417 ve yüksekten uçan uçaklar için tasarlanmış Eppler 420 kanat profilleri gözönünde bulundurulmuş ve yapılan potansiyel akış analizleri sonucunda Eppler 420 kanat profili seçilmiştir. Bu seçimde JAVAFOIL [14] adlı internet kaynaklı ücretsiz program kullanılarak kanat verileri karşılaştırılmıştır. Düşük Reynolds sayısı (300 000) temel alınarak sürükleme kuvveti, kaldırma kuvveti ve moment katsayıları karşılaştırması Şekil 4'de gösterildiği gibi yapılmıştır. Karşılaştırma sonuçlarına bakıldığında Eppler 420 kanat geometrisinin düşük Reynolds sayılarında diğer geometrilere göre oldukça yüksek bir kaldırma kuvveti sağladığı, fakat aynı derecede de sürükleme kuvveti ve negatif yunuslama momenti oluşturduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4. Eppler 420, SD7062 ve LS(1)-0417 kanat profilleri için $Re = 300\ 000$ için elde edilen taşıma, sürükleme ve moment katsayıları

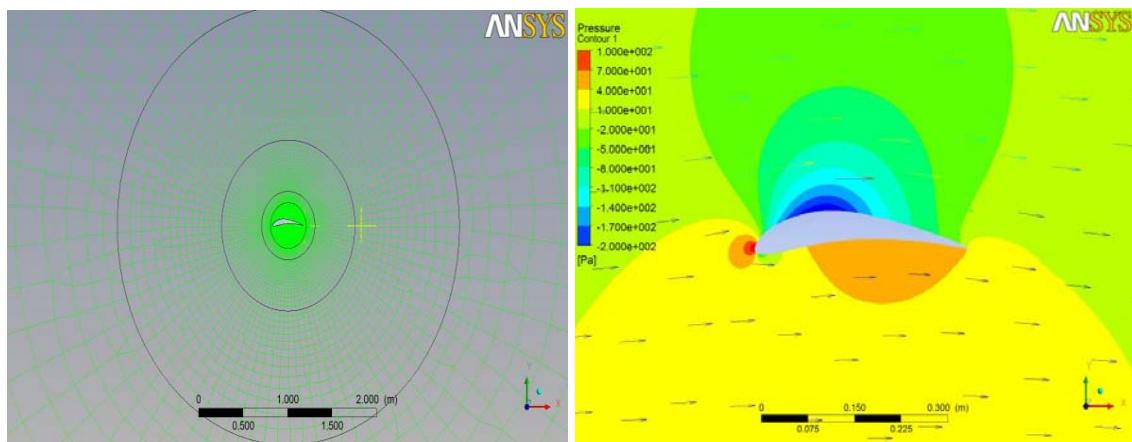
2.2. Kanat profilinin 2 boyutlu analizi

Aerodinamik çalışmalar, Reynolds-Ortalama Navier-Stokes denklemlerine dayalı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri ile de yapılmıştır. Öncelikli olarak JAVAFOIL verilerini de sınamak amacıyla düşük Reynolds sayılarında kanat profilleri

için HAD simülasyonları yapılmıştır. ANSYS CFX [15] yazılımı kullanılarak yapılan çalışmalara bir örnek olarak Şekil 5'de Eppler 420 geometrisini sarmalayan çözüm ağı yapısı gösterilmektedir. Toplam 125 528 nokta sayısı kullanılarak yapılan iki boyutlu analizde farklı türbülans modelleri de karşılaştırılmıştır. Cebirsel model, Standard $k-\varepsilon$ modeli, $k-\varepsilon$ RNG modeli, $k-\omega$ SST modeli ve SSG Reynolds Stress modeli karşılaştırma için kullanılan türbülans modellerindendir. $k-\omega$ SST modelinin 350 000 Reynolds sayısı için verdiği basınç konturu ve hız vektörlerinin gösterimi Şekil 6'da sunulmaktadır. Kanat profilinin üst kısmında yüksek kaldırma kuvvetine sebep olacak bir emme basınç alanı oluştugu göze çarpmaktadır. Tablo 2, sıfır-derece hücum açısında 350 000 Reynolds sayısı için yapılan farklı türbülans modellerinin sonuçlarını vermektedir. Göründüğü gibi kaldırma katsayısı baz alındığında SST modeli ve SST Reynolds Stress modeli, sürükleme katsayısı baz alındığında ise Standard $k-\varepsilon$ modeli ve JAVAFOIL verileri birbiriyle oldukça uyum içerisindeidir.

Tablo 2. Farklı türbülans modellerinin karşılaştırılması ($\alpha=0^\circ$, $Re=350\,000$)

Türbülans Modeli	Cl	Cd
Javafoil	1,40	0,030
Algebraic	1,14	0,065
Standard $k-\varepsilon$	1,07	0,030
RNG $k-\varepsilon$	1,08	0,029
$k-w$ SST	1,23	0,019
SST Reynolds Stress	1,33	0,008



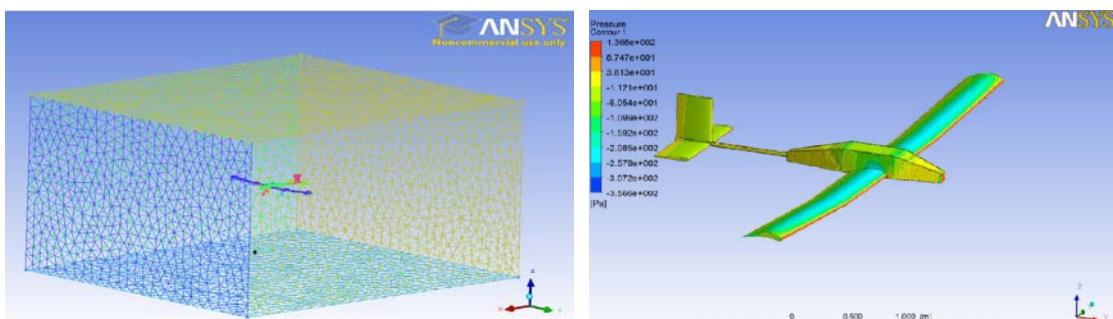
Şekil 5. Eppler 420 kanat profili ağı yapısı **Şekil 6.** Basınç ve hız vektörleri dağılımı

2.3. Akbaba İHA'nın 3 boyutlu analizi

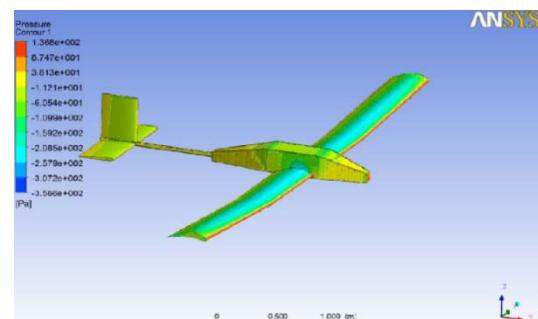
3-boyutlu Akbaba İHA etrafındaki HAD akış analizlerinde ANSYS IcemCFD çözüm ağı yaratma ticari yazılımı ve Ansys CFX HAD ticari yazılımı kullanılmıştır. 15 m/s ve 20 m/s serbest akım hızları, farklı hücum ve yalpa açıları için simülasyonlar yapılmıştır. TOBB ETÜ HAD Laboratuvarı'nda dört yüzeyle (tetrahedral) yapısal olmayan hücrelere sahip çözüm ağları yaratılmış ve kullanılmıştır. Kullanılan çözüm ağlarından seyrek olanı 127 000 nokta sayısına sahip iken sıkı çözüm ağı 477 000 nokta sayısına sahiptir. Daimi RANS simülasyonlarında, kanat profilinin HAD analizinde deneyel sonuçlara en yakın sonucu verdiği için, $k-\varepsilon$ türbülans modeli kullanarak İHA etrafındaki 3-boyutlu akış elde edilmiştir. Şekil 7'de akış alanı ve yapısal olmayan çözüm ağının gösterilmesi, Şekil 8'de analizler sonucu elde edilen İHA'nın tüm kanat / gövde / kuyruk yüzeylerindeki örnek basınç dağılımı gösterilmektedir. Akbaba İHA'nın 3 boyutlu analizleri yapılırken pervane ve iniş takımları göz önüne alınmamış olup, şu durumlar için analizler yapılmıştır:

- Uçak 15 m/s hız ile tam karşidan akış alıyor ise
- Uçak 20 m/s hız ile tam karşidan akış alıyor ise
- Uçak 15 m/s hız ile 5° açı ile yandan akış alıyor ise
- Uçak 20 m/s hız ile 5° açı ile yandan akış alıyor ise
- Uçak 15 m/s hız ile 5° açı ile alttan akış alıyor ise
- Uçak 20 m/s hız ile 5° açı ile alttan akış alıyor ise

Tablo 3'de ise İHA'nın yukarıda belirtilen durumlarda hesaplanan kaldırma ve sürükleme kuvveti değerleri verilmiştir.



Şekil 7. Akbaba İHA akış alanı ve yapısal olmayan çözüm alanı



Şekil 8. Akbaba İHA 15 m/s ile karşidan akış aldığı durum için basınç dağılımı

Tablo 3. 3-boyutlu HAD Analizleri sonucu elde edilen kuvvet değerleri

	KALDIRMA KUVVETİ (Newton)					SÜRÜKLENME KUVVETİ (Newton)				
	WINGS	FUSELAGE	HORIZONTALTAIL	VERTICALTAIL	BOOM	WINGS	FUSELAGE	HORIZONTALTAIL	VERTICALTAIL	BOOM
Karşidan 15 m/s ile fine mesh	262,28	424,48	305,97	0,08	0,01	-17,64	-115,15	-114,21	-0,40	-0,02
Karşidan 20 m/s ile fine mesh	471,05	777,56	53,11	0,14	0,00	-309,51	-199,59	-195,99	-0,69	-0,04
Altın 15 m/s ile 5° ile fine mesh	277,11	466,04	356,68	0,08	0,01	-148,98	-111,82	-115,64	-0,40	-0,02
Altın 20 m/s ile 5° ile fine mesh	498,38	853,07	622,18	0,14	0,01	-260,53	-193,50	-198,80	-0,69	-0,04
Yandan 15 m/s ile 5° ile fine mesh	261,05	433,90	307,10	0,08	0,00	-175,90	-115,46	-113,82	-0,40	-0,02
Yandan 20 m/s ile 5° ile fine mesh	469,66	795,14	534,20	0,14	0,00	-30,91	-200,46	-195,60	-0,68	-0,04
Karşidan 15 m/s ile Coarse mesh	250,11	405,83	248,53	0,08	-0,05	-200,45	-122,02	-117,85	-0,47	-0,04
Karşidan 20 m/s ile Coarse mesh	446,83	72,91	437,67	0,15	-0,09	-352,31	-21,15	-203,32	-0,81	-0,08
Altın 15 m/s ile 5° ile Coarse mesh	254,90	448,51	300,13	0,08	-0,04	-176,73	-11,83	-11,90	-0,47	-0,04
Altın 20 m/s ile 5° ile Coarse mesh	472,94	805,50	530,03	0,15	-0,08	-306,03	-205,39	-205,90	-0,81	-0,08
Yandan 15 m/s ile 5° ile Coarse mesh	248,91	415,47	248,74	0,08	-0,04	-199,77	-122,07	-117,46	-0,47	-0,04
Yandan 20 m/s ile 5° ile Coarse mesh	444,68	746,23	438,10	0,15	-0,08	-35,11	-211,60	-202,64	-0,81	-0,08

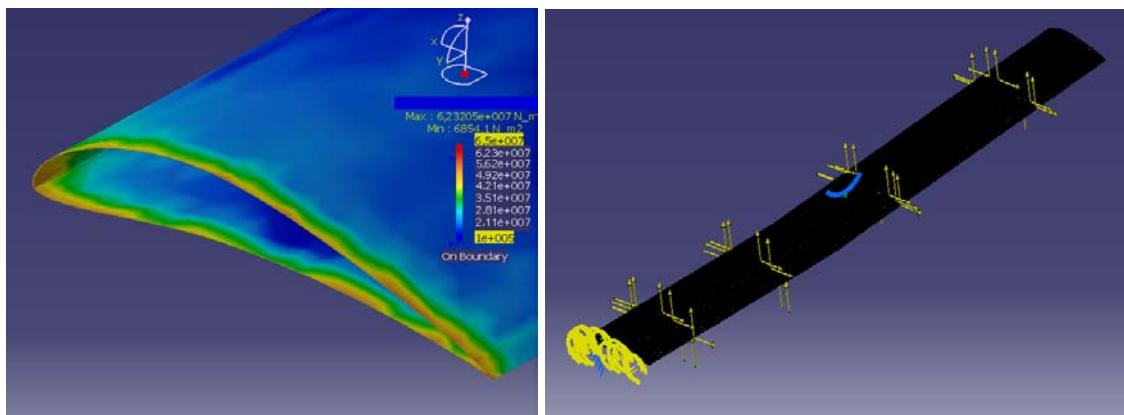
3. AKBABA İHA YAPISAL ANALİZİ

Bu yöntemle yapılan analizler genel olarak kritik bölgelerde yoğunlaştırılmıştır. Bunlardan bir tanesi kanat gövde kesişimidir. Kanattaki en boy oranının yüksek olması ve kanatların uzun olması nedeniyle kazanılacak yüksek kaldırma kuvveti, kanat gövde birleşiminde de büyük bir momentin oluşmasına sebep olacaktır. Bu sebeple, Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) kullanılarak bu bölge dikkatle incelenmiştir. Kavramsal tasarım sonucu elde edilen değerlerden yararlanılarak kanat taşıma kuvveti değerleri saptanmış, bu değerler manevra sırasında oluşması muhtemel g kuvvetleri hesaba katılarak artırılmıştır. Sonuçta 225 N gibi bir kuvvetin her bir kanata ayrı ayrı etkidiği düşünülmüştür. CATIA V5 [10] programının sonlu elemanlar seçeneği kullanılarak analizler yapılmıştır. Bu programın kullanılma sebebi veri aktarımın kolay ve hızlı, doğruluğun ise kabul edilebilir düzeyde olmasıdır.

Öncelikli olarak azami gerilmenin oluşması beklenen bölge 33 805 nokta sayılı bir ağ yapısıyla donatılmıştır. Kanat, gövde ile birleşim yerinden sabitlenerek dağılı yükle tabi tutulmuştur. S tipi camdan yapılmış kompozit malzemenin özelliklerini sağlayacak şekilde bir malzeme tanımlanmış ve analiz bu malzeme ile yapılmıştır. Analiz sırasında iç astarı oluşturan köpük, dayanımı yok sayılabilen kadar küçük olması sebebiyle hesaba alınmamıştır. Bunun dışında 8 N değerindeki sürükleme kuvveti de dağılımlı yük olarak uygulanmıştır. Bunlarında dışında bir de 20 m/s için kanat geometrisinden dolayı oluşacak moment, kanat üzerine yüklenerek mümkün mertebe en gerçekçi analiz yapılmış olup, yüklemeler Şekil 10'da gösterilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde 62,32 Mpa lik bir maksimum gerilmenin beklenildiği gibi kanat dibinde olduğu görülmektedir. Gerilim dağılımı Şekil 9'da görülebilir. Akbaba İHA'da kullanılacak malzeme epoxy yedirilmiş S tipi cam lifi (Glass Reinforced Epoxy – GRE) olup, GRE'lerin özellikleri göz önüne alınarak (minimum dayanım 150 Mpa

icindir) bir güvenlik katsayısı hesabı yapılmış ve güvenlik katsayısının yaklaşık olarak 2,4 dolaylarında olduğu görülmüştür. Bu değer, o bölge için yeterli ve gerekli bir rakam olarak nitelendirilebilir. Ayrıca 26 mm'lik bir yer değiştirme kanat ucunda gözlemlenmektedir. Kanat uzunluğu ele alındığında bu değer $0,6^\circ$ 'ye tekabül etmektedir ki bunun yeterince iyi bir sonuç olduğu düşünülmektedir. Bunların dışında bir de burulma açısından bahsedilebilir. Analiz sonuçlarına göre burulma açısı yaklaşık olarak $0,046^\circ$ olup bu sonuç da kabul edilebilir bir sonuçtır.



Şekil 9. Kesişim noktasındaki gerilimler

Şekil 10. Kanattaki yüklemeler

4. SONUÇ

Bu bildiride tasarımlı yapılan Akbaba isimli İnsansız Hava Aracının kavramsal tasarımının yanı sıra, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizleri ve yapısal analizleri anlatılmaktadır. Aracın imalatı 2010 yılının Mayıs ayında tamamlanmış, akabinde Lityum-Polimer batarya testlerine başlanılarak meydan çevresinde iki başarılı test uçuşu yapılmıştır (Şekil 11). 2-boyutlu ve 3-boyutlu HAD analizleri sonucu elde edilen aerodinamik performans karakteristikleri ve 3-boyutlu İHA etrafındaki akış karakteristikleri ile 3 boyutlu İHA yapısal olarak incelenmiş ve İHA tasarım kriterleri ve beklenileri ile uygunluğu tartışılmıştır.



Şekil 11. Akbaba İHA'nın iniş halindeyken görüntüsü

5. KAYNAKÇA

- [1] ERAST Program, www.dfrc.nasa.gov
- [2] en.wikipedia.org/wiki/Lithium_battery
- [3] arpa-e.energy.gov/.../ElectricalEnergyStorage%20forVehicles/ES-Sum.pdf
- [4] AeroVironment Pres. Release (2005), Aeronvironment Flies World's First Liquid Hydrogen Powered UAV, June 28.
- [5] Moffitt, B.A., Bradley, T.H., Parekh, D.E., and Mavris, D. (2006), *Design and Performance Validation of a Fuel Cell Unmanned Aerial Vehicle*, AIAA Paper 2006-823, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Jan 9-12, Reno, Nevada.
- [6] Unver Kaynak Rauf Akbaba, Alptekin Kibar Coşku Kasnakoğlu, Nilay Sezer-Uzol, Emre Güleç, Semih Tekelioğlu ve Mehmet Burak Solmaz (2010), *Design and Manufacture of a Fuel Cell Powered Unmanned Air Vehicle*, International Unmanned Vehicles Workshop UVW2010, 10-12 June, İstanbul, Türkiye.
- [7] Raymer, D.P.(2006)., *Aircraft Design: A Conceptual Approach*, 4th ed. Reston, VA, AIAA,
- [8] Roskam, J. (2000), *Airplane Design Part I-VI*, Lawrence, KS, Design Analysis Research Corporation.
- [9] Blake A. Moffitt, Thomas H. Bradley, David E. Parekh and Dimitri Mavris (2006), *Design and Performance Validation of a Fuel Cell Unmanned Aerial Vehicle*, AIAA-2006-823, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 9 - 12 January, Reno, Nevada
- [10] CATIA (2008), Software Package, Dassault Systemes, Vélizy-Villacoublay, France.

- [11] D. Hoak, D. Ellison et al., USAF DATCOM, Air Force Flight Dynamics Lab, Wright-Patterson AFB, OH, ABD.
- [12] M. J. Logan, T.L. Vranas, M. Motter, Q. Shams, D. Pollock, Technology Challenges in Small UAV Development, AIAA Paper. <http://librarydspace.larc.nasa.gov/dspace/jsp/handle/2002/992>.
- [13] Selig, M., Coordinate Database, http://www.ae.illinois.edu/mselig/ads/coord_database.html#E, April 2010.
- [14] JAVAFOIL, <http://www.mh-aerotools.de/airfoils/javafoil..htm>, April 2010.
- [15] ANSYS CFX, <http://www.ansys.com/products/fluid-dynamics/cfx/>, April 2010.

SİMÜLASYON SİSTEMLERİ İÇİN MİLLİ BİR BİRLİKTE ÇALIŞABİLİRLİK ALTYAPISI: SimBA

Serkan Özkaymak ^(a), Aziz Bekkine ^(b), Serdar Tuğac ^(c), Orkun Zorba ^(d)

(a), (b), (c), (d) Meteksan Savunma Sanayi A.Ş., Beytepe Köyü Yolu No.3 Bilkent-Ankara,
{sozkaymak, abekkine, stugac, ozorba}@meteksansavunma.com.tr

ÖZ

Koşum zaman altyapısı ürünlerinin düşük konfigürasyonlu bir sistemde de kullanılabilme olasılığı nedeniyle ağ, işlemci, bellek teknolojilerindeki gelişmeler dikkate alınmalı, bununla birlikte platform bağımsız geliştirme yapılmalıdır. SimBA altyapısının tüm bu problemlere uygun çözümler getirmesi amaçlanmaktadır.

Çalışmada SimBA'nın temel tasarım özellikleri verilmiş, birlikte çalışabilirlik altyapısının en temel yapı taşı olan koşum zaman altyapısına paralel olarak geliştirilmekte olan monitör aracı, FOM/SOM üretici, geçit kapısı üretici,enkapsülasyon kütüphanesi ve 3-B görselleştirme aracı gibi yan ürünler hakkında bilgi verilmiştir.

Koşum zaman altyapısının altında yayınla/abone ol mimarisine sahip bir mesajlaşma çatısı olan Mesajlaşım Altyapısı kullanılmıştır. Bu altyapı ile ilgili ölçeklenebilirlik, dinamik ağ topolojisi, mesaj yönlendirme, mesaj filtreleme, mesaj analizi, akış kontrolü, güvenlik, CPU ve GPU kullanımı gibi birtakım özellikler hakkında bilgi verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Birlikte çalışabilirlik, dağıtık simülasyon, koşum zaman altyapısı, yüksek seviye mimari.

AN INTEROPERABILITY INFRASTRUCTURE SOLUTION FOR SIMULATION SYSTEMS: SimBA

ABSTRACT

Run-time infrastructure products can be used in the system with low configurations. That's why progresses on network, processor and memory technologies should be considered in addition to platform independent developments. The SimBA infrastructure will provide appropriate solutions to these problems.

The main design features of SimBA are given in this work. The run time infrastructure, which is the main body of interoperability, together with a monitoring tool, a

FOM/SOM generator, a gateway, an encapsulation library and a 3-D visualization tool being developed are given.

A messaging infrastructure is used that has a publish/subscribe architecture under run time infrastructure. Scalability, dynamic network topology, message routing, message filtering, message analysis, security, CPU and GPU usage issues are given in the scope of this infrastructure.

Keywords: Interoperability, distributed simulation, run-time infrastructure, high level architecture.

1. GİRİŞ

Günümüzde simülasyon sistemlerinin artan önemine bağlı olarak, birçok taktik, operatif ve stratejik seviye simülasyon sistemi geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam edilmektedir. Farklı simülasyon sistemlerinin birlikte kullanılması ile sanal ortamda düzenlenen tatbikatların eğitim verileri üzerinde, sahada yapılamayacak karmaşık analiz ve değerlendirmelerin yapılması mümkün olmakta, eğitime katılan personele detaylı geri bildirim sağlanabilmektedir. Sanal ortamda yapılan bu faaliyetler istenildiği kadar tekrarlanabilmekte ve maliyet etkin bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. Bu durum son yıllarda, birlikte çalışabilirlik faaliyetlerinin hız kazanmasına yol açmıştır. Bu amaçla geliştirilen mimarilerden en önemlisi yüksek seviye mimari (High Level Architecture, HLA), simülasyonlar arası etkileşimlerin yönetildiği altyapı ise koşum zaman altyapısı (Run-Time Infrastructure, RTI)'dır.

Literatürde ticari olarak geliştirilen RTI ürünlerinden bazıları CAE RTI, Chronos RTI, MaK RTI, HLA Direct, OpenSkies RTI, Pitch pRTI, RTI NG Pro'dur. Bunların dışında ticari olmayan BH-RTI, CERTI, EODiSP HLA, GERTICO, Portico Project, RTI-S gibi produktelere piyasada rastlamak mümkündür. Bunlardan özellikle M&SC (Modeling and Simulation Office) tarafından onaylanmış olup ticari pazarı da elinde bulunduran ürünlerin üreticileri, aynı zamanda birlikte çalışabilirlik standardının gelişimine de katkılar vermekte ve standardın geleceğini yönlendirmektedirler. Ürünlerle ilgili bilgilere İnternet üzerinden erişmek mümkündür.

Mevcut RTI ürünleri performans, kararlılık ve esneklik gibi farklı alanlarda birbirlerine üstünlük sağlayabilmektedir. Teorik olarak birlikte çalışabilirlik konusunda farklı federasyonların farklı RTI ürünlerini kullanmasında bir sorun olmamakla birlikte, uygulamada bu konuda sorunlar yaşanıldığı bilinmektedir [1, 2]. Bu sorunları çözmek üzere çeşitli çalışmalar yapılmakta, hatta tek bir süreç (process) içinde çoklu RTI'nın desteklenmesi gibi radikal öneriler de yapılmaktadır [3].

RTI ürünlerinin karşılaştırılması konusunda çeşitli çalışmalar mevcuttur. Örneğin Malinga ve le Roux, farklı RTI ürünlerleri arasında bir performans kıyaslaması

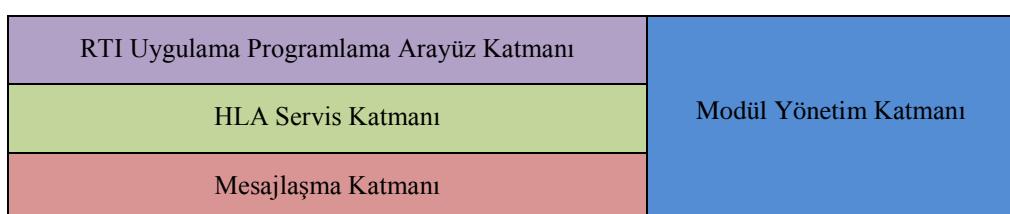
yapmışlardır [4]. Bu çalışmada tek bir öznitelik içeren basit bir sınıf yapısına sahip basit bir FOM tanımlanmış, özniteligin güncellenme süreleri ölçülerek bir performans karşılaştırması yapılmıştır. Buna göre temel bir sonuç elde edilmiş, ancak daha sağlam sonuçlar için çalışmanın daha ileri götürülmesi gereği belirtilmiştir. Fujimoto ve Hoare'nin çalışmasında ise yüksek hızlı yerel alan ağlarında RTI'ların performansları incelenmiştir [5]. Bu konuda bunların dışında da çeşitli çalışmalar yapılmıştır [6, 7]. Tüm bu çalışmalar farklı RTI ürünlerinin karşılaştırılmaları için çeşitli kriterler ortaya koymakta, ancak bu kriterler çoğunlukla göreceli ve sadece bir amacı gerçekleştirmeye yönelik olmaktadır.

Milli olarak geliştirilmiş bir RTI ürünü bulunmamakla beraber, ülkemiz savunma ve simülasyon sektörü birlikte çalışabilirlik konusunda oldukça yüksek standart ve beklentilere sahiptir. Bu beklentilerin karşılanması dış kaynaklı produktlere olan bağımlılığı kaldırmak ve birlikle çalışabilirlik konusunda ülkemiz ihtiyaçlarını da dünya standartları ile paralel hale getirebilmek amacıyla, SimBA projesinin doğmasına sebep olmuştur. SimBA kapsamında gerçekleştirimi yapılacak ürünler ile hem simülasyonların birlikte çalışabilmeleri sağlanacak, hem de yeni simülasyon sistemlerinin yerli teknolojiler ile geliştirilebilmesinin yolu açılacaktır.

Mevcut RTI ürünlerinin bir kısmı doğrudan IEEE HLA 1516 standardını [8] desteklemekte, bazıları ise standartla uyumlu çözümler sunmaktadır. SimBA'nın ilk etapta IEEE HLA 1516 standarı ve ardından da yeni yayımlanan IEEE HLA Evolved standartını [9, 10] desteklemesi amaçlanmaktadır.

2. SimBA MİMARI TASARIM ÖZELLİKLERİ

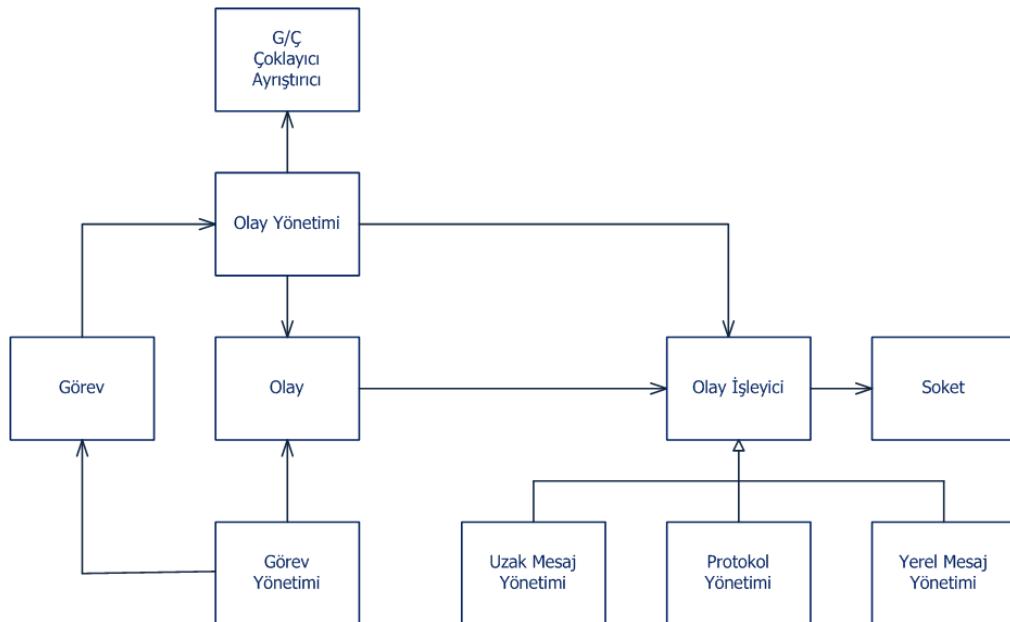
SimBA temel olarak iki yazılım birimini içerecek şekilde geliştirilmektedir: Bunlardan ilki federeler arasındaki iletişimini yöneten RtiExec uygulaması, diğer ise federelerin kullanılacak RTI kütüphanesi LibRTI'dır. Geliştirme sırasında kolaylık sağlama açısından bu iki yazılım biriminin aynı mimariye sahip olması kararlaştırılmıştır. Bu katmanlı mimari Şekil 1'deki katmanlardan oluşmaktadır.



Şekil 1. SimBA katmanlı mimarisi

Bu mimari aynı zamanda bileşen mimarisi özelliklerini de taşımaktadır. LibRTI ve RtiExec uygulamaları aynı mimariye sahip olmalarına rağmen farklı modüllerden oluşmaktadır. Bu modüller birbirlerinden tamamen ayrık tasarılmıştır. Modül

Yönetim Katmanı modüllerin konfigürasyonunu, modüller arası haberleşmeyi yönetmektedir. SimBA RTI altyapısının temelini Yayınla/Abone Ol (Publish/Subscribe) yapısına sahip Mesajlaşma Katmanı oluşturmaktadır. Mesajlaşma Katmanını oluşturan modüller arası ilişkiler basitçe Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Mesajlaşmayı oluşturan modüller arası ilişkilerin gösterimi

Mesajlaşmayı oluşturan yazılım modüllerinin geliştirilmesinde Reaktör tasarım deseni, Lider/Takipçi tasarım deseni (Leader/Follower) gibi tasarım desenleri kullanılmıştır [11].

Olay tabanlı uygulamaların birden fazla kaynaktan gelen olay isteklerini verimli bir şekilde işlemesi gerekmektedir. Olayları işleyen mekanizmanın her bir olay alındığında bloke olarak diğer olayları eş zamanlı işleyememesi, gereksiz bağlam değişimleri, senkronizasyon, işlemciler arası veri değişimi gibi sorunlar uygulama verimliliğini düşürmektedir. Bunlara ek olarak olayların eş zamanlı işlenebilmesi için kullanılacak çoklu parçacık (multithreaded) teknikleri, uygulamanın geliştirilmesi sırasında karşılaşılacak problemlerin artmasına neden olabilmektedir. Çözüm olarak Reaktör tasarım deseni kullanılmıştır. Bu kapsamında Olay Yönetim Modülü (Event Management), Olay Modülü (Event), Olay İşleyici (Event Handler) ve Soket Modülü (Multicast Socket) gibi birimler tanımlanmıştır.

Lider/Takipçi tasarım deseni (Leader/Follower), en önemli eşzamanlılık modellerinden birisidir. Bu modelde iş parçacıkları oluşan olayları verimli bir şekilde işlemektedir. Bu desen ile iş parçacıkları arasındaki performansı etkileyen senkronizasyon kullanımı gerekmemektedir. Desenin SimBA RTI altyapısı altında kullanımı kapsamında Görev Yönetim Modülü (Task Management Module), Görev Modülü (Task), Protokol

Yönetim Modülü (Protocol Handler), Uzak Mesaj Yönetim Modülü (Remote Message Handler) ve Yerel Mesaj Yönetim Modülü (Local Message Handler) tanımlanmıştır.

3. BİRLİKTE ÇALIŞABİLİRLİK ALTYAPISI

Birlikte çalışabilirliği sağlamak amacıyla kullanılabilecek geniş bir araç listesi Crosbie ve Zenor tarafından yapılan çalışmada verilmektedir [12]. Simülasyon sistemleri için birlikte çalışabilirliği sağlayacak en önemli ürün koşum zaman altyapısıdır. Bu nedenle, bu çalışma kapsamında RTI geliştirilmesi öncelikli tutulmuştur. Ancak koşum zaman altyapısına paralel olarak monitör aracı, FOM/SOM üretici, geçit kapısı üretici, enkapstülasyon kütüphanesi ve 3-B görselleştirme aracı gibi yan ürünler de birlikte çalışabilirlik konusunda avantaj sağlayabilmek üzere geliştirilmiştir.

3.1. Koşum Zaman Altyapısı

IEEE 1516 uyumlu olarak geliştirilmekte olan ve yüksek seviye mimari uyumlu simülasyonların haberleşmesine olanak veren altyapıdır. Koşum zaman altyapısının ilk etapta Windows ve Linux işletim sistemlerini, daha ileride sektörde kullanım alanı bulan Unix, Solaris, Irix, VxWorks gibi diğer işletim sistemlerini desteklemesi planlanmıştır. Programlama dillerinden C/C++ desteklenecek, yine ileride Java, Ada, Python gibi diğer dillerin de kullanımı mümkün olacaktır. Tasarım ve geliştirme sırasında performans, esneklik, ölçeklenebilirlik gibi kriterler göz önüne alınmıştır. Çalışmanın ilerleyen safhalarında HLA 1.3, IEEE 1516 Evolved gibi standartlarla uyumda planlanmaktadır. Koşum zaman altyapısı mimarisini bu gibi açılımlara kolaylık sağlayacak şekilde tasarlanmıştır.

3.2. Monitör Aracı

HLA federasyonunda oluşan iletişimini analiz etmek amacıyla gerçekleştirmeyi yapmakta olan araçtır. Bu araç ile, gönderilip alınan mesajlar, federelerin ve federasyonun performansı gibi simülasyon için önemli bilgiler elde edilip analiz amacıyla kullanılabilecektir. Bu monitor aracı HLA seviyesindeki mesajlaşmaya ek olarak son kullanıcı tarafından yazılabilcek betikler yardımı ile simülasyon seviyesinde bilgileri de sunabilecektir. Monitör aracı federasyona ayrı bir federe olarak bağlanacak ve federasyon zamanını etkilemeyecek şekilde çalışacaktır.

3.3. FOM/SOM Üretici

SimBA RTI kullanılarak geliştirilecek simülasyonlar için FOM ve SOM üretilmesini sağlamak amacıyla tasarlanıp gerçekleştirimi sağlanacak araçtır. Bu araç tarafından sunulacak grafiksel arayüz ve betik desteği ile FOM/SOM ve şablon kod üretimi mümkün olacaktır.

3.4. Geçit Kapısı Üreteci

Birlikte çalışması amaçlanan simülasyon sistemleri farklı FOM/SOM yapıları kullanabilmekte ve hatta farklı HLA standartlarına göre geliştirilmiş olabilmektedirler. Bu gibi durumlarda FOM/SOM eşleştirme yapılması gerekmektedir. Bu araç ile bu eşleştirmenin grafiksel bir arayüz üzerinde yapılması sağlanacak, oluşturulacak kod kütüphanesi ile farklı simülasyonların birlikte çalışması mümkün olacaktır. Birlikte çalışma kapsamında karşılaşılabilecek diğer bir sorun ise simülasyon sistemlerinin sadakat seviyelerinin ve model kütüphanelerinin farklı olabilmesidir. Örnek vermek gerekirse, bir simülasyon sisteminde firkateyn olarak modellenmiş bir unsurun diğer bir simülasyon sisteminde karşılığı bulunmayabilmekte, daha düşük veya daha yüksek özellikli farklı unsurlar ile eşleştirme yapılması gerekebilmektedir. Benzer olarak, bir simülasyon sisteminde unsurlar saniyede bir defa güncellenirken, bir diğerinde saniyede on defa güncellenebilmektedir. Geçit kapısı üreteci, bu gibi eşleştirme durumları için betik ve uygulama programlama arabirimini sağlayacaktır.

3.5. Enkapsülasyon Kütüphanesi

Farklı simülasyon sistemleri, özellikle tarihsel gelişime uygun olarak, farklı RTI ürünleri kullanılarak geliştirilebilmektedir. Bu durum, yeni geliştirilen simülasyon sistemleri ile, mevcut olan sistemler arasında uyumluluk sağlanması gerektiğini güçlendirmektedir. Söz konusu durum ortaya çıktığında, çözüm olarak,

- Eski sistemde modifikasyon yapılması,
- Yeni sistemin eskiyle uyumlu tasarılanması, veya
- Sistemler arası uyumlandıracı bir bileşen tasarılanması gerekebilmektedir.

Bu seçeneklerin tümü, sistem geliştirim süreci dahilinde düşünüldüğünde, ek maliyetler ve riskler getirmektedir.

Enkapsülasyon kütüphanesi, bir simülasyon sisteminin gerçekleştiriminde ortaya çıkabilecek bu ekstra efor ve maliyetleri tek ve ortak bir çözüm paketi haline getirmeyi amaçlamaktadır.

3.6. 3-B Görselleştirme Aracı

Yukarıda genel özellikleri verilen koşum zaman atyapısı ve destek araçları birlikte çalışabilirliği sağlayabilmek için planlanmıştır. 3-B görselleştirme aracı ise SimBA RTI altyapısı kullanan simülasyon sistemlerinin davranış, model görselleştirmesi ve analizi için gerçekleştirmesi yapılması planlanan bir araçtır. Bu araç ile 3-B ya da 2-B taktik resim oluşturulması, sensör kapsama analizleri, arazi görselleştirilmesi gibi işlemler yapılabilecektir.

4. MESAJLAŞMA ALTYAPISI TEKNİK ÖZELLİKLERİ

SimBA koşum zaman altyapısının altında genel amaçlı SimBA Mesajlaşma Altyapısı kullanılmıştır. Bu altyapı temel olarak Yayınla/Abone Ol (publish/subscribe) mimarisine sahip bir mesajlaşma çatısıdır. SimBA mesajlaşma altyapısı basit ve hızlı bir şekilde düğümler arasında mesajlaşmayı sağlamaktadır. HLA servisleri bu altyapı üzerine yapılandırılarak LRC ve CRC bileşenleri oluşturulmuştur. Bu altyapının genel özellikleri aşağıda kısaca anlatılmıştır.

4.1. Ölçeklenebilir yapı

Yayınla/Abone Ol yapısı sayesinde gönderen ve alıcı arasındaki bağımlılık ortadan kaldırılmış ve istenilen sayıda düğümün istenildiği anda birbirleriyle mesaj iletişimine girebilmeleri mümkün hale getirilmiştir [13].

4.2. Dinamik Ağ Topolojisi

IEEE HLA 1516 standarı tüm federelerin RTI üzerinden haberleşmesini öngörmektedir [8]. SimBA RTI mesajlaşma altyapısı hem HLA standardının gerektirdiği şekilde merkezi iletişime, hem de dağıtık iletişime imkan verecek şekilde tasarlanmıştır. Dağıtık iletişim durumunda düğümler gerektiğinde birbirleri ile doğrudan iletişime geçebilmektedir. Bu iletişim için düğümlerin ağ topolojisi içinde nerede bulunduklarının herhangi bir önemi bulunmamaktadır. SimBA RTI mesajlaşma altyapısı düğümler arası en verimli mesaj kanallarını oluşturarak mesaj iletişimini mümkün kılmaktadır. Düğümler farklı ağlar üzerinde de bulunabilmektedir [13].

4.3. Mesaj Yönlendirme

SimBA RTI mesajlaşma altyapısı bant genişliğinin verimli şekilde kullanacak biçimde tasarlanmıştır. Yerel ağ içindeki iletişim çoklu gönderim (multicast) protokolü kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Böylece mesaj trafiği abone sayısından bağımsız hale getirilmiştir. Örneğin bir düğümün mesajına abone olan 1 düğümlü konfigürasyon ile aynı düğümün mesajına abone olan 250 düğümlü konfigürasyon bant genişliğini kullanımını değiştirmemektedir [13].

4.4. Mesaj Filtreleme

Çoklu gönderim (multicast) mesajlaşmada bir düğüm abone olmadığı bir mesajı alabilir. Bu durumda bu mesajın uygulama seviyesindefiltrelenmesi gereklidir. Bu da gereksiz işlem gücü kullanımına yol açmaktadır. Bunu engellemek için SimBA RTI mesajlaşma altyapısı abonelik ilişkilerini analiz ederek düğümler arası adanmış çoklu gönderim kanallarını oluşturabilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu tasarım ile sadece iki düğüm arasında gönderilen ve alınan mesajlar iki düğüm arasında adanmış kanallar yardımı ile taşınmaktadır ve diğer düğümlere ulaşmamaktadır. Böylece uygulama seviyesinde gereksiz işlem gücü kullanımının önüne geçilmektedir [13].

4.5. Mesaj Analizi

Simülasyon sistemlerinde düğümler arası gönderilen mesajlar dinamik olmakla birlikte periyodik olarak gönderilen mesajlar birbirine benzeyebilmektedir. SimBA RTI mesajlaşma altyapısı gönderilen mesajlar üzerinde çeşitli analizler yaparak bant genişliğinin daha verimli kullanılmasını sağlayabilmektedir. Örneğin belirli zaman aralıklarında gönderilen ve içeriği değişmeyen mesajlar tespit edilerek, ön bellek oluşturulur. Bu ön bellek ile mesajının tamamını göndermek yerine, ön bellekteki tanımlama numarası gönderilerek mesaj uzunluğu minimum hale getirilir. Değişmeyen mesajların tespiti mesajların toplama sağlaması (checksum) hesaplanarak yapılmaktadır. Çalışmanın ilerideki aşamalarında bu analizin mesajın içeriğine de uygulanması planlanmaktadır. Böylece mesajların bire bir aynı olması gerekmeyecek birbirlerine benzemeleri optimizasyon için yeterli olacaktır.

4.6. Akış kontrolü

Zaman adımlı simülasyonlarda, simülasyon performansını, en yavaş işleme gücüne sahip düğüm belirlemektedir. Dolayısı ile akış kontrolü doğrudan simülasyon performansına etki edebilmektedir. Birbiriyle haberleşen iki düğümden herhangi biri daha yavaş mesaj işleme gücüne sahip olduğu durumda, tampon bellek hatalarına neden olabilmektedir. Tampon bellek hatası, gönderen düğümün abone olan düğümün işleyebileceğinden daha fazla mesaj göndermesi durumda ortaya çıkmaktadır. Bu durumda gönderen düğüm ile abone olan düğüm arasında mesaj akışının yönetilmesi gerekmektedir. Bilindiği üzere TCP/IP protokolü akış kontrolü yapmaktadır. SimBA RTI mesajlaşma altyapısında TCP/IP protokölü yerine UDP/IP protokolünün kullanımı tercih edilmiştir. Bu nedenle akış kontrolü SimBA RTI mesajlaşma altyapısı tarafından gerçekleştirilmektedir [5]. Akış kontrolünü en yavaş düğümün işlem performansını artıracak şekilde ayarlamak simülasyon performansını iyileştirmektedir. SimBA RTI mesajlaşma altyapısı sürekli olarak ağ performasını ve yavaş işlem gücüne sahip düğümün performansını ölçüp analiz ederek akış kontrolünü optimize edecek şekilde tasarlanmıştır.

4.7. Güvenlik

Bilindiği üzere simülasyon sistemlerinde HLA üzerinden aktarılan bazı bilgiler gizlilik içerebilmektedir. SimBA RTI mesajlaşma altyapısı, bu bilgilerin güvenliğini de sağlamaktadır. Birtakım güvenlik özellikleri SimBA RTI mesajlaşma altyapı konfigürasyon ayarları ile etkin hale getirilebilmektedir. Bu güvenlik yöntemlerinin performansa olan etkileri sürekli bir biçimde ölçülmekte ve yöntemlerin performansa olan etkilerini azaltmak için çalışmalar devam etmektedir. Bu güvenlik özelliklerinden bazıları; gönderen ile abone olan düğüm arasındaki mesajlaşma için standart şifreleme algoritmaları kullanılması, düğümler arasındaki mesaj kanallarının çoklanması, mesaj gönderilmeden önce mesaja içeriğini karıştırıcı anlamsız veriler eklenmesi ve mesaj

verisinin koşum zamanında oluşturulan ve düğümler arasında paylaştırılan maske ile gizlenmesidir.

4.8. CPU ve GPU kullanımı

İşlemci teknolojileri her geçen gün gelişmektedir. Son yıllarda işlem performansının arttırımı işlemci saat hızının arttırılması ile olduğu kadar, işlemci içindeki çekirdek sayısının artırılması ile de sağlanmaktadır. Bunun sonucu olarak çoklu iş parçacık tabanlı tasarım ve programlama önem kazanmaktadır. Bunlara ek olarak Intel'in 2011 yılında piyasaya süreceği yeni işlemci ailesi (Sandy Bridge) bünyesinde GPU'da bulundurmaktadır. Bu GPU temel vektör hesaplamaları için kullanılmaktadır. Şu anki grafik kartlarının sahip olduğu GPU'larda OpenCL gibi teknolojiler kullanılarak hesaplama işlemleri çok kısa zamanda yapılmaktadır. SimBA RTI mesajlaşma altyapısının tasarımında bu gelişmeler gözönüne alınmıştır. İleride mesaj üzerinde altyapı tarafından yapılan zaman alan bazı işlemlerin (şifreleme, mesaj ayırtırma) yukarıda anılan teknolojiler kullanılarak yapılması planlanmaktadır.

Aşağıda çoklu iş parçacık tabanlı tasarımla ilgili karşılaşılan zorluklar ve çözüm önerileriyle ilgili bilgiler kısaca anlatılmıştır.

4.8.1. Bağlam değişimi (Context switching)

Bağlam değişimi basitçe işlemler ya da iş parçacıkları için CPU durumunun saklanması ve tekrar yüklenmesi olarak tanımlanabilir [15]. SimBA RTI altyapısında bağlam değişikliğini azaltmak için iş parçacıkları arasındaki bağımlılıklar kaldırılarak bağımsız çalışabilmeleri sağlanmış, iş parçacıklarının global veri üzerinde işlem yapmaları kısıtlanmış ve iş parçacıklarının sistem fonksiyonlarını kullanmaları minimum seviyeye indirilerek kullanıcı modundan çekirdek moduna (user mode to kernel mode switch) geçişler azaltılmıştır.

4.8.2. Veri kopyalama

Bir önceki bölümde anlatıldığı üzere çekirdek moduna geçişlerin azaltılmasının performans üzerindeki etkileri önemlidir. SimBA RTI mesajlaşma altyapısında sıfır kopyalama (zero-copy) tekniği kullanılmıştır [14]. Linux sistem kütüphanesinde tanımlı olan sendfile ve splice gibi çağrılar kullanılarak 4 olan bağlam değişiklik sayısı 2'ye indirilmiştir. Bunun sonucu olarak işletim sistemi zamanlayıcısının iş parçacıkları arasındaki bağlam değişimi de azaltılmıştır. SimBA RTI mesajlaşma altyapısının Windows işletim sisteminde kullanılacak bileşenleri için de sıfır kopyalama mekanizmaları araştırılmaktadır.

4.8.3. Hafıza kullanımı

Çok çekirdekli işlemci mimarilerinde hafızaya erişim şekli ve verinin depolanması uygulama performansını etkilemektedir. Örneğin uygulamanın içerdiği veri L2 önbelleğine sığmaz ise ana bellekte dağıtık olarak saklanmaktadır. Bu durumda veriye

sıralı olarak erişilememekte ve erişim süresi oldukça uzamaktadır. L2 bellekte tutulan bir tamsayıya erişim 2 ya da 3 saat çevriminde gerçekleştirilebilirken, hafızada tutulan aynı veriye erişim birkaç yüz saat çağrısına neden olabilmektedir [15]. Bu sorunları aşmak için SimBA RTI mesajlaşma altyapısında kullanılan veri yapıları küçültülüp verimli hale getirilmiştir. Ayrıca bu verilerin birbirleri ile ilgili olanları bir arada gruplandırılıp önbellek optimizasyonu sağlanmıştır.

Bilindiği üzere bir C++ uygulamasında veri yapıları değişik bellek tiplerinde tutulacak şekilde tanımlanabilir [16]. Veri yapılarının yiğit (stack) içinde tanımlanması verimliliği artırmaktadır. Çünkü yiğin için önceden tanımlı adres alanını kullanmakta ve bu adres alanına erişim, hafızanın değişik adreslerine dağıtılmış veri yapılarının erişimine göre çok hızlı olmaktadır. Veri yapılarının çok büyük olmadığı durumlarda yiğit doğrudan L1 önbelleğe kopyalanmaktadır. Bu da veri erişiminin daha hızlı yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle SimBA RTI mesajlaşma altyapısında veri yapıları mümkün olduğunda lokal olarak metod içinde tanımlanmaya çalışılmıştır. Metod içinde tanımlanmayan veri yapıları global veri yapıları olarak adlandırılıp statik hafızada tutulurlar. Statik anahtar kelimesiyle (static keyword) tanımlanmış veri yapıları ve tüm sabitler statik hafızada tutulurlar. Statik hafızanın dezavantajı veri yapılarının program ömrü boyunca hafızada yer işgal etmesidir. Bu da önbellek verimliliğini düşürmektedir [15]. Avantaj olarak da veri yapısına program başlamadan ilk değer verilebilmesi sayılabilir. Avantaj ve dezavantajlar değerlendirilip SimBA RTI mesajlaşma altyapısı içinde global veri yapıları kullanılmayarak statik hafıza kullanımı sınırlanmıştır. Diğer bir hafıza çeşidi de dinamik hafızadır (heap memory). C++ programlama dilinde “new” direktifi ile ayrılan hafıza dinamik hafızadır. Dinamik hafıza çok kolay bir şekilde parçalanabilmektedir (fragmentation). Bu da veri yapılarının hafıza içinde dağılmalarına neden olmaktadır.

4.8.4. Eş zamanlılık (Concurrency)

Kilitlerin dikkatsiz bir şekilde kullanımını performansı negatif yönde etkilemektedir. Örnek olarak aynı veriye erişen A ve B iş parçacıklarının olduğu bir senaryo olsun. A iş parçacığı veri erişimini bir kilit yardımcı ile engellesin. B iş parçacığının veriye erişebilmesi için A iş parçacığının kilidi bırakması gereklidir. Fakat A iş parçacığının yapması gereken iş, işletim sistemi tarafından A iş parçacığına verilen quantum zaman dilimine sığmadığı durumda bağlam değişimi gerçekleşecektir. A iş parçacığı bir sonraki CPU kullanımını elde edene kadar A ve B iş parçacıkları bekleyecektir. A iş parçacığı kiliti bıraktıktan sonra B iş parçacığı kendisine bağlam değişikliği yapıldığında CPU'yu kullanabilir. Bu da iş parçacıklarının konvoy halinde işlerini yürütütmelerine neden olur [15]. Bu durum, çok kısa sürede yapılabilecek bir işlemin bir çok zaman dilimine yayılıp uzun sürmesine ve CPU'nun verimsiz kullanılmasına yol açmaktadır. Bu nedenle SimBA RTI mesajlaşma altyapısında kilit kullanımı sınırlanmıştır.

4.8.5. Verimli Mesaj İşleme

Federeler ve RTI arasındaki mesajlaşmayı sağlayan altyapının verimli çalışmasının federasyon açısından önemi büyüktür. Bu verimliliği sağlamak amacıyla SimBA mimari tasarımında birkaç mimari tasarım deseni kullanılmıştır. Bunlardan ön önemlisi gelen mesajların altyapıda verimli şekilde işlenmesini sağlayan Lider/Takipçiler (Leader/Followers) yöntemidir [17]. Bu yöntem ile alınan mesaj blokları en verimli işlenecek şekilde işlemci çekirdeklerine atanmaktadır. Verimliliği etkileyen bir başka etmen ise federe sayısıdır. Federe sayısının artması mesaj trafiğinin artmasına neden olmaktadır. Artan mesaj trafiğini karşılayabilmek için kullanılan mesaj kanalları koşum zamanında arttırmaktadır. Mesaj kanallarının artması ile gönderilen mesajın hangi kanalda olduğunun tespit edilmesi ve okunması işlemi zaman almaktadır [17]. Bu sorunu çözmek için Reaktör (Reactor) yöntemi kullanılmıştır. Mesaj kanalı sayısı çok fazla olduğu durumda bile hızlı şekilde mesajlar soketten okunup işlenebilmektedir. Reaktör yöntemi Linux işletim sistemi için uygun bir yöntem olmasına rağmen Windows işletim sisteminde kullanımının yeterince verimli sonuçlar vermediği yapılan testler ile tespit edilmiştir. Bunun yerine Windows işletim sisteminde Proaktör (Proactor) yöntemi kullanılmıştır.

5. SONUÇ

Simülasyon sistemlerinin birlikte çalışabilirliğinin sağlanması, RTI ürünleri önemli bir rol oynamaktadır. Uluslararası arenada bu konuda çeşitli ürünler bulunmakla birlikte, milli olarak geliştirilmiş mevcut bir ürün bulunmamaktadır. Bu amaçla geliştirilmeye başlanmış olan SimBA ürününün, performans ve içerik açısından uluslararası eşdeğerleri ile yarışabilmesi hedeflenmektedir.

Bu çalışmada SimBA'nın temel tasarım özelliklerini verilmiş, birlikte çalışabilirlik altyapısının en temel yapı taşı olan koşum zaman altyapısına paralel olarak geliştirilmekte olan monitör aracı, FOM/SOM üretici, geçit kapısı üretici,enkapsülasyon kütüphanesi ve 3-B görselleştirme aracı gibi yan ürünler hakkında bilgi verilmiştir.

SimBA koşum zaman altyapısının altında yayına/abone ol mimarisine sahip bir mesajlaşma çatısı olan Mesajlaşma Altyapısı kullanılmıştır. Bu altyapı ile ilgili ölçeklenebilirlik, dinamik ağ topolojisi, mesaj yönlendirme, mesaj filtreleme, mesaj analizi, akış kontrolü, güvenlik, CPU ve GPU kullanımı gibi birtakım özellikler hakkında bilgi verilmiştir.

Çalışmanın ilerleyen dönemlerinde geliştirilen RTI ve yan ürünlerin, dünyada benzerleri ile karşılaştırıldığı ve performans anlamında sağladığı avantajlar ortaya çıkarılacak, ürünün milli geliştirimi ile elde edilen kazanımlar daha net ortaya konulabilecektir.

6. KAYNAKÇA

- [1] Strassburger S. (2006), The Road to COTS-Interoperability: From Generic HLA-Interfaces Towards Plug-And-Play Capabilities, *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*.
- [2] Zalcman L., Tudor G. (2006), HLA Interoperability – An Update, *SimTecT 2006 Simulation Conference: Challenges and Opportunities for a Complex and Networked World (SimTecT 2006)*.
- [3] Luebke W., Baker J., Porter A. (2007), Supporting Multiple RTIs within a Single Process, *Interservice/Industry Training, Simulation, and Education Conference (I/ITSEC) 2007*.
- [4] Malinga L., le Roux W. (2009), HLA RTI Performance Evaluation, *2009 SISO European Simulation Interoperability Workshop*.
- [5] Fujimoto R., Hoare P. (1998), HLA RTI Performance in High Speed LAN Environments, *Defence Evaluation and Research Agency, British Crown*.
- [6] Boukerche A., Lu K. (2005), Design and Performance Evaluation of a Real-time RTI Infrastructure for Large-Scale Distributed Simulations, *Ninth IEEE International Symposium on Distributed Simulation and Real-Time Applications*.
- [7] Knight P., Corder A., Liedel R., Jenkins C., Drake R., Agarwal P., Nunez E. (2001), Independent Throughput and Latency Benchmarking for the Evaluation of RTI Implementations, *Conference Proceedings of SISO Fall 2001*.
- [8] IEEE Std 1516.1-2000 (2000), IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA), *IEEE*.
- [9] IEEE Std 1516-2010 (2010), HLA Evolved Standard, *IEEE*.
- [10] Möller B., Morse K., Lightner M., Little R., Lutz R. (2008), HLA Evolved – A Summary of Major Technical Improvements, *Fall Simulation Interoperability Workshop*.
- [11] Martin, R.C. (2002), *Agile Software Development Principles, Pattern and Practices*, Prentice Hall.
- [12] Crosbie R., Zenor J. (2011), High Level Architecture Module 2 Advanced Topics, *The Society for Computer Simulation, California State University*.
- [13] Hohpe G., Woolf B. (1980), *Enterprise Integration Patterns Designing, Building, and Deploying Messaging Solutions*, NY.
- [14] Mitchel M., Oldham J., Samuel A. (2001), *Advancing Linux Programming*, New Riders.
- [15] Fog A. (2011), *Optimizing software in C++ An optimization guide for Windows, Linux and Mac platforms*, Cophanegan University.
- [16] Stroustrup, B. (2004), *The C++ Programming Language Third Edition*, Addison-Wesley.
- [17] Schmidt D., Stal M., Rohnert H., Buschmann F. (2000), *Pattern-Oriented Software Architecture, Patterns for Concurrent and Networked Objects, Volume 2*, Wiley&Sons.

ETSİS: Etmen Tabanlı Simülasyon Sistemi

Mehmet F. HOCAOĞLU

Agena Bilişim ve Savunma Teknolojileri Ltd. Simülasyon Sistemleri
hocaoglu@agenabst.com.tr

ÖZ

Çoklu programlama paradigmasını destekleyen Etmen tabanlı Simülasyon Sistemi tanımladığı durum tabanlı programlama paradigmı ve ontolojik arka planı ile simülasyon modelleme ve etmen programlama dili olarak güçlü bir adaydır. Bildiride önerilen dilin tekrar kullanılabilirlik, esneklik, karşılıklı işleteilebilirlik ve ortogonalite kriterlerini sağlamadaki başarısı, desteklediği paradigmalar ve genişletilen miras mekanizması, genişletilen davranış yönetimi ve değişken tabanlı senkronizasyon yapısı sunulmuştur. Önerilen bildirimsel betik dilin geliştirilen yeni özellikleri açıklanmış ve genel işletim kavramı bir örnek ile detaylandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: EtSiS, Etmen, Durum tabanlı Programlama, Paradigma, Simülasyon

AdSiF: Agent driven Simulation Framework

Abstract

Agent driven simulation framework (AdSiF) is a powerful candidate for agent programming and simulation modeling environment with multi-programming paradigm it supports, with state oriented programming paradigm it re-interprets and its ontological background. The success of AdSiF in satisfying software criteria such as reusability, extendibility, interoperability, flexibility and ortogonalite, and software development paradigms Object Oriented Programming, Logic Programming, State Oriented Programming and Aspect Oriented Programming it supports are examined in the paper. An example is gives to show fundamental properties of the modeling approach and new properties discussed in the paper.

Keywords: AdSiF, Agent, Paradigm, Simulation, State oriented Programming

1. GİRİŞ

AdSiF genel amaçlı, multi-paradigma bildirimsel (declarative) betik (scripting) dildir [1]. Dilin tekrar kullanılabilirlik (reusability) ve karşılıklı işleteilebilirlik (interoperability) konusundaki ana vurgusu, multi-paradigma desteği ve modellemecilere sağladığı etmen programlama yaklaşımıdır. AdSiF varlıkbilimsel (ontological (ontolojik)) betimlemesinde nesne yönelimli programlama paradigması (NYP), mantık programlama, etmen-tabanlı programlama paradigması [2, 3] ve cephe tabanlı (aspect oriented) programlama paradigmalarını tümleştirmeyi

Durum tabanlı programlama olarak isimlendirdiği ve dünya betimlemesini, gramerini oluşturduğu bir paradigmada gerçekleştirir. AdSiF'in içeriği paradigmalardaki zenginlik, sağladığı tekrar kullanılabilirlik, karşılıklı işletilebilirlik, esneklik özelliklerinin yanısıra dünya tasvirine de yansır. Herbir paradigmanın dünya tasvirinin tümleşimi etmen programlama yaklaşımında kendini gösterir. Yaklaşımda, davranış planlama karakteristiği ile karşılık veren (responsive) bir yapı, otonomi sağlanır ve sahip olduğu insan biçimsel (anthropomorphic) karakteristik ile geliştirilen uygulamaların ve simülasyon modellerinin daha sosyal, esnek ve karşılıklı işletilebilir (interoperable) olmalarını sağlar. Geliştirilen modelin çevresine ait bilgiye sahip olması ve muhakeme yürütmesi, mantık programlama paradigmanın bir getirisidir ve simülasyon modellerine "Dual dünya betimlemesi" kurmasını sağlar.

AdSiF yazılım mühendisliği kavramlarına sağladığı katkılarından farklı olarak, simülasyon teknolojisinde kesikli ve sürekli olay simülasyon teknolojilerinin işletim yaklaşımına yeni bakışlar ve işletim zamanlı geliştirme kavramını katmıştır. Sürekli olay simülasyonlarının kesikli uzaya resmedilme yaklaşımı, varlık durumsallığı standardizasyonu, işletim zamanlı davranış semantiği yönetimi ve varlıklar arası ilişkilendirme esasları önemli katkılar olarak ele alınmıştır. Tüm bunlara ek olarak AdSiF'in 1) Genişletilen miras mekanizması, 2) Genişletilen davranış yönetimi, 3) İlişki tanımı ile varlık ontolojisindeki kavramsal genişlemeyi ve 4) Davranış değişkenleri ile davranış senkronizasyonu bildiride, yeni özellikler olarak, ele alınmıştır.

1. AdSiF: MODELLEME VE SİMÜLASYON ÇERÇEVESİ

AdSiF sistem betimlenmesi için bildirimsel bir metod sunar. Temelde bir sistem zaman esasına, girdilere, durumlara, davranışlara ve sistem davranışlarını, diğer bir ifadeyle, sistem dinamik karakteristiğini yöneten bir mekanizmaya sahiptir. AdSiF varlıkbilim bakışıyla bir sistemin dinamik karakteristiği, içsel (internal) ve harici (external) durum geçişlerini, durum ve davranış eylem prosedürleri yönetimini ve ayrıca, durum ve davranışlarla temporal ilişkili davranışların yönetimini içerir.

AdSiF'in yazılım mühendisliği perspektifini oluşturan üç temel kavram Yazılım Çerçeveesi (*Framework*), *betik dil* ve *Yazılım Etmenleri* olarak ele alınır. Bir yazılım çerçevesi olarak AdSiF bir seri yazılım tasarım kuralı seti getirir ve programlama paradigmasi ve ontolojik bakışı olan taslak bir tasarımı varsayar. AdSiF sahip olduğu multi-programlama paradigmاسını durum tabanlı programlama paradigmاسını bünyesinde tümleştirdiği için tasarım kurallarındaki ana odak bu paradigmadır. Literatürde durum tabanlı programlama kavramı ile modelin durumsallık tanımlamalarının yapılarak, durum tanımlamalarının programlanması veya durum tanımlamalarına uygun kod üretilmesi olarak ele alınmıştır [4]. Oysa burada, durumların programlanması değil, durumlarla modelleme ve programlamayı esas alan bir programlama ve altında yatan ontoloji önerilmektedir. Tasarımı yapılan simülasyon modelleri davranış diyagramları

genişletilmiş bir durum otomatı formatındadır ve doğrudan AdSiF tarafından işletilirler. Bölüm 7 Şekil 1'de küçük ölçekte bir simülasyon örneği için hazırlanmış davranış diyagramları görülmektedir ve bu diyagramların işletimi ile simülasyon yürütülmektedir. Takipeden bölüm, paradigmaların ortak bir ontoloji tanımı içerisinde nasıl tümleştirildiğine ışık tutar.

2. VARLIKBİLİMSEL (ONTOLOJİK) BAKIŞ

Aşağıdaki tanımlamada AdSiF ontolojik tanımlaması, ontolojiyi oluşturan bileşenlerin desteklediği paradigmalar ile ele alınmıştır.

“Varlıklar kendilerini diğer varlıklardan ayırt eden özniteliklere ve işletimleri ile öznitelik değer değişimlerini yöneten atomik fonksiyonlara sahiptirler (NYP). Varlıklar sahip oldukları fonksiyonları ardışık olarak, davranış olarak tanımlanan, belirli bir sematik yapı içerisinde yürütürler ve davranışlar paralel ve/veya seri olarak işletilirler. Modelde ait her bir atomik fonksiyon durum tanımlamaları ile sarılırlar (Durum tabanlı Programlama –State Oriented Programming). Varlıklar birbirleri ile olay iletişimleri ile etkileşirler ve birbirleri arasında ilişkilendirmeler kurulabilir. Birbirleri ile olan etkileşimlerinde amaç gündemü, otonomi ve reaktif davranışlar sergilerler (Etmen Tabanlı Programlama - AgOP). Kategorik bir bakış ile, varlıklar sahip olduğu davranış kategorileri ile farklı davranış bakışlarını temsil ederler (Cephe Tabanlı Programlama - Aspect Oriented Programming). Varlıklar bulunduğu çevre ve çevreyi paylaştıkları varlıklarla ilgili inanışlara (beliefs) ve olgulara (facts) dual olgu dünya tasviri olarak sahiptirler. Dual dünya tasvirlerinde başaracakları bir seri amaçlara ve muhakeme mekanizmalarına ve karar yapım yordamlarına sahiptirler (Mantık Programlama-Logic Programming).” AdSiF ontolojik bakışı, NYP'nin dayandığı klasik Descartian varlık betimlemesini üç katmanda genişletir.

Nesne Betimlemesi; Klasik NYP'den en önemli ayırt edici farklılık, AdSiF model sınıf yapıları atomic fonksiyonlar arasında herhangi bir semantik ilişkilendirme içermemesidir. Sınıf fonksiyonları modelleme detayına göre belirlenen ve daha alt adımlara ayrılamayan atomik düzeyde eylemler olarak modellenirler. Sınıf fonksiyonları oldukça basit bir parametre setine sahiptirler ve sıklıkla parametresiz kullanılırlar, boş veya bool geri dönüş değerine sahiptirler. Metot parametreleri yerine davranışları tetikleyen olaya ait parametreler veya öznitelikler kullanılır. Bu bakış açısıyla, AdSiF'de programlama yazılım etmeni geliştirme ile benzerlikler taşır [3].

D davranış karakteristiği; Atomic fonksiyonların durumlar ile sarılması durum tabanlı programlamaya doğru ilk adımdır. Varlıklar ilgili durum içerisinde tanımlı süreyi geçirirler ve durum tarafından sarılan eylemleri yürütürler. AdSiF varlık betimlemesinde, herhangi bir zaman anında, varlık en az bir durum içerisinde bulunur. Varlıkların davranış semantiği, ardışık durum işletimlerinin gerçekleştirildiği, durum otomati formundaki davranışlarla modellenir. Her bir davranış kuruluş amacına uygun,

mantıklı bir sonuç üretir. Üretilen sonuç varlık çevresini ve çevreyi paylaşan diğer varlıklarını etkileyen, onlarda bir davranış başlatan veya durumlarını değiştiren bir sonuç olarak görülür.

Mantıksal perspektif; Varlıklar çevresi ve çevredeki varlıklarla ilişkin oldukları bilgiler ile oluşturdukları içsel “dual dünya tasvirine (fact equivalent dual world)” sahiptir. Varlıklar çevrelerinde oluşan olayları ve diğer varlıklar algılarlar, varlıklara ve oluşan olaylara reaksiyon göstermelerinin ötesinde, edindiği çevresel varlıklara ilişkin olguları güncel olarak oluşturdukları içsel modellerinde tutarlar. Olgular yalnızca güncel değerleri değil, olguların tarihsel akışını gösteren önceki değerlerini, modelleyici tercihine bağlı olarak, muhafaza edebilirler. Sözkonusu olgular çevre ve içerdeği varlıkların sahip oldukları durumlar, olaylar ve öznitelikleri ile hesaplama sonucu üretilen değerleri üzerinde kurgulanır. Karar yapım algoritmaları, mantık programlama söyleyişle, önermeler, olguları muhakeme amaçlı girdi olarak kullanırlar ve çevre, varlıklar ve durumlar için bir karar sonucu üretirler. Muhakeme, doğruluk değeri ve önermelerin sahip oldukları çıktı (“out”) parametrelerini üretir. Üretilen kararlar ve parametreler, varlık için bir davranış tetikleyici sonuç olarak durum tabanlı programlama davranış yapıları ile tümleştirilirler.

3. Programlama Paradigmaları

Takip eden bölümlerde AdSiF'in varlık betimlemesini oluşturan paradigmalar ve paradigmaların tümleşik varlık betimlemesine sağladığı katkı ile durum tabanlı programlamadaki tümleştirilmeleri ele alınmıştır.

3.1.Cephe Tabanlı Programlama Bakışı

Bir varlığın sahip olduğu davranışlar modelleyicinin bekłentilerine göre kategorize edilirler. Bu bakış, davranış perspektifi ile saçılım (scattered) isterlerin model davranışlarına dağıtılmmasını ve tümleşik bir ister setinin (tangled) sınıflandırılmasını sağlar. Semantik olarak bir birinden ayıktır olan davranışların farklı kategoriler içersine taşınması, modelleyiciye modellerin farklı davranış cephelerine (aspects) göre yönetilmesini sağlar. Ayrıca, saçılım isterleri karşılayan davranışların veya durumların, sırasıyla, davranış setlerine ve davranışlara dağıtım düşük-bağımlılık ve yüksek tutarlılık ile saçılım ister problemi çözürt. Bölüm 7'da verilen örnekte davranışlara loglama işlevini gerçekleştiren bir durumun eklenmesi veya davranış kümese bu amacı sağlayan bir davranışın eklenmesi, model semantığını bozmadan saçılım isterin karşılaşmasında bir çözüm olarak kullanılabilir. Daha genel bir örnek olarak, bir simülatörün iki farklı çalışma modu olduğunu varsayıyalım. Burada iki farklı simülatör modellemek yerine, modlar arasındaki davranış farklılıklarını davranış kategorileri olarak belirlenir. Farklı davranış kategorisinde, yürütülen davranışların hesaplama prosedürleri ortak veya benzer olanları bir tek model sınıfında modellenebilirler. Yaklaşım

simülatörden beklenen fonksiyonların davranış seti olarak ayrıştırılması ile *yığın şeklindeki isterlerin* karşılandığı bir cephe programlama çözümüdür.

AdSiF'in Cephe tabanlı Programlamaya olan bir diğer önemli desteği Geç-Yüklemeli-Atomik-fonksiyon uzantılarıdır (Delayed-Loaded Atomic Function Plug-ins (D₁AFPs). D₁AFPs davranış durumları tarafından işletilen atomic fonksiyonun işletim zamanında yüklenmesini sağlar. Özellikle, varlıklara işletim zamanında dahi geliştirme, modeli genişletme imkanı verir ve AdSiF'in genişletilebilirlik derecesi için önemli bir ölçütür.

3.2.Mantık Programlama Bakışı

Mantık programlama “horn ifadeleri (horn clause)” ifadelerin koleksiyonu olarak tanımlanır [5]. Mantık programlamaya nesne tabanlı programlama bakışı ile, mantık nesneleri “hakkında doğru olarak neleri bildiğimiz ile ilgileniriz” [6]. AdSiF durum tabanlı programlama paradigmasi ile olan tümleşimindeki ana fikir, mantık nesnelerinin doğruluk değerleri ve muhakeme sonucu elde edilen parametreler ile davranışların yönetilmesidir. Mantık nesneleri muhakeme operasyonlarında çevre ve diğer nesnelere ait olguların ve önermelerin bulunduğu bilgitabanını kullanır. Mantık programlama ile varlıkların çevre ve çevreyi paylaştıkları varlıklar hakkında sahip oldukları bilgiler (olgular) doğrudan veya dolaylı etkileşimler ile güncellenir. Olgular zaman etiketli olarak güncel bilgi veya zaman çerçeveli bilgi olarak tutulurlar. Elde edilen olgular üzerinde muhakeme yapan önermelerden elde edilen doğruluk değerleri ve parametreler davranışları tetiklemekte kullanılır. Simülasyonda çözüm için geçmiş değerlere matematiksel bağımlılık olan problemlerde [9, 10] ve yapay zeka literatüründe çerçeve (frame) problemi [11] olarak bilinen problemler için çözüm adayıdır.

3.3.Etmen Karakteri

Etmen-tabanlı programlama klasik hesaplama yaklaşımlarından iki noktada farklılık göstermiştir. İlk, klasik yaklaşımın öngördüğü şekilde yazılım tekil bir çözüm geliştirici olmaktan ziyade, farklı varlıklarla etkileşebildiği bir topluluk içerisinde yer almıyor olmasıdır. İkincisinde ise, hesaplama prosedürleri rutin bir algoritmik işletimin ötesinde, hesaplama prosedürleri bir amaç içerir ve duygusal özellikler olarak tanımlanabilecek özelliklere de sahiptir [7]. Bu etmenlerin bir işlemi yerine getirirken uyguladıkları stratejiler amaç ve amacı uygulamadaki duygusal karakteristiğini gösterir [8]. AdSiF amaçları ve ilgili stratejileri mantık programlama ve davranış yapılarını daha üst düzey programlama ile tümleştirerek gerçekleştirir. Varlığa ait her bir davranışın anlamlı bir sonuç ürettiği dikkate alınırsa, davranışlar varlığın eylemlerini ifade eden cümle yapıları olarak tanımlanabilir. Mantık programlama etmen için amaç modellemesi ve çelişki çözümlemesi işlevlerini gerçekleştirir [9] ve amacın işletimini, varlıkların davranışlarını kelime olarak kullanan, daha üst düzey davranış cümlelerini yöneterek yürütür. Bir etmenin amacının olması, etmen yazılımlarını yalnızca bir insan benzeri yazılım olmaktan öte, bir işi olan insan benzeri olmalarını sağlar. Amaç güdümü

ve strateji uygulama, etmenleri klasik yazılımlardan daha fazla insan benzeri davranışa yaklaştırır ve otonomi, reaktif olma özellikleri bu özelliğe güçlendirir. Klasik yaklaşım ile geliştirilen bir yazılım, tanımlı prosedürleri takip ederek işletimi sonlandırır, bir etmen bir çevre içerisinde bulunduğu için çevresi var olduğu sürece, yürütecek bir amacı bulunmasa veya başarılı olsa bile, kendisi için tanımlı olan olaylara ve durum değişimlerine reaksiyon gösterir. Çevresinde oluşan olaylara veya durum değişimlerine gösterilen reaksiyon davranış olarak modellenir ve davranış işletimi sonucunda durumsal farklılık (dolaylı etkileşim) ve/veya olay yayılaması (doğrudan etkileşim) gerçekleşir.

4. AdSiF Varlık İlişkileri

AdSiF'in ontolojisinin bir parçası olarak varlıklar aralarında tasarım zamanlı ilişki ve işletim zamanlı ilişki olmak üzere iki tip ilişkilendirme mevcuttur. Tasarım zamanlı ilişkilendirme, modeller arası miras (inheritance), kümeleme (aggregation) ve birleştirme (composition) ilişkileri olarak tanımlanır. Kümeleme ve birleştirme ilişkisinde, alt modellere bileşen olarak sahip olan ana model, alt varlıkların zaman ve olay yönetimini üstlenir.

İşletim zamanlı ilişkilendirme işletim zamanında etkindir. Modellerin tasarımlarında doğrudan bir ilişkilendirme sözkonusu değildir. İlişki tanımının yanında ve solunda yeralan varlıkların her biri için ilişkinin aktif olması ve pasif olması durumunda yürütecekleri davranışlar tanımlanır. Örnek olarak; Bölüm 7'da verilen depo örneğinde yeralan ilişkilendirme dikkate alınırsa, Depo modelinin iki adet musluk modeli ile "Doldurur" ve "Boşaltır" ilişkileri ile ilişkilendirildiği görülmektedir ("<relation.left="Musluk".right="Depo.name="Doldurur"/>"). *Musluk* ilişkilendirmenin solunda, *Depo* ise yanında yer almaktadır. İlişki aktif olduğunda *Musluk* modeli ilişkinin yanında yeralan *Depo* modeline su aktarma olayı gönderdiği ve *Depo* modelinin *Musluk* modeline açma, kapama olayı gönderdiği örnekte görülmektedir.

5. DURUM TABANLI PROGRAMLAMA PARADİGMASI ELEMANLARI

Paradigma AdSiF'in içeriği tüm paradigmaları bünyesinde kaynaştıran özgün bir paradigma olması sebebiyle, alt bölümlerde paradigmmanın temel elemanları kısaca anlatılmıştır.

5.1.Davranışlar ve Davranış Setleri

En yalın anlamı ile bir davranışın işletilmesi, ardışık olarak sıralanmış durumların işletimidir. Durum işletimi duruma atanan sürenin harcanması ve duruma atanan atomik metodların yürütülmesidir. Durum ve davranışların her ikisi de, işletiminin doğal akışı içerisinde, ilgili tüm fazlarda, temporal ilişkili davranış yönetimi gerçekleştirilir ve akışın tamamlanması durumunda kendilerine ilişkilendirilmiş olayları ilgili adreslere

gönderirler. Bir davranışın aktif olma (Active), iptal edilme (Canceled), askıya alınma (suspended), tekrar işletimi (askıya alınmış bir davranış için) (resumed) ve sonlandırılması (finished) olarak tanımlanan durumsal tanımlayıcıları vardır.

Bir davranış üç farklı şekilde aktive edilir. Bunlar;

- **Olay ile aktivasyon;** Tanımında S giriş durumuna ve e tetikleyici olayına sahip bir davranış, yürütülmekte olan herhangi bir davranışın S durumu içerisinde olduğu anda aldığı e olayı ile aktive edilir.
- **Gündüm şartı ile aktivasyon;** Gündüm şartı, bir davranışın olay almaksızın, tanımlı aktivasyon şartının sağlanması ile aktive edilmesidir. Şart tanımları ile aktif bir davranışın iptal edilmesi, askıya alınması, sonlandırılması ve askıya alınmış bir davranışın tekrar aktive edilmesi gerçekleştirilebilir.
- **Temporal ilişkili aktivasyon;** Bu durumda davranış, temporal ilişkili olduğu diğer bir davranış veya durum tarafından aktive edilir. Aktivasyon için kısıt ve gecikim süresi tanımlanabilir. İlişkilendirme davranış ve durumun fazları ile aktive edilecek davranış arasında yapılır (7.4 Öznitelikler ve Temporal İlişkiler).

D davranış setleri, Cephe Tabanlı Programlama bölümünde debynildiği gibi, modelin farklı cephelerden bakışını oluşturan davranışları kategorik olarak düzenleyen ve ayrık setler (kümeler) içerisinde toplayan bir yapıdır. Davranış setleri aktif olma ve pasif olma şartlarına sahiptir. Aktif olma şartının işletim zamanında sağlanması durumunda içeriği davranışlar model tarafından kullanılabilir.

5.2.Durumlar

Durum modelin içerisinde belirli bir zaman için bulunduğu tanımlı bir safhadır. Modeller, tasarım çözünürlüğüne bağlı olarak, bir durumunda iken durumun farklı fazlarında tanımlanmış atomic fonksiyonlarını işletirler. Durumların operasyonel tanımlayıcıları; **a) Giriş şartı;** Giriş şartı bir duruma girişin gerçekleşip gerçekleşmeyeceğine karar veren şart tanımıdır, **b) Durum eylemleri;** Modelin ilgili durumun tanımlı fazlarında yürüteceği fonksiyonların tanımıdır. Bir durum sahip olduğu üç fazı için model atomik fonksiyonlarına ait referanslara sahiptir. Birincisi, Durum-eylem-fonksiyonu olarak tanımlanır ve duruma giriş fazında işletilir. İkincisi çıkış-faz-fonksiyonu olarak tanımlanır ve durumdan içsel geçiş fazında işletilir ve sonucusu harici-geçiş-fonksiyonu olarak tanımlanır ve durumun harici geçiş esnasında işletilir. İçsel geçiş varlığın içerisinde bulunduğu duruma atanan zamanı harcadıktan sonra davranışın takipeden durumuna geçisi olarak tanımlanır. Dışsal geçiş modelin mevcut durumdan çıkışına durum zamanının tükenmesi değil, modelin aldığı bir olay sebebiyle gerçekleşir. **c) Olaylar;** Bir duruma/davranışa diğer modellere veya kendisine gönderilmek üzere olay ilişkilendirilebilir. Bu, durumun yerine getirdiği eylemden sonra diğer modellerden yapmasını beklediği eylemleri tetikleyen bir mesajlaşma, bir

bilgilendirme olabileceği gibi, bir eylem isteği de olabilir [6]. **d) Zaman hesaplayıcıları;** Süre hesaplayıcıları tanımlandığı durum için durumda geçirilecek süre hesabını yapar. **e) Koşum izi etmenleri;** Koşum sırasında kayıt altına alınacak koşum yörüngesi değişkenlerinin tanımlanması sağlanır. Tanımlaması yapılan bir koşum izi etmeni işletileceği durum tanımında belirtilir. Koşum izi etmenlerinin model kodları içerisinde gömülü olmaması, etmenlerin model kodları ile olan yüksek-tutarlıklı-düşük-bağımlılığa sahip bir tasarıma sahip olduğunu gösterir.

5.3. Sınıflar, Öznitelikler, Temporal İlişkiler ve Miras Mekanizması

AdSiF'e ait iki tip soyut model sınıfı mevcuttur. Bunlar; AdSiFModelEntity sınıfından türeyen model ve AdSiFModelBuilder sınıfından türeyen model builder sınıflarıdır. Bir simülasyon modeli zorunlu olarak bu iki kök sınıfın türeyen sınıfına sahip olmalıdır. AdSiFModelEntity sınıfı simülasyon işletim zamanında kullanılan modele ait temel sınıfı ve AdSiFModelBuilder sınıfından türetilen sınıf ise simülasyon senaryosu tasarımda kullanılan model sınıfıdır.

AdSiF iki tip öznitelik kullanım konseptini barındırır. Bunlardan birincisi, NYP teknolojisinde yer alan ve sınıf içerisinde tanımlı öznitelik kullanımıdır. İkinci kullanım konsepti ise, öznitelikler nesne olarak tanımlanır. Tanımlamada öznitelik tanımları bir şablon tanımlama ile gerçekleştirilir. Şablon dinamik bir karakteristiğe sahip olup tasarımcı tarafından belirlenen farklı öznitelik veri alanları ile veri yapısı genişletilebilir.

Temporal ilişkiler davranışlardan davranışlara ve durumlardan davranışlara ilişkilendirmeyi sağlar. İlişkilendirme durum ve davranışların durumsal belirleyicileri üzerinden yapılır. Durumdan davranışa yapılan bir tanımlama durumun giriş ve çıkış fazları için, davranıştan yapılan bir ilişkilendirme ise davranış durumsal tanımlayıcıları ile yapılır ve ilişkilendirilen davranışın, aktive edilmesi, askıya alınması, sonlandırılması ve tekrar işletimi sağlanır. Temporal ilişkilendirme bir uygulama şartı ve uygulama gecikim süresi içerir.

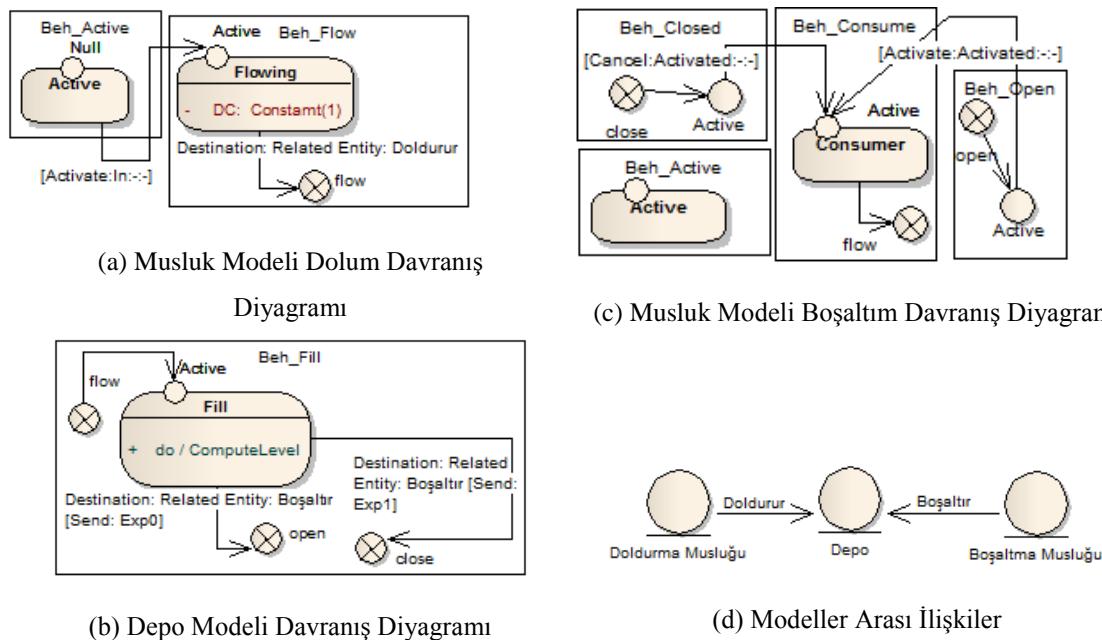
Miras ilişkisi modeller arasında tanımlanabilecegi gibi [1], durumlar ve davranışlar arasında da tanımlanabilir. Durumlar arasında yapılan miras ilişkisinde temel durum için tanımlanan; atomic fonksyonlar, ilişkilendirilen olaylar, giriş şartı ve temporal ilişkiler türetilen durum tarafından alınır. Davranışlar arasında tanımlanan miras ilişkisinde davranış durum tanımlamaları dışındaki tanımlamalar türetilen davranış tarafından alınır. Model davranış setleri (kümeleri) arasında yapılan miras ilişkisinde türetilen davranış seti temel setten içerdiği davranışları alır. Modeller arasında kurulan miras ilişkisinde türetilmiş varlık, temel varlıktan öznitelikleri, koşum izi etmenlerini, öznitelik aboneliklerini (subscription set), durum tanımlamalarını, mantıksal ifade tanımlarını ve davranışları alır.

6. DEĞİŞKEN İLE DAVRANIŞ SENKRONİZASYONU

Modeller davranış ve model etki sahali (scope) değişkenlere sahiptirler. Birden fazla davranış tarafından kullanılan bir değişkenin, davranışın herhangi bir noktasında kullanımında, ilgili davranış, değişkene değer atanıncaya kadar askıya alınır. Örnek olarak, bir X değişkeni davranışa ait bir Durumun giriş şartı tanımlamasında $X > 5$ şeklinde bir mantıksal ifade ile kullanılmış olsun. Eğer X değişkenine bir değer ataması yapılmamış ise X değişkeni ile hesaplama yapacak davranış, X değişkenine, bir başka davranış tarafından değer atanıncaya kadar askıda bekler.

7. SİMÜLASYON ÖRNEĞİ: SU DEPOSU SİMÜLASYONU

Örneğimizde, su akışı sağlayan bir musluk ile doldurulan ve maksimum seviyesine yaklaşıldığından tahliye vanasını açan bir sistem simüle edilmektedir. Simülasyonda depo ve iki adet musluk mevcuttur. Şekil 1'de modellere ait davranışlar ve modeller arası ilişkilendirmeler görülmektedir. Musluk modeli için iki farklı davranış seti tanımlanmıştır (doldurma davranış seti ve boşaltma davranış seti). Doldurma ve boşaltma muslukları için bunlardan uygun olanlar aktif olarak seçilirler. Bu önceki bölümlerde ifade edilen davranış listelerinin kullanım konseptini göstermektedir. Depo modelinin sahip olduğu ve ifadelerden örneği açıklamaya yetecek öznitelikler şu şekildedir.



Şekil 1 : Depo Simülasyonu

waterLevel; Tamsayı tipinde bir özniteliktir ve depodaki su seviyesini gösterir.

maxLevel; Tamsayı tipinde bir özniteliktir ve en yüksek su seviyesini temsil eder.

Simülasyon modelinde tanımlı olaylar şu şekildedir.

open; Musluğun açılma davranışını tetikler.

close; Musluğun kapanma davranışını tetikler.

flow; Depoya musluktan su akışını belirtir. Debi isimli, akış miktarını temsil eden integer tipinde bir parametreye sahiptir. Negatif değer boşaltımı ifade eder.

Depo modelinin sahip olduğu mantıksal ifadeler aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

Exp0; $\text{waterLevel} >= \text{maxLevel} * 0,9$ şeklinde formüle edilir ve su seviyesinin maksimum su seviyesinin %90'ından büyük olması durumunu ifade eder.

Exp1; $\text{waterLevel} <= \text{maxLevel} * .1$ şeklinde formüle edilir ve su seviyesinin maksimum su seviyesinin %10'unun altına inmesi durumunu ifade eder.

Musluklardan birincisi (M1) $d_0 \text{ m}^3/\text{dk}$ debisi ile depoyu su ile doldurmaktadır. Şekil 1 (a)'da görülen "Beh_Active" isimli davranış başlangıç (initial) davranış olarak belirlenmiştir ve simülasyonun t0 zaman anında active edilir. Davranış temporal ilişkili olan "Beh_Flow" isimli davranışı, "Flowing" durumu giriş fazında sıfır zaman sonra active eder. "Beh_Flow" davranışı döngüsel bir davranış olarak tanımlanmıştır. Davranış "Flowing" durumunda, duruma ait zaman hesaplayıcısının belirttiği bir zaman birimi harcar ve davranış her durum çıkışından sonra yinelenir. "Flowing" durumu çıkışında "flow" olayı hedefi "Doldurur" ilişkisi ile ilişkilendirilmiş model olan "Depo" modeline gönderir. Depo modeli başlangıç davranışı "Beh_Active" olarak belirlenmiştir. "flow" olayı Depo modelinde "Beh_Fill" davranışını aktive eder. Durum tarafından "ComputeLevel" metodu yürütülür. Metot "flow" olayı ile alınan debi parametresindeki değer ile akış süresi kullanılarak dolan su miktarı hesaplar ve bulunan değer depo modeline ait "waterLevel" özniteligine atanır. "Fill" durumu çıkışında "Exp0" mantıksal ifadesinin doğru değerine sahip olması durumunda, "open", "Exp1" mantıksal ifadesinin doğru değerine sahip olması durumunda ise "close" isimli olay Depo modelinin "Boşaltır" ilişkisi ile ilişkilendirildiği modele gönderilir (boşaltma musluğu). Boşaltma musluğu başlangıç davranışı "Beh_Active" olarak tanımlıdır. Model "Active" durumundadır. "open" olayının alınması ile tetiklenen "Beh_Open" davranışı temporal ilişkili olduğu "Beh_Consume" davranışı davranışın aktivasyon fazında aktive eder. "Beh_Consume" davranışı "Consumer" durumunda $DC:Constant(1)$ ile hesapladığı zaman adımı kadar süre harcar ve süre sonunda durum çıkışında "Boşaltır" ilişkisi ile bağlı olduğu modele "flow" olayını gönderir. Depo modeli tarafından alınan olay ile tekrar "Beh_Fill" davranışını tetiklenir. Davranış "Fill" durumu ile "flow" olayından aldığı debi parametresi ile *ComputeLevel* metodunu çalıştırır ve hesaplanan değeri "waterLevel" özniteligine atar (negatif debi değeri alınmıştır). Durum çıkışında olay gönderimleri bir önceki durum gibi ele alınır. "close" olayının gönderildiği durumda, olayı alan boşaltma musluğu "Beh_Closed" davranışını işletir. Davranış temporal ilişkili "Beh_Consume" davranışını iptal eder ve musluk kapatılır.

Simülasyon, muslukların debi oranlarına bağlı olarak simülasyon bir kararlılık noktasına ulaşır. $d_0=d_1$ olması durumunda sistem maksimum su seviyesinde kararlılığa ulaşır. $d_0>d_1$ olması durumunda depo taşar ve $d_0<d_1$ olması durumunda ise deponun dolup minimum seviyeye kadar boşaltılıp tekrar maksimum seviyeye yükseldiği bir simülasyon çevrimi oluşur. Bir karar problemi olarak, doldurma musluğunda meydana gelecek birim zamandaki n katlık bir debi artışının, alarm durumu olduğunu ve tahliye vanası açılığının maksimum seviyeye ulaştırılması ile karşılık verileceğini düşünelim. Bölüm 5'de ifade edildiği şekilde, simülasyona AdSiF'in simülasyon teknolojilerine katmış olduğu, mantık programlama yeniliği kullanılarak, $debi(miktar, time)$ şeklinde bir olgu tanımlaması yapalım. Bir karar algoritması olarak aşağıdaki gibi tanımlanır.

*openOutValve(X,N,T):-debi(M0,T0),debi(M1,T1), T1-T0>T, M1/M0>N, X is N*1.5.*

İfade şu şekilde yorumlanır; Verilen bir T zaman aralığında, debi N katından daha fazla artmış ise çıkış vanası X kat açılır ve X bu oranın 1.5 katı olarak belirlenir. Önerme bir vana açma/kapatma davranışının aktivasyon şartı olarak tanımlanır ve önermenin doğru değer döndürmesi durumunda davranış aktive edilir. Önermenin geridönüş değeri X , davranış tarafından parametre olarak kullanılır. Vana açış davranış durum tanımlamaları sıfır zamanlı olarak tanımlanır. Sıfır zamanlı durumların işletilebiliyor olması AdSiF'in simülasyon işletimlerine kattığı diğer bir yeniliktir ve kaynağı önerdiği durum tabanlı programlama paradigmاسıdır.

8. SONUÇ

AdSiF simülasyon ve etmen programlama uygulamaları için güçlü bir geliştirme ortamı sunmaktadır. Aşağıda belirtilen yazılım mühendisliği ve simülasyon alanında kullanım kolaylıklarını sunmaktadır. Bunlar; 1) Model davranış semantığının dışsal veri olarak giriliyor olması, model karmaşaklığını azaltmaktadır. Model davranışlarında yapılacak değişiklikler kodun yeniden derlenmesini gerektirmemektedir. Alternatif yaklaşımlar, sıkılıkla model davranış semantığını modelin derlenen kodunun bir parçası olarak muhafaza etmektedir, 2) Özniteliklerin dışsal veri olarak tanımlanma imkanının, DIAFPs özelliği ile birleştirildiğinde modelin geliştirme sürecinde işletim zamanına kadar uzanan bir esneklik kazanılmaktadır. Alternatif yaklaşımlardan önemli bir fark sağlayan özellik, modelin kaynak kodunu değiştirmeden ve hatta yeniden derlemeden, yeni özellikler katılarak genişletilebilme avantajını sağlar, 3) Simülasyon işletim algoritmalarının davranışları ile modellenmiş olması, sistemin ileriye dönük genişletmelere açık olma sonucunu doğurmaktadır. Bu özelliğe ile yazılım mühendisliği ortogonalite kriterini sağlar, 4) Soyut davranış yorumlayıcı mekanizma sistemi simülasyon dışı uygulama alanlarına da taşımaktadır. Alternatif sistemler bir hesaplama ortamı sağlamak çok bir simülasyon geliştirme ve işletim ortamıdır, 5) Simülasyon modellerinin mantık programlama yaklaşımı ile simülasyon modellerinin çevrelerine ilişkin dual dünya betimlemesine sahip olmasını ve muhakeme yapabilmesini sağlar.

Yapay zeka ile tümlestiren ve etmen tabanlı programlama yaklaşımı ile birleştiren özellik, alternatif sistemlerle kıyaslandığında AdSiF tarafından yeni bir özellik olarak sunulmaktadır ve mühendislikte çerçeve (frame) probleminin çözümü için teknik altyapı sağlar, 6) Durum programlama ile sıfır zamanlı simülasyon ilerlemesi, olay listeleri tabanlı simülasyon yaklaşımından farklı olarak, mümkündür, 7) Model kodundan bağımsız tanımlı koşum kayıt etmenleri ile analiz koşum kayıtları alınmasında esneklik sağlar.

AdSiF kesikli ve sürekli olay simülasyonlarını destekler ve etmen programlama imkanı sunarak etmen güdümlü simülasyon ortamı sunar. Davranışlar ve mantık programlamada kullanılan önermeler, doğal dile yakın bir okunma özelliği ile model geliştirme sürecini karmaşıklıktan korur ve izlenebilirliğini artırır. Büyük hacimli simülasyon projelerinde izlenebilirlik takibini model davranışları üzerinden yapılmasını sağlar.

9. KAYNAKÇA

- [1] Hocaoğlu, M. F., “AdSiF: Agent Driven Simulation Framework”, The Huntsville Simulation Conference 2005, 26-27 October 2005.
- [2] Shoham, Y. Agent-Oriented Programming (Technical Report STAN-CS-90-1335). Stanford University: Computer Science Department, 1990.
- [3] Shoham, Y. Agent-Oriented Programming. Artificial Intelligence. pp. 51-92. <http://www.cs.unb.ca/~ulieru/Teaching/CS6705/Shoham.pdf>. Retrieved 2009-06-01., 1993.
- [4] Nomoto, H., “State Oriented Programming”, Proceedings of the Eighth IEEE International Symposium on High Assurance Sistems Engineering (HASE’04), 2004
- [5] Bhattacharya, A., Konar, A., Mandal, A. K., “Parallel and Distributed Logic Programming”, Springer, studies in computational intelligence, vol.24, 2006.
- [6] McCabe F. G., “Logic and Objects”, Prentice Hall, 1992.
- [7] Travers, M. D., “Programming with Agents:New metaphors for thinking about computation” Massachusetts Institute of Technology, Doctoral dissertation, 1996.
- [8] Wooldridge, M., “An introduction to MultiAgent Systems”, John Wiley & Sons, Ltd, 2002.
- [9] Murray-Smith, D. J., “Continuous Sistem Simulation” Chapman & Hall, 1995.
- [10] Zeigler, B. P, Praehofer, H., Kim, T. G., “Theory of Modeling and Simulation”, Second Edition, Academic Press, Florida, (2000).
- [11] J. McCarthy and P. J. Hayes (1969). Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence. Machine Intelligence, 4:463-502.

TAKTİK DATA LINK TEKNOLOJİLERİİNDE BİRLİKTE ÇALIŞABİLİRLİK VE KRİTİK SİMÜLASYON BİLEŞENLERİ

Mert TUĞCU ^(a), Oral GÜREL ^(a)

^(a) STM A.Ş., Ankara Teknoloji Geliştirme Bölgesi, Bilkent Cyberpark, C Blok,
ANKARA, {mtugcu,ogurel@stm.com.tr}

ÖZ

Bu makalede birlikte çalışabilirliği sağlamak amacıyla simülasyon ortamlarının verimli kullanımını, bir Taktik Data Link (TDL) simülasyonu için gerekli olan bileşenler, hali hazırda kullanımda olan teknolojiler ve TDL teknolojisinin güvenli olarak entegre edilmesinin sağladığı avantajlar incelenmiştir. Çalışmada, TDL sistemi olarak günümüz modern muhabere sahasında öncelikli kullanım alanı bulan ve NATO tarafından aslı link seçilen Link 16 TDL sistemi ele alınmıştır. Gerçekçi bir senaryo oluşturularak, Komuta Kontrol yeteneğine sahip olan ve olmayan platformlar arasında iletilen mesajlar incelenmiştir. Platformlar arasında mesajların iletilmesi sırasında simülasyon ortamındaki analiz araçları ve yetenekleri incelenmiştir. Son olarak, simülasyon analizinin sonuçları ve kullanılan simülasyon ortamının TDL teknolojisine geçiş ve ilgili modernizasyon süreçlerine sağladığı avantajlar sunularak çalışma tamamlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Birlikte Çalışabilirlik, Ağ Destekli Yetenek, Elektronik Harp, Link 16, Simülasyon, Simülasyon Bazlı Tedarik, Taktik Data Link (TDL), TDL Senaryo Bazlı Simülasyon.

INTEROPERABILITY AND CRITICAL SIMULATION COMPONENTS IN TACTICAL DATA LINK TECHNOLOGY

ABSTRACT

In this paper, in order to address the interoperability issue, the efficient utilization of simulation environments, essential simulation components of a TDL, available technologies and the advantages of reliable integration of TDL Technology are examined. In our study, specifically the Link 16, which has been found the primary usage area in a modern battlefield and recognized as the principal TDL system by NATO, is selected as the subject TDL. In our approach, a realistic scenario is simulated and examined, where TDL messages are exchanged between C2 platforms and non-C2 platforms. While messages are exchanged between platforms, the analysis tools of the simulation environment and their capabilities are studied. Finally, the results of the simulation analysis and the benefits of using the subject TDL simulation environment are presented.

Keywords: Interoperability, Network Enabled Capability, Electronic Warfare, Link 16, Simulation, Procurement Based on Simulation, Tactical Data Link (TDL), TDL Scenario Based Simulation

1. GİRİŞ

Geçmişte Komuta Kontrol haberleşme sistemlerinde veri iletişimi elektronik taarruza karşı dayanıklı olmayan, güvensiz veri kanalları üzerinden sağlanmaktadır. Bu yöntem katılımcı limitinin yetersiz olması, çok yüksek miktarda bilginin değişimi gerekliliği gibi kısıtlardan dolayı, bir süre sonra taktik bilgi değişimi için verimliliğini kaybetmiştir. Bu durum, ülkelerin görevle ilgili verilerinin güvenli olarak paylaşımını ciddi ölçüde sınırlamış ve böylelikle elektronik harbe karşı dayanıklı, güvenilir haberleşme ağlarına ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyaçlardan ötürü, Link-16 sistemlerinde gönderilen verinin kriptolanması, hata tespit ve düzeltme algoritmalarının kullanılmasıyla güvenilirliğin ve gürültü altında veri gönderim kalitesinin artması sağlanmış; iletilen sinyalin enerjisinin belirli yöntemlerle yayılması sonucunda düşman unsurlar tarafından tespit edilme olasılığı azaltılmış ve sinyal karıştırmalarına karşı dayanıklı bir hale getirilmiştir.[1] Muharebe sahasında müşterek taktik resmin doğru şekilde oluşturulması ve bilginin anlık olarak paylaşılması, düşmana karşı üstünlük sağlamak açısından büyük önem arzettmektedir. NATO'nun Taktik Data Link yol haritasına baktığımızda orta vadede yalnızca J serisi mesaj ailesi kullanımın öngörüldüğü görülmektedir. Özellikle Link 16, savaş ortamında bulunan iz ve diğer bilgilerin gerçek zamanlı paylaşımını sağlamak; yüksek kapasiteli, Komuta Kontrol (K2) ve uçak/silah/görev yönetimini destekleyen taktik birimlerin tüm veri değişim

gereksinimlerini karşılamak amacıyla tasarlanmıştır. Link 16 karıştırmalara karşı dirençli, Time Division Multiple Access (TDMA) mimarisine dayanan, frekans atlamlı ve güvenilir bir haberleşme altyapısına sahiptir. Bahsedilen tüm bu özelliklerden dolayı, Link-16 sistemlerinin kullanımı barış, kriz ve savaş dönemlerinde vazgeçilmez hale gelmektedir.

Bu makalede Link 16 TDL sistemi temel alınarak TDL teknolojisine geçiş ve ilgili modernizasyon süreçlerinde, simülasyon yazılımlarında olması gereken kritik bileşenler ve yetenekler ele alınmıştır. Bu simülasyon bileşenlerinin sağladığı maliyet, operasyonel etkinlik, eğitim ve güvenlik faydalari detaylı olarak açıklanmıştır. Her bir kritik bileşen sağladığı kabiliyetlerle beraber incelenmiştir. K2 yeteneği olan ve olmayan platformlardan oluşan bir senaryo oluşturulmuş ve bu senaryo baz alınarak kritik bileşenlerde simülasyonlar koşturulmuştur.

1.1. Birlikte Çalışabilirlik ve Önemi

Sistem, birim ve kuvvetlerin diğer sistem, birim ve kuvvetlerden hizmet alıp verme kabiliyeti ve bu hizmetlerin birarada ve etkin şekilde çalışmak amaçlı kullanılması [2] olarak tanımlanan Birlikte Çalışabilirlik (BÇ), TDL'lerin etkili kullanımı açısından kritik öneme sahiptir. Haberleşme ve bilgi değişimi alt yapılarına sahip sistemlerin etkin olabilmesinin en önemli şartı, diğer sistemler ile birlikte çalışabilir olmasıdır. Bu bağlamda, TDL teknolojisine geçiş ve ilgili modernizasyon süreçlerinde ulusal, hatta müttefik ülke platformları arasındaki BÇ'nin sağlandığından emin olunmalıdır.

BÇ'yi sağlamak amacıyla izlenmesi gereken adımlar, uluslararası kabul görmüş iSMART - The interoperable Systems Management and Requirements Transformation - süreçleriyle tanımlanmıştır [3]. Üst seviye gereksinimler, platformlar arası bilgi değişim ihtiyaçları ve analizleri, bilgi tanımları ve izlenmesi gereken standartlar süreçte tanımlanmaktadır. Tüm bu süreçler sonunda yüksek maliyetli tatbikatlar yapılmadan önce kağıt üzerinde yapılacak analizler ve bilgisayar simülasyonları yol gösterici olmaktadır. Kağıt üzerinde yapılan BÇ analizleri aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır:

- Platform Gereksinim Farklılık Dokümanı: Literatürde belirlenmiş standart gereksinimler ve platformlara özgü gereksinimlerin arasındaki farkların belirtildiği dokümandır.
- Platform Uygulama Farlılık Dokümanı: Literatürde belirlenmiş standart gereksinimler ve platformlara özgü yapılmış uygulamaların arasındaki farkların belirtildiği dokümandır.
- Veri Link Platform Uygulaması: Bir platformun mesajının, kelimesinin, alanının ve veri öğesinin iletim ve alım uygulamalarını tanımlayan dokümandır.

Bu dokümanlar sayesinde gerçek platform testlerine düşen yük hafifletilmiş olacaktır. Platformlar arası BÇ problemlerinin %80-90'ı bu analizlerle tespit edilebilmektedir.

TDL simülatörleri BÇ problemlerinin tespiti için faydalı olmakla beraber muharebe ortamında oluşabilecek her çeşit durumu kapsayamaz. Dolayısıyla, sistem simülasyon ortamında sorunsuz çalışsa da asıl doğrulamanın gerçek denemeler ve operasyon sırasında yapılacağı unutulmamalıdır.

Platformların her anlamda birlikte uyum içinde çalışabilmeleri için BÇ farklı seviyelerde ele alınmalıdır. Bu seviyeler şu şekilde listelenebilir:

- Radyo Frekansı Seviyesinde BÇ: Fiziksel olarak terminaller arasında mesajların doğru iletilmesidir.
- Veri Seviyesinde BÇ: Bilgi içeriğinin mesaj standartlarıyla uyumlu olması ve bilginin görev bilgisayarları arasında uyumlu olarak iletilmesidir.
- Protokoller Arası BÇ: Muharebenin sürdürülebilmesi için gerekli olan operasyonel prosedüre uygunluktur.
- İnsan-Makina Arayüzü & Operatörden Operatöre BÇ: Gönderilen bilgilerin alıcı operatör tarafından görüntülenebilmesi ve doğru yorumlanabilmesidir.

Öte yandan TDL işlevlerinin önemli bir kısmını yürüten görev bilgisayarlarının farklı üreticilerin ürettiği terminallerle doğru entegrasyonu da olası uyumsuzlukların önüne geçilmesi için önemlidir.

Kağıt üzerinde yapılan BÇ analizlerinden sonra, BÇ'yi mümkün olan en üst seviyede karşılayabilmek için bilgisayar ortamında simülasyonlara ihtiyaç vardır. Simülasyon bazlı tedarik kapsamında [4] ele alındığında halihazırda mevcut yazılımlar kendi içlerinde standartlar ve mesaj kataloglarına uyumlu şekilde çalışmaktadır. TDL teknolojisine geçiş sürecinde bilgi değişimi ihtiyaçları analiziyle platformlar arasında hangi bilgilerin paylaşılacağı (ulusal ve operasyonel) belirlenir. Sonraki adımda belirlenmiş olan isterlere göre veri ağ işlemcileri ve terminaller imal edilip mevcut simülatörlerde detaylı olarak test edilir. Böylelikle, geliştirilmiş olan TDL terminallerinin tam anlamıyla standartlara ve mesaj kataloglarına uygun olarak BÇ'yi sağladığı doğrulanmış olur. Bu işlem sayesinde terminaller platformlara entegre edilmeden önce maliyet etkin olarak olası uyumsuzluklar tespit edilmiş olur.

2. SENARYO ve SİMÜLASYON BİLEŞENLERİ

2.1. Senaryo

Kritik simülasyon bileşenleri işlenirken kullanılacak olan senaryo K2 yeteneği olan ve olmayan birimlerden oluşmaktadır. K2 yeteneği olan platformlar Komuta ve Kontrol Uçağı ve Yer Komuta Merkezidir. K2 yeteneği olmayan platformlar ise 2 adet Muharip Uçak, Silahlı İnsansız Hava Aracı ve Füze Sistemi dir. Tüm dost unsurlarında Link-16 sistemi mevcuttur. Düşman unsurlar olarak 3 adet savaş uçağı ve füze sistemi vardır.

Senaryoda konuşlandırılmış düşman füze unsurunu tespit eden Komuta ve Kontrol Uçağı bu bilgiyi Silahlı İnsansız Hava Aracı'na J3.5 mesajı ile iletir [5]. Senaryoda J3.5 mesajının Silahlı İnsansız Hava Aracı'nın TDL işlemcisinde tanımlanmadığı ve dolayısıyla görev bilgisayarına ulaşmadığı farzedilmiştir. Bu durum sonucunda düşman unsurundan haberdar olamayan Silahlı İnsansız Hava Aracı düşman füze sistemi tarafından vurulmaktadır. Senaryoda J3.5 mesajının Silahlı İnsansız Hava Aracı'nın TDL işlemcisinde tanımlanmamasından dolayı veri seviyesinde bir BÇ sorunu kurgulanmıştır. Bu çalışmada ölçüt platformlar arasında tüm mesajların eksiksiz, doğru şekilde iletilmesi ve işlenmesidir. Dolayısıyla, sonuçlar sayısal olmayan nitel analizlere dayanmaktadır.

Senaryonun hazırlanması ve oynatılması sürecinde Savunma Teknolojileri Mühendislik ve Ticaret (STM) A.Ş. bünyesinde bulunan Sentetik Yer Birlikte Çalışabilirlik Test Ortamı (SYBTO) 'nda bulunan simülasyon bileşenleri temel alınmıştır. SYBTO, Lockheed Martin UK firmasından tedarik edilmiş, ticari bir TDL simülasyon ortamıdır. Mevcut olan bir çok modern platform kullanılarak simülasyonlar yapılabilmektedir. Kullanılan sistem, Ağ Tasarım Aracı, Senaryo Üreticisi ve Çevrimdışı ve Çevrimiçi Mesaj Analiz Araçları Aracı bileşenlerinden oluşmakta ve Windows XP işletim sisteminde koşmaktadır. Bu çalışmada sunulan şekil ve tablolar STM A.Ş. bünyesindeki SYBTO kullanılarak elde edilmiştir.

2.2. Ağ Tasarım Aracı

TDL Sistemlerinde ilk olarak simüle edilmesi gereken kısım kurulacak olan ağdır. Bu amaçla bir ağ tasarım ve simülasyon aracı kullanılmalıdır. Böyle bir bileşen sayesinde Link 16 TDL Sisteminde 7.8125 mili saniyelik zaman dilimlerinde TDMA yöntemiyle çalışan ağını ağ isterlerine göre tasarlanması ve modellenmesi imkanı doğar. Böyle bir araçla zaman dilimleri, Ağ Katılım Grubu (AKG)¹, TSEC² ve MSEC³ değişkenleri, zaman çerçevelerini (frame) oluşturan zaman dilimi sayısı gibi ağ tasarım parametreleri belirlenip tasarılanmalıdır. Bu konuda milli isterlerimizi de kapsayan çalışmalar yapılmaktadır [6].

Link 16 TDL sisteminde her mesaj içeriğine uygun olarak belli bir AKG'de yayınlanır. AKG'lere örnek olarak Hava Kontrol, Elektronik Harp ve Silah Koordinasyonu gösterilebilir. Platformlar yetki ve kabiliyetlerine göre bahsi geçen grupta mesaj göndermek üzere AKG'ye katılır. Bu amaçla tasarımın önemli bir adımı platformların hangi AKG'lerden mesaj alıp hangi AKG'lere mesaj gönderdiğini özetleyen bir bağlantı matrisinin olmasıdır. Tablo 1'de örnek senaryo için oluşturulan matrisle platformlar ve mesaj alıp verdikleri AKG'ler gösterilmiştir. Ayrıca ağ tasarım aracının üreteceği

¹ Belirli mesajların gönderilmesi için oluşturulan ve zaman dilimi tahsis edilen gruplar.

² İletim için kullanılan kripto değişkenidir (Transmission Security).

³ Mesaj için kullanılan kripto değişkenidir (Message Security).

matrisle AKG'ler ve onlara bağlı olan zaman dilim grupları da gösterilmelidir. Tasarım aracında Zaman Dilim Bloklarının AKG'lere tahsis işlemi, isteğe bağlı olarak yapılabileceği gibi hızlı bir şekilde otomatik olarak da yapılmalıdır. Bu özelliklere ek olarak Yeniden Tahsis fonksiyonu ile belli bir zaman diliminde yayın yapma yetkisi olan platforma kapasite tahsisini yapılmalıdır.

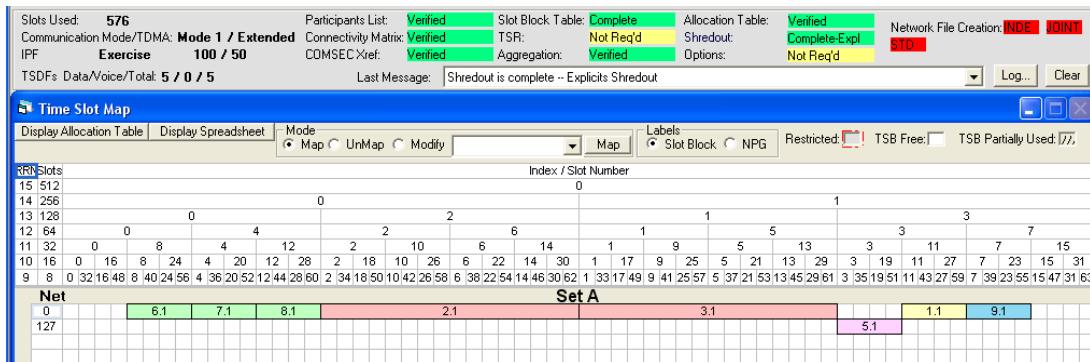
Tablo 1. Bağlantı Matrisi

Slots Used: 576	Participants List: Verified	Slot Block Table: Complete	Allocation Table: Verified	Network File Creation: NDE, JOIN						
Communication Mode/TDMA: Mode 1 / Extended	Connectivity Matrix: Verified	TSR: Not Req'd	Shredout: Complete/Expl							
IPF Exercise 100 / 50	COMSEC Xref: Verified	Aggregation: Verified	Options: Not Req'd	STD						
TSDFs Data/Voice/Total: 5 / 0 / 5	Last Message:	Shredout is complete -- Explicits Shredout								
Connectivity Matrix										
	Slot Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9
		1003	1013	1012	1004	1005	1015	1014	1008	1016
	PPLI-A	SURV	SURV	SURV	A/C-B	M/MGT	M/MGT	M/MGT	F/F	
	NPGs	5	7	7	7	9	8	8	8	19
	Net Number					127				
	TSEC Variable	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	MSEC Variable									
	Access Mode	D	D	D	D	D	D	D	D	D
	Overlap ID									
	Packing Limit	STD	STD	STD	STD	STD	STD	STD	STD	STD
	Per Unit Slots/Frame	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Total Slots/Frame	32	128	128	128	32	32	32	32	32
Platform Name	Slots	TSDF	NETE	DNet						
KOMUTA_KONTROL_UCAK[1]	576	1.04	Y	0	T/R	T/R	T/R	T/R	T/R	R
YER_KOMUTA_MERKEZ[1]	576	1.04	Y	0	T/R	T/R	T/R	T/R	T/R	R
MUHARIP_UCAK[1]	576	0.65	Y	0	T/R	R	R	T/R	T/R	T/R
SILAHLI_INSANSIZ_HAVA_ARAC[1]	576	0.65	Y	0	T/R	R	R	T/R	T/R	T/R
MUHARIP_UCAK[2]	576	0.65	Y	0	T/R	R	R	T/R	T/R	T/R
FUZE_SISTEMI[1]	544	0.52	Y	0	T/R	R	T/R	T/R	R	T/R

TDMA mimarisine dayanan Link-16 sisteminde veri iletiminde iki çeşit yöntem vardır: Bunların ilki, “atanmış erişim” (Dedicated Access) yöntemidir. Bu yöntemde her bir platform için zaman dilimleri tahsis edilir. Zaman dilimlerinin yetersiz kaldığı durumlarda “çekişmeli erişim” (Contention Access) yöntemi kullanılır. Bu yöntemde belirli sayıda zaman dilimleri, platformların ihtiyacına göre paylaşılacak olarak kullanılır. “Çekişmeli erişim” yönteminde ağ parametreleri, katılımcı sayısı, iletim miktarı ve havuz kapasitesine bakılarak simülasyon ortamında yayın alış olasılığı hesaplanmalıdır. Bu istatistiksel fonksiyon sayesinde, çekişmeli erişim olasılığı dikkate alınarak tasarlanan ağıın verimi hakkında fikir sahibi olunabilir.

İsterlere göre ağ tasarımını ve tahsis işlemleri yapıldıktan sonra hangi zaman dilimi bloklarında hangi mesaj gruplarının ve platformların yayın yapma yetkisi olduğunu özetleyen bir fonksiyon olmalıdır. Şekil 1'de buna örnekk bir Zaman Dilim Haritası verilmiştir. Son olarak 1536 zaman diliminden oluşan çerçeveyin hangi AKG'lerden oluştuğu da gösterilmelidir.

Simülasyon adımlarına geçmeden önce önerilen ağ tasarım aracıyla isterlere göre oluşturulan ağ, tüm parametreleriyle detaylandırılmış ve resmedilmiş olur.



Şekil 1. Zaman Dilimi Haritası

2.3. Senaryo Üreticisi

Simülasyonda tanımlanan birimlerin hareketlerinin modellenmesi, birimler arası mesajlaşmalarının, taktik resmin ve platformların sensörlerinden gelen iz bilgilerinin istenildiğinde gerçek zamanlı olarak gösterilmesi için gerçekçi senaryo üretebilen ve oynatılabilen temel simülasyon bileşeni gerekmektedir. Bileşen başlatılırken ağ tasarım aracında belirtilmiş olan birimler ve hazırlanmış olan ağ konfigürasyonu kullanılabilirlerdir.

Bir senaryonun oluşturulabilmesi için en azından platformların tanımlanmış, hareket modelleri ve iz tiplerinin (hava, yüzey, v.b.) ve zaman dilimlerinin belirlenmiş olması gerekmektedir. BÇ'nin detaylı olarak incelenmesi için senaryoda işletilecek ve belirli zamanlarda platformlar arasında gönderilecek olan TDL mesajlarının tanımlanabilmesi gerekmektedir. Bütün bu işlemler sonucunda test ön hazırlıkları tamamlanmış olmalı ve gerçek zamanlı simülasyon çalıştırılmalıdır.

Simülasyonda bir birimin kontrolünün ele alınması ve senaryo içerisinde operatör isteğine bağlı olarak hareket ettirilmesi; senaryoya yeni birimler eklenebilir olması, simülasyonun gerçekliğe yakınlığı ve karşılaşılabilen olası hataların tespiti açısından büyük önem arz etmektedir. Senaryo akışı devam ederken hatalı alan değerleri içeren mesajların gönderilmesi durumunda, sistemin hatalı mesajlara nasıl tepki vereceğinin gözlemlenmesi, gerçek platformlarda oluşabilecek hatalı mesajlaşmaların önüne geçilmesi için kritik bir girdi oluşturacaktır. Dolayısıyla, senaryo üreticisinde ağıda bulunan tüm veri alışverişi izlenebilir olmalı ve hatalar olduğu durumlarda sistemin nasıl bir tepki verebileceğinin analizi detaylı olarak yapılabilмелidir. Senaryo üreticisinde farklı senaryoların üretilmesi operatör eğitimi için gerekli altyapıyı da oluşturmuş olur.

Şekil 2'de örnek olarak kullanılan senaryoda bulunan platformların ve düşman unsurların konumlarını gösteren taktik resim verilmiştir. Şekilde Silahlı İnsansız Hava Aracına (S-0203) gönderilen füze (S-3502) ve füzeyi gönderen düşman unsur görülmektedir (S-1001). Şekil 3'te verilen ekran çıktısı senaryodaki Link-16 alanında

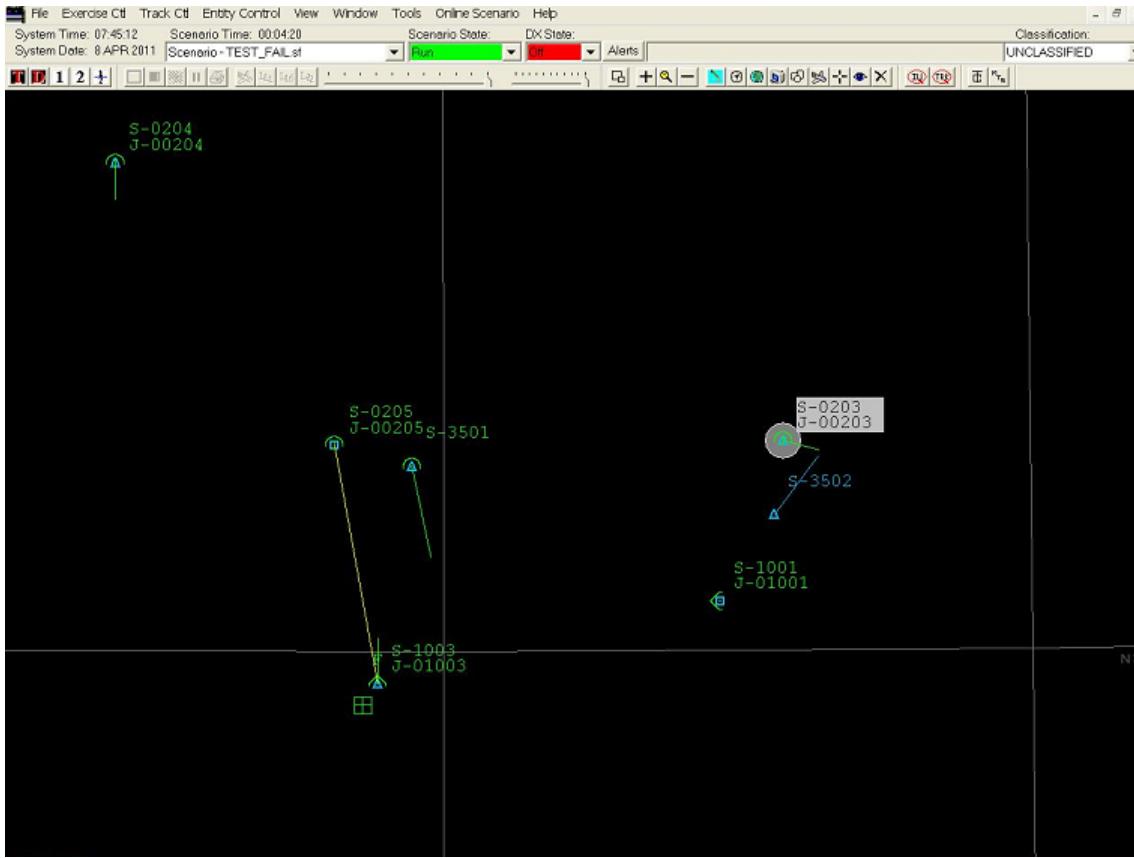
bulunan dost unsurlar arasında iletilen mesajlardan bir kısmını göstermektedir. Örnek senaryoda Silahlı İnsansız Hava Aracı'nın TDL işlemcisi Komuta Kontrol Uçağı'ndan gelen J3.5 mesaj içeriğini algılayamadığı için düşman füze sisteminden haberdar olamamış ve düşürülmüştür. Böylece simülasyon ortamına entegre edilen Silahlı İnsansız Hava Aracı terminalinin mesaj tanımlarındaki eksikliğin yaratmış olduğu BC problemi ortaya çıkarılmıştır. Bu durum Komuta Kontrol Uçağı ve Silahlı İnsansız Hava Aracı arasındaki Bilgi Değişimi İhtiyacı zaafiyetinden kaynaklanmaktadır. Bu senaryoda Komuta Kontrol Uçağı'ndan gelen sinyal Silahlı İnsansız Hava Aracı terminalinde alındığı için RF seviyesinde BC problemi yoktur. Ancak bilgi değişim gereksinimi kapsamında Silahlı İnsansız Hava Aracı'nda mesaj tanımlı olmadığı için veri seviyesinde BC problemi ortaya çıkmış ve operasyonel etkinliğin yetersizliği test sonucunda tespit edilmiştir. Bu probleme çözüm olarak İnsansız Hava Aracı'nın TDL işlemcisine J3.5 mesaj tanımı eklenmelidir.

2.4. Çevrimdışı ve Çevrimiçi Mesaj Analiz Araçları

BC'nin sağlanması için izlenmesi gereken iSMART süreçlerinde mesaj analizleri önemli yer tutar. Bu amaçla simüle edilen senaryolarda platformlar arasında gönderilen mesajların kaydedilmesi ve sonradan çevrimdışı olarak kodlarının çözülebilmesi gereklidir. Mesaj kodlarının çözülmesi sonrasında mesaj iletim ve alımlarında protokol ihlali olup olmadığı analiz edilmeli ve böylece BC'ye uyumluluk incelenmelidir. Bu analizde uygulanacak kurallar seçilecek standardın mesaj kataloğu kuralları veya kullanıcı tarafından tanımlanacak ilave kurallar olmalıdır. Bu bağlamda analiz aracının NATO STANAG veya MIL-STD gibi farklı standart seçenekleri olmalıdır. Bu analiz yardımıyla protokol ihlalleri hızlı bir şekilde bulunup gerekli düzeltmeler yapıldıktan sonra BC doğrulanmış olacaktır.

TDL'deki mesaj kodlarının çözülmesi sonrasında sonuçların kullanıcının isteğine göre hazırlanmış özet tablolara veya grafiklere dökülmesi de aracın sunması gereken diğer bir özelliklektir. Bu fonksiyon ile senaryoda üretilmiş mesajlar kullanılarak istenilen istatistiksel bilgilere de ulaşılabilmektedir. Bu tabloda istenen parametrelerin sınırlandırılması veya filtrelenmesi yoluyla istenen analizin yapılması mümkün olabilmektedir.

USMOS 2011 ODTÜ, ANKARA



Şekil 2. Senaryo Ortamı

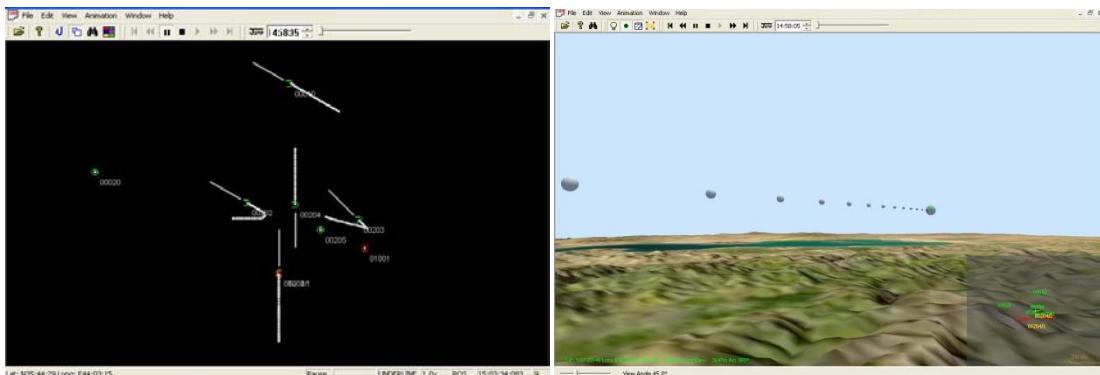
```

07:54:36.847 MT 00204/019 J12.6EO 01002 PENDING STYPE NS          HDG 0 SPD 600 ALT 35000 /C2 CORRELATN
07:54:38.019 MT 00205/006 J2.5I ACTIVE SZ NS NC1 NS /TMQ 12/GPQ 12/EQ 12/ELV 0
07:54:38.019 MT 00205/006 J2.5EO N37:16.785 E043:48.934
07:54:38.589 MT 00010/007 J3.2I 01002 HOSTILE SZ NS ALT SRC NS      TQ 12 ALT 35000
ID CONFID 00
07:54:42.589 MT 00010/007 J3.2EO N36:S2.570 E043:12.133 HDG 0 SPD 600 PASSIVE
07:54:42.105 MT 00204/019 J12.6I STAT NS EC AIR IDX 1 ORIGINTR N36:S2.570 E043:12.120 TGTPQ NS
07:54:42.105 MT 00204/019 J12.6EO 01002 PENDING STYPE NS HDG 0 SPD 600 ALT 35000 /C2 CORRELATN
07:54:42.284 MT 00204/009 J12.6I STAT NS EC AIR IDX 1 ORIGINTR N36:S2.570 E043:12.120 TGTPQ NS
07:54:42.284 MT 00204/009 J12.6EO 01002 PENDING STYPE NS HDG 0 SPD 600 ALT 35000 /C2 CORRELATN
07:54:42.524 MT 00010/006 J2.2I NC2NI ACTIVE SZ NS NC2 NS /TMQ 12/GPQ 12/AQ 12/ALT 35000 /AI/C2
MCMDR
07:54:42.524 MT 00010/006 J2.2EO N39:01.447 E043:16.315 HDG 300 SPD 480
07:54:42.027 MT 00204/006 J2.2I NC2NI ACTIVE SZ NS NC2 NS /TMQ 12/GPQ 12/AQ 12/ALT 35000 /AI
MCMDR
07:54:44.027 MT 00204/006 J2.2EO N37:129.581 E043:26.405 HDG 180 SPD 480 TGTPQ NS
07:54:45.499 MT 00202/006 J2.2I NC2NI ACTIVE SZ NS NC2 NS /TMQ 12/GPQ 12/AQ 12/ALT 35000/FL/AI
MCMDR
07:54:45.499 MT 00202/006 J2.2EO N37:38.444 E042:36.398 HDG 300 SPD 480
07:54:48.084 MT 00204/019 J12.6I STAT NS EC AIR IDX 1 ORIGINTR N36:S2.570 E043:12.120 TGTPQ NS
07:54:48.084 MT 00204/019 J12.6EO 01002 PENDING STYPE NS HDG 0 SPD 600 ALT 35000 /C2 CORRELATN
07:54:48.265 MT 00204/009 J12.6I STAT NS EC AIR IDX 1 ORIGINTR N36:S2.570 E043:12.120 TGTPQ NS
07:54:48.265 MT 00204/009 J12.6EO 01002 PENDING STYPE NS HDG 0 SPD 600 ALT 35000 /C2 CORRELATN
07:54:48.505 MT 00020/006 J2.5I ACTIVE SZ NS NC1 NS /TMQ 12/GPQ 12/EQ 12/ELV 0 /C2
07:54:48.505 MT 00020/006 J2.5EO N37:57.245 E040:29.648
07:54:50.007 MT 00205/006 J2.5I ACTIVE SZ NS NC1 NS /TMQ 12/GPQ 12/EQ 12/ELV 0
07:54:50.007 MT 00205/006 J2.5EO N37:16.785 E043:48.934
07:54:50.578 MT 00010/007 J3.2I 01002 HOSTILE SZ NS ALT SRC NS      TQ 12 ALT 35000
ID CONFID 00
07:54:50.578 MT 00010/007 J3.2EO N36:S2.570 E043:12.133 HDG 0 SPD 600 PASSIVE
07:54:50.578 MT 00010/007 J3.2C1 M1 00 M2 0000 M3 0000 M4 NS FIGHTER INTRUDNG PLIF 0/TOD NS
07:54:26.029 MT 00205/006 J2.5I ACTIVE SZ NS NC1 NS /TMQ 12/GPQ 12/EQ 12/ELV 0
07:54:26.029 MT 00205/006 J2.5EO N37:16.785 E043:48.934
07:54:26.961 MT 00010/007 J3.2I 01002 HOSTILE SZ NS ALT SRC NS      TQ 12 ALT 35000
ID CONFID 00
07:54:26.961 MT 00010/007 J3.2EO N36:S2.570 E043:12.133 HDG 0 SPD 600 PASSIVE
07:54:30.537 MT 00010/006 J2.2I NC2NI ACTIVE SZ NS NC2 NS /TMQ 12/GPQ 12/AQ 12/ALT 35000 /AI/C2
MCMDR

```

Şekil 3: Senaryoda Link 16 Ağında İletilen Mesajlardan Örnekler

TDL'de gönderilen iz pozisyon bilgileri de analiz sürecinde önemlidir. J3.2 Hava İz pozisyon bilgileri kullanılarak senaryodaki unsurlar gerçekçi arka plan üzerinde 2 veya 3 boyutlu olarak canlandırılmalıdır. Bu sayede simülasyonun bütünlüğü sağlanmış olacaktır. Şekil 4'te örnek senaryodaki platformların 2 ve 3 boyutlu iz canlandırmaları gösterilmiştir.



Şekil 4: 2D ve 3D iz canlandırmaları

Simülasyon ortamında gerçeğe yakın zamanlı olarak çevrimiçi mesaj analizi yapılması gereklili olan diğer bir fonksiyondur. Bu sayede platformlar arasında gönderilen mesajlar ve mesaj standartları arasındaki uyumsuzluklar simülasyon sırasında otomatik olarak saptanmalıdır. Örnek senaryo baştan sona koşturulmuş ve platformlar arasında iletilen mesajlar kaydedilmiştir.

3. SONUÇ

Bu çalışmada kurgulanan senaryoda Link 16 TDL ağında K2 yeteneği olan bir platformdan, K2 yeteneği olmayan bir platforma gönderilen mesajda veri seviyesinde oluşan BÇ probleminin neden olduğu hata gösterilmiştir. Problemin tespiti için simülasyon kullanımı ve çözüm olarak da mesaj tanımının Veri Ağ İşlemcisine eklenmesi gerektiği açıklanmıştır.

TDL geçiş ve ilgili modernizasyon süreçlerinde simülatör kullanımı maliyet, harekat etkinliği, eğitim ve güvenlik açılarından büyük yarar sağlar. Ayrıca simülatörler ulusal isterler sonucunda imal edilen TDL veri ağ işlemcileriyle ulusal - hatta müttefik - ülke platformları arasındaki “birlikte çalışabilirlik” problemlerinin testi için önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada önerilen minimum simülasyon bileşenleri ağ tasarımcısı, senaryo üreticisi, çevrimdışı ve çevrimiçi mesaj analiz araçlarıdır.

Bu çalışmada sadece Veri Seviyesinde BÇ problemi olan bir durum ve durumda simülatör kullanımının getirdiği avantajlar incelenmiştir. Ancak BÇ Radyo Frekansı Seviyesinde, Veri Seviyesinde, Protokoller Arası Seviyede, İnsan-Makina Arayüzü Seviyesinde ve Operatör Seviyesinde olan çok boyutlu bir problemdir. Tam anlamıyla

BÇ'yi sağlamak için BÇ'nin tüm bu seviyeleri, hatta platform görev bilgisayarı ve terminal uyumluluğu arasındaki BÇ sağlanmalıdır.

4. KAYNAKÇA

- [1] Myron Hura. et. al., (2000), *Interoperability: A continuing challenge in coalition air operations*, Chapter 9, 107-108
- [2] NATO Standardization Agency (NSA) Standardization Agreement (STANAG) No. 5516 (Edition 6), Chapter 3, 28
- [3] iSMART Handbook V2.0, Issue 1, (2009)
- [4] Murat İkinci, Hakan Ayçenk ve Nusret Erdener, (2005) TSK Bilgi Sistemleri Ortak Entegrasyon Ve Simülasyon Altyapısı, *USMOS*, 145-153
- [5] Deparment of Defense Interface Standard Tactical Data Link (TDL) 16 Message Standard , MIL-STD-6016C, Chapter 4, 167
- [6] Kaan Kır, Celal Zaim Çil, (2010), Link-16 Ulusal Ağ Tasarım ve Yönetim Aracı, ASESS 2010

YÜKSEK SEVİYE MİMARİ UYUMLULUĞU DAĞITIK BENZETİMLERİN KOLAY BİRLİKTE ÇALIŞABİLİRLİK VE TEKRAR KULLANILABİLİRLİĞİ İÇİN YETERLİ MİDİR?

Turgay ÇELİK ^(a), Hüseyin KUTLUCA ^(b), Günay ÖZKAN ^(c)

^{(a) (b)(c)} MilSOFT Yazılım Teknolojileri A.Ş., 06531, Teknokent ODTU,
{tcelik,hkutluca,gozkan}@milsoft.com.tr

ÖZ

Günümüzde dağıtık benzetim sistemlerinin birlikte çalışabilir ve tekrar kullanılabilir olması önemli bir gereksinimdir. Bu bağlamda kaydedilen en büyük gelişmelerden biri, temel iki hedefi birlikte çalışabilirlik ve tekrar kullanılabilirliği sağlamak olan Yüksek Seviye Mimari'nin (*High Level Architecture-HLA*) tanımlanması, önce IEEE sonra da NATO standarı olarak kabul edilmesidir.

Dünya genelinde ve ülkemizde ihtiyaç makamları tedarik edecekleri dağıtık benzetim sistemleri için HLA uyumluluğunu şart koşmakta, dolayısıyla HLA uyumlu birçok benzetim sistemi geliştirilmektedir. Günümüzde HLA'nın çıkış amacına uygun olarak HLA uyumlu benzetimlerin entegrasyonu için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Geliştirilen benzetim sistemlerinin sayısı arttıkça, önmüzdeki yıllarda bu sistemlerin birlikte çalışmasının ve yeni projelerde belirli parçalarının hatta tamamının tekrar kullanımının daha da önem kazanacağı aşikardır.

HLA uyumluluğu koşulu, bir seviyeye kadar tekrar kullanılabilirlik ve birlikte çalışabilirlik için destek sağlasa da, bu koşul sistemlerin kolayca entegre edilmesi için yeterli değildir.

Bu makalede HLA'nın mevcut kullanım yöntemleri irdelenerek birlikte çalışabilirlik ve tekrar kullanılabilirlik konularındaki problemler tespit edilecek ve bu problemlere çözüm önerilecektir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek Seviye Mimari, Birlikte Çalışabilirlik, Tekrar Kullanılabilirlik, Kavramsal Birlikte Çalışabilirlik Seviyeleri, Referans Nesne Modelleri, Taktik Çevre Benzetimleri, Benzetim Sistemlerinde DDS Kullanımı

IS HLA COMPLIANCY ENOUGH FOR EASY INTEROPERABILITY AND REUSABILITY OF DISTRIBUTED SIMULATIONS?

ABSTRACT

Interoperability and Reusability are two key concerns for simulation systems. One of the most important advances in this context is development of High Level Architecture-HLA which is also accepted as IEEE 1516 and NATO standard.

HLA compliancy is a key requirement especially for Defense Industry Projects in Turkey and around the world. As a major goal of HLA compliancy, there are various efforts on interoperating and reusing HLA compliant simulation systems. As number of developed simulation systems increase, it is obvious that interoperability and reusability of systems will become more and more important.

Although HLA compliancy provides a framework for reusability and interoperability, being HLA compliant is not enough for easy reuse and interoperation.

In this paper we will investigate current usage of HLA and try to identify potential problems for interoperability and reusability. We will also offer solutions to detected problems.

Keywords: High Level Architecture-HLA, Reusability, Interoperability, Levels of Conceptual Interoperability, Reference Object Models, Tactical Environment Simulations, Using DDS in Simulation Systems

1. GİRİŞ

HLA[1][2][3][4] 90'lı yılların ortalarında Amerikan Savunma Bakanlığı - Savunma Modelleme Simülasyon Ofisi DMSO (Defense Modeling and Simulation Office) tarafından benzetim sistemlerinin birlikte çalışabilirlik ve tekrar kullanılabilirliğini artırmak için tanımlanmış bir mimarıdır. Neredeyse 15 yıl geçmesine rağmen, HLA temel mimarisi üzerinde değişiklik yapılmadan küçük revizyonlarla teknolojinin çok hızlı geliştiği ve değiştiği yazılım sektöründe ayakta kalmayı başarabilmiştir. Hatta daha ilginci, giderek kullanımı yaygınlaşmış, 2000'li yılların başında IEEE, 2008 yılında yani neredeyse ilk tanımlanmasından 13 yıl sonra da NATO standarı olmuştur. HLA'nın bu başarısının arkasındaki en büyük nedenlerden birisi, tanımladığı mimarinin üst seviye olmasından dolayı teknoloji bağımlılığının düşük olmasıdır.

HLA'nın teknolojiden ve gerçekleştirim yönteminden bağımsız olması sayesinde aynı gereksinimlere sahip bir sistem HLA uyumlu olarak çok farklı tasarımlarla gerçekleştirilebilir. Seçilen tasarıma göre geliştirilecek sistemin birlikte çalışabilirlik ve tekrar kullanılabilirlik seviyeleri değişecektir. Birlikte Çalışabilirlik, çeşitli seviyeleri

olan geniş bir kavramdır. Her ikisi de HLA uyumlu olan iki sistem çok düşük birlikte çalışabilirlik seviyesine sahip olabilecekken, çok yüksek birlikte çalışabilirlik seviyesine de sahip olabilirler.

HLA, sistemlerin birlikte çalışabilirliği ve tekrar kullanılabilirliği için üst seviye bir çatı oluştursa da, iki sistemin HLA uyumlu olması bu sistemlerin kolayca birlikte çalışabileceği, sistemlerin parçalarının başka sistemlerde tekrar kullanılabileceği anlamına gelmemektedir.

HLA uyumlu benzetim sistemleri geliştirilirken teknik, idari, ve zamansal kısıtlardan dolayı uygulanan bazı yanlış çözüm yöntemleri ve uygulanmayan bazı süreçler sistemlerin birlikte çalışabilirlik ve tekrar kullanılabilirliğini azaltmaktadır. Bu makalede HLA uyumlu yazılımların birlikte çalışabilirlik ve tekrar kullanılabilirliği azaltan sorunlar incelenecuk, bu sorumlara çözüm yöntemleri önerilecektir.

Spesifik çözüm yöntemlerinden bahsetmeden önce makalenin bütünlüğü açısından öncelikle 2. kesimde Tekrar Kullanılabilirlik ve Birlikte Çalışabilirlik kavramları inceleneciktir.

3. kesimde tekrar kullanılabilirlik ve birlikte çalışabilirlikle ilgili problemler ve önerilen çözümler uygulanacakları FEDEP[3](Recommended Practice for HLA Federation Development and Execution Process) adımlarına eşleştirilerek anlatılacaktır. FEDEP, HLA standardının bir parçasıdır ve adından da anlaşılabileceği gibi HLA uyumlu benzetim sistemleri geliştirmek için önerilen bir süreçtir.

2. TEKRAR KULLANILABİLİRLİK VE BİRLİKTE ÇALIŞABİLİRLİK

Bileşen Tabanlı Yazılım Mühendisliğinin [5] en temel hedeflerinden birisi olan Tekrar Kullanılabilirlik, bir sistemin veya sistemin alt parçalarının benzer isterleri olan başka sistemleri oluştururken yeniden kullanılabilme yeteneğini gösteren bir özelliktir. Bileşen Tabanlı Mimarilerde tekrar kullanılabilirlik bileşenlerin bir bütün olarak paketlenmiş yeteneklerin tekrar kullanımına dayanır. Bir bileşen sadece uygulama kodundan oluşmaz, bileşenin dokümantasyonu, testleri ve diğer ilişkili ürünler de bileşenin parçalarıdır. Bir bileşenin tekrar kullanılabilmesi için net olarak tanımlanmış bir arayüzünün olması gerekmektedir.

Birlikte çalışabilirlik—*Interoperability*, sözlük anlamıyla “Ayrık sistemlerin ve kuruluşların birlikte çalışabilme yeteneklerini gösteren bir özelliktir”[6].

İki sistemin birlikte çalışabilirlik özelliği var/yok gibi net bir değer değildir. [7], [8], [9] ve [10] çalışmalarında varılan ortak sonuç, birlikte çalışabilirlik kavramının farklı seviyelerde ele alınması gerektiğini göstermektedir. Kavramsal Birlikte Çalışabilirlik

Modeli Seviyeleri (Levels of Conceptual Interoperability Model-LCIM) çalışması [11] ile bu seviyelerin neler olabileceğini Şekil 1'deki gibi ayrıntılandırmıştır.

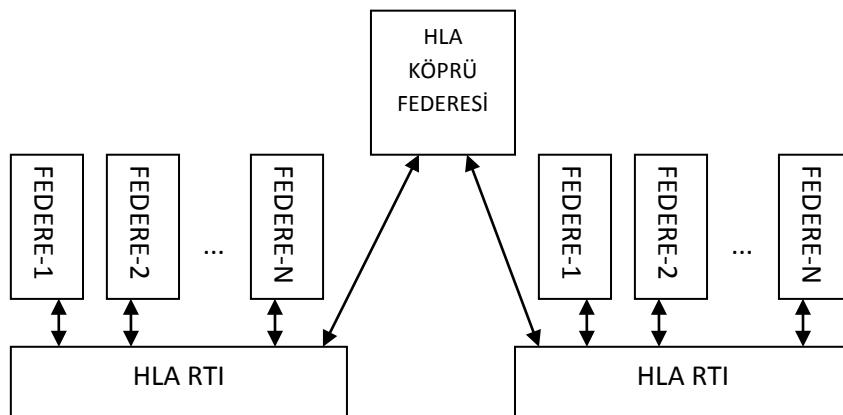


Şekil 1 Kavramsal Birlikte Çalışabilirlik Seviyeleri

3. HLA UYUMLU SİSTEMLERİN TEKRAR KULLANILABİLİRLİĞİ VE BİRLİKTE ÇALIŞABİLİRLİĞİ İLE İLGİLİ PROBLEMLER VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ

3.1. Birlikte Çalışabilirlik Problemleri

Birbirinden bağımsız geliştirilmiş HLA uyumlu iki sistemin birlikte çalışması, iki sistemin federasyonları arasında bir ilişki kurulması veya her iki sistemin de aynı federasyon üzerinde koşmasıyla sağlanabilir. İki HLA federasyonu arasında ilişki kurmanın en basit yolu, her iki federasyona da katılan bir federe ile köprü (*bridge*) kurarak Seviye-2 birlikte çalışabilirliği sağlamaktır (Şekil 2).



Şekil 2 HLA Uyumlu İki Uygulamanın Köprü İle Bağlanması(Seviye-2 Birlikte Çalışabilirlik)

Bu yöntemde, köprü uygulaması her iki federasyonun da veri modelini, yani FOM(Federation Object Model)'unu[2] ve bu veri modellerindeki elemanları nasıl

esleyeceğini bilir. Bu yöntem kolayca geliştirilebilir gibi görünse de, aşağıda listelenen ciddi problemleri adreslememektedir.

3.1.1. Problem-1: Veri Modeli Farklılıklarını

Bu problem, FEDEP'in federasyon tasarlama ve geliştirme adımlarında çözülmesi gereken bir sorundur.

Seviye-2 Birlikte Çalışabilirliğinde köprü uygulamasının yaptığı iş, iki sistemin veri modelinin yani HLA bağlamında FOM'larının birbirlerine eşleşmesidir. Sistemlerin FOM tanımlarının farklı olması çeşitli anlamsal karmaşalar, bir sistemdeki veri modeli değişikliğinin entegrasyonu bozması gibi temel sorunlara yol açar.

Özellikle Savunma Sanayi'ne yönelik benzetim sistemleri düşünüldüğünde modellenen unsurların ve olayların çoğunlukla aynı olduğu gözlemlenebilir. Ortak FOM ihtiyacını karşılamak için başta RPR-FOM (Real Time Platform Reference FOM) [12] olmak üzere çeşitli tanımlamalar yapılmıştır. Geliştirilen benzetim sistemlerinde ortak bir FOM'un kullanılması hem proje başlangıcında harcanacak sistem çözümleme eforunu azaltacak hem de sistemlerin birlikte çalışabilirliğini 2. seviye olan Sözdizimsel seviyeden 3. Seviye olan Anlamsal seviyeye taşıyacaktır. Bundan dolayı projenin gerekleri uygunsa başta RPR-FOM olmak üzere standart FOM tanımlamalarını kullanmak çok önemlidir.

RPR-FOM gibi ortak FOM'ları kullanıyor olmak her zaman birlikte çalışabilirliğin tam anlamıyla sağlanabileceği anlamına gelmemektedir, RPR-FOM kullanırken de uyulması gereken çeşitli kurallar vardır. Örneğin, sisteme özel verilerin transferi için *generic data* mesajlarının kullanımından mümkün mertebe kaçınılmalıdır. Bu kullanımında aynen TCP/IP haberleşmede olduğu gibi veri sisteme özel bir yöntemle paketlenip ve alıcı tarafta açılır. Bu kullanım HLA'nın amacına uygun değildir. RPR-FOM kullanırken mümkün mertebe tanımlı alanlar kullanılmalı, bu alanların ihtiyacı görmediği noktalarda HLA OMT (Object Model Template) standardında tanımlı olan miras (*inheritance*) ve içерme (*composition*) ilişkileriyle RPR-FOM genişletilmelidir. Örneğin RPR-FOM'da tanımlı olmayan ama karakteristik olarak PhysicalEntity nesne sınıfına uyan bir nesneyi tanımlamak için FOM tanımında PhysicalEntity sınıfı genişletilerek (*extend*) yeni bir nesne oluşturulmalıdır. Böylece aslında yeni oluşturulan özel nesneyi bilmeyen diğer sistemler bu nesneyi hiç olmazsa PhysicalEntity olarak görecektir.

RPR-FOM üzerinde güncelleme ihtiyaçları çıktıkaça ülke genelinde farklı şirketler tarafından benzer amaçlara çeşitli yeni tanımlamalar yapılacak ve güncelleme sayısı arttıkça neredeyse ilk problem olan farklı FOM kullanımı noktasına dönecektir. Bunu engellemek için ülke genelinde entegre edilmesi muhtemel olan tüm sistemlerin FOM'larını tek bir noktadan idame etmek mantıklıdır. Bu yaklaşımda RPR-FOM tabanlı ortak FOM ihtiyaç makamının belirleyeceği bir otoritenin sorumluluğunda olmalı ve geliştirici şirketler, üniversiteler gibi paydaşların da katkılarıyla ihtiyaca göre

güncellenmelidir. İhtiyaç makamı proje şartnamesinde bu ortak FOM'a uyumluluğu şart koşarak gelecekteki potansiyel entegrasyon projelerini mümkün kılabılır, maliyetini düşürebilir. Ortak FOM idame edilirken herhangi bir değişiklik veya ekleme istediğiinde bu istekleri idame etmek için kullanılacak bir hata ve değişiklik takip aracı üzerinden istek kaydı açılmalıdır, bu istek ilgili tüm katılımcıların onayını aldıktan sonra FOM'a yansıtılarak FOM'un yeni versiyonu yayınlanmalıdır. Bu ortak veri modeli idame yaklaşımının küçük bir modeli MilSOFT kapsamında DDS (Data Distribution Service) Veri Türlerini idame etmek için CMSCore (Combat Management System Core), GVLS (Genesis Veri Linkleri Sistemi) ve SARSHIP (Search and Rescue Ship) projelerinin katılımıyla Mantis aracı [13] kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Ülke geneli ortak veri modeli sağlandıktan sonra çözülmesi gereken bir diğer problem veri modelinin programlama dili karşılıklarının oluşturulmasıdır. Herhangi bir uygulamanın FOM tanımlarını kullanabilmesi için bunu uygun programlama diline eşleştirmesi gerekmektedir. Bilindiği gibi HLA 1516 standardında veri türlerinin paketleme/açma (*encode/decode*) işlemleri kullanıcıya bırakılmıştır. Özellikle ülke genelinde ortak bir FOM kullanılacağı ve bu FOM'un ihtiyaca göre normalden sık değişeceği düşünülürse, programlama dili eşlemelerinin otomatik üretilmesi gerekmektedir. FOM tanımındaki yapılar ve bu yapılar için kullanılacak paketleme/açma işlevleri otomatik üretmeye uygundur. [14]'te bahsedilen otomatik kod üretme aracı FOM tanımlarından Java kodu üretebilmektedir. Aynı şekilde sık kullanılan C++ gibi diğer diller için de otomatik kod üretme aracı sağlanırsa ülke genelinde geliştirilen tüm benzettim projelerinde ortak bir FOM – Programlama Dili eşlemesi elde edilebilir. Bu yaklaşım birlikte çalışabilirliği destekleyeceği gibi her proje için tekrar kod üreticileri yazılmasının önüne geçecektir. Daha ileri bir adım olarak, bu kod üretme aracı merkezi bir yerde idame edilip web üzerinden kod üretimi ve paylaşımı sağlanabilir.

3.1.2. Problem-2: Olay Çözümleme Yaklaşım Farklılıkları

Bu problem, FEDEP'in federasyon tasarlama ve geliştirme adımlarında çözülmesi gereken bir sorundur. Birbirinden bağımsız geliştirilmiş benzettimlerin birlikte çalışabilirliklerinin önündeki en büyük sorunlardan birisi, entegre edilen sistemlerin mantıksal bir bütünlük içerisinde çalışmamasıdır. Bir tarafta farklı bir olayı tetikleyen bir mesaj, diğer tarafta sistemi bambaşka bir duruma geçirebilir. Örneğin iki uçuş simülörünü entegre ettiğimizi düşünelim. Uçuş simülörlerinden birisinden hedefe ateşlenen bir füze olması durumunda ortama bir HLA mesajı yayınlanacaktır. Bu mesaj birlikte çalışılan diğer uçuş simülörü sistemine de iletilecektir. İki sistemin davranışları ve karar verme mekanizmaları farklı olduğundan bu füze atışı iki tarafta farklı modellenebilir. Bir tarafta füze uçuşu sonunda basit bir vuruş yüzdesi – pH (*probability of hit*) ve öldürme yüzdesi – pK (*probablity of kill*) hesabı ile füzenin vurduğuna karar verilirken, diğer tarafta hedefin chaff, flare, sakınma manevrası gibi

karşı savunma hamleleri de dikkate alınarak füzenin hedefi vurmadığına karar verilebilir.

Entegre edilecek sistemlerin ortak karar verici mekanizmaları kullanmaları bu gibi tutarsızlıklarını engelleyecektir. Karar verme sorumluluğu, Savunma Sanayi benzetim sistemlerinde genelde RAHAT (Rafta Hazır Ticari) ürün olarak kullanılan Taktik Çevre Benzetimlerinde olmaktadır. Taktik Çevre Benzetimleri ülke ihtiyaçlarına göre düzenlenmesi gereken uygulamalardır. Gelecekte entegrasyon potansiyeli olan benzetim sistemlerinde farklı Taktik Çevre Benzetimlerinin kullanılması günümüzde sorun yaratmasa da, gelecekte büyük bir problem olacaktır. Ayrıca, her projede farklı bir Taktik Çevre Benzetimi kullanıp uyarlamaya çalışmak maliyet etkin bir yöntem değildir. Bu bağlamda, milli bir Taktik Çevre Benzetiminin geliştirilmesine ihtiyaç vardır.

3.1.3. Problem-3: Kavramsal Model Farklılıkları

Bu problem, FEDEP'in federasyon amaçlarını tanımlama ve kavramsal model geliştirme adımlarında çözülmesi gereken bir sorundur. Savunma Sanayinde geliştirilen çoğu benzetim sistemlerinde radarlar, platformlar, füzeler gibi ortak nesnelere ait değişik çözünürlükte modeller sağlanmaktadır.

Benzetim, gerçek dünyanın dijital ortama birebir yansıtılmasından ziyade bir "modelleme" aktivitesidir. Modellemede sistemin belirli özellikleri üzerinde yoğunlaşılarak ilgilenilmeyen bazı özellikleri ihmal edilir. Anlaşılacağı gibi, modelleme sonuçları çok net olan bir aktivite değildir ve çoğu zaman modeli geliştiren kişilere/ekibe göre aynı sistem için farklı modellerin ortaya çıkması muhtemeldir. Benzer sistemler için farklı davranışlar gösteren modelleri içeren benzetim sistemlerinin tutarlı biçimde birlikte çalışabilirliklerini sağlamak kolay değildir. Bundan dolayı birlikte çalışabilirlik aktivitelerini ürün geliştirme aşamasına veya sonrasında bırakmak yerine işin başlangıcında, yani FEDEP'teki analiz ve kavramsal modelleme adımlarından itibaren başlatmak gereklidir. Bu aşamalarda gerçek dünya nesneleri analiz edilip kavramsal benzetim nesnelerine eşlenir. Geliştirilen sistemler ortak bir kavramsal veri havuzundaki nesnelere dayanırsa, sağladıkları modeller benzer davranışlar gösterecek, böylece gelecekte tutarlı biçimde birlikte çalışmaları sağlanabilecektir. Ortak Kavramsal Veri modeli yönetimi için aynen FOM Ortak Nesne Modeli yönetiminde olduğu gibi bir otoritenin yönetiminde paydaşların katılımının sağlanması faydalı olacaktır. Bu bağlamda araç desteği için ülkemizde geliştirilen KAMA (Kavramsal Modelleme Aracı) [15] ve SISO (Simulation Interoperability Standards Organization) tarafından tanımlanmış olan BOM (Base Object Model) standardının[16] kullanımı değerlendirilebilir. Sistemlerde her defasında yeniden çözümleme yapmak yerine ortak kavramsal modellerin temel alınması birlikte çalışabilirliğe destek olmanın yanı sıra, proje başlangıcındaki sistem mühendisliği sürecini de etkinleştirecektir.

Sistem mühendisliği süreci, ciddi uzmanlık ve efor gerektiren hatta düzgün uygulanmadığında projenin başarısız olmasına bile yol açabilecek bir süreçtir.

3.2. Tekrar Kullanılabilirlik Problemleri

HLA uyumlu sistemlerde tekrar kullanılabılırlikle ilgili sıkça karşılaşılan iki temel problem “Ölçeklendirilebilirlik vs. Bölümleme Problemi” ve “Performans vs. HLA Kullanımı Problemi”dir.

3.2.1. Ölçeklendirilebilirlik vs. Bölümleme Problemi

Bu problem, FEDEP'in federasyon tasarlama ve geliştirme adımlarında çözülmesi gereken bir sorundur.

HLA standardındaki kavramlar incelendiğinde aslında HLA'nın bileşen tabanlı mimari paradigmının bir gerçekleştirmesi olduğu net olarak görülebilir. HLA'daki “federe” tanımı “bileşen” tanımıyla, SOM tanımı ise “bileşen arayüzü” tanımıyla birebir örtüşmektedir. HLA uyumlu sistemlerin tekrar kullanılabılırliğin artırılması için sistem mümkün mertebe küçük, işlevi ve arayüzü net olarak tanımlanmış alt parçalara bölünmelidir. HLA bağlamında bakıldığından bu hedefe ulaşmak için akla gelecek ilk çözüm her alt parçayı bir federe olarak geliştirmektir. Gerçekleştirm anlamında her federe bir uygulamaya (*process*) karşılık gelmektedir. Bu yöntemin en temel handikabı sistemdeki federe sayısı arttıkça uygulamalar arası iletişim (*Interprocess Communication-IPC*) artacağından ölçeklendirilebilirlik sorunları oluşmasıdır [12].

Bu problem, birden çok modeli tek bir federe içerisinde çalıştırabilecek altyapılar ile model seviyesi tekrar kullanılabılırlik sağlanarak çözülebilir. Örneğin [17], [18] ve [19]'da bahsedilen Simülasyon Altyapısı binlerce modeli bir federede çalıştırabilirken aynı zamanda ihtiyaca göre modelleri federeler arasında bölümleyerek ölçeklendirilebilirliği de sağlayabilmektedir. Bu altyapı modellerin bağımsız olarak geliştirilmesine ve diğer modeller ile arayüzlerini aynen federeler gibi SOM (Simulation Object Model) arayüzleri ile tanımlamalarına olanak sağlayarak tekrar kullanılabılırlik seviyesini arttırır.

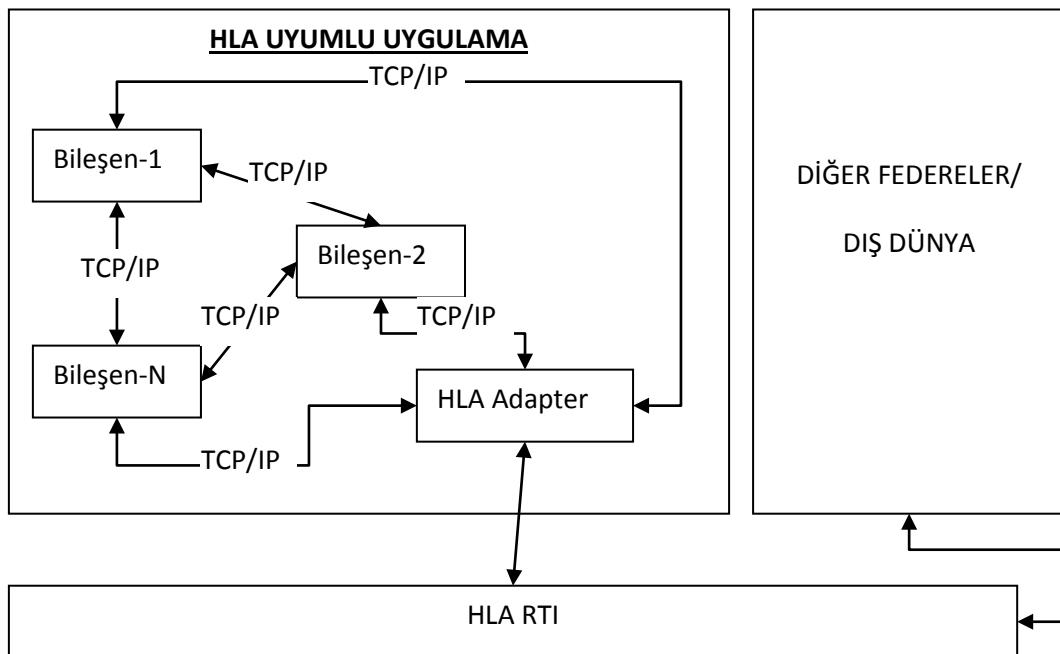
3.2.2. Performans vs. HLA Kullanımı Problemi

Bu problem, FEDEP'in federasyon tasarlama ve geliştirme adımlarında çözülmesi gereken bir sorundur.

Günümüzde geliştiricileri tüm sistemi HLA uyumlu küçük alt bileşenlere bölüp bileşenler arası tüm iletişimini HLA üzerinden yapmaktan sakındıran bir diğer temel problem mevcut HLA RTI(Runtime Infrastructure) gerçekleştirmelerinin performans sorunları olduğu düşüncesidir. Bundan dolayı özellikle kullanıcıların yüksek performans beklediği simülatör içi bileşenlerde (platform kontrol, görüntüleme, vs.) HLA yerine doğrudan TCP/IP kullanılıp dış dünya ile bağlantıyı sağlamak için bir HLA Adaptör uygulaması geliştirilmesi yaygın uygulanan bir yöntemdir. Şekil 3'de kabaca gösterilen

bu tasarımda, simülatör içi tüm iletişim TCP/IP mesajlarıyla sağlanırken HLA Adaptör uygulaması $\text{HLA} \leftrightarrow \text{TCP/IP}$ dönüştürücüsü ile dış dünya ile simülatör bileşenleri arasındaki mesaj alışverişini sağlar.

Bu yöntem sistemin HLA Uyumluluğu için engel teşkil etmese de, iç bileşenler arası iletişim sisteme özel TCP/IP mesajlarıyla olması alt bileşenlerin HLA uyumlu başka sistemlerde doğrudan tekrar kullanılabilmesi açısından problem yaratacaktır.



Şekil 3 Tüm Uygulamayı Tek Bir Federe Olarak HLA Uyumlu Hale Getirme

Bu probleme çözüm olarak öncelikle HLA RTI gerçekleştirimlerinin yavaş olduğu yönündeki geçmişten gelen önyargılardan sıyrılmak gerekmektedir. HLA standardının temel iki hedefi tekrar kullanabilirlik ve birlikte çalışabilirlik olsa da, mevcut RTI ürünleri performans konusunda da tatmin edici değerler sağlamaya çalışmaktadır. Günümüzde HLA RTI gerçekleştirimleri giderek iyileşmekte, merkezi iletişim yerine federeler arası noktadan noktaya iletişim sağlama, güvenilir (*reliable*) verileri doğrudan TCP ile göndermek yerine “Reliable UDP” ile gönderme gibi iyileştirmeler sayesinde yüksek performans sağlayabilmektedir [20]. Bundan dolayı öncelikle kullanılacak HLA RTI’nın ihtiyacı karşılayıp karşılamadığı örnek uygulamalar ile denenmelidir. HLA RTI’nın ihtiyacı karşılamadığı denemelerle kanıtlansa bile bileşenler arası haberleşme için doğrudan TCP/IP üzerinden ham veri gönderimi tercih edilmemelidir. Bu durumda esas amacı yüksek performans sağlamak olan ve aynen HLA gibi Yayımla/Üye Ol (*Publish/Subscribe*) mantığına dayanan DDS [21] gibi altyapılar kullanılmalı, böylece paylaşılan veri protokol seviyesi paketlerden yayınlanan/üye olunan nesneler seviyesine çekilmiş olacaktır. Bu durumda çözülmesi gereken temel problem HLA ve DDS

altyapılarının aynı ortamda birlikte kullanılması ve karşılıklı kavram eşlemesidir. Simülatör içerisinde DDS kullanılması durumunda **Şekil 3**'de simülatörü HLA dünyasına bağlayan HLA Adapter uygulaması TCP/IP \leftrightarrow HLA FOM dönüştürümü yerine DDS Topic \leftrightarrow HLA FOM dönüştürümü yapacaktır. [18]'de HLA ile DDS arasında veri alışverişi sağlayan örnek bir köprü uygulaması anlatılmaktadır. [22]'de simülasyon sistemlerinde DDS kullanımını irdelenmektedir. [23] HLA ve DDS standartlarını karşılaştırarak kavramları eşlemeye çalışmaktadır. [24]'de HLA ve DDS altyapılarının birlikte çalışmasına olanak sağlayacak bir altyapı anlatılmaktadır. Benzetim sistemlerinde HLA ve DDS'in birlikte çalışabilmesini desteklemek için sistemin nesne modelini üst seviyeden tasarlayarak HLA FOM ve DDS Topic'lerine otomatik dönüştürüm sağlayacak bir aracın geliştirilmesi faydalı olacaktır. Bu araç aslında Platform Bağımsız Ortak Nesne Modelinden (*Platform Independent Object Model-PIM*) HLA ve DDS'e özel platform spesifik nesne modelleri (*Platform Specific Object Model-PSM*) üretecek bir Model Güdümlü Mimari (*Model Driven Architecture-MDA*)[25] aracı olacaktır.

4. SONUÇ

Bu makalede HLA uyumlu benzetimlerin birlikte çalışabilirlik ve tekrar kullanılabilirlikleriyle ilgili gelecekte karşılaşılabilen problemler ile ilgili öngöründe bulunulmaya çalışılmıştır. Bu potansiyel problemler gelecekte oluşacaksa da etkin çözümleri bugünden itibaren çeşitli aktivitelerde bulunmayı, belirli kısıtları göz önünde bulundurmayı gerektirmektedir. Bu bağlamda literatürde mevcut olan çeşitli çözüm yöntemler tekrar kullanılabilirlik ve birlikte çalışabilirlik perspektifi ile tekrar ele alınmış, bu yöntemlerin düzgün uygulanabilmesi için ülke geneli ortak veri modeli yönetimi gibi çeşitli net önerilerde bulunulmuştur.

Özet olarak benzetim sistemlerini kolay entegre edebilmek ve tekrar kullanabilmek için aşağıdaki maddelerin dikkate alınması önerilmektedir:

- Sistemlerin mümkün mertebe aynı kavramsal modellere dayanması sağlanmalıdır. Bunun için federasyon amaçları tanımlanırken ve Kavramsal Model oluştururken BOM ve KAMA gibi araçların kullanımı değerlendirilmelidir,
- Ülke genelinde farklı seviyedeki kavramsal modellerin tek elden idame edilmesi ve yüklenici şirketten bağımsız olarak bu ortak modeller kullanılması konusunda çalışma yapılmalıdır.
- Sistemlerin mümkün mertebe ortak FOM nesne modellerinin kullanımı sağlanmalıdır. RPR-FOM gibi referans nesne modelleri temel alınarak ülke genelinde benzetim projelerinde kullanılacak ortak FOM tanımları oluşturulmalı

ve aynen kavramsal modeller gibi paydaşların katılımıyla tek elden idame edilmesi için çalışma yapılmalıdır.

- Sistemlerin mümkün mertebe aynı Taktik Çevre Benzetimini kullanmaları sağlanmalı, Milli bir Taktik Çevre Uygulama Çatısı geliştirilmelidir. Yaklaşık 4 yıldır TSK MEHDESKOM'da başarıyla kullanılan MEHSIM projesinin de altyapısını oluşturan MilSOFT Taktik Çevre Uygulama Çatısı'nın [18]; sağladığı araçlar, altyapı ve model kütüphanesiyle Milli Taktik Çevre projesi için temel olabilecek nitelikte olduğu düşünülmektedir.
- HLA uyumlu sistemlerde mümkün mertebe TCP/IP gibi alt seviye iletişim protokollerini kullanımından kaçınılmalı, bileşenler arası haberleşmeler için HLA kullanılmaya çalışılmalıdır. HLA RTI'ların performansının yeterli olmadığı durumlarda da yüksek veri iletişimi gerektiren bileşenler arasında yine Yayımlama/Üye Olma mantığına dayanan ama HLA'ya göre daha performans odaklı olan DDS kullanımını değerlendirilmeli, bu bileşenler sisteme DDS – HLA köprüleriyle bağlanmalıdır.
- Ölçeklendirilebilirlikle ilgili sıkıntı yaşandığında tekrar kullanılabilirlikten taviz vermek yerine net tanımlanmış arayüzleri ve davranışları olan birden çok modeli tek bir federede çalıştırabilen HLA uyumlu uygulama çatılarının kullanımı değerlendirilmelidir.

5. KAYNAKÇA

- [1] IEEE, (2010), IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA)- Framework and Rules, 1516-2010
- [2] IEEE, (2010), IEEE Standard for Modeling and Simulation (M&S) High Level Architecture (HLA)- Object Model Template (OMT) Specification, 1516.2-2010
- [3] IEEE, (2003), “Recommended Practice For HLA Federation Development and Execution Process (FEDEP), IEEE Std 1516.3-2003”
- [4] F.Kuhl, R. Weatherly, J.Dahhman, (1999), “Creating Computer Simulation Systems: An Introduction to the High Level Architecture”, Prentice Hall PTR
- [5] G.T. Heineman et al. (2001), “Component-Based Software Engineering: Putting the Pieces Together”, Addison-Wesley Professional
- [6] Wikipedia, “Interoperability”, <http://en.wikipedia.org/wiki/Interoperability>
- [7] J. Dahmann, M. Salisbury, C. Turrell, P. Barry, P. Bleemberg, (1999), HLA and Beyond: Interoperability Challenges., Information & Security, Volume 3
- [8] A. Tolk and J.M. Pullen, Ideas for a Common Framework for Military M&S and C3I Systems, 2003 Euro Simulation Interoperability Workshop, 03e-siw-032.
- [9] C.D. Turnitsa, A. Tolk, With All Your Knowing, Get Understanding: Conceptual Interoperability and the Net-Centric Value Chain, Command and Control Research and Technology Symposium 2006.

- [10] M.D. Petty and E.W. Weisel, A Composability Lexicon, 2003 Spring Simulation Interoperability Workshop, 03s-siw-023.
- [11] A. Tolk and J.A. Muguiria, (2003), “The Levels of Conceptual Interoperability Model”, 2003 Fall Simulation Interoperability Workshop, 03f-siw-007.
- [12] SISO, “The Real Time Platform Reference Federation Object Model”, <http://www.sisostds.org/>
- [13] Mantis Bug Tracker, <http://www.mantisbt.org/>
- [14] T.Çelik,G.Gökdoğan, K.Öztürk, B.Sarıkaya, (2011), “Analysis And High Level Design For An HLA Based Tactical Environment Application Framework”, JDMS Special Issue:Recent Simulation Activities In Turkey (*2011 Eylül’de yayınlanması beklenmektedir.*)
- [15] N.A. Karagoz, (2008), “A Framework For Developing Conceptual Models Of The Mission Space For Simulation Systems”, A Thesis Submitted to the Graduate School of Informatics of Middle East Technical University
- [16] SISO, 2006, “Base Object Model (BOM) Template Specification”
- [17] G.Gökdoğan, G.Özkan, T.Çelik, (2007), “A Framework for Rapid Development of Scalable HLA-Compliant Simulations: SIMALT”, USMOS’07
- [18] T.Çelik, A.Ç.Çavdar, (2010), “A Case Study On Interoperability Between Simulation And Command Control Systems”, SAVTEK 2010, 5th Defense Technologies Conference.
- [19] T.Çelik, G.Gökdoğan, (2009), “System Analysis for HLA Compliant Tactical Environment Application Framework”, Third National Defence Applications Modeling and Simulation Conference – USMOS’09
- [20] Malinga, L and Le Roux, WH. 2009. “HLA RTI performance evaluation”. Simulation Interoperability Standards Organization: 2009 SISO European Simulation Interoperability Workshop, Istanbul, Turkey, 13-16 July, 2009. pp 1-6
- [21] H. Kutluca İ. E. Çetin, M. Kilic, U. Cakir, (2007), “Developing MilSOFT DDS Middleware “OMG Real-time And Embedded Systems Workshop, Arlington, VA USA.
- [22] H. Kutluca, İ.E. Çetin, E. Deniz, B. Bal (2007), “MilSOFT DDS Middleware and Using DDS for Simulation in Combat Management Systems.” USMOS 2007, Ankara, Türkiye.
- [23] R. Joshi, G. Castellote, (2003), “A Comparison and Mapping of Data Distribution Service and High-Level Architecture”, Fall Simulation Interoperability Workshop
- [24] B. Calvo, I. Seisdedos, (2006), “SimWare Kernel – Real Time Communication System for Simulation”, Real-time and Embedded Systems Workshop 2006.
- [25] OMG, Model Driven Architecture, www.omg.org/mda

GERÇEK ZAMAN KISITLARI ALTINDA SEYRÜSEFER PLANLAMAYA YENİ BİR YAKLAŞIM

Ferhat Uçan ^(a), D. Turgay Altılar ^(b)

^(a) TÜBİTAK BİLGEMLİ BTE, 41470, Gebze, Kocaeli, ferhat.ucan@bte.tubitak.gov.tr

^(b) İTÜ Bilgisayar Müh. Böl. 34469, Maslak, İstanbul, altilar@itu.edu.tr

ÖZ

Gerçek zaman kısıtları altında seyrüsefer planlama, değişken ortam koşullarında hava aracı için minimum yakıtla en güvenilir, en kısa yoldan intikal tamamlayabilmesi için gerekli çözümün bulunmasını gerektirir. Enlem, boylam koordinatları ve yükseklik değerleri ile tanımlanan uçuş noktalarının bazıları arasında geçiş yolları bulunmaktadır. Bu yol parçalarının uzunluk, güvenlik, yükseklik gibi rastlantısal olarak değiştirebilen kısıtları mevcuttur. Problemin en uygun çözümü, tüm amaç fonksiyonlarını birlikte eniyileyen çözümüdür. Böyle bir çözüme ulaşmak çoğunlukla zordur. Çünkü genellikle göz önüne alınan kısıtlar birbiriyle çelişkili ve negatif yönde etkileşimlidir. Problem uzunluk, yükseklik ve güvenlik koşullarını kısıt olarak değerlendirildiğinden çok amaçlı eniyileme problemidir. Gerçekleştirilen sistem uçuş planı tasarlama ve yürütme olmak üzere iki alt sistemden oluşmaktadır. Uçuş planı tasarlama alt sisteminde, hava araçlarının, bir intikal başlangıç noktasından hedef noktasına en güvenilir, en kısa, en düz yoldan intikal evrimsel yöntemle, genetik algoritma ile planlanmıştır. Uçuş planı yürütme alt sistemi sağladığı yatay ve dikey seyrüsefer güdüm fonksiyonlarıyla tüm uçuş bacakları için, istenilen kalkış noktasından bir sonraki varış noktasına planlanan intikal gerçekleştirir. Problem çözümünde tasarlanan alt sistemler üç boyutlu çizge yapısını kullanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Seyrüsefer Planlama, Uçuş Planı Simülasyonu, Çok Amaçlı Eniyileme, Karar Destek Amaçlı MODSİM

A NEW APPROACH TO NAVIGATION PLANNING UNDER REAL TIME CONSTRAINTS

ABSTRACT

Navigation planning under real time constraints requires finding the necessary solution for the transition of the air vehicle from the most secure, shortest path with minimum

fuel consumption under changing environment conditions. There are transition paths between some of the waypoints that are defined by latitude, longitude and altitude values. There are constraints of the transition paths like distance, security and altitude that can change casually. The optimum solution of the problem is the solution which optimizes all objective functions. Finding such a solution is usually difficult. Because usually constraints that are considered in the problem are contradictory and interact negatively with each other. Since the problem considers distance, altitude and security conditions as distinct constraints, it is a multi-objective optimization problem. The system consists of two subsystems, one of these subsystems is flight planning subsystem and the other one is flight plan execution subsystem. In the flight planning subsystem, the most secure, shortest and smoothest flight path transition of the air vehicles from the source waypoint to the target waypoint is planned by evolutionary method and genetic algorithm. Flight plan execution subsystem executes the planned flight path from the desired departure waypoint to the next arrival waypoint owing to the lateral and vertical navigation guidance functions. The two subsystems developed uses 3-D graphs for the solution.

Keywords: Navigation Planning, Flight Plan Simulation, Multi Objective Optimization, Decision Support Motivated MODSIM

1. GİRİŞ

İntikal problemi çok genel bir problemdir. Trafikte araç rotalamada, askeri uygulamalarda, robotik uygulamalarda, şehir ulaşımında bir yerden bir yere hangi hat üzerinden gidileceğini belirlemeye, ağ üzerinde veri paketlerini yönlendirmede kullanılabilir. Bu çalışmada hava araçları için seyrüsefer planlama çalışması yapıldığı için bir uçuş sisteminde kullanılması olası koşullar ve amaçlar düşünülerek çözüm geliştirilmiştir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde standart yol bulma problemi için geliştirilen Dijkstra, Floyd algoritmaları, Neural Network çözümü gibi yöntemlerin problemin kısıtları gerçek zamanlı olduğunda düzgün sonuç vermediği görülmüşür. Evrimsel yöntemler ise uygunluk fonksiyonu sayesinde sadece yolun uzunluğuna değil, güvenliğine ve yoğunluğuna da bakabilmekte, dinamik değişen ortam şartları için problemin çözümüne uygun bir yaklaşım sunabilmektedir [1].

Dinamik intikal planlama probleminin, çok iyi bilinen üç çözümü; Franciosa, Ramalingam Reps ve Frigioni çözümleridir [2, 3, 4]. Franciosa tarafından geliştirilen çözüm kullanılamaz hale gelen bir düğümün daha sonra sisteme tekrar eklenemelme durumunu gözetmemiştir [3]. Ramalingam Reps yöntemi ortalama çalışma zamanı açısından, Frigioni yöntemi de en kötü durumdaki çalışma zamanı açısından üstündür [2, 4]. Fakat bu algoritmalar aşağıdaki durumlar göz önüne alındığında bazı kısıtlara sahiptir:

- Mevcut dinamik yol bulma algoritmaları, topolojideki eş zamanlı değişimlere duyarlı değildir, yani herhangi bir anda sadece tek bir değişim olan durumlarda başarılı olarak çalışmaktadır, fakat çevrede eş zamanlı birçok değişim olduğunda bu algoritmalar çözüm üretmemektedir.
- Kenar ağırlıklarının istatistiksel olarak ve sürekli değiştiği senaryolar için mevcut algoritmaların başarımı iyi değildir.
- Büyük topolojilerde ve düğüm ve bağlantı sayılarının çok olduğu ağlarda eş zamanlı olarak birçok değişikliğin olduğu durumlarda zaman kısıtı da var ise mevcut algoritmaların kullanımını pek uygun değildir.

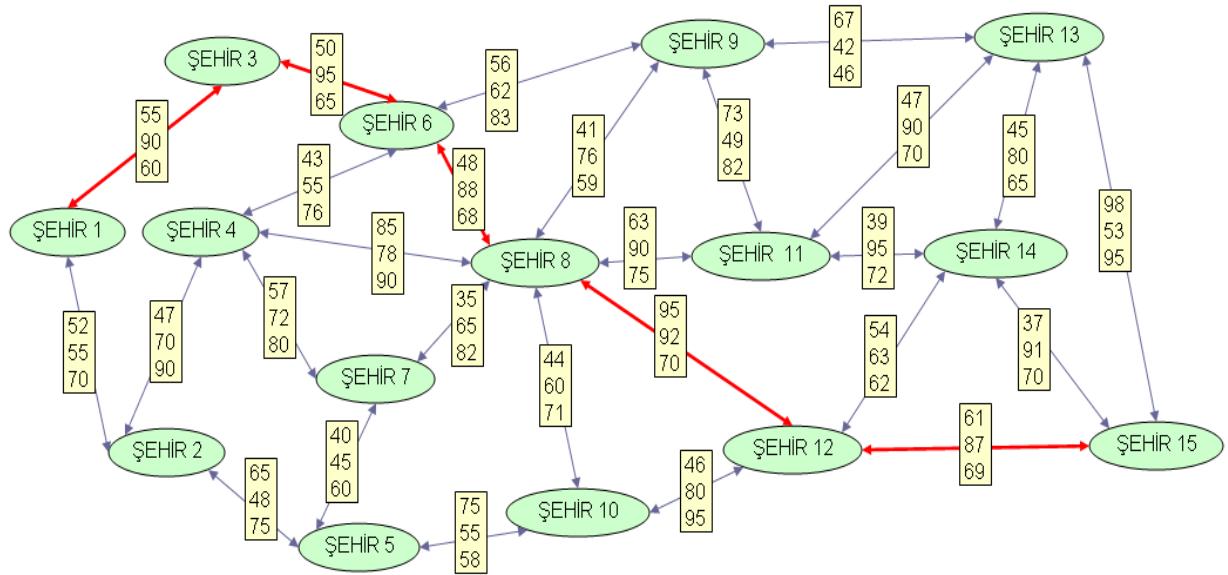
Bu ve benzeri senaryolar dinamik algoritmaların koşmasını gerektiren ortamlar olduğundan mevcut çözümler sınırlı olarak kullanılabilir. Dinamik optimizasyon probleminin verileri ve girdileri zamanla değiştiğinden, her seferinde yeni bir matris ile çözüme baştan başlamak yerine, bu çalışmada olduğu gibi, sezgisel algoritmanın üretim döngüsü ve amaç fonksiyonu kullanılarak bir önceki nesildeki çözüme yakın bireylerin seçimiyle daha iyi çözümler üretilebilir. Bilgisayar dünyasında çözümsüz veya NP karmaşık olarak nitelendirilen bazı gerçek hayat problemlerine son yıllarda evrimsel eniyileme sınıfındaki yöntemlerle çözümler getirilmeye çalışılmaktadır [5].

2. ÇİZGE KURAMI

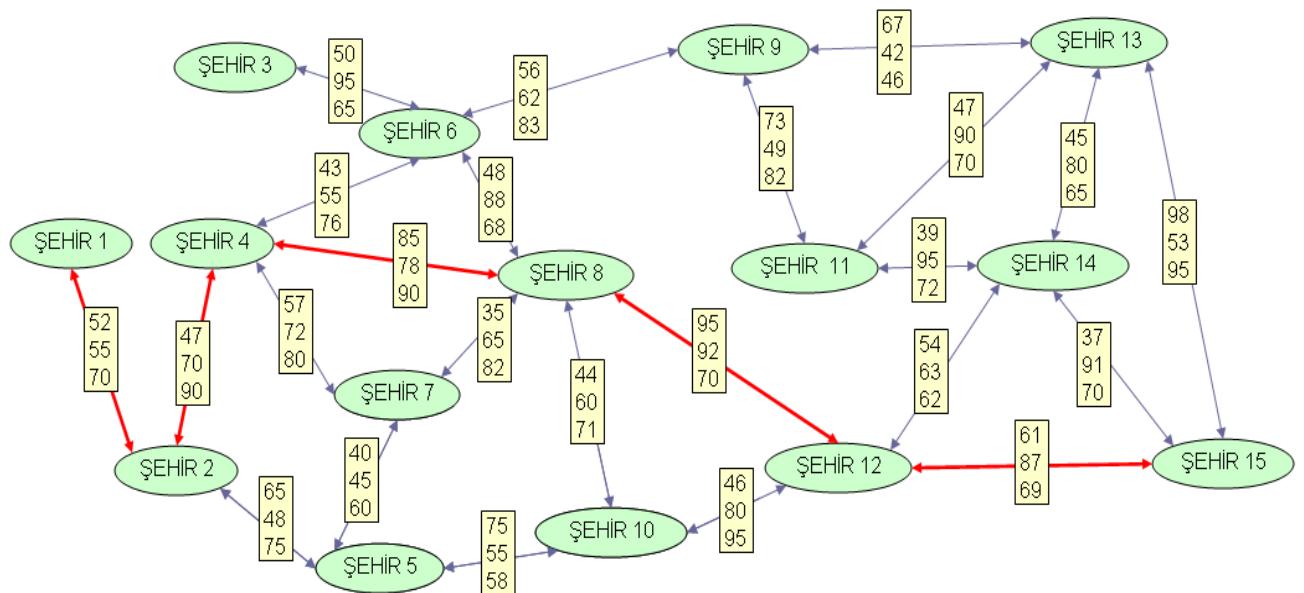
Çizge Teorisi, bir olay ve ifadenin düğüm ve çizgiler kullanılarak gösterilmesi biçimidir. Çizgeler birçok bilgisayar uygulama alanında ve uygulama modellerinde sık sık kullanılmaktadır. Günümüzde birçok örnek çizgelere benzetilebilir. Mesela şehirler arası uçak seferleri veya internetteki bilgisayarların birbirine bağlanması çizge yapısı baz alınarak örneklenebilir. Bağlantı noktaları bulunan ve aralarında yol bağlamında birşey bulunan her tür uygulama çizge yapısına yaklaştırılabilir. Birçok problem çizge veri modeli şeklinde modellendiğinde karmaşık bir halden daha anlaşılır hale gelmektedir. Çizge yapısı, düğümler ve kenarlar kümelerinden oluşur. Düğümler kenarların kesişme noktasıdır ve kenarlar da bu düğümleri birbirine bağlar.

Uçuş planı tasarlama alt sisteminde Şekil 1'deki gibi bir şehir haritasında hava araçlarının, bir intikal başlangıç noktasından hedef noktasına en güvenilir, en kısa, en düz yoldan intikal geliştirilen yöntemle planlanmıştır. Şehir haritasında şehirlerarası her bağlantı uzunluk, güvenlik, yükseklik olmak üzere üç değerden oluşan bir vektörle temsil edilmektedir. Uçuş planlaması yapıldığı için, şehirlerarası yolun yüksekliği de dikkate alınmakta ve üç boyutlu çizge ile çözüm yapılmaktadır. Uçuş planı yürütme alt sisteminde kullanılan çizge uçuş noktalarının enlem, boylam ve yükseklikleri ile oluşturulur.

Sistem Şekil 1'de gösterilen başlangıç durumunda çözüm üretirken, dinamik olarak Şehir 1 – Şehir 3, Şehir 8 – Şehir 9, ve Şehir 8 – Şehir 11 arasındaki bağlantılar koptuğunda algoritmanın önerdiği yeni intikal planı Şekil 2'de gösterildiği gibidir. Algoritma hem güvenlik, hem uzunluk, hem de uçuş yüksekliği koşullarını dikkate almakta ve en güvenilir, en kısa, en düz uçuşu planlamaktadır.



Şekil 1. Uçuş planı tasarlama alt sistemi çizge yapısı



Şekil 2. Dinamik intikal çözümü

3. EVRİMSEL UÇUŞ PLANLAMA ALT SİSTEMİ

Uçuş planı tasarlama evresinde başlangıçta uçuş noktalarının enlem, boylam ve yükseklik değerleri ve üç boyutlu çizge yapısındaki rota parçası vektörü okunmaktadır. Daha sonra uçuş noktalarının enlem ve boylam bilgilerinden yararlanarak, arasında yol tanımlı olan noktalar için mesafe hesabı yapılmaktadır. Çok kısıtlı eniyileme problemi için kısıtlar [uzunluk, güvenlik, yükseklik farkı] şeklinde üçlü bir vektör olarak düşünülebilir. Tüm uçuş planı için uzunluğu $d(x)$, güvenliği $s(x)$, yükseklik farkı $f(x)$ olarak düşünülürse eniyileme fonksiyonunun kısıtları şunlardır;

$$\min \sum d(x), \max \sum s(x), \min \sum |f(x)| ; \{ d : Z \rightarrow R_+, s : Z \rightarrow [0..100], f : Z \rightarrow R \}$$

Her x için; $d(x) > 0, 0 < s(x) < 100, f(x) > 0$

Hava aracı için bulunan uçuş planını gerçekleştirmek için gereken yakıt miktarını gösteren fonksiyon $y(x)$ ve yakıt tankında ölçülen yakıt miktarı Y ise, $y(x) < Y$ şartı sağlanmalıdır. Eğer bu şart sağlanmıyorsa alternatif uçuş planları araştırılır. Eğer yakıt tankındaki yakıt miktarı istenen kalkış noktasından varış noktasına gidiş için hiçbir şekilde yeterli değilse mevcut yakıtla gidilebilecek en yakın uçuş noktasına intikal için gerekli planlama yapılır. S70-A Sikorsky atak helikopterine ilişkin gerçek uçuş verileri ve ortam koşulları kullanılarak alınan veri kümesine göre regresyon analizi yapılmış ve uygun yakıt akış hızı denklemi bulunmuştur. Yakıt akış hızı tahmini için regresyon yöntemiyle bulunan formüller şu şekildedir;

Sıcaklık ≤ 0 durumu için:

$$\text{Yakıt akış hızı} = -66.7 + 0.5817 * (\text{Sıcaklık}) - 0.9395 * \sqrt{\text{Yükseklik}} + 17.3483 * \sqrt{\text{Havahızı}} + 5.8181 * \sqrt{\text{Ağırlık}} \quad (1)$$

Sıcaklık > 0 durumu için:

$$\text{Yakıt akış hızı} = -147.77 + 0.4257 * (\text{Sıcaklık}) - 0.7765 * \sqrt{\text{Yükseklik}} + 13.651 * \sqrt{\text{Havahızı}} + 6.9755 * \sqrt{\text{Ağırlık}} \quad (2)$$

Geliştirilen regresyon analizi ile hesaplanan tahmini yakıt akış hızı bilgisi ile uçuş planlama alt sistemi tarafından bulunan en iyi uçuş planındaki toplam uçuş menzilinin tamamlanıp tamamlanamayacağı bulunur. S70-A Sikorsky helikopterinin ortalama uçuş hızı pilot tarafından ayarlanabilir durumdadır. Varsayılan ortalama uçuş hızı 150 deniz mili / saat, yani yaklaşık 277 km / saat olarak alınmıştır, bu değer güncellendiğinde algoritma yakıt akış hızına göre görevin tamamlanabilme durumunu güncel yakıt akış hızı değerine göre hesaplamaktadır. Regresyon ile bulunan yakıt akış hızı ile ortalama hız değeri çarpılarak mevcut yakıtla gidilebilecek menzil değeri hesaplanır. Eğer uçuş planı alt sisteminin çok kısıtlı eniyileme ile ürettiği uçuş planının gerektirdiği toplam uçuş menzili mevcut yakıtla gidilebilecek uçuş menzilinden daha büyük ise alternatif uçuş planı bulunur. Eğer hiçbir şekilde mevcut yakıtla tamamlanacak bir uçuş planı

bulunamıyorsa en güvenilir, en kısa, en düz uçuş rotasında hava aracının gidebileceği uçuş noktasına kadar gidebilmesi için gerekli uçuş planı üretilir ve uçuş planı çalıştırma alt sitemine girdi olarak verilir. Şekil 3'de Sikorsky S-70A helikopteri için sıcaklık, yükseklik, hız ve ağırlık kısıtlarına göre değişen gerçek yakıt akış hızı değerleri ve regresyonla tahmini olarak hesaplanan yakıt akış hızı değerleri ve regresyon analizinin hata yüzdesi gösterilmiştir. Gerçek yakıt akış hızı verileri Sikorsky S70-A helikopteri teknik el kitabından alınmıştır [6].

SICAKLIK (Derece)	YÜKSEKLİK (Feet)	HAVA HIZI (Knots)	Ağırlık (LB)	Yakıt Akış Hızı (Lb / saat)	Denklemle Bulunan Yakt	Akış Hızı (Lb / saat)	HATA YÜZDESİ
-30	0	40	6000	480	476,2309712	0,7852143	
-30	0	120	10000	685	687,6937049	0,3932416	
-30	2000	40	8000	500	503,9338498	0,78677	
-30	2000	120	10000	646	645,6779876	0,0498471	
-30	4000	40	7000	450	452,9208559	0,6490791	
-30	4000	40	8000	482	486,5303698	0,9399108	
-30	4000	40	9000	514	518,0971155	0,7971042	
-30	4000	40	10000	543	547,9536858	0,912281	
-30	6000	40	7000	438	439,566696	0,3576932	
-30	6000	40	10000	531	534,599526	0,6778768	
-30	6000	120	6000	527	483,7784359	8,2014353	
-15	0	40	6000	484	484,9564712	0,197618	
-15	0	120	9000	665	666,5626345	0,2349826	
-15	2000	40	8000	512	512,6593498	0,1287793	
0	2000	40	7000	488	487,7753358	0,0460377	
0	2000	40	8000	519	521,3848498	0,4595086	
0	4000	40	7000	473	470,3718559	0,555633	
15	2000	120	9000	631	635,1738115	0,6614598	
15	4000	40	10000	596	593,3830326	0,4390885	
15	6000	40	6000	427	425,1156799	0,4412928	
15	6000	120	10000	646	645,5484813	0,0698945	
30	2000	40	8000	538	540,5102561	0,4665903	
30	6000	40	6000	431	431,5011799	0,116283	
30	14000	40	7000	442	443,0641872	0,2407663	
45	4000	40	9000	573	570,3580672	0,4610703	

Şekil 3. Sikorsky S-70A Helikopteri Yakıt Akış Hızı Bilgileri

Uçuş planlama alt sistemindeki işlem akışı Şekil 4'deki kod bloğunda gösterilmiştir. Bireylerin kromozomlarla temsili gerçekleştirildikten sonra başlangıç nüfusu oluşturulur. Dinamik ortam şartlarının güncel hali alınarak tasarlanan uygunluk fonksiyonu ile başlangıç nüfustaki bireyler değerlendirilir. Bireyler ebeveyn seçimi aşamasında çiftlere ayrılır ve her bir ikili için çaprazlama yapılır. Çaprazlama aşaması sonrası çevrim içeren yollardaki çevrimler temizlenir. Bazı bireyler için mutasyon yapılarak çeşitlilik sağlanır. Mutasyon sonucu, ebeveyn ve çocuk kromozomlar tekrar uygunluk fonksiyonu ile değerlendirilir, uygunluk değeri yüksek olan bireyler yaşıtlır, diğerleri öldürülür. Bu çevrim birey benzerliği ölçüyü sağlanıncaya kadar sürdürülür [7].

Algoritma_Evrimsel_Ucus_Planlama (waypoints [N], segments [M]; flight_plan[K])

1. Uçuş noktalarının enlem, boylam, yükseklik bilgilerini oku
2. Birbirine bağlı uçuş noktalarına ilişkin segment bilgilerini oku
3. Segmentlerin güvenlik bilgisini oku
4. Segmentlerin uçuş yüksekliği değerlerini bul
5. Segmentlerin uzunluk değerini hesapla
6. Kromozom gösterim şekli ile genetik algoritmanın ilk nüfustaki bireyleri kodla
7. do
 - 7.1. Segmentlerin güncel kısıt değerlerini oku
 - 7.2. Çok kısıtlı uygunluk fonksiyonu ile bireyleri değerlendir
 - 7.3. En az bir geni ortak olan bireyleri çiftler şeklinde ayır
 - 7.4. Her çift için çaprazlama ile çocuk kromozomlarını oluştur
 - 7.5. Çaprazlama sonucu oluşan döngüleri düzeltme operatörü ile temizle
 - 7.6. Çeşitliliği sağlamak amacıyla bazı oğul kromozomları için mutasyon işlemini uygula
 - 7.7. Uygunluk fonksiyonu ile yeni bireyleri değerlendir
 - 7.8. Uygunluk değeri yüksek olan çocukları ebeveynleri yerine nüfusa dahil et
8. while (stop_criteria)
9. Mevcut nüfustaki en yüksek uygunluk değerine sahip bireyi bul

Şekil 4. Uçuş Planlama Alt Sistemi Evrimsel Algoritma Akışı

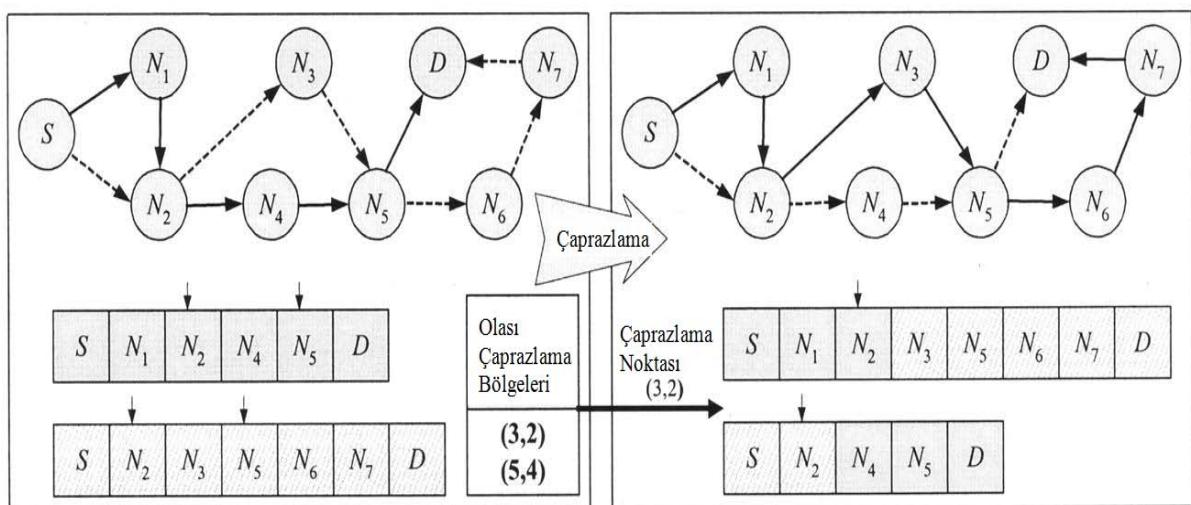
Evrimsel algoritmanın seyrüsefer planlama amacıyla kullanılımında, her birey başlangıç noktasından bitiş noktasına olan bir rotayı göstermektedir ve kromozom ile kodlanarak gösterilir. Geliştirilen sezgisel yöntemde yolların temsili için değişken uzunluklu kromozomlar kullanılmıştır. Kromozomun ilk geni başlangıç noktası, son geni de bitiş noktasını göstermektedir. Kromozomlar permutasyon kodlama ile kodlanırlar. Her kromozom, rotada üzerinden geçen düğümlerin numaralarından oluşan bir tamsayı dizisi şeklindedir. Uçuş planlama sisteminde ilk nüfus, rastlantısal olarak oluşturulur. Nüfustaki birey sayısı nesiller boyunca sabit kalan ve genetik algoritmanın çalışmasına etki eden önemli bir faktördür. İlk nüfustaki bireyler rastlantısal olarak üretildiğinden dolayı, herhangi bir veya birden fazla düğüm üzerinde çevrimler oluşabilir. Kullanılan genetik algoritma yaklaşımında bireylerde oluşan çevrimler temizlenmektedir, çünkü bu çevrimler olduğu anda kaldırılmazlarsa, çaprazlama sonucu bozuk bireylerin oluşmasına neden olabilirler [8].

Bireylerin, yani çözüm adaylarının kalitesi ve sonuca yakınlığı uygunluk fonksiyonu ile belirlenir. Tüm objektifleri bağlamak amacıyla genel bir uygunluk fonksiyonu tasarlanmıştır. Evrimsel yöntemin bireyleri değerlendirmek için kullandığı amaç fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

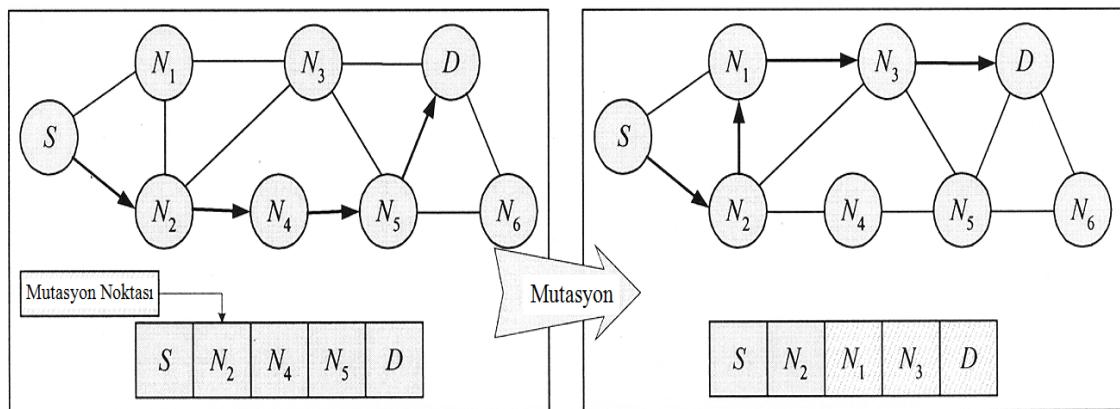
$$\sum_{i=1}^{\text{segmansayısı}} \left(\frac{1}{\text{uzunluk}} + \frac{1}{(100 - \text{güvenlik})} + \frac{1}{\text{yükseklik farkı}} \right) \quad (3)$$

Bireye ait kromozomun uygunluk değeri, rotayı oluşturan her bağlantının uzunluk, güvenlik ve önceki bağlantıya göre yükseklik farkı değerleri kullanılarak bulunur ve bu değer rotayı oluşturan bağlantı sayısına bölünür. İlk bağlantı için yükseklik farkı dikkate alınmaz. Kromozomlar uygunluk değerlerine göre azalan sıra ile sıralanırlar. Toplumun toplam kalitesini artırmak için uygunluk değeri yüksek kromozomların bir sonraki neslin gen havuzuna alınma şansını yükselten bir seçim operatörü kullanılır. Seçim operatörü sonucun araştırılmasını, çözüm uzayının belirli bölgelerinde yoğunlaştırır. Önerilen algoritmada, sonraki nesil için, en iyi kromozomların korunması ve örneklemeden kaynaklanacak istatistiksel hataların önlenmesi amacıyla rulet tekeri isimli seçim tekniği kullanılmıştır. Rulet tekeri teknigine göre topluluktaki tüm bireylerin uygunluk değerleri toplanır. Bir bireyin seçilme olasılığı, uygunluk değerinin bu toplam değere oranı kadardır.

Çaprazlama aşamasında, çaprazlama bölgesinden sonraki genler, ebeveyn kromozomlar arasında takas edilir. Çaprazlama noktaları iki kromozdaki genlerin aynı olduğu noktadır. Geliştirilen algoritmada iki kromozom ancak ortak gene sahipse çaprazlanabilir. Çaprazlama işlemi sonucu tekrarlı genler içeren çevrimler oluşabilir. Algoritma bir art-islem gerçekleştirerek oluşan çevrimleri temizler ve kromozomu kısaltır. Mutasyon toplumdaki genetik çeşitliliği artırır ve aday kromozomun genlerini değiştirerek bölgesel en iyi çözümlere takılma durumunu engeller. En kısa yol probleminde bir kromozomun herhangi bir geni değiştiğinde kromozom geçerliliğini yitirebilir. Bu nedenle tek bir gen değişimi için bir dizi gen değiştirilerek kromozomun uygunluğu korunur. Seçilen iki nokta arası alternatif bir rota ile kromozom genetik değişime uğratılır. Örnek bir çaprazlama işlemi Şekil 5'de, örnek bir mutasyon işlemi de Şekil 6'da gösterilmiştir [8].



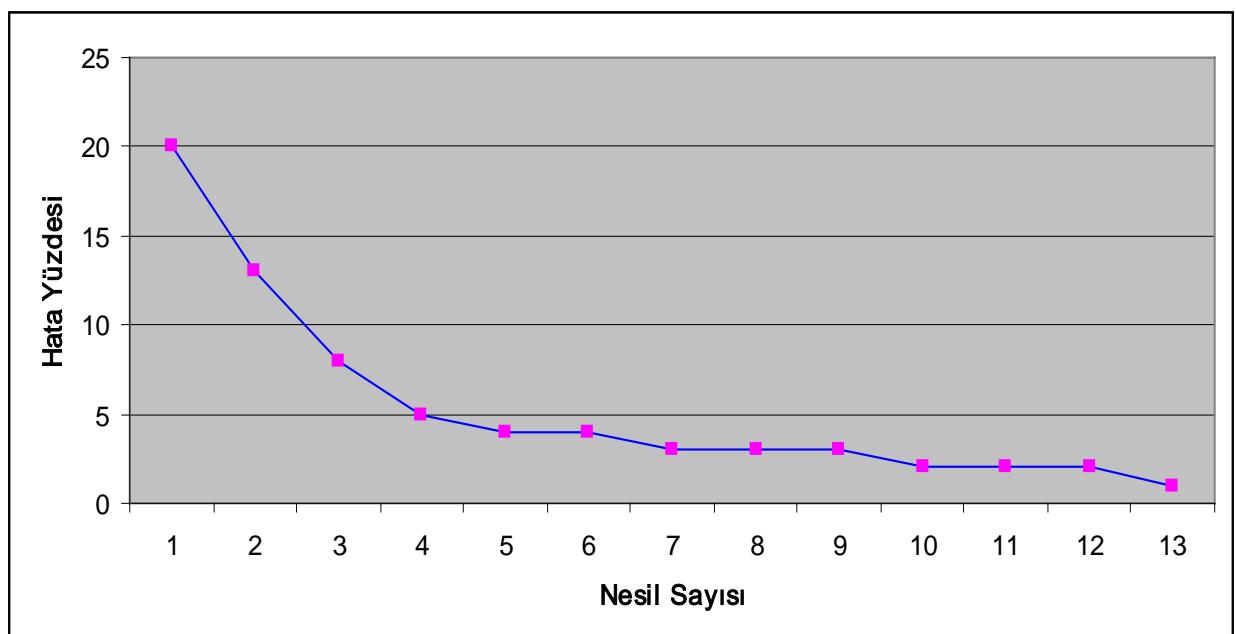
Şekil 5. Çaprazlama operatörü



Şekil 6. Mutasyon operatörü

Evrimsel algoritmanın en önemli üç parametresi çaprazlama oranı, mutasyon oranı ve toplumdaki birey sayısıdır. Çaprazlama ve mutasyon oranının belirlenmesi için farklı değerlerle denemeler yapılarak en uygun değerler bulunmuştur. Çaprazlama oranı için denemeler sonucu en uygun değer %80, mutasyon oranı için en uygun değer %1 olarak belirlenmiştir. Kromozom sayısı ise çizgenin karmaşıklığına göre belirlenmektedir.

Geliştirilen evrimsel agoritmada, jenerasyonlar ilerledikçe uygunluk değeri daha yüksek, çözüme daha yakın bireyler popülasyonda yayılır. 50 uçuş noktalı, 250 bağlantı içeren bir çizge için nesiller boyu hata oranının nasıl azaldığı Şekil 7'deki grafikte gösterilmiştir. X eksenini jenerasyon sayısını, Y eksenini de nesil içindeki uygunluk değeri en yüksek olan bireyin sonuca uzaklığını gösteren hata yüzdesi değeridir. Bu örnek denemede nüfustaki birey sayısı $N = 20$ olarak seçilmiştir.



Şekil 7. Genetik algoritma hata oranı ile nesil sayısı ilişkisi

4. UÇUŞ PLANI YÜRÜTME ALT SİSTEMİ

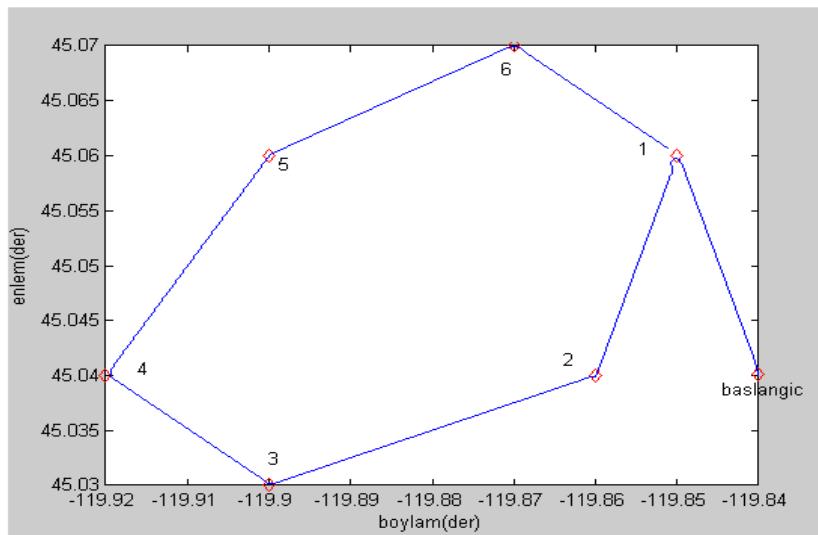
Hava aracının rotasında, istenilen uçuş rotasına göre herhangi bir sapma olduğunda, sapmayla orantılı, hava aracını yeniden o rotaya sokacak yalpa komutu hesaplanır. Ayrıca hava aracının rota değiştirmesi gereken zamanlarda da, bir sonraki rotaya oturmasını sağlayacak yalpa komutunun hesaplanması gerekmektedir. Hava aracını istenilen rotaya oturtmada kullanılan yatay ve dikey gündemleme algoritmaları kod blokları Şekil 8'de görüldüğü gibidir.

- Yer hızı kuzey ve doğu bileşenlerini kullanarak yer hızı değerini hesapla
- Kalkış noktasından anlık konum noktasına olan meafeyi hesapla
- Kalkış noktasından anlık konum noktasına olan yönelim açısını hesapla
- Kalkış noktasından varış noktasına olan yönelim açısını, uçuş hattı yönelim açısını hesapla
- Anlık konum noktasının uçuş hattına dikey mesafesini hesapla
- İz açısı farkı değerini hesapla
- Uçuş hattına dik mesafeyi katsayı ile çarpıp, yer hızına böl
- Bulunan açı değerini doyum fonksiyonu ile (-45 .. +45) aralığına getir
- Doyum fonksiyonu sonucu oluşan açı değeri ve iz açısı farkı ile yalpa açısı komutunu hesapla
- Yalpa açısı komutunu doyum fonksiyonu ile (-30 .. +30) aralığına getir

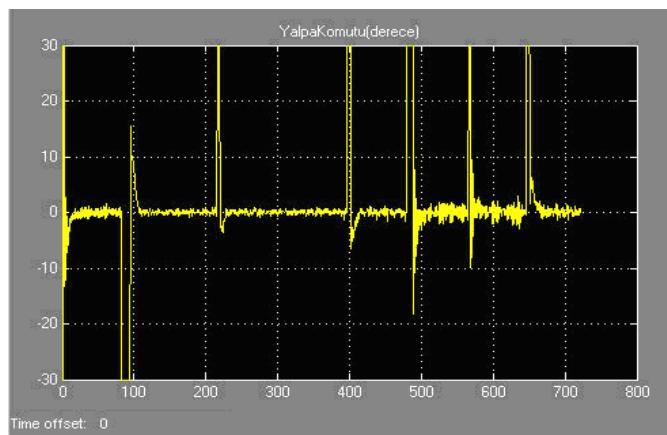
- Anlık konum noktasından hedef noktasına olan mesafeyi hesapla
- Anlık yükseklik bilgisi ile hedef noktasının yüksekliği arasındaki yükseklik farkını hesapla
- Yükseklik farkını katsayı ile çarpıp, dikey hızı böl
- Bulunan açı değerini doyum fonksiyonu ile (-75 .. +75) aralığına getir
- Pisagor bağıntısıyla, yükseklik farkı ve hedef noktasına mesafeden oluşan hipotenüsü hesapla
- Hipotenüs, yükseklik farkı ve dikey hız bilgileriyle yunus açısı komutu değerini hesapla
- Yunus açısı komutunu doyum fonksiyonu ile (-60 .. +60) aralığına getir

Şekil 8. Yatay ve dikey gündemleme akışları

Enlem ve boyamları koordinat sisteminde gösterilen uçuş noktalarıyla elde edilen çizge yapısı üzerinde en güvenilir en kısa yoldan minimum yakıtla hava aracının uçuş planı çalıştırılır. Bu örnek senaryoda 6 noktalı bir uçuş planı çalıştırılması esnasında tasarlanan yürütme alt sisteminde elde edilen sonuç gösterilmiştir. Uçuş planı yürütme alt sisteminin çalışmasına ilişkin örnek ekran görüntüsü Şekil 9'da, aynı örnek için hesaplanan yalpa açısı komutu Şekil 10'da gösterilmiştir. Bu örnekte, hava aracı "üzerinden uç" modunda, "ileri" yönde [N 10 m/s, E 10 m/s] esen, 14.14 m/s hızındaki rüzgâr koşullarında planlama alt sistemi ile bulunan uçuş planını izlemektedir. Uçuş başlangıç noktası enlem $45^{\circ} 04' 47''$ ve Boylam $19^{\circ} 84' 06''$, başlangıç yer hızı 70 m/s, başlangıç irtifası 1985 metredir.



Şekil 9. Uçuş Planı Yürütmeye Senaryosu



Şekil 10. Yatay seyir yalpa komutu

5. SONUÇ

Uçuş ve seyir planlama probleminin çözümünde Floyd, Dijkstra gibi karmaşıklığı belirli, analitik algoritmalar veya A-Star, Neural Network benzeri yaklaşımalar kullanılabilir. Fakat uçuş hattı üzerindeki her uçuş bacagının maliyetinin aynı değerde olmadığı durumlar olabilir. Belirli uçuş bacakları uzunluk ve yükseklik ölçülerinden dolayı tercih edileceği gibi, belirli bağlantılar emniyet açısından kullanılmak istenmeyebilir. Ayrıca uçuş hattı üzerinde dinamik olarak bazı bağlantılar kopabilir. Bu durumda çizge ve bağlantılar değişeceğinden, problem verileri yenilenmiş haliyle tekrar çözülmek durumundadır. Dinamik eniyileme probleminin verileri ve girdileri zamanla değiştigidinden, her seferinde yeni bir matris ile çözüme baştan başlamak yerine, bu çalışmada olduğu gibi, sezgisel algoritmanın üretim döngüsü ve amaç fonksiyonu

kullanılarak bir önceki nesildeki çözüme yakın bireylerin seçimiyle daha iyi çözümler üretilabilir. Genetik algoritmalar, karmaşık objektif fonksiyonları için en sağlam arama tekniklerinden biri olarak görülmektedir [9].

Dinamik yol planlama probleminin çözümünde, matris kullanarak çözüm yapan Dijkstra, Floyd algoritmaları benzeri yöntemlerde, çizgeye yeni düğümlerin ve bağlantıların eklenmesi veya çıkarılması durumunda yine matris değişeceği için, işlem zamanı artar. [10, 11]. Kısıtlar eş zamanlı dinamik değiştiğinde önceki çözümün bir parçasının aynen korunacağı her zaman garanti edilemeyebilir [12]. Sistemde eş zamanlı olarak birden fazla değişiklik gerçekleşebileceğinden, algoritmanın asıl kazanımı yeni durumda uygunluğu yüksek bireylerin topluma yayılmasını sağlamaktır.

6. KAYNAKÇA

- [1] C. Hocaoglu, A. C. Sanderson, (1996), Planning multi-paths using speciation in genetic algorithms, IEEE Int. Conf. Evolutionary Computation, Nagoya, Japan.
- [2] Ramalingam G., Reps T., (1996), On the computational complexity of dynamic graph problems, *Theoret. Comput. Sci.*, vol. 158, no. 1, pp. 233–277.
- [3] Franciosa P. G., Frigioni D., Giaccio R., (1997), Semi-dynamic shortest paths and breadth first search in digraphs, *Symp. Theoretical Aspects of Computer Science*.
- [4] Frigioni D., Marchetti A., Nanni U., (2000), Fully dynamic algorithms for maintaining shortest paths trees, *J. Algorithms*, vol.34, pp. 251–281.
- [5] Uğur, A. (2008), “Path planning on a cuboid using genetic algorithms”, *Information Sciences* 178, 3275–3287
- [6] TM 1-70-28D-10, 2002. Operators Manual for Sikorsky S70-A Helicopter 28D Glass Cockpit Helicopter, Chapter 7 Performance Data.
- [7] G. Harik, E. Cantu-Paz, D. E. Goldberg, (1999), The Gambler’s ruin problem, genetic algorithms, and the sizing of populations, *Evo. Comp.* vol. 7, pp. 231–253.
- [8] Ahn CH, Ramakhrisna R.S, (2002), A Genetic Algorithm for Shortest Path Routing Problem and the Sizing of Populations, *IEEE Trans Evolutionary Computation*, Vol.6, No.6, pp. 566-579.
- [9] D. E. Goldberg, (1989), *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley publishing company.
- [10] Hatzakis I., Wallace D., (2006), *Dynamic Multi-Objective Optimization with Evolutionary Algorithms: A Forward-Looking Approach*, *Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'2006)*, ACM Press.
- [11] Bosman, P. A. N, (2005), Learning, Anticipation and Time-Deception in Evolutionary Online Dynamic Optimization, *GECCO-2005 Workshop on Evolutionary Algorithms for Dynamic Optimization*, Washington DC.
- [12] Morrison, R. W., (2004), *Designing Evolutionary Algorithms for Dynamic Environments*, Springer-Verlag, Berlin.

KORİDOR ANALİZİ İLE OPTİMUM GÜZERGAH PROBLEMİNİN ÇÖZÜMÜ

Serkan Gazel^(a), Serdar Ak^(a)

^(a) ULUSAL CAD VE GIS ÇÖZÜMLERİ A.Ş., Cyberpark, Bilkent, ANKARA,
{serkan.gazel, serdar.ak}@netcad.com.tr

ÖZ

İki nokta arasındaki en uygun güzergahın otomatik olarak kabul edilebilir süreler içinde bulunabilmesi, birçok alanda karar sürecini hızlandırip maliyetleri düşürmesi açısından çözülmesi gereken çok önemli bir problemdir. Birbirileyle çelişen birden fazla amacın eş zamanlı optimizasyonundan oluşan bu problemin çözümünde, her bir hedefin sağlandığı tek bir çözümün bulunması her zaman mümkün değildir. Bu nedenle alternatif çözüm kümesindeki diğer çözümler tarafından bastırılmamış, hedeflerin her biri için kabul edilebilir düzeyde uygun Pareto-Optimal Çözüm üretilmelidir. Tüm ölçütlerin bir arada değerlendirilerek olası tüm seçeneklerin karşılaştırılması ve uygun olanın bulunması insan gücü ile çözülebilecek bir problem değildir. Kullanıcı, deneyimleri ve elindeki araçlar ile üretebileceği en uygun çözümü üretebilir ancak bu çözümün en uygun çözüm olduğunun garantisini yoktur. Yüzde 1'lik bir iyileştirme dahi zaman, güvenlik ve maliyet olarak büyük kazanımlar anlamına gelmektedir. Bu bildiri, problemin, verilen kısıt ve ölçütlere göre otomatik olarak 2 ve 3 boyutlu çözümü, alternatif çözümler arasında karşılaştırma yapılması ve çözülebilen örnek problemleri içermektedir.

Anahtar Kelimeler: Çoklu Optimizasyon, Karar Destek, Koridor Analizi, Otomatik Güzergah, Sezgisel Algoritma

SOLUTION OF OPTIMUM ROUTE PROBLEM BY CORRIDOR ANALYSIS

ABSTRACT

Considering the minimization of time spent for decision making and the reduction in cost, finding the optimum route automatically between two points within reasonable time is a very important problem to be solved. Solution of this problem, which is formed of simultaneous optimization of multiple conflicting criteria, is not always possible with full satisfaction of all target functions. Therefore, a Pareto-Optimal solution which is acceptable for all criteria and not overwhelmed by any solution in the

alternative solution set has to be sought. Evaluation of all criteria simultaneously, comparing all the options and finding the appropriate one is not a problem to be solved manually. One can reach a solution with experience and available tools, however there is no guarantee that it is the optimal solution. Even 1% optimization may result in huge gains in time, security, safety and cost. Especially, in case of a disaster, time and safety can be a key for saving lives. This paper includes the solution of the problem in 2D and 3D environments according to the given limits and criteria and solution of sample disaster related problems.

Keywords: automatic routing, corridor analysis, decision support, heuristic algorithm, multiple optimization

1. GİRİŞ

En uygun güzergah ifadesi, kullanıldığı yere göre farklı anlamlar taşıyabilmektedir. Problemin çözümü en kısa yol olabileceği gibi, en az eğimli yol, belirli bir arazi tipini takip eden yol, en az görülebilen yol gibi çözümler de problem tanımındaki ölçüt ve kısıtlara göre doğru olabilmektedir.

Euler'in 1736 yılında yayınladığı ve Königsberg'in Yedi Köprüsü olarak bilinen problem, grafik kuramının ve modern güzergah bulma çözümlerinin başlangıcı sayılmaktadır. Grafik kuramı ve vektör temelli CBS (Coğrafi Bilgi Sistemleri) üzerine çalışan ağ analizi, güzergah bulma ve planlama algoritmaları, önceden tanımlanmış ağlar ve gridler üzerinde çözüm üretebilmektedirler. Bu nedenle gerçek hayatı sürekli bir yüzey üzerinde farklı alternatiflerin bulunması gereken durumlarda bu yöntemlerin uyarlanması gerekmektedir. 1970'lerle birlikte bilgisayar ve CBS, konumsal analizlerde kullanılmaya başlandığında, sürekli uzay kafes yada grid olarak simule edilmektedir. Goodchild, bu yaklaşımın getirdiği hata ve yaklaşık sonuç sorununu ilk inceleyenlerden biridir. Bir yüzeyde sadece ortogonal ilerlemenin yeterli olmayacağı, güzergahtaki uzama ve sapmanın azaltılması ve gerçek dünyadaki durumun daha iyi temsil edilebilmesi için çapraz yönlerde de ilerlemenin gerektiğini kanıtlamıştır^[1].

Optimum güzergah konusunda günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır. Dijkstra'nın 1959 yılında yayınladığı ve optimum çözümü garanti eden en kısa yol algoritması, geliştirilen diğer yöntemlerin yanında günümüze kadar geçerliliğini korumuştur^[2]. 1967 yılında McHarg, ışıklı masa üzerinde farklı veri katmanlarına ait çizimleri üst üste yerleştirerek bilgisayar olmayan bir ortamda çoklu kriter analizinin öncülerinden olmuştur^[3].

Tomlin, harita aritmetiği işlemlerini, bilgisayar algoritmalarının verileri alma biçimine dayandırarak yerel, odaksal ve bölgesel fonksiyonlar olarak üç temel kategoride

sınıflandırmıştır [4]. Yakınlık yüzeylerini hesaplamak için bir yayılma algoritması (odaksal fonksiyon) geliştirerek herhangi bir noktadan hedef noktaya mümkün olan en kısa mesafeyi belirlemiştir. Bu yöntemde tüm hücrelere boş ilk değerler atanmaktadır. Her bir hücreden değer içeren komşu hücrelere olan seyahat maliyeti hesaplanarak raster üzerinde geçişler yapılmaktadır. Artımlı mesafe (maliyet) toplam maliyetteki farktan az ise veya hücre herhangi bir değer içermiyor ise hücrenin değeri hesaplanan yeni değer olarak güncellenmektedir. Maliyet yüzeyi, hiçbir değişiklik olmadan bir geçiş tamamlandığında son halini almış olmaktadır.

Collischonn ve Pilar'ın 2000 yılındaki çalışmasında yer alan en düşük-maliyet-güzergahları (least-cost-paths) kavramı, bir çözümü sadece maliyet yüzeyinde aramanın yanı sıra eğimi dereceği ve yönü ile birlikte ele aldığı için dikkate değer bir çalışmадır [5]. Dik bir yamaçtan aşağıya giden bir güzergah, dik yamaçları kullanmadan yapılan bir inişten daha maliyetli olabilmektedir. Bu görüş, geleneksel yol ve kanal planlama yöntemleri ile çakışmaktadır. Algoritmaları, bir hücre etrafında yer alan 3x3 boyutundaki pencereye artımlı maliyetleri atayabilmek için bir maliyet-eğimi fonksiyonu kullanmaktadır. Eğim dikleştikçe (aşağı yada yukarı) maliyet artmaktadır, böylelikle eğimin değişmediği yada az değiştiği yönler algoritma tarafından tercih edilmektedir.

Cowen ve diğerleri, 2000 yılında dolgu ve yarma, yol ve akarsu geçişleri ve ray gibi yapım maliyetlerini de girdi olarak kullanan ve potansiyel demiryolu güzergâhlarını araştıran ekonometrik bir güzergâh bulma modeli üzerinde çalışmışlardır [6]. Araştırmalarında, raster CBS'den kaynaklanan yaklaşıklık sonuçların yüksek çözünürlülüklü ve doğruluktaki veriler ile dengelenebileceğini göstermek için LIDAR'dan (Işık Saptama ve Uzaklık Tayini, Light Detection and Ranging) elde edilmiş yüksek doğruluktaki sayısal yükseklik modelini kullanmışlardır.

2. PROBLEM GİRDİLERİ VE ÇÖZÜM

Optimum güzergah, coğrafi kısıtlar (eğim, kot, yanal eğim, baki ...) ile tanımlı kriterlerin (yasak alanlar, kamu alanları, tarımsal alanlar, ...) ve maliyet unsurlarının (birim yol maliyeti, ...) birlikte göz önünde bulundurularak çözülmesi gereken bir problemdir. Aynı zamanda tercih edilen köprü, tünel, geçiş noktası gibi kriterler de dikkate alınmalıdır.

Karar vericilere katı tek bir çözüm sunmak yerine alternatif çözümler sunulması, kriterlere ağırlıklar verilebilmesi ve alternatiflerin birbirleri ile karşılaştırılması, kullanılabilirlik açısından önemlidir.

2.1. Coğrafi Veriler

Arazi tek başına bir veri olabileceği gibi, zorunlu bir veri değildir. Geliştirilen algoritma, coğrafi olmayan problemlerin çözümünde de kullanılabilmektedir. Arazi modeli olarak TIN (Düzensiz Üçgenleme Modeli, Triangulated Irregular Network), DEM (Sayısal Yükseklik Modeli, Digital Elevation Model) yada yükseklik verisi üreten herhangi bir referans kullanılabilmektedir^[7].

Arazi modelinden elde edilebilen kot, eğim, yanal eğim ve bakı değerleri, analizde kısıtlayıcı ve/veya maliyet hesaplama faktörü olarak kullanılabilmektedir. Verilecek ağırlık faktörleri ile hangi kriterin sonuca ne kadar etki edeceğini ayarlanabilmektedir.

2.2. Kriter Katmanlar

Bir yol güzergahı için örnek vermek gerekirse, güzergahın tarım arazilerinden geçmesi istenilen bir durum değildir, ancak bu pek çok zaman kaçınılmazdır. Geliştirilen algoritma, bu sorunu tarım arazilerini puanlayarak çözmektedir (1. sınıf tarım arazisi, 2. sınıf tarım arazisi, tarıma uygun olmayan arazi gibi). Oluşturulacak güzergah alternatifleri "olabildiğince" tarıma uygun olmayan yerlerden geçirilir. Ancak arazi modeli ve tarım arazileri katmanlarının hangisinin önemli olduğu koşullara bağlıdır. Bu nedenle kullanıcının bu iki kriter için belirleyeceği ağırlıklara gerek duyulur.

Ağırlıkları % 10 eğim, % 90 tarım olarak verildiğinde bulunacak yol çoğunlukla tarıma uygun olmayan yerlerden geçecektir. Ağırlıklar tam tersi, yani %90 eğim, %10 tarım olarak verildiğinde ise güzergah düşük eğimi seçerek gerektiğinde tarıma uygun olan bölgelerden geçecektir^[7]. Benzer şekilde yavaşlatıcı bölgeler, ormanlık araziler, yerleşim alanları, görünür alanlar gibi sınırsız sayıda kriter katman girdi olarak tanımlanabilmektedir (Şekil 1).

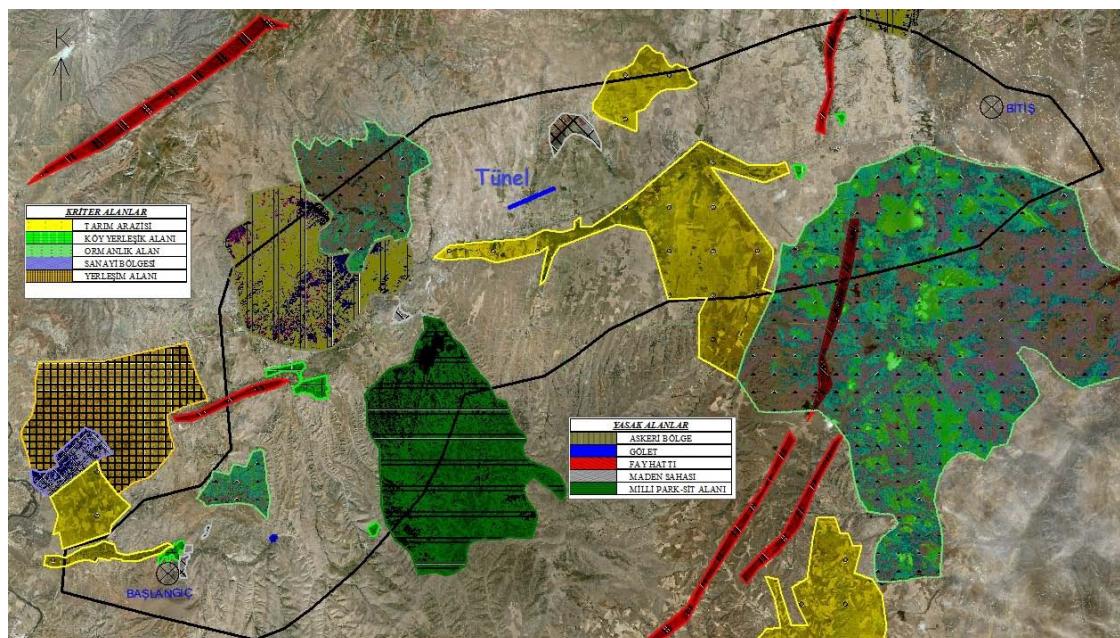
2.3. Sınırlar ve Kısıtlar

Optimum güzergah hesaplamaları için bir çalışma alanı gerekmektedir. Çözüm, bu çalışma alanı içinde üretilicektir (Şekil 1). Çözüm duyarlılığı, çalışma alanı sınırlarına ve kullanılan donanımın gücüne göre otomatik olarak ayarlanmaktadır. İki şehir arasındaki bir otoyol güzergahı arayışındaki çözünürlük ile askeri bir bireliğin 20 kilometrelilik bir arazide izleyeceği güzergahın bulunması farklı çözünürlükte girdiler gerektirecek ve dolayısı ile farklı çözünürlükte çıktılar üretecektir. Algoritma üzerine geliştirilen uygulama ile yapılan test çalışmalarında, Ankara – İzmir arasındaki 500 kilometreden uzun bir otoyol güzergahının standart bir masaüstü bilgisayar ile kolaylıkla çözülebildiği görülmüştür^[7].

Çözüm sınırlarında olup güzergahın geçmemesi istenilen yasak alanlar da (SİT alanları, askeri bölgeler, mayınlı bölgeler, yol yapımına uygun olmayan zeminler, görülebilir alanlar, vb.) algoritmaya girdi olarak verilebilmektedir. Çözüm bu yasak alanlardan geçmemektedir^[7].

2.4. Tercih Edilen Güzergah Bölümleri

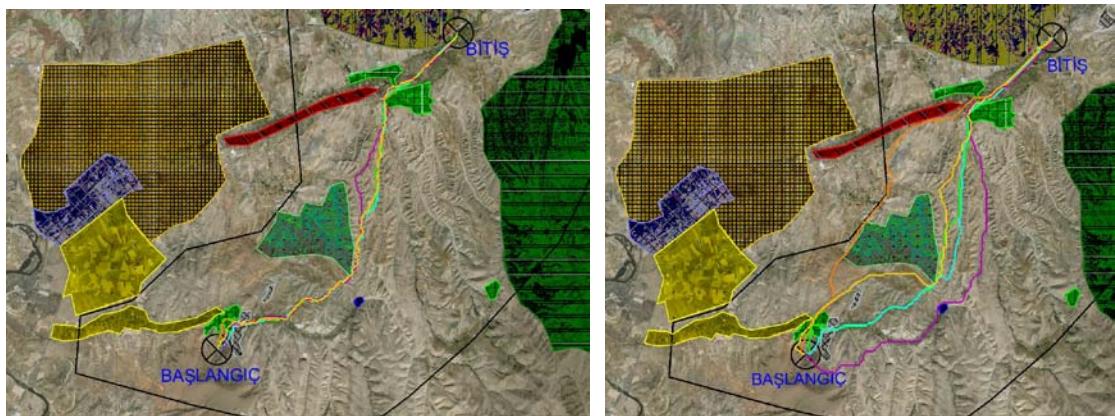
Algoritma, kullanıcının yerini ve maliyetini belirlediği tünel, köprü, viyadük gibi özel yapıları, yada mutlaka kullanılması gereken bir patika gibi hatları da çözüme girdi olarak kabul etmektedir (Şekil 1). Böylelikle bir dağın etrafından geçen ve tünel kullanıılan iki farklı çözüm karşılaştırılabilmektedir^[7].



Şekil 1. Koridor Analizi Girdileri

2.5. Parametreler

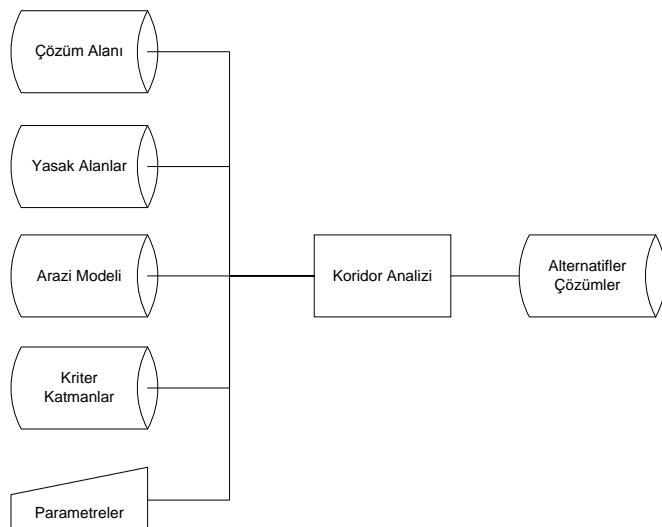
Birden fazla alternatif bulunması durumunda, alternatiflerin birbirlerinden ne kadar ayırik olması gerektiği çözülmESİ gereken bir problemdir. Kullanıcının N adet alternatif istemesi durumunda, A noktasından B noktasına en uygun çözüm ile kalan N-1 çözüm arasında güzergahın sadece 1 segmenti farklıdır. Matematiksel olarak doğru olan bu alternatifler aslında kullanıcıya herhangi birşey ifade etmemektedir. Bu nedenle algoritma içinde geliştirilen “Alternatiflerin Benzersizliği” kavramı ile kullanıcılar açısından “anlamlı derecede farklı” sonuçlar üretilebilmektedir (Şekil 2a ve 2b).



Şekil 2a ve 2b. Alternatif Çözümler

2.6. Maliyet Fonksiyonu ve Çözüm

Koridor Analizi, yukarıda bahsedilen tüm girdileri birlikte ele alır ve oluşturduğu maliyet yüzeyi üzerinde en uygun çözümleri bulur (Şekil 3). En uygun çözüm için *k-shortest path* (*k-* en kısa yol) algoritmasının değiştirilmiş bir hali kullanılmaktadır. Yapılan değişiklik ile, bulunan her alternatifin bir sonraki çözüm kümesinde yer olması zorlaştırmıştır. Maliyet yüzeyinin çözünürlüğü, çalışma alanı ve kullanılan donanıma göre otomatik olarak belirlenir. Eğimin yöne bağlı olarak ele alınması ve bulunan sonucun bir koridordan ziyade bir güzergah olmasına dolaylı basit bir overlay analizine göre çok daha karmaşık sonuçlar üretilmektedir.



Şekil 3. Koridor Analizi Girdileri

Maliyet yüzeyindeki herhangi bir noktanın maliyeti (1)'de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\text{Maliyet}_i = \sum (\text{Kriter}_i \times \text{Ağırlık}_i) / \sum \text{Ağırlık} \quad (1)$$

3. ÖRNEK ÇÖZÜM

3.1. Girdiler

Geliştirilen algoritma ile askeri yasak alanlara sahip sanal bir sınır bölgesinde, güzergah üzerinde bulunan patikaları ve köprüleri de kullanarak üretilen çözüm incelenmiştir. Bu örnekte analizlerin yapılabilmesi için kullanılacak olan yükseklik verisi olarak Netcad Grid Dosyası kullanılmıştır.



Şekil 4. Örnek Çalışma Alanı

Kriter bölgeler ise ormanlık alan (yeşil), yavaşlatan alan (mavi) ve yerleşim alanları (sarı) olarak belirlenmiştir. Turuncu olarak belirtilen alanlar ise yasak bölgelerdir. Siyah çizgiler ile kullanılabilecek patika ve köprüler belirtilmiştir.

Çizelge 1. Kriter Alan Ağırlıkları

KRİTER ALAN İSMİ	AĞIRLIK (%)
ORMANLIK ALANLAR	30
YAVAŞLATAN BÖLGELER	15
YERLEŞİM ALANLARI	40
KRİTER İSMİ	AĞIRLIK (%)
EĞİM	15
KOT	0
YANAL EĞİM	0
	$\Sigma 100$

3.2. Çözüm

İlk çözümde köprüler ve patikalar dikkate alınmamıştır. Örnekte, başlangıç ve bitiş noktaları arasında yasak alanlar bulunması gibi farklı bir durum vardır. Özellikle

başlangıç noktasından güzergahın devam edebilmesi için içinde bulunduğu yasak alandan dışarı çıkabilmesi gereklidir. İlk analizin sonucunda üretilen güzergah incelediğinde, sonuçlar kriter ve yasak alanlar çerçevesinde ilk iki yasak alanı özel yapıları kullanarak geçmiştir. Ancak bitiş noktasında bulunan bölgede vermiş olduğumuz kriterlerin sınırları dahilinde kaldığı için özel yapıyı kullanmamıştır. Bitiş noktasına bu yasak bölgenin etrafından dolaşarak ulaşmıştır (Şekil 5a).

İkinci çözümde ise köprü ve patikalar dikkate alınmıştır. Bu analizde, bitiş noktasından önceki yasak alanda tanımlanmış olan özel yapı hem kriterlere uygun hem de güzergahı kısaltma özellikleri nedeniyle algoritma tarafından tercih edilmiştir (Şekil 5b).



Şekil 5a ve 5b. Sonuçların Karşılaştırılması

4. SONUÇ

Netcad Koridor Analizi uygulamasının geliştirilmesi sırasında birçok alanda uygulanabilecek, standart donanımlar ile kısa sürede sonuç alınabilecek bir yöntem üzerinde çalışılmıştır. Gerek sivil, gerek askeri alanlarda en uygun güzergah, koridor yada bölge problemine karşılaştırmalı alternatif çözümlerin sunulması hedeflenmiştir.

Var olan yaklaşımlardan farklı olarak eğim, gidiş yönü ile birlikte ele alınmıştır. Böylelikle, sınırlayıcı bir eğim haritası yerine dinamik bir eğim fonksiyonu kullanılmıştır.

Geliştirilen uygulama ile yapılan testlerin girdilere ve parametrelerle uygun olarak sonuçlar ürettiği gözlenmiştir. Kullanıcı tarafından sağlanan kriterlerin hepsinin optimum şekilde sağlandığı, çoklu kriterlere uygun sonuçlar üretildiği bir uygulama geliştirilmiştir.

Analiz motoru, COM (Bileşen Nesne Modeli, Component Object Model) arayüzü ile programlanabilir şekilde geliştirilmiştir. Netcad Operatörleri sayesinde gelecekte

yapılacak çalışmalarda kolaylıkla farklı amaçlar için, farklı girdi ve parametreler ile geliştirilebilir yapıdadır.

5. KAYNAKÇA

- [1] Dijkstra, E. (1959), A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische Mathematik*, 1 (1), 269-271.
- [2] McHarg, I, 1967, Where should Highways go?, *Landscape Architecture*, 57, 179-181.
- [3] Goodchild, M.F., 1977, An evaluation of lattice solutions to the problem of corridor location, *Environment and Planning A*, 9, 727-738.
- [4] Tomlin, C.D., 1990, *Geographic Information Systems and Cartographic Modelling*, Prentice Hall, New Jersey, ABD
- [5] Collischonn, W., & Pilar, J., 2000, A direction dependent least-cost-path algorithm for roads and canals, *International Journal of Geographical Information Science*, 14 (4), 397-406
- [6] Cowen, D.J., Jensen, J.R., Hendrix, C., Hodgson, M., Schill, S.R., 2000, A GIS-Assisted Rail Construction Econometric Model that Incorporates LIDAR Data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66 (11), 1323-1328
- [7] Ulusal Cad ve Gis Çözümleri, 2011, *Netcad Koridor Analizi Kullanıcı Kitabı*

İNSANSIZ ARAÇLARLA DÜZLEMSEL OLMAYAN ALANLARIN TARANMASI

Çağlar Seylan ^(a), Özgür Saygin Bican ^(b), Fatih Semiz ^(c)

^(a) ODTÜ TSK-MODSİMMER, caglarseylan@gmail.com

^(b) ODTÜ TSK-MODSİMMER, ozgur.bican@ceng.metu.edu.tr

^(c) ODTÜ TSK-MODSİMMER, semizfatih1@gmail.com

ÖZ

Günümüzde insansız araçlarla alan taraması, yani bir alanın tümünün veya bir kısmının insansız araçlarla en az efor ile dolaşılması, alan taramasına duyulan ihtiyaç ve insansız araçların kullanımının artmasıyla beraber hızla önem kazanmaktadır. İnsansız araçlarla alan taramasının, İHA'lar (İnsansız Hava Araçları) ile bir alanda keşif yapmaktan robotlar ile mayınlı arazilerin mayınlardan arındırılmasına, büyük alışveriş merkezlerinde yerlerin robotlarla temizlenmesinden büyük arazilerde çim biçmeye kadar pek çok uygulaması mevcuttur. Problemin tek araçla alan taraması, birden fazla araçla alan taraması, çevrimiçi (arazinin nasıl olduğu daha önceden bilinmiyorsa) alan taraması gibi pek çok versiyonu mevcuttur. Ayrıca arazide çeşitli büyüklüklerde engeller de bulunabilmektedir. Doğal olarak, bu problem üzerinde birçok araştırmacı çalışmaktadır ve günümüzde kadar pek çok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların çok büyük bir kısmı, MKA (Minimum Kapsama Ağacı) yaklaşımını kullanmaktadır. Bu yaklaşımın temel olarak, düzlemsel bir arazi, aracın görüş alanına göre eş büyüklükte karelere bölünmekte ve bu karelerin merkezleri birer düğüm olarak kabul edilerek araziden kenarları birim ağırlıkta olan bir çizge elde edilmektedir. Sonra bu çizgenin MKA'sı bulunup bu MKA'nın etrafı araçlar tarafından turlanmaktadır. Bizim önerdiğimiz metod düzlemsel olmayan arazilerin de insansız araçlar ile taramasına çözüm getirmektedir. Biz de çözümde MKA yaklaşımını temel aldık, ancak arazi düzlemsel olmadığı için çizgedeki kenarlara birim ağırlık vermek yerine iki kare arasındaki eğime bağlı ağırlıklar verdik. Bu yaklaşım ile aynı zamanda özellikle İHA'lar için rüzgarın şiddeti ve yönü de hesaba katılarak bir rota elde edilip alan taraması yapılabilir.

Anahtar Kelimeler: alan taraması, çizge teorisi, İHA (İnsansız Hava Aracı), MKA (Minimum Kapsama Ağacı), rota planlama

SCANNING NON-PLANAR AREAS WITH UNMANNED VEHICLES

ABSTRACT

The importance of area coverage with unmanned vehicles, in other words, traveling an area with an unmanned vehicle such as a robot or an UAV (Unmanned Aerial Vehicle) completely or partially with minimum cost, is increasing with the increase in usage of such vehicles today. Area coverage with unmanned vehicles are used today in exploration of an area with a UAV, sweeping mines with robots, cleaning ground with robots in large shopping malls, mowing lawn in a large area etc. The problem has versions such as area coverage with a single unmanned vehicle, area coverage with multiple unmanned vehicles, on-line area coverage (The map of the area that will be covered is not known before starting the coverage) with unmanned vehicles etc. In addition, the area may have obstacles that the vehicles cannot move over. Naturally, many researches are working on the problem and a lot of researches have been done on the problem until today. Spanning tree coverage is one of the major approaches to the problem. In this approach, at the basic level, the planar area is divided into identical squares according to range of sight of the vehicle, and centers of these squares are assumed to be vertexes of a graph. The vertexes of this graph are connected with the edges with unit costs and after finding MST (Minimum Spanning Tree) of the graph, the vehicle strolls around the spanning tree. The method we propose suggests a way to cover a non-planar area with unmanned vehicles. The method we propose also takes advantage of spanning tree coverage approach, but instead of assigning unit costs to the edges, we assigned a weight to each edge using slopes between vertexes connected with those edges. We have gotten noticeably better results than the results we got when we did not consider the slope between two squares and used classical spanning tree approach.

Keywords: area coverage, graph theory, MST (Minimum Spanning Tree), route planning, UAV (Unmanned Aerial Vehicle)

1. GİRİŞ

Günümüzde insansız araçlar için en önemli problemlerden birisi alan taramasıdır. Alan taraması bir arazinin her yerini dolaşmak olarak tanımlanabilir. Alan taraması yapılrken göz önünde bulundurulan en önemli kıstaslardan bir tanesi bu taramayı olabildiğince verimli yapmaktr. Bu amaca ulaşmak için, bir yandan taranan alan maksimize edilmeye çalışılırken, bir yandan da harcanan zaman ve yakıt minimize edilmeye çalışılır.

Arazileri verimli bir şekilde taramak için en sık kullanılan yaklaşılardan bir tanesi kapsama ağacı yöntemidir. Kapsama ağacının tanımı şu şekildedir:

G bağlı bir çizge olsun. Hem ağaç olan hem de G'nin tüm düğüm noktalarını kapsayan bir alt çizgeye kapsama ağacı denir.

Problemin tek araçla alan taraması, birden fazla araçla alan taraması, çevrimiçi (Taranacak alanın haritası daha önceden bilinmiyorsa) alan taraması, çevrimdişi alan taraması veya engel bulunan arazilerin taranması, engel bulunmayan arazilerin taranması gibi çeşitli varyasyonları mevcuttur.

Günümüzde alan taramasının İHA'lar ile bir alanda keşif yapmaktan robotlar ile mayınlı arazilerin mayınlardan arındırılmasına, büyük alışveriş merkezlerinde yerlerin robotlarla temizlenmesinden büyük arazilerde çim biçmeye kadar pek çok uygulaması mevcuttur [7, 4, 8].

Bu konuda bugüne kadar yapılan çalışmaların çok büyük bir kısmı taranacak arazileri düzlemsel olarak ele almıştır. Bu çalışmanın amacı, düzlemsel arazilerde alan taraması için geliştirilen mevcut yaklaşımlar üzerine geliştirmeler yapılarak düzlemsel olmayan arazilerin de verimli olarak taranabileceği bir yaklaşım türetmektir.

2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Alan taramasında, en önemli problemlerden bir tanesi arazinin bilgisayar ortamında nasıl gösterileceğidir. Daha açık söylemek gerekirse problem, sürekli gerçek dünyanın kesikli bilgisayar dünyasında nasıl gösterilebileceğidir. Çözümlerden bir tanesi A. Elfes tarafından önerilen araziye, araziyi eş hücrelere bölerek yakinsamaktır [1]. Bilinmeyen ve yapılandırılmamış alanlar için, Elfes sonar tabanlı gerçek dünya harita ve navigasyon sistemi önermiştir. Böylece araziyi bilgisayar ortamında gösterebilmek için bir yaklaşım bulmuştur. Bu yaklaşımda arazi, eş hücrelerden oluşan iki boyutlu bir dizi olarak gösterilmiştir. Hücre, hücreye bir araç girince veya aracın algılayıcısı hücreyi algılayınca gezilmiş olarak kabul edilir. 2 boyutlu dizideki tüm hücreler gezildiğinde alan taranmış olur.

İnsansız araçlarla alan taramasına diğer hücre tabanlı bir yaklaşım ise Y. Gabriely ve E. Rimon tarafından önerilen kapsama ağacı yaklaşımıdır [2]. Bu yaklaşımda araziye, arazi eş hücrelere bölünüp daha sonra bu hücrelerden bir çizge elde edilerek yakinsanmıştır. Daha sonra bu çizgenin kapsama ağacı bulunur ve etrafı bir ya da birden fazla araçla dolaşılır. Dolaşma bittiğinde alan taranmış olur.

S. Hert, S. Tiwari ve V. Lumelsky otonom su altı araçlarına 3 boyutlu su altı alanlarının taranması için rota planı yapan kısmi kesikli bir algoritma önermiştir [3]. Önerilen algoritma çevrimiçi (Taranacak olan su altındaki alan tarama başlamadan önce bilinmemektedir). Bu yaklaşımındaki hücreler tamamen sabit değildir, enleri sabit fakat boyları değişkendir. Bu algoritma ile basit bağlantılı ya da basit olmayan bağlantılı alanlar taranabilmektedir. Algoritmanın özyinelemeli bir doğası vardır ve araç alanı

paralel düz çizgiler boyunca zigzag hareketi yaparak tarar. Alan adalar ve koymalar içerebilir. Koymalar girerken ya da çıkarken koymaların içindeki bazı alanlar birden fazla taramabilir ya da bazı alanlar hiç taramayabilir (Bu tür koymalar saptırıcı koy denir). Bu tür koymalar taramak için özel yaklaşılara gerek vardır. Alan ada içerdiği zaman, yani alan basit bağlantılı değilse, aynı prosedürler üzerinde küçük değişiklikler yapılarak alanın tamamen taraması sağlanır.

Alanın hücrelere ayrılması bir yakınsama olmak zorunda değildir, tam da olabilir. Alan tam olarak hücrelere ayrılrken, öyle farklı bölgelere ayrılr ki bu bölgelerin birleşimi alanı tam olarak verir [4]. Tam olarak hücrelere ayırma tekniklerinden bir tanesi alanı yamuksal şekilde ayırmaktır. J. R. VanderHeide ve N. S. V. Rao yamuksal şekilde alan ayırma tabanlı çevrimiçi bir alan taraması metodu önermiştir [5]. Temel olarak, insansız araç alan hakkında bilgi toplama fazından sonra alanı dikdörtgenlere ayırır ve her dikdörtgen için ayrı bir rota planlaması yapar. Daha sonra her dikdörtgen için bulunan rotaları birleştirir ve tek bir rota elde eder.

3. ÖNERİLEN YAKLAŞIM

Bugüne kadar önerilen metodlar genelde düz alanlarda alan taraması yapmak içindir. Biz bu yazında düzlemsel olmayan, engebeli yüzeyleri taramak için, insansız araçlara rota planlaması yapan bir yaklaşım sunuyoruz. Bizim yaklaşımımız da temel olarak Y. Gabriely ve E. Rimon'un yaklaşımı [2] gibi Kapsama Ağacı Taraması yöntemini kullanmaktadır. Ancak bu yöntemde, kapsama ağacı oluşturulurken, araziden elde edilen çizgenin kenarlarına birim ağırlık yerine komşu iki düğüm arasındaki eğime bağlı bir ağırlık atanır. Daha sonra oluşan çizgenin minimum kapsama ağacı bulunarak bu ağacın etrafı dolaşılır.

Arazi, bilgisayarda her bir elemanı o noktanın yüksekliğini (Belirli bir yere göre) belirten bir $N \times M$ 'lik matris ile gösterilir. Şekil 1'de bu matrise bir örnek görülmektedir.

10	10	10	10	10	10	10	20	20	20	30
20	30	30	20	20	20	30	30	30	30	40
20	30	30	20	30	40	40	30	30	30	30
30	30	30	30	30	40	40	40	40	40	40
20	20	30	40	40	50	50	50	50	50	50
20	20	30	40	50	50	60	50	50	40	40
20	20	20	30	40	40	50	40	40	30	
20	20	20	40	40	50	40	30	40	30	
30	30	30	40	40	40	40	30	30	20	
20	20	20	30	30	30	30	20	20	10	

Şekil 1. Arazi için örnek matris

İnsansız araca bağlı kameranın görüş açısının, ya da daha genel bir söylemle araca bağlı cihazın kapsama alanının, matriste bir karelük alana denk geldiği farz edilmektedir. Bu matris N. Hazon'ın yaklaşımındaki gibi her kenarı iki kare olan (Daha genel bir söylemle aracın kapsama alanı çapının iki katı uzunluğunda) daha büyük karelere ayrıılır [6] (Şekil 2).

10	10	10	10	10	10	20	20	20	30
20	30	30	20	20	20	30	30	30	40
20	30	30	20	30	40	40	30	30	30
30	30	30	30	30	40	40	40	40	40
20	20	30	40	40	50	50	50	50	50
20	20	30	40	50	50	60	50	50	40
20	20	20	30	40	40	50	40	40	30
20	20	20	40	40	50	40	30	40	30
30	30	30	40	40	40	40	30	30	20
20	20	20	30	30	30	30	20	20	10

Şekil 2. Alt karelere ayrılmış matris

Bu matristen $(N/2) \times (M/2)$ 'lik yeni bir matris üretilir. Bu matrisin her bir elemanı eski matrisin 2×2 'lik karelerinin içindeki elemlere (Şekil 2'de kalın sınırlarla belirtilen) denk gelmektedir. Yeni matristeki her bir eleman da eski matristeki gibi yükseklik belirtmektedir. Bu yükseklikler eski matristeki 2×2 'lik karelerdeki 4 elemanın aritmetik ortalaması alınarak bulunur ve gerçek araziye yakınsama yapılır. Yani, bir 2×2 'lik kare içindeki elemler H_1, H_2, H_3, H_4 ise yeni matriste bu kareye denk gelen elemanın değeri H_{yeni} , bu dört elemanın aritmetik ortalamasıdır (Şekil 3).

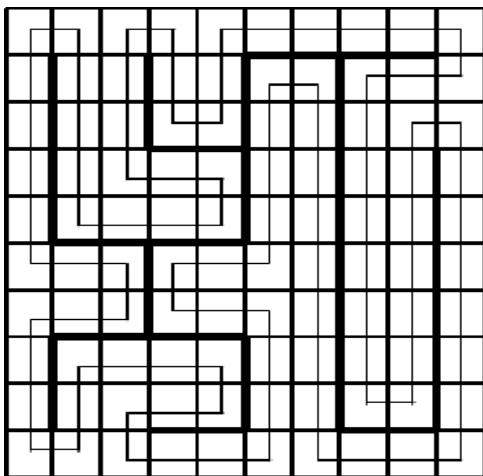
$$\begin{array}{|c|c|} \hline H_1 & H_2 \\ \hline H_3 & H_4 \\ \hline \end{array} \rightarrow \frac{H_1 + H_2 + H_3 + H_4}{4}$$

Şekil 3. Alt matristeki dört elemanın aritmetik ortalaması

Yeni matristeki her bir hücre aynı zamanda bir düğüm noktasıdır. Her düğüm noktası ile, kendisine karşılık gelen hücrenin komşuları kenarlar aracılığıyla bağlıdır (Her bir hücre, kendisinin sağındaki, solundaki, üstündeki ve altındaki hücre ile komşudur, çapraz hücreler komşudan sayılmaz).

Kenarların ağırlıkları, bağladıkları düğüm noktaları arasındaki eğime bağlı bir fonksiyon aracılığıyla bulunur. Bu fonksiyon, düğüm noktaları arasındaki yatay uzaklık d , yükseklikleri arasındaki fark h ise, doğrudan aradaki uzaklığa veren Pisagor bağıntısı, yani $\sqrt{d^2 + h^2}$, özellikle İHA'lar için rüzgarın yönü ve şiddetine bağlı bir bağıntı, ya da amaca göre çok daha karmaşık bir bağıntı olabilir.

Çizge bu şekilde oluşturulduktan sonra minimum kapsama ağacı bulunur ve bu kapsama ağacının etrafı Y. Gabriely ve E. Rimon'un yaptığı yaklaşımındaki gibi araçlar tarafından turlanır [2]. Yükseklik matrisi Şekil 1'deki gibi olan matriste, doğrudan Pisagor bağıntısına göre bulunmuş çizgenin, bu yaklaşımı göre turlanırken ortaya çıkan rota Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Kapsama ağacının turlanması

4. TEST SONUÇLARI

Testlerde 15 tane girdi kullanıldı. Girdiler, rastgele üretilmiş araziler olup 250x250 matris şeklinde gösterilmiştir. Girdilerdeki arazilere en fazla 30 adet engel koyulmuştur. Testlerde bizim önerdiğimiz yaklaşım ile şimdiden kadar düzlemsel arazileri taramada kullanılan doğrudan kapsama ağacı yaklaşımını bu 15 girdiyi her iki yaklaşım için de kullanarak karşılaştırdık. Bunu yaparken her birinin ortalama eğimi farklı olan girdiler denedik.

Ortalama eğim, bütün komşu hücre ikililerinden elde edilen eğimlerin toplamının çizgedeki kenar sayısına bölümünden elde edilmiştir. İki hücre arasındaki eğim, iki hücrenin ortalama yükseklikleri arasındaki farkın bu hücreler arasındaki yatay uzaklığa bölümü olarak tanımlanmıştır.

Testlerde metot, çizgedeki kenarlara ağırlık atamada kullanılan iki farklı ağırlık fonksiyonu kullanılarak denenmiştir. Bu fonksiyonlardan ilki, kenarlara doğrudan Pisagor bağıntısı kullanılarak bulunan, hücreler arasındaki doğrusal uzaklığını bulmaktadır. Diğer ise yine ilk fonksiyon gibi Pisagor bağıntısını kullanarak hücreler arasındaki doğrusal uzaklığını bulmaktadır. Ancak bunu doğrudan kenarların ağırlığı olarak kullanmak yerine buna, artan eğim ile beraber artan bir ceza puanı eklemektedir. Fonksiyonlar ve test sonuçları daha detaylı olarak aşağıda açıklanmıştır.

4.1.Doğrudan pisagor bağıntısını kullanan ağırlık fonksiyonu

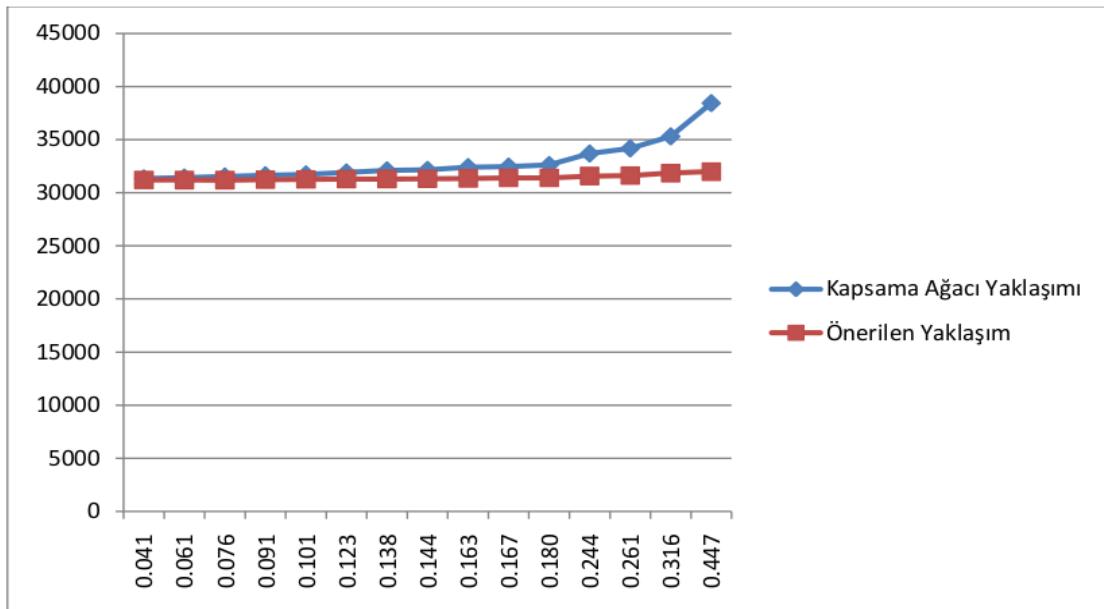
Ortalama yükseklikleri h_1 ve h_2 olan, aralarındaki yatay uzaklık ise d olan hücrelere karşılık gelen düğümler arasındaki kenarlara,

$$w = \sqrt{h_1^2 + h_2^2 + d^2} \quad (1)$$

fonksiyonuna göre ağırlık atanmıştır. Girdi numarasına göre ortalama eğim, kapsama ağaçları yaklaşımlına göre bulunan ağaçtaki kenarların ağırlıkları toplamı ve önerdiğimiz metoda göre (Herhangi bir kapsama ağaçından ziyade minimum kapsama ağaçına göre) bulunan ağaçtaki kenarların ağırlıkları toplamı çizelge 1'de gösterilmiştir. Eğime bağlı olarak değişen kenar ağırlıkları toplamları çizelge 2'de gösterilmiştir (Dikey eksen ağırlıklar toplamına, yatay eksen ortalama eğime karşılık gelmektedir.).

Çizelge 1. İki metodun denklem (1)'e göre karşılaştırılması

Girdi No	Ortalama Eğim	Kapsama AĞACI Yaklaşımı	Önerilen Yaklaşım
Girdi-1	0.041	31347.4	31193.6
Girdi-2	0.061	31429.8	31192.0
Girdi-3	0.076	31523.4	31184.9
Girdi-4	0.091	31639.1	31230.6
Girdi-5	0.101	31720.5	31251.1
Girdi-6	0.123	31908.1	31284.4
Girdi-7	0.138	32107.4	31293.4
Girdi-8	0.144	32146.8	31306.2
Girdi-9	0.163	32410.0	31349.7
Girdi-10	0.167	32464.5	31395.0
Girdi-11	0.180	32608.3	31382.8
Girdi-12	0.244	33693.2	31568.5
Girdi-13	0.261	34176.4	31609.5
Girdi-14	0.316	35306.8	31844.6
Girdi-15	0.447	38438.3	31981.4

Çizelge 2. İki metodun denklem (1)'e göre karşılaştırılması**4.2.Ek olarak eğime bağlı ceza puanı da kullanan ağırlık fonksiyonu**

Ortalama yükseklikleri h_1 ve h_2 olan, aralarındaki yatay uzaklık ise d olan hücrelere karşılık gelen düğümler arasındaki kenarlara,

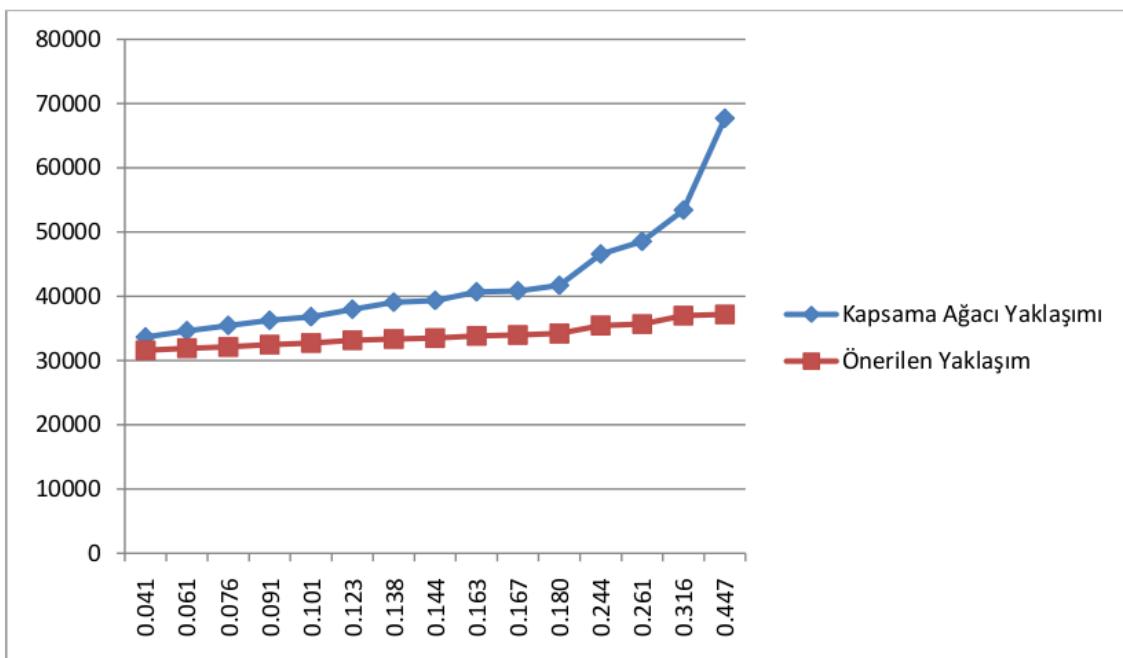
$$w = \sqrt{h_1^2 + h_2^2 + d^2} * \left[1 + \frac{|h_1 - h_2|}{d} \right] \quad (2)$$

fonksiyonuna göre ağırlık atanmıştır. Bu fonksiyon, ilk fonksiyona yine eğime bağlı bir ceza puanı eklenerken elde edilmiştir. Girdi numarasına göre ortalama eğim, kapsama ağacı yaklaşımına göre bulunan ağaçtaki kenarların ağırlıkları toplamı ve önerdiğimiz metoda göre (Herhangi bir kapsama ağacından ziyade minimum kapsama ağacına göre) bulunan ağaçtaki kenarların ağırlıkları toplamı çizelge 3'de gösterilmiştir. Eğime bağlı olarak değişen kenar ağırlıkları toplamları çizelge 4'de gösterilmiştir (Dikey eksen ağırlıklar toplamına, yatay eksen ortalama eğime karşılık gelmektedir.).

Çizelge 3. İki metodun denklem (2)'ye göre karşılaştırılması

Girdi No	Ortalama Eğim	Kapsama Ağacı Yaklaşımı	Önerilen Yaklaşım
Girdi-1	0.041	33618.1	31578.1
Girdi-2	0.061	34614.1	31901.9
Girdi-3	0.076	35440.0	32108.5
Girdi-4	0.091	36230.7	32468.1
Girdi-5	0.101	36785.4	32695.4
Girdi-6	0.123	37953.1	33147.8
Girdi-7	0.138	39047.1	33347.6
Girdi-8	0.144	39325.0	33481.9
Girdi-9	0.163	40666.2	33813.4
Girdi-10	0.167	40826.5	33976.9
Girdi-11	0.180	41677.3	34196.6
Girdi-12	0.244	46548.1	35443.8
Girdi-13	0.261	48515.4	35676.8
Girdi-14	0.316	53395.8	36982.7
Girdi-15	0.447	67680.1	37171.3

Çizelge 4. İki metodun denklem (2)'ye göre karşılaştırılması



4.3.Yorumlar

İki yaklaşım doğrudan Pisagor bağıntısını kullanan ağırlık fonksiyonu ile test edildiğinde, önerilen yaklaşım diğer yaklaşımı göre biraz daha verimli rotalar bulmaktadır. Arazinin ortalama eğimi arttıkça (Özellikle 0.5'e yaklaşıkça) aradaki fark daha belirgin hale gelmektedir. Yaklaşımalar Pisagor bağıntısına ek olarak eğime bağlı ceza puanı da kullanan ağırlık fonksiyonu ile test edildiğinde, yine önerilen yaklaşım diğer yaklaşımı göre daha verimli rotalar bulmaktadır ancak aradaki fark bu sefer daha belirgindir. Arazinin ortalama eğimi arttırıldıkça aradaki fark ilk ağırlık fonksiyonu kullanıldığı zamankine göre çok daha belirgin hale gelmektedir. Özellikle ortalama eğim 0.5'e yaklaşırken, önerilen yaklaşımda toplam ağırlık yavaş bir artış göstermiştir, ancak diğer yaklaşımda toplam ağırlık neredeyse üstel bir biçimde artış göstermiştir.

Not: Test olarak denenen girdiler <http://www.ceng.metu.edu.tr/~e1631126/> adresinden bulunabilir.

5. SONUÇ

Makalede düzlemsel olmayan arazilerin insansız araçlarla verimli bir şekilde taranması için yeni bir metot önerilmiştir. Bu metot, temel olarak, kapsama ağacı yaklaşımında bulunan kenarlara birim ağırlık yerine eğime bağlı bir fonksiyona göre atanmış ağırlıkları kullanmaktadır. Testlerde önerilen metot kapsama ağacı metodu ile karşılaştırılmıştır. Genel olarak önerilen metot diğer metoda göre daha verimli sonuçlar verse de kenarlara eğimi daha fazla hesaba katmak için atanmış ağırlıklarda eğimin uzaklığa göre etkisi daha da artırıldığında aradaki fark daha da artmaktadır.

Düzlemsel yüzeylerden elde edilen herhangi bir kapsama ağacı aynı zamanda minimum kapsama ağacı olacağının önerilen yaklaşımı arada rotanın verimi açısından bir fark olmaz. Ancak yüzey düzlemsel değilse ortalama eğime bağlı olarak minimum kapsama ağacı herhangi bir kapsama ağacına göre daha verimli sonuçlar verir. Bu nedenle herhangi bir kapsama ağacının etrafı dolaşılmaktansa minimum kapsama ağacının etrafı dolaşılırsa, düzlemsel olmayan arazilerde, tarama için daha verimli rotalar elde edilmiş olur.

6. TEŞEKKÜRLER

Makalenin yazarları olarak ODTÜ-TSK MODSİMMER'e bu makaleye desteginden dolayı ve Doç. Dr. Veysi İşler'e yaptığı büyük katkılar ve yardımlardan dolayı teşekkürü borç biliriz.

7. KAYNAKÇA

- [1] Elfes, A. (1987), Sonar-based real-world mapping and navigation, *IEEE J. Robotics Autom.* 3, 249-265.
- [2] Gabriely, Y., Rimon, E. (2001), Spanning-tree based coverage of continuous areas by a mobile robot, *Ann. Math. Artif. Intell.*, 31(1-4):77-98.
- [3] Hert, S., Tiwari, S., Lumelsky, V. (1996), A terrain-covering algorithm for an AUV, *Autonom. Robots* 3, 91-119.
- [4] Choset, H. (2001), Coverage for robotics – a survey of recent results, *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 31:113-126.
- [5] VanderHeide, J., Rao, N. S. V. (1995), Terrain coverage of an unknown room by an autonomous mobile robot, *Technical report ORNL/TM-13117*, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN.
- [6] Hazon, N. (2005), Robust and efficient multi-robot coverage, Bar-Ilan University Department of Computer Science, Ramat-Gan, Israel.
- [7] Jones, P. J. (2008), Cooperative area surveillance strategies using multiple unmanned systems, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, ABD.
- [8] Zheng, X., Jain, S., Koenig, S., Kempe, D. (2005), Multi-robot forest coverage, *In Proc. IROS*.

**TORPIDO GÜDÜM METOTLARININ KARŞILAŞTIRILMASI VE
DURAĞAN / HAREKETLİ ENGELLERE KARŞI YÖRÜNGE
PLANINDA DEĞİŞİKLİKLER**

Hakki Murat Genç ^(a), Cevdet Okutan ^(b)

^(a) TÜBİTAK BİLGEM BTE, 41470, Gebze, KOCAELİ,
murat.genc@bte.tubitak.gov.tr

^(b) TÜBİTAK BİLGEM BTE, 41470, Gebze, KOCAELİ,
cevdet.okutan@bte.tubitak.gov.tr

ÖZ

Güdümlü füzeler üzerine literatürde birçok yayınmasına rağmen sulti torpidoları için oldukça sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Torpidonun angaje olunan hedefe ya da sonar temaslanma için uygun bir noktaya intikal ettirilmesine yönelik rota planlama işlemi atış kontrol sistemi tarafından gerçekleştirilen temel güdüm işlemidir. Bu çalışmada, literatürde en çok kullanılan metot olan sabit kerteriz güdümü (SKG) yanında havadan füzeler için kullanılan bazı güdüm metotlarının sulti eşlenikleri incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Bunlar, kerteriz takibi esaslı güdüm (KTEG) ve hız takibi esaslı güdüm (HTEG) metotlarıdır. Sunulan bu metotlar sadece bilinen yöntemlerin sulti silahları için uyarlanmış halleri olmanın ötesinde herhangi bir engel, dost birlik veya kasıtsız düşman birliklerin varlığında sakınma manevrası hesaplama özelliğine de sahiptirler. Bu sakınma manevrasının tamamlanmasının ardından seçilen yönteme ilişkin kural ve kısıtlar değerlendirilerek torpido yörüngesi güncellenir. Bu makalede, konuya ilişkin kısa bir literatür taraması verilmiş, bahsedilen güdüm metotlarının matematiksel altyapıları okuyucuya sunulmuş ve yörünge planlama çıktıları benzetimler yardımıyla sergilenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Güdüm metotları, torpido yörüngesi planlama, atış kontrol sistemi, sakınma manevrası

COMPARISON OF TORPEDO GUIDANCE SCHEMES AND MODIFICATIONS ON THE TRAJECTORY PLAN IN THE EXISTENCE OF STATIONARY / MOVING OBSTACLES

ABSTRACT

Torpedo trajectory planning deals with the prediction of future torpedo and target positions to generate a possible interception with the target. A guidance method, on the other hand, is the set of laws that are used to realize that trajectory plan. Although many researchers have conducted projects and published many search reports for guided missiles, there are quite a few of them for torpedoes or underwater missile systems in general. In this work besides the well known method of constant-bearing guidance, the underwater counterparts of the other commonly used guidance methods have been investigated and compared in simulation environment. Namely these methods are line of sight guidance, which is also known as beam rider guidance, and pursuit guidance. Also the presented path planning algorithms are not only the simple adaptations of that of the guided air missiles, but also they have the ability to evade any obstacle, allied force or unintended target either if they are moving or stationary. The guidance method prioritizes the evading option and alters the trajectory consequently. After this evading phase is completed, it optimizes the trajectory considering the rules and constraints imposed by the selected algorithm. In this paper, a literature survey is given, the basic mathematical background for the aforementioned guidance algorithms are derived and the results are illustrated through simulations.

Keywords: Guidance Methods, Torpedo Trajectory Planning, Weapon Control System, Evading Manoeuvre.

1. GİRİŞ

Denizaltıların taktik sahadaki etkinliklerinin temelinde sessiz çalışma koşullarına sahip olmaları yatar. Çıkabilecekleri sürat kademeleri, manevra kabiliyetleri ve envanterlerinde taşıdıkları silahlar çoğunlukla saldırı geliştirecekleri hedef unsurlarına göre daha sınırlıdır. Bu zayıf noktalarına rağmen denizaltılar, sessiz hareket edebilme özelliklerinin yardımıyla düşmanın yakınına fark edilmeden intikal edip torpido saldırısı gerçekleştirmek ya da casusluk görevi yapmak gibi taktiksel olarak çok önemli avantajlara sahiptir.

Bir denizaltı için silah ateşlemek (örn. torpido) yerini belli etmek ve avantajını kaybetmek anlamına gelmektedir. Bu durumda, bahsedilen hız ve manevra kabiliyeti kısıtlarından dolayı denizaltı için başarılı bir silah angajmanı gerçekleştirmek hayatı

öneme sahiptir. Bu nedenle vuruş olasılığını olabildiğince artırmak için güvenilir güdümlü iletişim ve sonar sistemleri yanında etkili güdümlü algoritmaları kullanılmalıdır.

Güdümlü algoritmalarının temel amacı torpidonun hedef ile buluşabilmesi için koşullara bağlı olarak en uygun yörünge planlamasının yapılmasıdır. İlerleyen bölümlerde, bu amaç doğrultusunda güdümlü algoritmasını seçmeye etki eden parametreler ve bunların güvenilirlik dereceleri incelenecaktır.

Sualtı güdümlü metotlarının incelenmesinin ötesinde yayının bir diğer ana katkısı, hareketli ya da durağan engellere karşı akıllı yörünge yenilemesi yöntemidir. Önerilen yöntem, angaje olunan hedef dışındaki tüm aktif saha unsurlarına, torpido yörünge üzerindeki diğer engellere ve müttefik birliklere karşı sakınma yapacak şekilde yörünge planını güncellemektedir. Sakınma algoritmasının yörünge üzerinde etkisi ilerleyen bölümlerde örneklerle açıklanacaktır.

Havadan güdümlü füzelerin ve sualtı otonom araçların güdümlüne yönelik çalışmalara literatürde sıkça rastlanmaktadır ([1-12]). Diğer taraftan torpido güdümlüne yönelik çok az referans çalışma vardır. Bunlar arasında en önemlerinden biri Inzartsev tarafından derlenen Underwater Vehicles kitabının bir bölümündür. Breivik ve Fossen bu kitabın 4. bölümünde güdümlü metotlarının kapsamlı bir analizini yapmışlardır [2]. Bunun dışında Naeem ve diğerlerinin 2003 yılında yayınladığı çalışmada [7] da torpido güdümlü hem yörünge planlama aşamasıyla hem de donanımsal iletişim karakteristikleriyle detaylı şekilde incelenmiştir.

Yayının takip eden kısmı 4'e ayrılmıştır. Takip eden bölümde güdümlü metotları özetlenmiştir. 3. Bölüm, yörünge hesaplarıyla bütünsel olarak çalışan sakınma eklentisini konu alır. 4. bölümde ise benzetimlerin yapıldığı ortam ve benzetim sonuçları verilmektedir. 5. bölüm çalışmanın sonuçlarına ayrılmıştır.

2. GÜDÜMLÜ TORPIDOLAR İÇİN YÖRÜNGE PLANLAMA

Torpido yörünge planlamasında ana amaç torpidonun hedeften temas alabilmesi için en uygun yere intikal ettirilebilmesidir. Bu amaca yönelik olarak üç güdümlü metodu incelenecaktır; karteriz takibi esaslı güdümlü, sabit karteriz güdümlü, hız takibi esaslı güdümlü. Her üç yöntem de sualtı torpidoları için daha önceden incelenmiş ve sonuçlar yayınlanmıştır [2, 7].

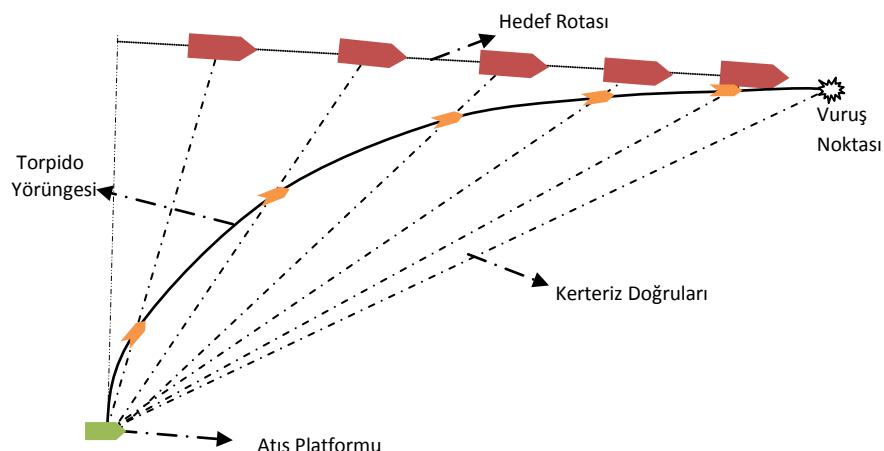
Bu yayında tüm yörünge planlama (güdümlü) emirleri otomatik planlama biriminin hesaplama sonuçları olarak kullanılmaktadır. Operatör tarafından verilebilecek olası komutlar/emirler göz önünde bulundurulmamaktadır.

Tipik bir sualtı torpidosu, kovanı terk etmesinden hedefle çarşısmasına kadar 3 fazdan geçer. Atış ve kovanı terk fazı, arama fazı ve içgüdümlü fazı. Bu çalışmanın konusu olan 3 güdümlü metodu arama fazında torpidoya iletilecek kumandalardan sorumludur. Bir

sonar teması sağlandığında arama fazı sonlanarak içgündüm fazı başlar ve otomatik güdüm sonlanır. Kovarı terk fazında ise torpidonun atış platformundan güvenli uzaklaşması için gerekli manevralar önceliklendirilerek torpidonun otomatik planlayıcıdan gelen yörlüğe komutlarını uygulaması engellenir. (bu çalışmada kullanılan torpido faz isimleri, sırası ve karakteristikleri bazı torpidolar için farklılık gösterebilir. Bunun literatürde de örnekleri mevcuttur [2].

2.1. Kerteriz Takibi Esash Güdüm

Bu yöntemde torpido, atış platformu ve hedef arasındaki görüş hattında kalmaya zorlanır. Torpidonun planlanan tüm hareketi boyunca anlık olarak atış platformunun hedef platformunu gördüğü kerteriz üzerinde tutulması esastır. Bu amaçla atış anından itibaren belirli aralıklarda gözlemlenecek kerterizler, hedef ve atış platformunun rota, sürat mesafe değerleri kullanılarak kestirilir. Yapılan bu kestirimler hedef ve atış platformu hareketlerindeki değişiklikler ve/veya torpidonun emredilen rotayı takip edememesi durumlarına karşı belirli aralıklarla güncellenir. Kerteriz takibi esaslı güdüm metodu Şekil 1'de sergilenmiştir.



Şekil 1. Kerteriz Takibi Esash Güdüm

2.2. Sabit Kerteriz Güdümü

Sabit kerteriz güdüm metodu, hedef ilerleme vektörü ile kesişen sabit torpido rotasının hesaplanması işlemidir. Kesişme noktası, azami yaklaşma noktası (ing. Closest point of approach, CPA) ya da vuruş noktası olarak adlandırılır. Sabit kerteriz güdümü, güdüm teli iletişim sorunlarından etkilenmemesi ve tel güdümü olmayan torpidolarda da kullanılabilmesi nedeniyle pratikte en çok kullanılan yöntemdir.

Hedef ve torpidonun hız vektörü kesişme anına kadar sabit kabul edildiğinden hedefin, torpidodan gözlenen kerterizi koşum boyunca sabit kalmaktadır. Yöntem ismini bu özellikten almaktadır (Şekil 2).

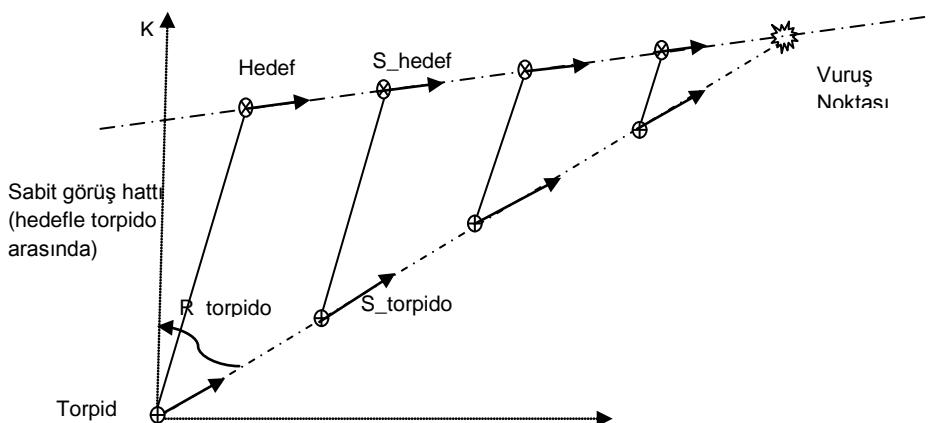
Torpidoyu kesişme noktasına yönlendirecek rota (1) denklemindeki gibi hesaplanabilir.

$$R_{_torpido} = K_{_hedef} + \text{asin}(S_{_hedef} * \sin(R_{_hedef} - K_{_hedef}) / S_{_torpido}) \quad (1)$$

Burada $R_{_torpido}$, sabit torpido rotası, $K_{_hedef}$, hedefin torpidoya göre kerterizi $S_{_hedef}$, hedef süratı, $R_{_hedef}$, hedef rotası, $S_{_torpido}$ ise torpido süratidir. Atış anından vuruş anına kadar geçecek süre (2) denklemi yardımıyla hesaplanabilir,

$$T_{vuruş} = \frac{M_{_hedef}}{S_{_torpido} * \cos(R_{_torpido} - K_{_hedef}) - S_{_hedef} * \cos(R_{_hedef} - K_{_hedef})} \quad (2)$$

(2) denkleminde, $M_{_hedef}$, torpido ile hedef arasındaki mesafedir.



Şekil 2. Sabit Kerteriz Gündümü

2.3. Hız Takibi Esaslı Gündüm

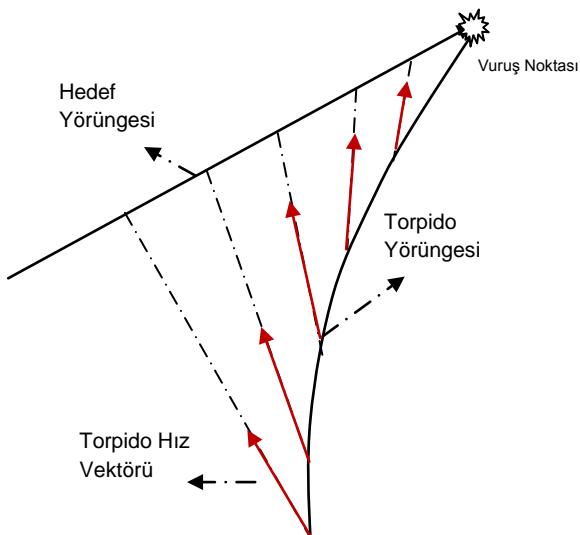
Bu yöntemin temel noktası torpido hız vektörünü torpido ile hedef arasındaki nişan hattında (ing. Line of sight (LOS)) tutmaktadır. Yöntem, Şekil 3'te sergilenmiştir.

Hız takibi esaslı gündüm yönteminde torpido hız vektörü görüş hattına hizalanmış durumdadır. Başka bir deyişle aralarında 0 derece açı oluşur. Torpido hız vektörü ile nişan hattı arasındaki açının 0'dan farklı ve hedef kerteriz değişim yönünde sabit bir değerde (önleme açısında, ing. lead angle) tutturulmaya çalışılması yöntemi de hız takibi esaslı gündüm olarak adlandırılabilir. Bu çalışmada öngörü açısının 0'dan farklı olduğu durumlara deðinilmeyecektir; ama genel işleyiş aynıdır.

2.4. Gündüm Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Atış kontrol sistemlerinde gündem yönteminin seçimi otomatik olarak yapılmamakta, operatörün seçimine bırakılmaktadır. Bu seçimi etkileyen birçok etken bulunur. Eğer operatör, atış kontrol sistemine birlesik çeşitli sensörleri ve veri işleyicileri aracılığıyla sentezlediği hedef pozisyonu ve kerteriz değişim yönünden eminse, sabit kerteriz gündemünü tercih edebilir. Bu sayede en kısa yoldan torpidoyu müsademe noktasına ulaştırarak torpido üzerindeki bataryanın en az kullanılmasını, dolayısıyla da olası hedef kaçırma durumlarında yeniden hücum için gerekli bataryanın harcanmamasını

sağlayabilir. Bunun yanında verilen güdüm rotası sürekli aynı olduğundan, tel kopması ve benzeri iletişim sorunlarında son verilen emre göre ilerleyen torpidonun, başlangıçta planlanan vuruş noktasına erişmesi beklenir.



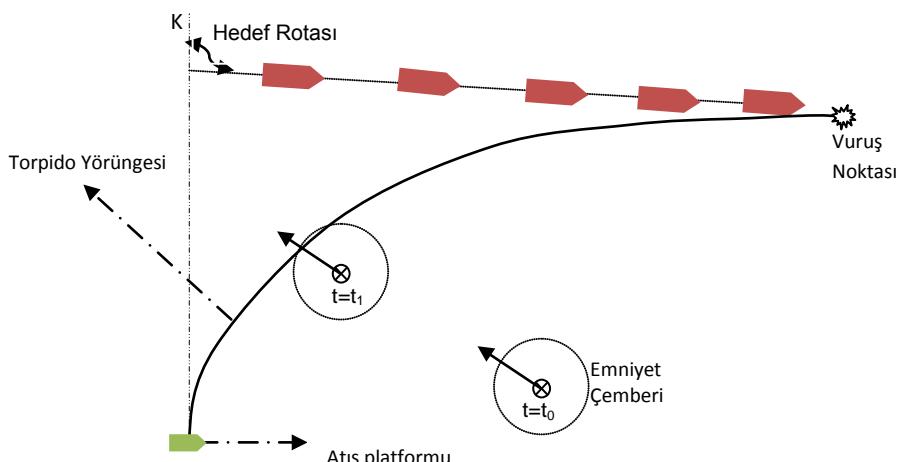
Şekil 3. Hız Takibi Esaslı Güdüm

Operatör ateş kontrol sistemine birleşik çeşitli sensörleri ve veri işleyicileri aracılığıyla sentezlediği hedef pozisyonu ve kerteriz değişim yönü bilgisine yeterince güvenmeyorsa kerteriz takibi esaslı güdüm yöntemini seçmek vuruş / temas olasılığını artıtabilir. Atış platformu üzerindeki pasif sensörler sayesinde kerteriz bilgisi (rota, sürat, mesafe gibi değerler henüz çözümlenmemiş olsa da) mevcut olacağından, torpido sürekli elde edilen kerteriz üzerinde tutulmaya çalışılır. Bu durumda arama (intikal) safhasının daha uzun süreceği ve müsademe anına kadar SKG yöntemine göre daha fazla batarya ve güdüm teli harcanacağı açıktır. Ayrıca sürekli nişan hattında tutulan torpido, ürettiği pervane gürültüsü ile hedeften alınacak kerterizlerin kısmen maskelenmesini ve dolayısıyla ateş kontrol platformunun elde ettiği verinin SNR (işaret – gürültü oranı, ing. signal to noise ratio) değerini düşürecegi öngörlülebilir.

Hız takibi esaslı güdüm yönteminde torpidonun iç sonar güdümü atış kontrol emirleri ile taklit edilir. Hedef ve torpido pozisyonları (torpido pozisyonu güdüm teli üzerinden geri döndürülen bilgiler kullanılarak elde edilir / kestirilir) bilindiğinde, torpidonun hedefi gördüğü kerteriz atış platformu üzerinden hesaplanabilir. Bu kerteriz değeri torpidoya güdüm rotası olarak gönderildiğinde 0 derece açılı hız takibi sağlanmış olur. Torpido hedefin yeterince yakınına gelince, nispi kerteriz (torpido heading ve torpido – hedef nişan hattı arasındaki açı) 0 ya da 0'a çok yakın bir değer olduğundan temas sağlama olasılığı en fazla olur. (Bu yargının nedeni genel olarak sonar sensörlerin torpidonun baş sektörlerinde yer almاسıdır.) Bununla birlikte torpido ve hedef pozisyonu yeterli güvenilirlikte değilse bu sayılan avantajlar dezavantaja dönüşebilir.

2.5. Engelden (Durağan / Hareketli) Kaçış Algoritması

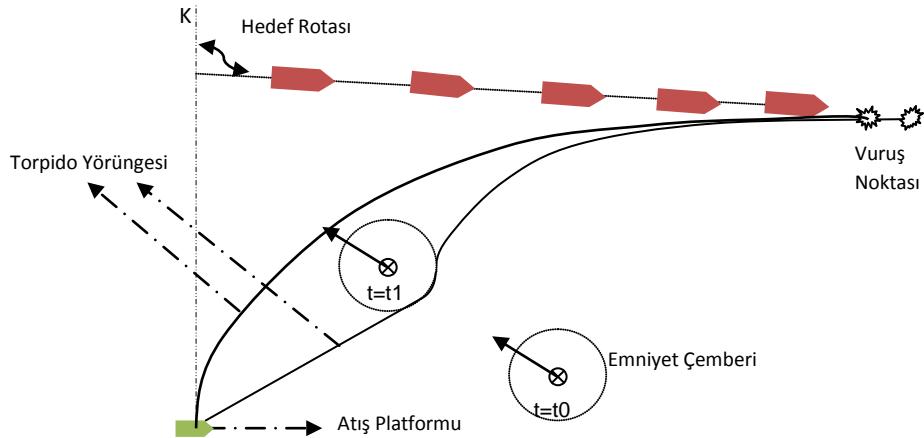
Bir hedefe angajman planlanırken torpido yörüngesi üzerinde engeller (hareketli/durağan) bulunabilir. Operatör tarafından, ateşlenen silahın bu engellerin belli bir mesafe yakınına girmemesi istenebilir. Engeller, yarıçaplarının tehlikeden boyutuna göre operatör tarafından belirlendiği dairesel tehlike alanları (emniyet çemberleri) olarak düşünülebilir. Özellikle hareketli bir engelin emniyet çemberi ile planlanan torpido yörüngesinin kesişme durumunun bir hesaplama yapılmadan anlaşılması oldukça zordur. Şekil 4'te görüldüğü üzere, $t=0$ anında yapılan hesaplama emniyet çemberi ile torpido yörüngesi kesişmemektedir. Fakat yörünge temel olarak torpidonun seyri boyunca bulunacağı tahmini pozisyonları verdiginden, bu seyir boyunca emniyet çemberinin bulunacağı pozisyonlar göz önüne alınarak hesaplama yapılmalıdır.



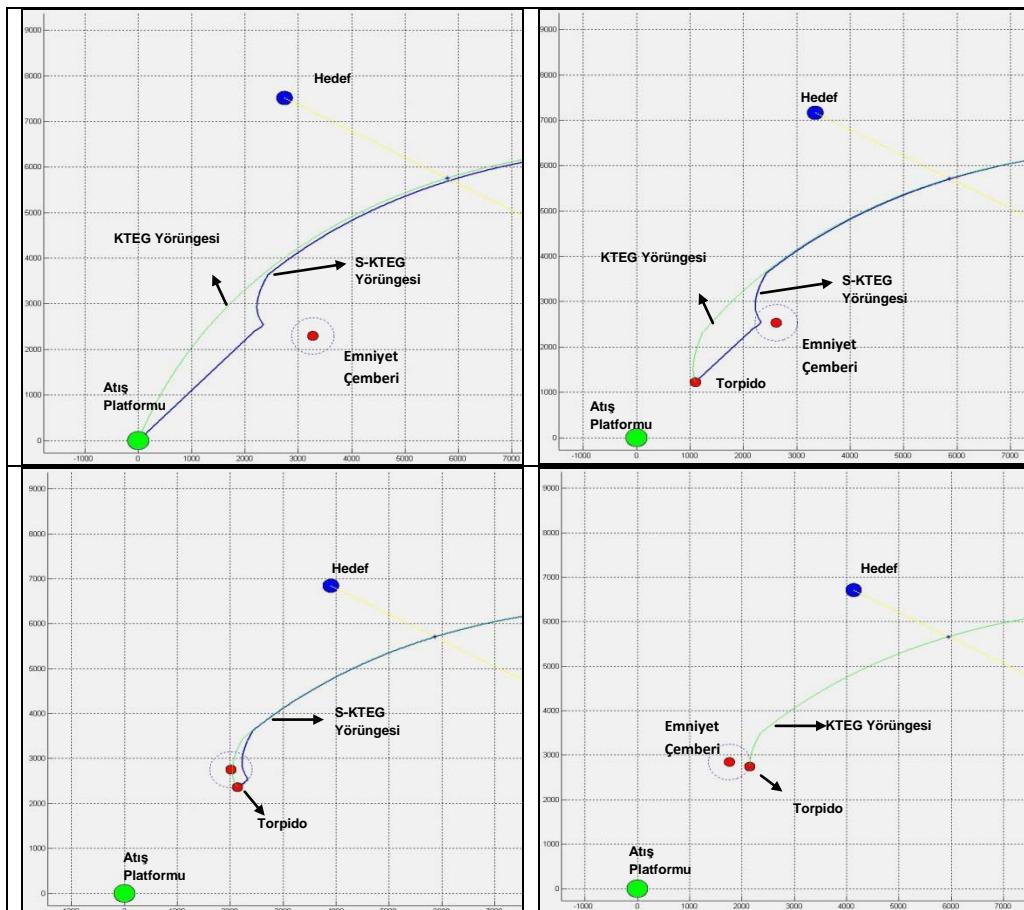
Şekil 4. Kerteriz Takibi Esaslı Gündüm Yöntemi için Emniyet Çemberi ile Torpido Yörüngesinin Kesişmesi

Yapılan hesaplamlar sonucunda torpido yörüngesi ile emniyet çemberi kesişiyorsa, engelden sakınma algoritması devreye girer. Sakınma algoritması engelin pozisyonunu, tehlike yarıçapını, rota ve süratini kullanarak güvenlik çemberine girmeyecek şekilde yapılması gereken en küçük rota manevrasına sahip yörüngeyi hesaplar. Çözümün temelinde hareketli / hareketsiz engelin durağan olarak kabul edilip nispi hız vektörünün torpido üzerinde hesaplandığı dönüştürülmüş uzayın kullanılması yatar. Bu durumda torpidonun hedef tarafından gözlemlenen bağıl hız vektörü ve torpidonun dönüştürülmüş uzaydaki nispi rotası (3) denkleminde verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} V_{TORPx,nispi} &= V_{TORPx} - V_{tx} & C_{0,nispi} &= \tan^{-1}\left(\frac{V_{TORPx,nispi}}{V_{TORPx,nispi}}\right) \\ V_{TORY,nispi} &= V_{TORY} - V_{ty} & (3) \end{aligned}$$



Şekil 5. Kerteriz Takibi Esaslı Gündüm Yöntemi için Sakınma Amaçlı Yörünge Planı (S-KTEG)



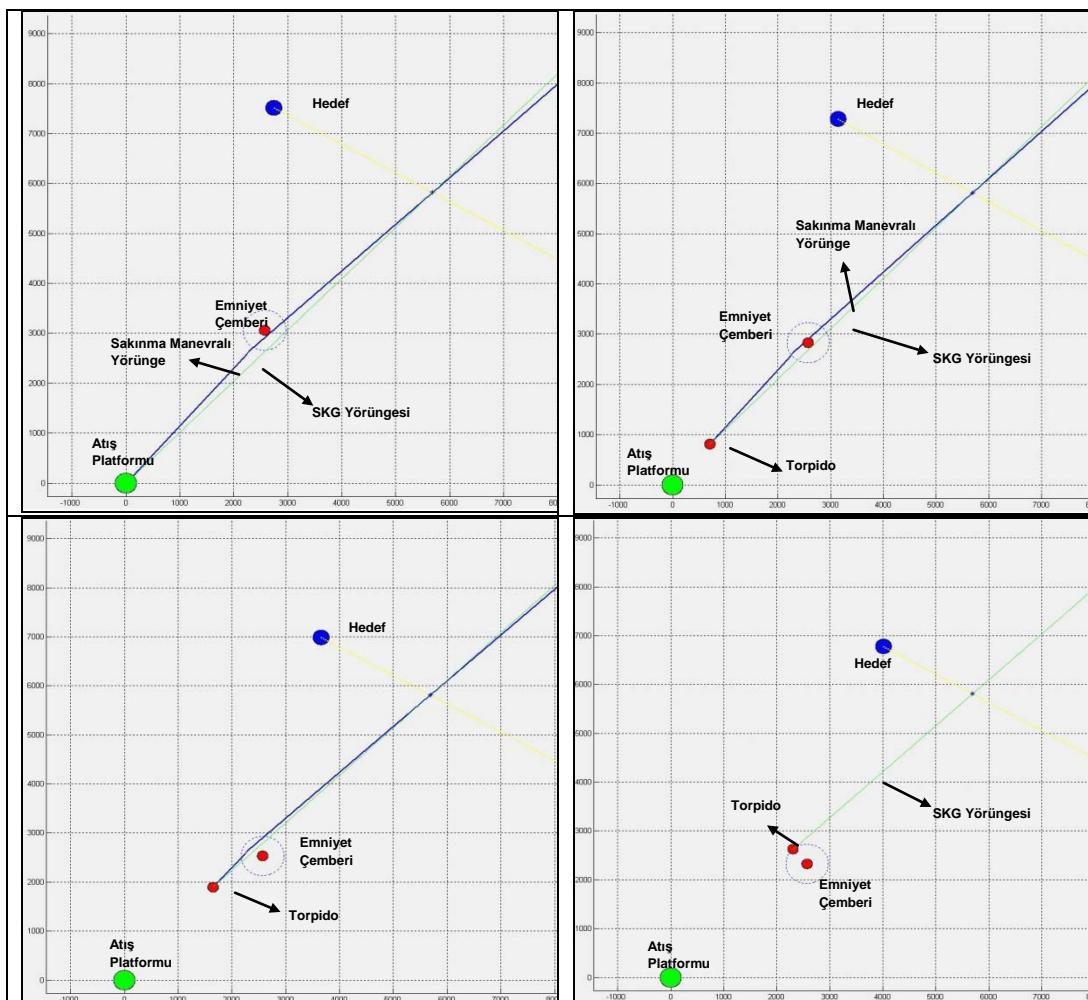
Şekil 6. Sakınma Manevralı Kerteriz Takibi Esaslı Gündüm (S-KTEG)

Engelin etrafındaki tehlike çemberinin durağan olduğu varsayımlıyla bu çemberde teget rota doğrularının denklemleri, torpidonun güncel pozisyonu ve çember üzerindeki iki teget noktası kullanılarak hesaplanabilir. Çember denklemi teget doğru denklemleri ile beraber çözüldüğünde iki olası teget noktası elde edilir. Bu adımda algoritma, torpido

fürin daha kısa yörunge planlamasını sağlayacak teget noktasını kullanarak atış platformu üzerindeki atış kontrol sisteminin torpidoya emredeceği rotayı hesaplar. (Şekil 5)

Şekil 6'da angaje olunan hedefe torpido intikalini engelleyen bir hareketli nesnenin olduğu sahada KTEG yöntemi ile yörunge planlaması sergilenmektedir. Şekil 6'nın sol üst köşesindeki anda atış öncesinde KTEG ve S-KTEG yöringe planlamaları belli periyotlarla anlık parametrelerle güncellenerek operatöre sunulmaktadır. Sağ üst köşedeki sergilenen benzetim anında, torpido, güvenlik çemberine teget olarak ilerlemekte ve alttaki şekillerde görüldüğü üzere teget noktasına geldikten sonra hedeften sakınma işlemi tamamlanıncaya kadar emniyet çemberi üzerinde hareketine devam etmektedir.

Şekil 6'da KTEG algoritması için yapılan sakınma manevrasının SKG yöntemine uygulanmış hali Şekil 7'de sergilenmektedir. HTEG algoritması için sakınma manevrası oldukça açık olduğundan verilmemiştir.



Şekil 7. Sakınma Manevralı Sabit Kerteriz Güdümü

3. SONUÇ

Bu çalışmada sualtı silahları için atış kontrol sisteminin benzetimi verilmiştir. Atış kontrol sistemi, torpido yörünge planlama amaçlı 3 temel algoritmaya sahiptir. Bu algoritmalar yörünge üzerinde torpidonun belli bir mesafeden fazla yaklaşmasını istemediğimiz engellerin varlığında sakınma amaçlı olarak güncellenmektedir.

Bir savaş sahasında hem düşmanlar hem de müttefik birlikler bulunur. Bunun yanında atış kontrol operatörü birçok hedefin içerisinde özel bir tanesine angajman planlamak isteyebilir. Bu kısıtlar veya tercihler daha akıllı yörünge planlama algoritmalarına ihtiyaç doğurur. Bu çalışmanın ana katkısı olarak 3 temel güdüm metodu için sakınma amaçlı manevra yapma kabiliyetinin eklenmesi önerilmektedir. Bu yeni önerilen yönteme göre kullanıcı tarafından tanımlanan güvenlik bölgelerinden sakınılması yörünge planlamasında önceliklendirilmektedir. Sakınma manevrası tamamlandığında yörünge planlama yöntemi seçilen güdüm metoduna göre devreye girer.

4. KAYNAKÇA

- [1] Blakelock,J. H. (1991), *Automatic Control of Aircraft and Missiles*, John Wiley & Sons, Inc.
- [2] Breivik, M. ve Fossen, T.I. (2009), *Guidance Laws for Autonomous Underwater Vehicles*, Book chapter of Underwater Vehicles edited by Alexander V. Inzartsev., In-Tech.
- [3] Breivik, M., Hovstein, V.E. ve Fossen, T.I. (2008), Straight-line target tracking for unmanned surface vehicles, *Modeling, Identification and Control*, Vol. 29, No. 4, 2008, pp. 131—149.
- [4] Garnell P., East D.J. (1977), *Guided Weapon Control Systems*, Pergamon Press, U.K.
- [5] Genç, H.M., Okutan, C. C. (2009), Modeling, control and simulation of a tactical navigation guidance integrated autonomous underwater vehicle (AUV), *Underwater Defence Technology Conference*, Europe.
- [6] Lin, C.F. (1991), *Modern Navigation, Guidance, and Control Processing*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- [7] Naeem, W., Sutton R., Ahmad, S. M., & Burns, R. S. (2003), A review of guidance laws applicable to unmanned underwater vehicles, *The Journal of Navigation*, 56, 15–29.
- [8] Naeem, W., Sutton R., Ahmad (2003), Pure pursuit guidance and model predictive control of an autonomous underwater vehicle for cable/pipeline tracking, *In: Proceedings of World Maritime Technology Conference*.

- [9] Narula, K., Garai, T, & Mukhopadhyay, S. (2005), An effective guidance scheme for passive tracking using a quantized bearing-only sensor, *IEEE Indicon Conference*, Chennai, India, 11-13.
- [10] Song, T. L., Um, T.Y. (1996), Practical Guidance for Homing Missiles With Bearings-OnlyMeasurements. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 32, no. 1.
- [11] Tan, C.S., Sutton, R., & Chudley, J. (2005), Quasi-random, manoeuvre-based motion planning algorithm for autonomous underwater vehicles. *Proceedings of the 16th IFAC WorldConference*, Prague.
- [12] Zhufeng S., Wenbing H., Mingyan X., Changyou X. (2008), Research on an optimized method for submarine, *International Conference on Computer Science and Software Engineering*.

BİR SUALTI ARACI İÇİN GÜRBÜZ KONTROLÇÜ TASARIMI

Fatih GERİDÖNMEZ ^(a), Prof. Nafiz ALEMDAROĞLU ^(b)

^(a) TÜBİTAK - SAGE, PK.16 06261 LALAHAN ANKARA,
fgerid@sage.tubitak.gov.tr

^(b) ODTÜ Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, 06531 ANKARA,
nafiz@metu.edu.tr

ÖZ

Bu makalede bir otonom sualtı aracı için gürbüz kontrolcü tasarımları anlatılmaktadır. NPS AUV II için verilmiş olan üç boyutlu uzaydaki dinamik davranışını tanımlayan özellikler kullanılarak sistemin dikey ve eksenel düzlemlerde MATLAB modelleri oluşturulmuştur. Bu modellerden dikey eksende hareketini temsil eden doğrusal model için gürbüz kontrolcü tasarımları ele alınmıştır. Öncelikle sistem modelindeki bilinmezliklerin neler olabileceği ve bu bilinmezliğin dikey eksen modelinde hangi parametreleri hangi oranda etkilediği hesaplanmıştır. Sonrasında bu parametrik bilinmezliği içeren ve içermeyen nominal model oluşturulmuştur. Her iki model için de multiplicative bilinmezlik modeli içeren gürbüz kontrolcü tasarılmıştır. Böylece parametrik bilinmezliği temsil eden multiplicative bilinmezlik ağırlık fonksiyonu olan ve olmayan iki model davranışları karşılaştırılmıştır. Sonrasında mu analizi ile sistem performansı değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: MATLAB, Simulink, C++, Gürbüz Kontrol

ABSTRACT

In this paper a robust controller design for an autonomous underwater vehicle (AUV) is presented. An existing AUV of NPS AUV II's dynamic properties given in 6 Degrees of Freedom (6DOF) are used throughout the modeling of depth and longitudinal plane dynamics. We have introduced the uncertainties on the axial location of the center of location and the dynamic stability derivative "Mqdot" (Moment generated with respect to rate of change of pitching motion) of the underwater vehicle. Those uncertainties are added to the model as parametric uncertainty and compared with nominal system response. We have also introduced a multiplicative uncertainty that reflects the parametric uncertainty and designed H-Infinity controller and then we compared the controlled closed loop system response with and without multiplicative uncertainty weighting function. Also μ - analysis is performed to determine the system performance.

Keywords: MATLAB, Simulink, C++, Robust Control

1. GİRİŞ

Bu çalışmada NPS AUV II [1], [2] sualtı aracına ait fiziksel özellikler ve dinamik katsayılar kullanılarak doğrusallaştırılmış dikey eksen modeli kullanılmıştır.

Sualtı aracının derinlik kontrolcüsü tasarımları için daha önceki çalışmalarda basamak giriş optimizasyonu (İng. Step Response Optimization) yöntemi kullanılmıştır [3]. Ayrıca eyletici (İng. Actuator) modeli kullanılmadan kontrolcü modülünden hesaplanan elevator açılarıfiltrelenerek kullanılmış ve modelde herhangi bir giriş uygulama (İng. Perturbation) gözönüne alınmadan nominal sistem kabul edilmiştir.

Aşağıda verilen başlıklar altında gerçekleştirilen çalışmalar ile derinlik kontrolcüsü gürbüz bir kontrolcü haline getirilmiştir.

1. Eyletici modeli
2. Parametrik belirsizliklerin tanımlanması.
3. Belirsizlik ağırlıklandırma fonksiyonu eklenmesi
4. H_{∞} sentezi
5. Nominal sistem davranışları ile giriş uygulanmış sistem davranışlarının ağırlıklandırılmış ve ağırlıklandırılmamış kontrolcü tasarımları ile karşılaştırılması
6. μ analizi ile sistemin gürbüz performansının incelenmesi

2. EYLETİCİ MODELİNİN EKLENMESİ

Gerçek sistem davranışına daha da yakın bir model oluşturmak amacıyla eyletici modeli eklenmiştir. Bu çalışma, seçilecek daha farklı eyletici modellerini de sistematik olarak gürbüz kontrolcü tasarımına uygulayabileceğinden gerçeği en çok yansitan eyletici sistemi seçimi daha sonra yapılacak çalışmalara bırakılmış ve genel olarak eyletici sistemlerini yansitan bir model seçilmiştir.

Seçilen eyletici modeli şu şekildedir:

```
% The actuator dynamics used in nominal model and perturbed system:  
s = tf('s');  
Act = 3/(s+2);
```

3. PARAMETRİK UNCERTAİNİTY'LERİN TANIMLANMASI

Derinlik modelinde kullanılan statik parametrelerden olan sualtı aracının kütle merkezinin eksenel düzlemdeki yerinde en fazla “10 cm lik bir hata payı olması durumunda genelleştirilmiş sistem modelindeki parametrelerde meydana gelecek yüzde

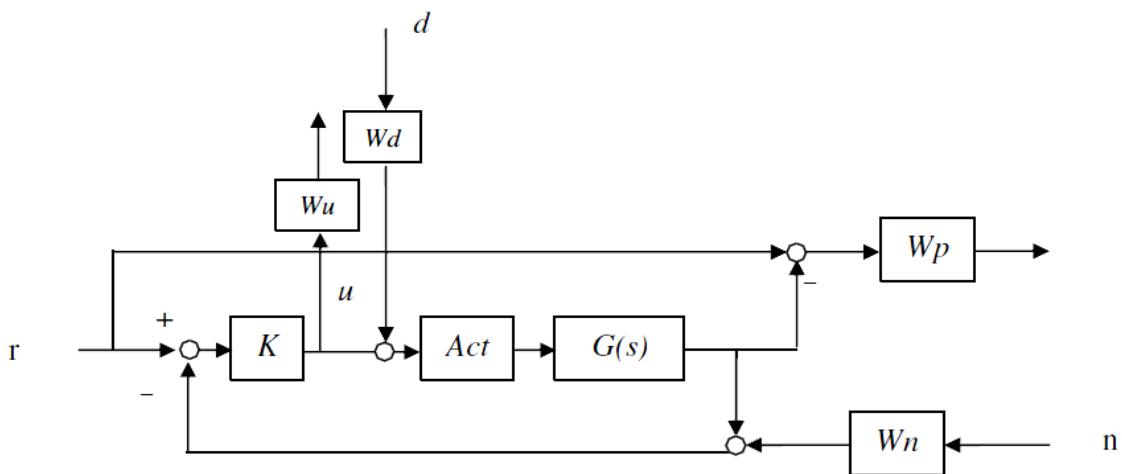
değişim hesaplanarak bu parametre üzerinde %40 lik bir parametrik uncertainty oluştuğu varsayılmıştır. Bu değerler sadece gürbüz kontrolcü tasarımlına yön verebilmek amacıyla seçilmiştir. Ayrıca Mqdot dinamik katsayı hesaplanırken yapılabilecek "%10" luk bir hatanın da sistem modeli üzerinde ilgili parametrede "%20" lik bir değişime yolaceği hesaplanmıştır.

Böylece genelleştirilmiş sistem modeline uygulancak parametrik uncertainty'ler belirlenmiştir. Bundan sonra yapılan işlem aşağıdaki şekilde gösterilen modelde parametrik belirsizlikleri ifade eden en iyi çarpım belirsizlik ağırlık fonksiyonu hesaplamasıdır. Derinlik modelindeki parametrik bilinmezlikleri en iyi ifade eden çarpım belirsizlik ağırlık fonksiyonunu (İng. Multiplicative Uncertainty Weighting Function) ağırlık fonksiyonunu elde etme yöntemi ilerideki çalışmalara bırakılmıştır.

Şekil 1'de derinlik modeline etki eden bozucu giriş (W_d) (İng. Disturbance), eyletici (Act), izleme hatası (W_p) (İng. Tracking error), gürültü (W_n) (İng. Noise) girdi ağırlık fonksiyonları gösterilmiştir. Belirsizlik ağırlıkları şu şekilde eklenmiştir:

```

Wu = 2;          % Weighting function for the actuator input
Wd = 1;          % Weighting function for the disturbance input
Wp = 1;          % Weighting function for the tracking error output
Wn = .01;        % Weighting function for the noise input
    
```



Şekil 1 Nominal model üzerindeki eyletici, bozucu giriş, takip hatası, ve gürültü girdi ağırlıkları gösterimi. K: Kontrolcü katsayıısı, G: Sistem transfer Fonksiyonu, r: Sistem Girdisi, u: Eyletici girdisi

MATLAB'ın sysic komutu yardımıyla kontrolcü tasarlanacak olan sistemin oluşturulması sağlanmıştır. Sysic ("System Interconnection") komutunun çalışabilmesi için öncelikle herbir modelin girdi ve çıktıları tanımlanmalıdır.

Sysic komutu kullanılmadan önce yapılması gereken işlemler şunlardır:

```
% inputs & outputs & names of each block:
```

```

systemnames = 'G Wu Wp Wd Wn Act'; inputvar = '[d;r;n;u]';
outputvar = '[Wp;Wu;r-G-Wn]';
% Input signals to each block:
input_to_G = '[Act]'; input_to_Act = '[u+Wd]';
input_to_Wd = '[d]';
input_to_Wp = '[r-G]';
input_to_Wn = '[n]';
input_to_Wu = '[u]';
% system interconnection:
P = sysic

```

Sistem oluşturulduktan sonra parametrik belirsizlikler modele şu şekilde eklenmiştir:

```

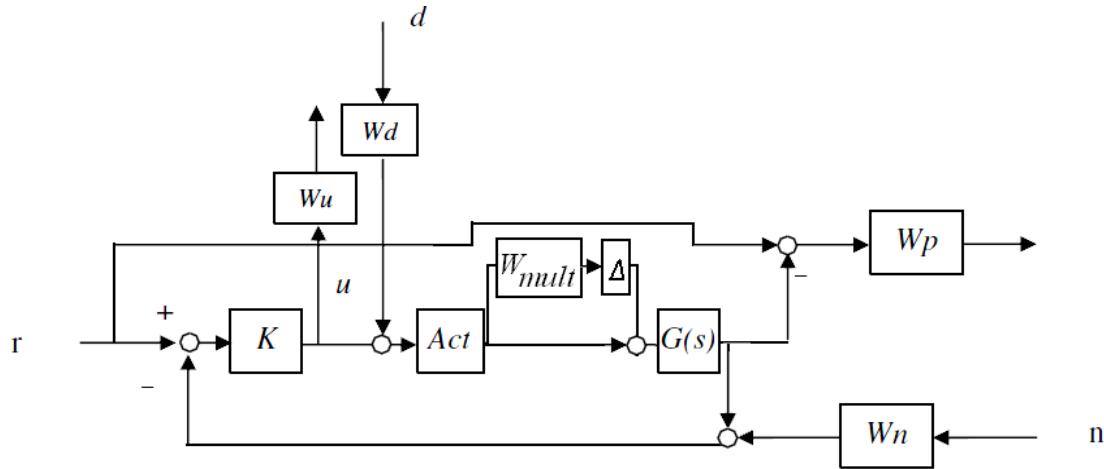
tfd=tf(G)
a = 0;
b = tfd.num{1}(4);
c = tfd.den{1}(1);
d = tfd.den{1}(2);
e = tfd.den{1}(3);
f = tfd.den{1}(4);
%nominal system:
G_T(1) = ((a*s + b)/(c*s^3 + d*s^2 + e*s + f))*Act;
%perturbed system:
G_T(2) = ((1 - 0.2)* b)/(c*s^3 + (1 - 0.4)*d*s^2 + e*s + f)*Act;
G_T(3) = ((1 - 0.2)* b)/(c*s^3 + (1 + 0.4)*d*s^2 + e*s + f)*Act;
G_T(4) = ((1 + 0.2)* b)/(c*s^3 + (1 - 0.4)*d*s^2 + e*s + f)*Act;
G_T(5) = ((1 + 0.2)* b)/(c*s^3 + (1 + 0.4)*d*s^2 + e*s + f)*Act;

```

Nominal model sualtı aracının derinlik modelini aynen yansıtırken, giriş uygulanmış model sualtı aracı ağırlık merkezi konum hatasının boyamasına eksen üzerindeki bileşenini temsil eden “d” parametresinde ve sualtı aracının dinamik türevlerinden “Mqdot” değerinin etkilediği “b” parametresindeki belirsizlikleri içermektedir. Böylece giriş uygulanmış model ile nominal modelin davranışlarının karşılaştırılması yapılabilecektir.

4. ÇARPIM AĞIRLIKLADIRMA FONKSİYONUNUN EKLENMESİ

Parametrik belirsizlikleri en iyi yansitan çarpım ağırlık fonksiyonu (Ing. Uncertainty Weight Function) kullanıldığından sistem davranışının nasıl değiştiğini incelemek amacıyla aşağıdaki şekilde gösterilen sistem oluşturulmuştur.



Şekil 2 Çarpım belirsizliği eklenmiş model

```
% Multiplicative uncertainty weight:
Wmult = tf([0 1],[0 0 1]);
% inputs & outputs & names of each block
systemnames = 'Wmult G Wu Wp Wd Wn Act';
inputvar = '[delta;d;r;n;u]';
outputvar = '[Wmult;Wp;Wu;r-G-Wn]';
% Input signals to each block:
% additional delta:
input_to_G = '[Act+delta]';
input_to_Act = '[u+Wd]';
input_to_Wd = '[d]';
input_to_Wp = '[r-G]';
input_to_Wn = '[n]';
input_to_Wu = '[u]';
input_to_Wmult = '[Act]';
% system interconnection:
P1 = sysic
```

5. H_∞ SENTEZİ

Bu bölümde hem çarpım ağırlık fonksiyonu eklenmiş hem de eklenmemiş olan genelleştirilmiş sistem modelleri için kontrolcülerin hesaplanması yöntemi verilmektedir.

Sistem interconnection ile elde edilen ayrı iki sistemin MATLAB'de verilen hinfsyn komutu kullanılarak kontrolcü katsayıları hesaplanmaktadır.

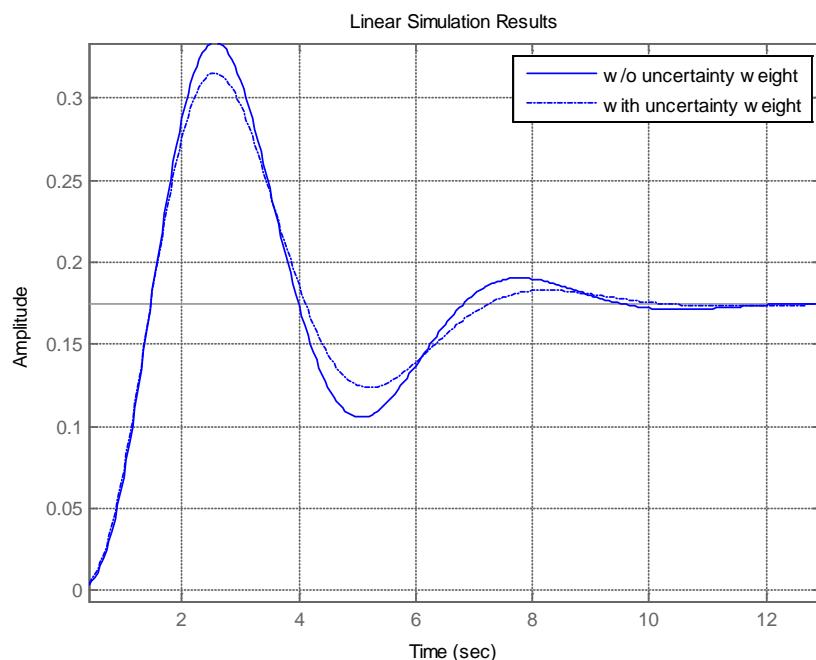
```
nmeas = 1; ncon = 1;
% H_infinity controller synthesis for w/o uncertainty weight:
[K, ghinf, gopt] = hinfsyn(P, nmeas, ncon)

% H_infinity controller synthesis for with uncertainty weight:
[K, ghinf, gopt] = hinfsyn(P1, nmeas, ncon)
```

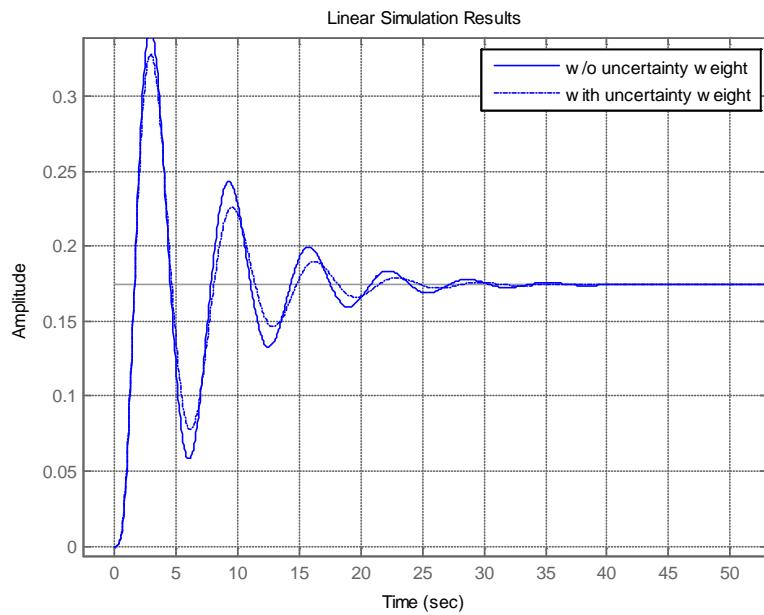
6. NOMİNAL SİSTEM DAVRANIŞI İLE GİRİŞ UYGULANMIS SİSTEM DAVRANIŞLARININ AĞIRLIKLANDIRILMIŞ VE AĞIRLIKLANDIRILMAMİŞ KONTROLÇÜ TASARIMLARINA GÖRE KARŞILAŞTIRILMASI

Bu bölümde, hesaplanan K and K_1 doğrusal ve zamana göre değişmeyen (Ing. Linear Time Invariant) kontrolcüler ile herbir sistemin kapalı döngü modeli oluşturularak çalıştırılmıştır. 10 derecelik bir elevator açısı komutu verildiğinde doğrusal sistem davranışları aynı grafikte çizdirilmiştir.

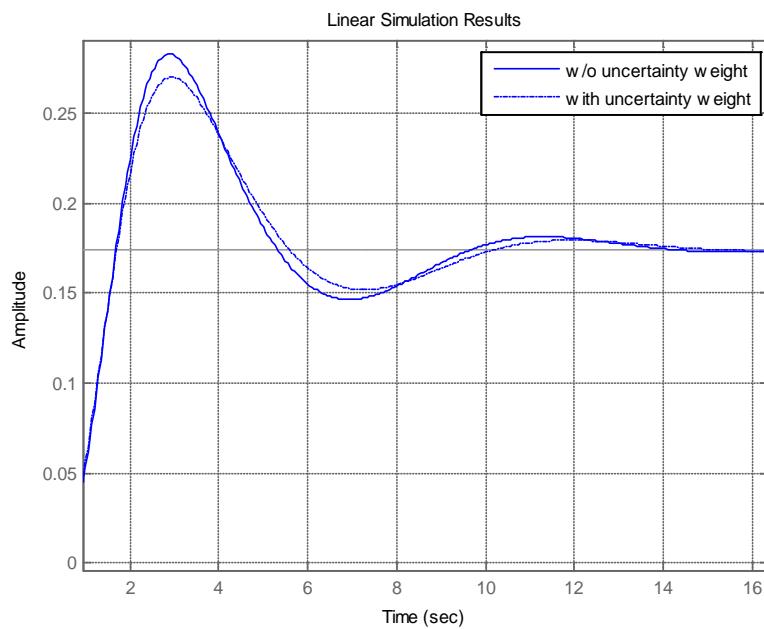
Çalışma sonuçları şu şekildedir:



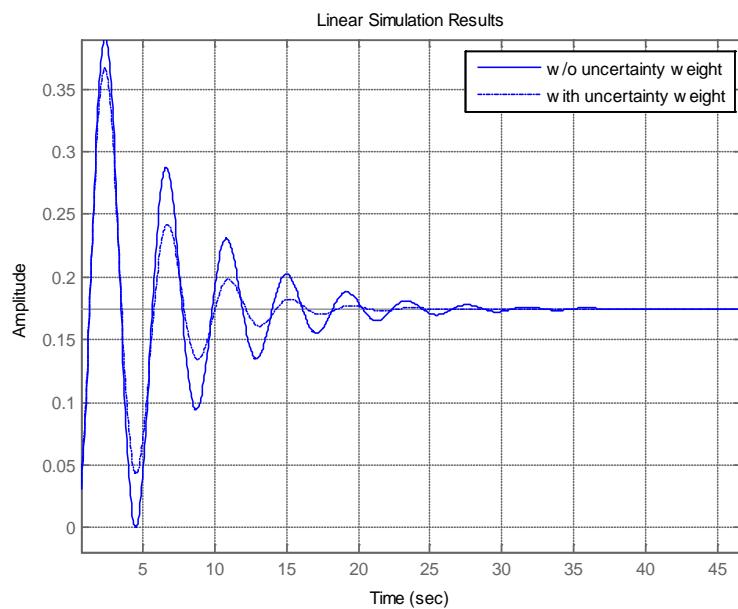
Şekil 3 Nominal sistem simülasyonu



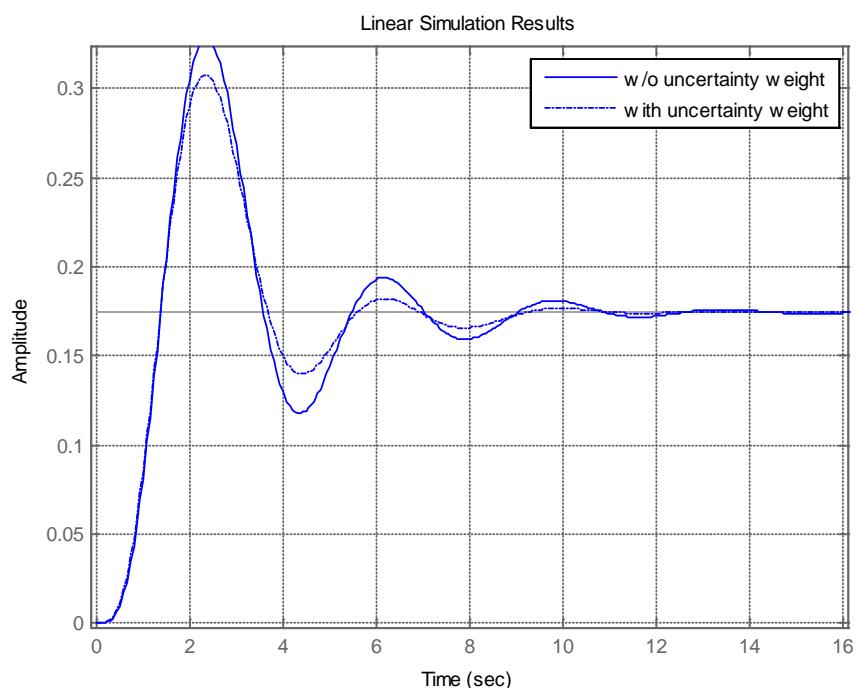
Şekil 4 Girdi uygulanmış sistem davranışları. $G = ((1 - 0.2)* b)/(c*s^3 + (1 - 0.4)*d*s^2 + e*s + f)*Act$



Şekil 5 Girdi uygulanmış sistem davranışları. $G = ((1 - 0.2)* b)/(c*s^3 + (1 + 0.4)*d*s^2 + e*s + f)*Act$



Şekil 6 Girdi uygulanmış sistem davranışları. $G = ((1 + 0.2)* b)/(c*s^3 + (1 - 0.4)*d*s^2 + e*s + f)*Act$



Şekil 7 Girdi uygulanmış sistem davranışları. $G = ((1 + 0.2)* b)/(c*s^3 + (1 + 0.4)*d*s^2 + e*s + f)*Act$

7. MU ANALİZİ

Sistem üzerinde mu analiz yapmak için öncelikle MATLAB'ın “lft” komutu ile genelleştirilmiş sistemin kontrolcü ile birlikte doğrusal kesir dönüşümü (Ing. linear fractional transformasyonun) elde etmek gerekir. Daha sonra uncertainty'i ifade eden blok yapısını tanımlamak gereklidir. Derinlik modeli için kullanılan blok modeli şu şekildedir:

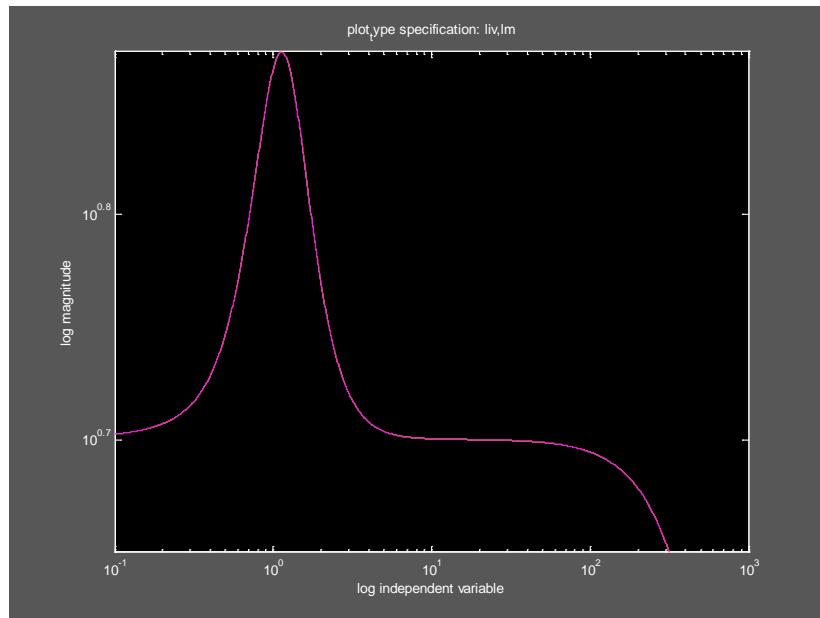
$$\begin{bmatrix} \Delta_{1 \times 1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \Delta & P \\ & 3 \times 2 \end{bmatrix}$$

Üstte yer alan 1×1 lik blok çarpım belirsizliği ile ifade edilen parametrik belirsizliği temsil etmektedir. Altta yer alan 3×2 'lik blok, sistem performansını azaltan girdi kanallarındaki belirsizliği temsil etmektedir. Böylece blok şu şekilde ifade edilmiştir:

```
blk = [1 1; 3 2];
```

Blok yapısı tanımlandıktan sonra frekans vektörü tanımlanarak mu analizine şu şekilde yapılmaktadır:

```
%% mu analysis:
M = lft(P1,K);
inputvar = '[delta;d;r;n;u]';
outputvar = '[Wmult;Wp;Wu;r-G-Wn]';
blk = [1 1; 3 2];
w = logspace(-1,2.5,1000);
sys = pck(M.a,M.b,M.c,M.d);
Mw = frsp(sys,w);
[bnnds,rowd,sens,rowp,rowg] = mu(Mw,blk);
figure();
vplot('liv,lm', bnnds)
xlabel('log independent variable')
ylabel('log magnitude')
title('plot_type specification: liv,lm')
```



Şekil 8 Yapısal tekil değer (Ing. Structured singular value) grafiği

Şekil 8'e göre 10 rad/s lik frekanslardan sonra sistemin tepkisi azalmaktadır.

8. SONUÇ

Karşılaştırmalı sonuçlara göre sisteme parametrik belirsizlik durumlarını temsil eden belirsizlik ağırlığı eklemek referans girişten aşmaları azaltıcı etkide bulunmaktadır. Buna rağmen sistemin bilinmezliklerini dengeleyici bir kontrolcü tasarımları kullanılması gerekmektedir. Nominal sistem performansı belirsizlik ağırlığı eklenmeden bile yeterli seviyede kalmasına rağmen bu durum her zaman gözlenmeyebilir.

Bu çalışma kapsamında elde edilen gürbüz kontrolcü yöntemi sistemin gerçek eyleticili modeli ve muhtemel belirsizliklerinin belirlenmesinin ardından tekrar çalıştırılarak gürbüz kontrolcü tasarlanabilir.

9. KAYNAKÇA

- [1] Thor I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley, Norway, 1994
- [2] Donald. P. Brutzman, *A Virtual World for an Autonomous Underwater Vehicle*, Naval Post Graduate School, Monterey, California, December 1994
- [3] “Bir Sualtı Aracının Hareketinin Simülasyonu”, Fatih Geridönmez, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, 2007

BİR DENİZALTI MATEMATİKSEL MODEL UYGULAMASI

Umut Özen ^(a)

(a) Meteksan Savunma Sanayi A.Ş., Beytepe Köyü Yolu No.3 Bilkent-Ankara

uozen@meteksansavunma.com.tr

ÖZ

Bu çalışmada, denizaltının sualtındaki hareket ve manevralarını simüle etmek amacıyla oluşturulan örnek bir matematiksel model uygulaması anlatılmıştır.

Bu kapsamda; matematiksel model, literatürde bilinen, doğrusal olmayan altı serbestlik derecesindeki bir diferansiyel denklem takımı kullanılarak oluşturulmuştur. Denizaltıya etkiyen hidrostatik (kaldırma ve ağırlık), hidrodinamik (sönümleme ve eksü kütle etkisi), tahrik (itki) ve çevresel kuvvet ve momentler modellenerek denizaltı dinamik modeline eklenmiştir.

Bu hareket modelinin başarımı, REMUS 100 tipi bir insansız sualtı aracının parametreleri kullanılarak, Matlab Simulink ortamında çeşitli senaryolar dâhilinde gerçekleştirilen simülasyonlarla sınanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Denizaltı, Matematiksel Model, Matlab, Simulink, Simülasyon

A SUBMARINE MATHEMATICAL MODEL APPLICATION

ABSTRACT

In this paper, a mathematical model application that is used to simulate motion and maneuver of a submarine is presented.

The mathematical model is constructed on a nonlinear 6DOF general motion equations set which is defined in the technical literature. Expressions for hydrostatic (buoyancy and gravity), hydrodynamic (drag and added mass), propulsion and environmental forces and moments are derived and used in the submarine mathematical model.

Several simulations are executed in Matlab Simulink to verify accuracy of the model that is used. The parameters of a REMUS 100 type Autonomous Underwater Vehicle are used in the simulations.

Keywords: Mathematical Model, Matlab, Submarine, Simulink, Simulation

1. GİRİŞ

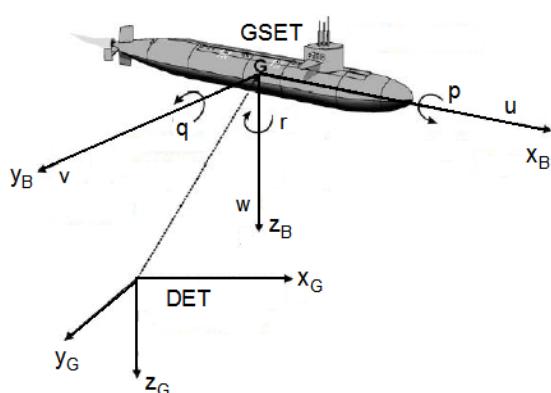
Üç serbestlik derecesine sahip su üstü gemilerinden farklı olarak sualtı araçlarının manevraları altı serbestlik derecesinde olup; üç düzlem üzerinde ve bunların etrafında tanımlıdır. Denizaltının su üstünde ve sualtıda hareket ve manevraları, doğrusal olmayan altı serbestlik derecesindeki bir diferansiyel denklem takımı kullanılarak modellenir.

Literatürde, sualtı araçlarının hareketinin modellenmesini konu edinen çok sayıda çalışma mevcuttur [1] - [7]. Bu çalışmaların ortak özelliği, sualtı aracını hacmi ve kütlesi değişmeyen katı bir cisim olarak olarak modellemeleri ve bunun neticesinde araca ait hidrodinamik katsayı ve türevlerin de sabit olarak alınmasıdır. İnsansız, belirli bir hedef ya da görev için oluşturulan sualtı araçları için bu geçerli bir yaklaşımdır. Oysa ki, kütlesi ve hacmi sürekli olarak değiŞebilen bir araç olan denizaltı için bu modelin çok doğru sonuçlar vermeyeceği aşikardır. Bu bildiri kapsamında anlatılan çalışmada denizaltı, kütlesi, ağırlık merkezi, hacmi ve sephiye merkezi değiŞebilen bir şekilde modellenmiştir. Bu kapsamında denizaltı hareket modelinin temel bileşenleri verilmiş ve bu bileşenlerin elde edilmesi için yapılan çalışmalar anlatılmıştır.

2. DENİZALTI MATEMATİKSEL MODELİ

Bir sualtı aracının herhangi bir “t” anındaki manevrası; pozisyon, yönelim ile açısal ve doğrusal hızlar ile tanımlanır.

Sualtı aracının 6 serbestlik dereceli hareketinin tanımlanabilmesi için iki eksen takımının kullanılmasına ihtiyaç duyulur. Bunlar, Dünya Eksen Takımı (DET) (x_G, y_G, z_G) ile; cisimle hareket eden ve orijini cismin ağırlık merkezinde olan Gövde Sabitli Eksen Takımı (GSET) (x_B, y_B, z_B)'dır. Bu iki eksen takımı Şekil 1'de gösterilmektedir. [1],[3]



Şekil 1. Koordinat sistemi

Dünyanın kendi etrafındaki dönüş hareketinin denizaltı aracına etkisini ihmali edersek DET, ataletsel eksen takımı olarak kullanılabilir. DET, dünya üzerinde sabitlenmiş eksen takımıdır. x-ekseni kuzey, y-ekseni doğu ve z- eksenin de dünya yüzeyinden aşağıya doğrudur. GSET, sualtı aracına sabitlenmiştir ve sualtı aracıyla birlikte hareket eder.

Sualtı aracının kendi eksenleri boyunca tanımlı hareketi; Boyuna Öteleme, Yanal Öteleme ve Dalıp Çıkma olarak isimlendirilir. Aşağıdaki tabloda verilen doğrusal ve açısal hızlar ile kuvvet ve momentler GSET üzerinde tanımlıdır. Konum ve Euler Açıları ise DET üzerinde tanımlıdır.

Bu çalışmada kullanılan SNAME notasyonu Çizelge 1'de gösterilmiştir. [1]

Çizelge 1. SNAME notasyonu

Serbestlik Derecesi	Tanım	Eksen	Kuvvet ve Momentler	Doğrusal ve Açışal Hız	Konum ve Euler Açıları
1	Boyuna Öteleme	x	X	u	x
2	Yanal Öteleme	y	Y	v	y
3	Dalıp Çıkma	z	Z	w	z
4	Yalpa	x	K	p	ϕ
5	Yunuslama	y	M	q	θ
6	Sapma	z	N	r	ψ

2.1. Kinematik denklemler

Aşağıda verilen denklemlerden ilk üçü denizaltının kendi eksenleri boyuncaki hareketini (sırasıyla boyuna öteleme, yanal öteleme, dalıp çıkma) tanımlarken; son üç denklem sualtı aracının kendi eksenleri etrafındaki hareketini (sırasıyla yalpa, yunuslama, sapma) tanımlar. [1]

$$m \left[\dot{u} + wq - vr - x_g (q^2 + r^2) + y_g (-\dot{r} + pq) + z_g (\dot{q} + pr) \right] = \sum X \quad (1)$$

$$m \left[\dot{v} + ru - pw + x_g (\dot{r} + pq) - y_g (r^2 + p^2) + z_g (rq - \dot{p}) \right] = \sum Y \quad (2)$$

$$m \left[\dot{w} + pv - qu + x_g (rp - \dot{q}) + y_g (rq + \dot{p}) - z_g (q^2 + p^2) \right] = \sum Z \quad (3)$$

$$\begin{aligned} I_x \dot{p} + (I_z - I_y) qr - (\dot{r} + pq) I_{xz} + (r^2 - q^2) I_{yz} + (pr - \dot{q}) I_{xy} \\ + m \left[y_g (\dot{w} - uq + vp) - z_g (\dot{v} - wp + ur) \right] = \sum K \end{aligned} \quad (4)$$

$$I_y \dot{q} + (I_x - I_z) rp - (\dot{p} + qr) I_{xy} + (p^2 - r^2) I_{zx} + (qp - \dot{r}) I_{yz} + m [z_g (\dot{u} - vr + wq) - x_g (\dot{w} - uq + vp)] = \sum M \quad (5)$$

$$I_z \dot{r} + (I_y - I_x) pq - (\dot{q} + rp) I_{yz} + (q^2 - p^2) I_{xy} + (rq - \dot{p}) I_{zx} + m [x_g (\dot{v} - wp + ur) - y_g (\dot{u} - vr + wq)] = \sum N \quad (6)$$

Burada,

m : denizaltı toplam kütlesi,

$I_x, I_y, I_z, I_{xy}, I_{xz}, I_{yz}, I_{zx}$: eylemsizlik momentlerini simgelemektedir.

2.2. Kinetik denklemler

Denizaltının hareketine etkiyen, hidrostatik, hidrodinamik, tahrik (İtki) ve çevresel kuvvet ve momentleri tanımlayan denklem kümesidir. Bu denklemlerin en temel hali aşağıda verilmiştir [2]. Detay denklemler ve katsayı/türevlere ait denklemler bu bildiride sunulmamaktadır ancak literatürde tanımlıdır.[1]-[7]

$$\sum X = -(W - B) \sin\theta + X_{u|u}|u|u + X_{\dot{u}}u + Z_{\dot{w}}wq + Z_{\dot{q}}q^2 - Y_{\dot{v}}vr - Y_{\dot{r}}r^2 + X_P \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sum Y = & (W - B) \cos\theta \sin\phi + Y_{v|v}|v|v + Y_{r|r}|r|r + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} \\ & - Z_{\dot{w}}wp - Z_{\dot{q}}qp + Y_{ur}ur + Y_{uv}uv + Y_{uu}\delta_s u^2 \delta_r \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sum Z = & (W - B) \cos\theta \cos\phi + Z_{w|w}|w|w + Z_{q|q}|q|q + Z_{\dot{w}}\dot{w} + Z_{\dot{q}}\dot{q} \\ & + Y_{\dot{v}}vp + Y_{\dot{r}}rp + Z_{uq}uq + Y_{uw}uw + Y_{uu}\delta_s u^2 \delta_s \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \sum K = & (y_g W - y_b B) \cos\theta \cos\phi - (z_g W - z_b B) \cos\theta \sin\phi + K_{p|p}|p|p + K_{\dot{p}}\dot{p} \\ & - (Y_{\dot{v}} - Z_{\dot{w}})vw + (Y_{\dot{r}} + Z_{\dot{q}})vq - (Y_{\dot{r}} + Z_{\dot{q}})wr - (M_{\dot{q}} - N_{\dot{r}})qr + K_P \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \sum M = & - (z_g W - z_b B) \sin\theta - (x_g W - x_b B) \cos\theta \cos\phi + M_{w|w}|w|w + M_{q|q}|q|q \\ & + Z_{\dot{q}}\dot{w} + M_{\dot{q}}\dot{q} + M_{uq}u - qY_{\dot{r}}vp + M_{uw}u - w(K_{\dot{p}} - N_{\dot{r}})rp + M_{uu}\delta_s u^2 \delta_s \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \sum N = & - (x_g W - x_b B) \cos\theta \sin\phi + (y_g W - y_b B) \sin\theta + N_{v|v}|v|v + N_{r|r}|r|r \\ & + Y_{\dot{r}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_{uv}uv + N_{ur}ur + Z_{\dot{q}}wp - (K_{\dot{p}} - M_{\dot{q}})pq + N_{uu}\delta_s u^2 \delta_r \end{aligned} \quad (12)$$

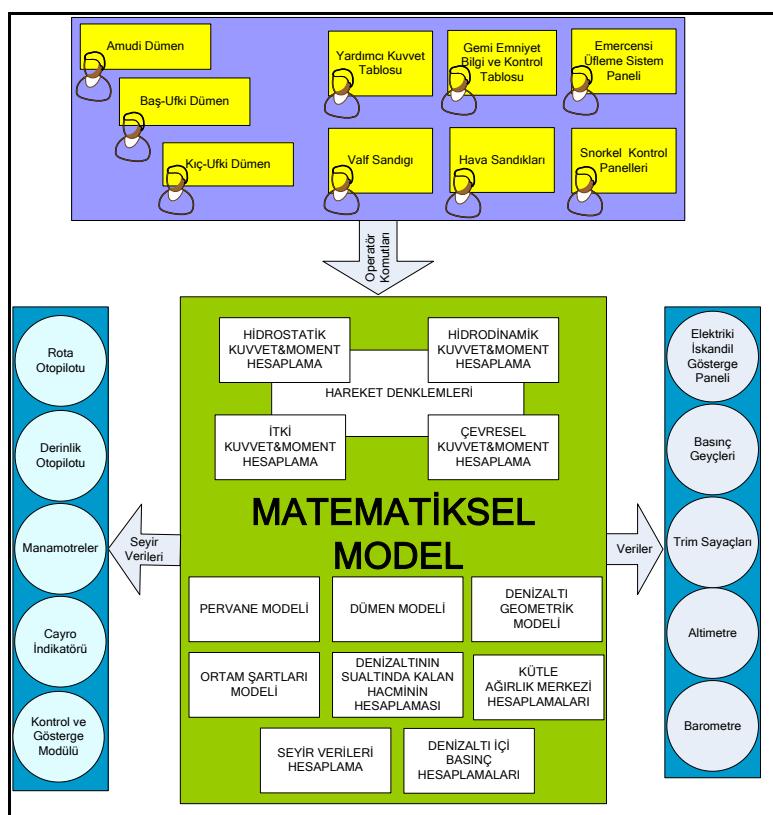
Burada; W :Ağırlık, B :Sephiye kuvveti, δ_r : Amudi dümen açısı, δ_s :Ufki dümen açısıdır. Denklemlerde geri kalan değişkenler ise hidrodinamik türev ve katsayılardır.

3. SİMÜLASYON MODELİ

Simülasyon modeli, pervane dönüş hızı, amudi dümen açısı, baş ve kış uftki dümen açısı ve sarnıç muhteviyatını operatör girdisi olarak almakta ve senaryoda tanımlı ortam şartlarına göre denizaltının üç eksen üzerindeki ilerleme hareketi (öteleme, yan öteleme, dalıp çıkma) ile bu eksenler etrafındaki dönüş hareketleri de (yalpa, baş-kış vurma ve savrulma) dâhil olmak üzere, toplam altı eksenli hareket serbestîsine sahip olacak şekilde hesaplama yapmaktadır.

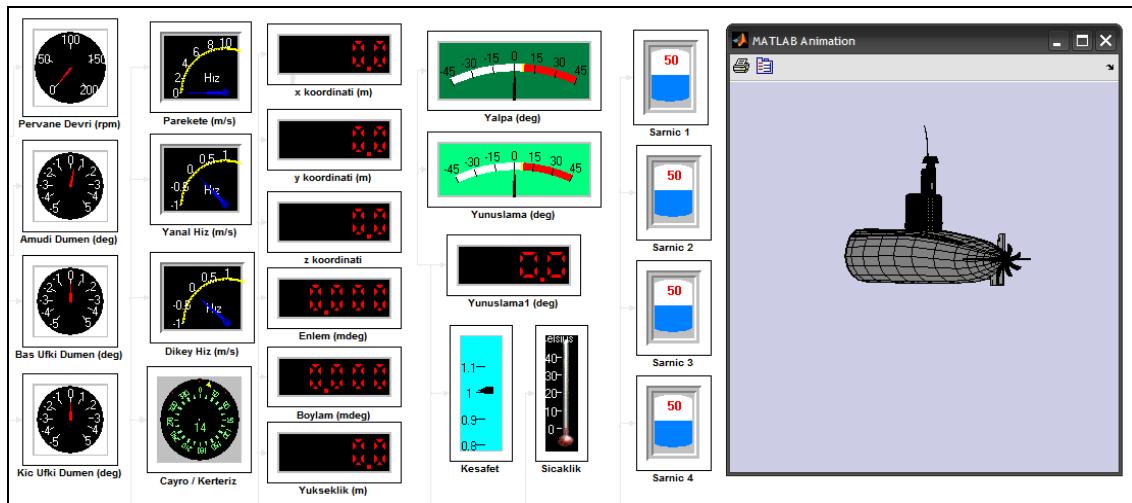
Ayrıca modern bir denizaltının manevra dairesinde bulunan göstergeleri beslemek üzere gerekli bütün seyir verileri (umk, rota, kerteriz, sürat, arzani ve tulani meyil vb.) modelin çıktısı olarak üretilmektedir. Elde edilen veriler dalış kabini içerisindeki göstergeleri sürmek amacıyla sürekli olarak ilgili modüllere beslenmektedir.

Simülasyon yapısı Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Simülasyon yapısı

Şekil 3'te görülen görsel animasyon modülünde simülasyon koşarken, eğitmenin denizaltının ve denizaltı manevra dairesinde bulunan göstergelerin görsel olarak takip etmesi sağlanmaktadır.



Şekil 3. Görsel animasyon modülü

3.1. Ortam şartlarının modellenmesi

Simülasyon modelinde dalgı, akıntı, deniz suyu yoğunluğu ve deniz suyu sıcaklığı gibi ortam şartları modellenmiştir. Çevresel kuvvet ve momentlerin hesaplanması sırasında kullanılan eşitlikler, [1] numaralı kaynakta mevcuttur.

Farklı yoğunluk tabakaları arasında geçiş yapan denizaltı üzerine etki edecek sephiye kuvvetleri hesaplanmakta ve ortaya çıkacak kuvvet/momentlere bağlı olarak denizaltının tabakalar arasındaki geçisi gerçeğe uygun şekilde simüle edilmektedir.

3.2. Denizaltı ağırlığının modellenmesi

Denizaltının mukavim teknesi ile üzerinde bulunan sistemler, matematiksel modellemede noktasal sabit bir ağırlık olarak tanımlanmıştır.

Buna ek olarak denizaltının değişebilir ağırlıkları da modellenmiştir. Bunlar, sintineler sarnıçlar ve kovanlardaki değişebilir ağırlıklar ile şnorkel direğinin dreyn edilmesi ile denizaltı dâhiline alınan suyun ağırlığından oluşmaktadır.

Ağırlık değişimleri gerçek şartlardaki değişim hızlarına uygun olarak modellenmiştir.

3.3. Denizaltının sualtıda kalan hacminin modellenmesi

Denizaltının sualtıda kalan hacminin değişebilir kısımları (sarnıçların hacmi, dizel egzost devrelerinin hacmi, şnorkel direğinin pozisyonuna bağlı olarak artan ya da azalan hacim, seyir/hüküm periskoplarının pozisyonuna bağlı olarak artan ya da azalan hacim, derinliğe bağlı olarak değişen basının tekne hacmine etkisi) hesaplanmakta ve simülasyona dâhil edilmektedir.

3.4. Tahrik kuvvetinin modellenmesi

Pervanenin itme etkisi; pervanenin devir hızı, bulunulan ortamdaki deniz suyu yoğunluğu, bulunulan derinlik ve ortam şartlarının modellenmesi sonucu hesaplanan nispi sürate bağlı olarak simülasyona dâhil edilmektedir.

3.5. Hidrodinamik kuvvetlerin modellenmesi

Denizaltı kontrol yüzeylerinin (amudi dümen, baş ufki ve kış ufki dümenler) geometrik özelliklerine, açısal değerlerine, direnç ve kaldırma katsayılarına, kontrol yüzeylerine, hücum açısına, ortam koşullarına bağlı olarak oluşan hidrodinamik kuvvet ve momentler hesaplanarak simülasyona dâhil edilmektedir.

Ayrıca denizaltı sürülebilir direklerinin derinlik ve sürülme yüksekliğine bağlı olarak yaratacağı etkiler hidrodinamik hesaplamalarda dikkate alınmaktadır.

3.5.1. Hidrodinamik katsayıların belirlenmesi

Hidrodinamik kuvvet ve momentlerin hesaplanması için hidrodinamik türev/katsayıların yüksek doğrulukta belirlenmesi çok önemlidir. Bu hidrodinamik türev/katsayılar tamamıyla denizaltıların geometrik özellikleri, dizayn kriterleri ve denizaltıının anlık durumu (kütle, hacim, ağırlık merkezi, sephiye merkezi) bağlıdır. Denizaltıının anlık durumunda meydana gelen değişikliklere bağlı olarak hidrodinamik türev ve katsayılar çeşitli kaynaklarda verilen hesaplama yöntemleri kullanılarak sürekli güncellenmektedir. [1], [4], [5]

4. MATEMATİKSEL MODELİN DOĞRULANMASI

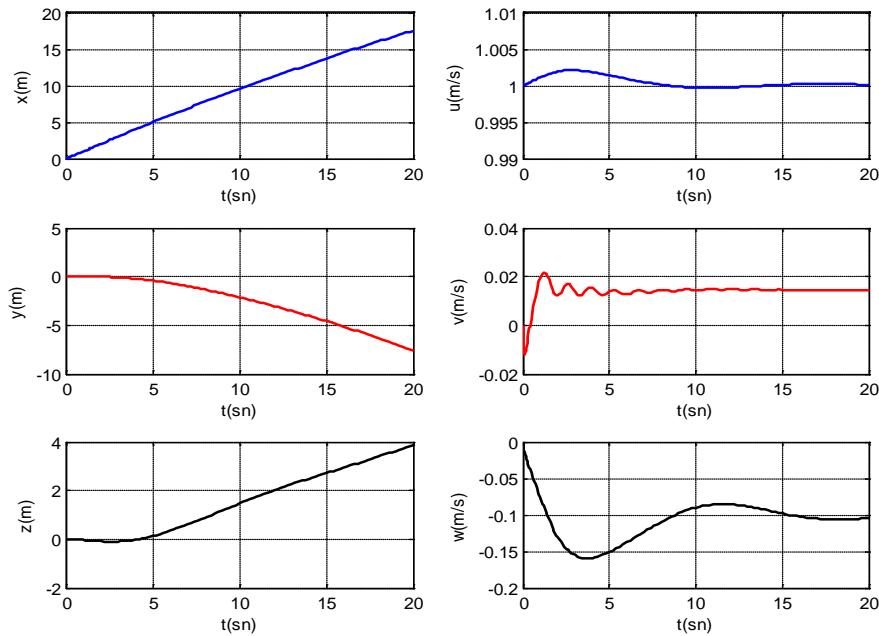
Oluşturulan matematiksel modelin doğrulanması amacıyla yapılan simülasyonlarda, gerçek bir denizaltıya ait parametrelerin temin edilmesi mümkün olmadığından, Şekil 4'te verilen, Woods Hole Oceanographic Institute tarafından geliştirilmiş RUV REMUS 100 isimli insansız denizaltı aracı temel alınmıştır [8]. Söz konusu aracın karakteristikleri [2] ve [4]'de verilmiştir. Ancak bu çalışmada verilmiş olan simülasyon modeli, herhangi bir denizaltıya adapte edilebilecek yapıdadır.



Şekil 4. REMUS 100 insansız denizaltı aracı

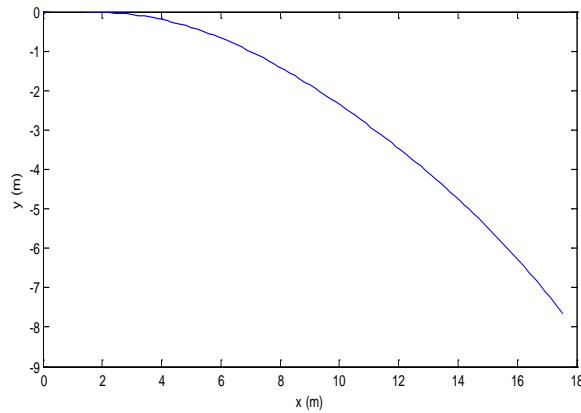
Şekil 5'de -0.5° amudi dümen açısı girişi verilen denizaltı aracının ataletsel düzlemdeki doğrusal hız ve pozisyon grafiklerini gösteren simülasyon sonuçları görülmektedir. Pervane dönüş hızı, boyuna öteleme hızını 1m/sn'de tutacak şekilde hesaplanmakta ve

giriş olarak verilmektedir. Simülasyon elde edilen sonuçlar [4]'de verilen manevrayla tutarlılık arzetmektedir.

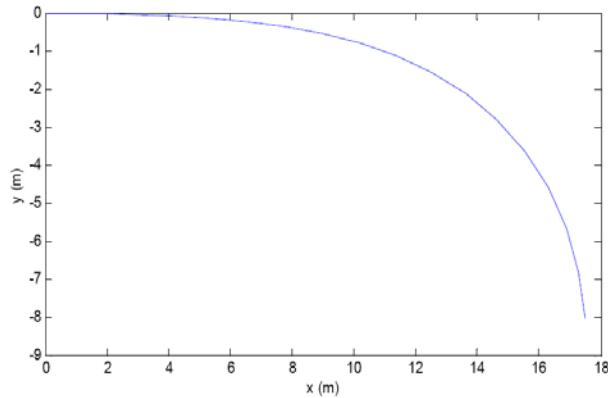


Şekil 5. Ataletsel hız ve pozisyon grafikleri

Şekil 6'da grafik simülasyon sonucu xy düzlemindeki manevrayı göstermektedir. Şekil 7'deki grafik ise [4] numaralı kaynaktan alınan araca ait manevradır. Simülasyon sonuçları tutarlı olsa da, araca ait katsayı ve türevlerin hesaplanması sırasında bulunan belirsizlikler nedeniyle bir miktar fark bulunmaktadır.

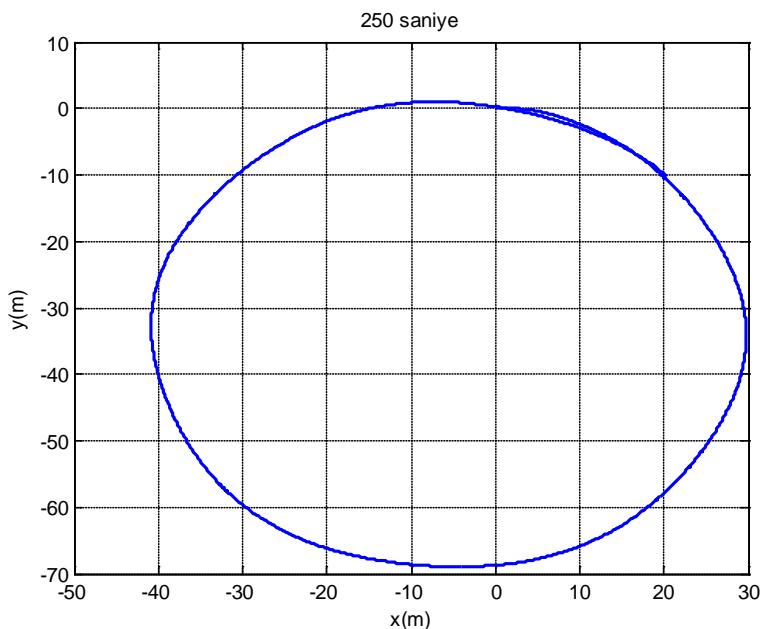


Şekil 6. Manevra (simülasyon sonucu)



Şekil 7. Manevra ([4]'de verilen)

Şekil 8'de simülasyonun 250 saniye koşturulması sonucunda elde edilen xy düzlemindeki hareket manevrası görülmektedir.



Şekil 8. Manevra (t=200sn)

5. SONUÇ

Bu bildiride bir denizaltı aracının hareket ve manevralarını simüle etmek amacıyla Matlab Simulink ortamında oluşturulan örnek bir simülasyon modeli verilmiştir. Oluşturulan görsel animasyon modülü ile de denizaltı aracının manevrasına ait seyir verilerinin simülasyon boyunca anlık olarak izlenebilmesi sağlanmıştır.

Kullanılan matematiksel modelin doğrulanması için katsayı ve parametreleri literatürde tanımlı olan RUV REMUS 100 isimli insansız denizaltı aracı kullanılmıştır. Bu araca ait manevralar ile simülasyon modeli sonucunda elde edilen manevralar karşılaştırılmış ve tutarlı oldukları görülmüştür.

Oluşturulan simülasyon modeli, seçilecek herhangi bir sualtı aracının dinamiklerini simüle etmek amacıyla kullanılabilecek yapıdadır. Bu modelin geliştirilerek bir eğitim simülatörü olarak kullanılması da mümkündür. Bunun için kullanılacak denizaltı modeline özgü karakteristiklerin ve parametrelerin hesaplanması gerekmektedir.

Denizaltı ağırlığının ve sualtında kalan hacminin hesaplanması için tekne geometrisinin ve sarnıç yerleşiminin bilinmesi gerekmektedir. Hidrodinamik türev ve katsayılar ise denizaltı modeli kullanılarak yapılacak deneylerlerle ya da lokal hız ve basınç profillerinin belirlenmesi ile elde edilebilir.

6. KAYNAKÇA

- [1] Fossen, T. I. (1994), Guidance and Control of Ocean Vehicles, *John Wiley & Sons*.
- [2] Prestero T. (2001), Verification of a Six-Degree of Freedom Simulation Model for the REMUS Autonomous Underwater Vehicle, *MSc Thesis at MIT and WHOI*.
- [3] Haklıdır M., Güven A. F., Eroğlu Ö., Aldoğan D., Taşdelen İ. (2009), Denizaltı Modellenmesi ve Ticari Bir Sentetik Hedef Simülatörü İle Entegreli Simülasyonu, *USMOS 2009*.
- [4] Josserand, T.M (2006), Optimally-Robust Nonlinear Control of a Class of Robotic Underwater Vehicles, *PhD Thesis, The University of Texas*.
- [5] Ridley P., Fontan C., Corke P., Submarine Dynamic Modeling
- [6] Oller, E.D. (2003), Forces and Moments Due to Unsteady Motion Of an Underwater Vehicles, *MSc Thesis at Massachusetts Institute of Technology*
- [7] Deng Z., Richmond M.C., Simmons, C.S., Carlson T.J. (2004), Six-Degree-of-Freedom Sensor Fish Design – Governing Equations and Motion Modelling, *Pacific Northwest National Laboratory*
- [8] <http://www.hydroidinc.com/100spec.html>

ÇEKİLİ DİZİNLERİN AKIŞKAN-KİNEMATİK ETKİLEŞİMLİ OLARAK MODELLENMESİ

Fatih Altunel ^(a), Halil Bil ^(b), Murat Aykan ^(c)

^(a) ASELSAN A.Ş. Yenimahalle/Ankara, faltunel@aselsan.com.tr

^(b) ASELSAN A.Ş. Yenimahalle/Ankara, hbil@aselsan.com.tr

^(c) ASELSAN A.Ş. Yenimahalle/Ankara, maykan@aselsan.com.tr

ÖZ

Su üstü platformların, denizaltı ve torpido tehdidini tespit etmesinde çekilebilir dizinlerin kullanımı son yıllarda artış göstermektedir. Dizinlerin, bağlı oldukları platformun gürültüsünden etkilenmemesini ve daha geniş bir alanda tespit yapabilmeyi sağlamak için uzun kablolar kullanılmaktadır. Bu durumda, kablonun deniz içinde çekilmesi sırasında, çekilebilir dizin üzerinde etkili olan sürüklendirme kuvvetleri ciddi boyutlara ulaşmaktadır. Bu kuvvetler dışında, çekilebilir dizinin su üstü platformunun farklı hızlarında aldığı şekil, bulunduğu derinlik ve yaptığı salınım hareketleri, hem dizinin dayanımı hem de akustik tespit algoritması açısından önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında, yukarıda bahsedilen kuvvetlerin hesaplanması ve dizinin su içinde alacağı şekil ile yapacağı hareketlerin tahmin edilmesi için bilgisayar tabanlı bir analiz yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntem iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, çekilebilir dizin üzerindeki çeşitli bölgelerin birim uzunluğu üzerine gelen tüm kuvvetler, bir akışkan dinamiği analiz yazılımı kullanılarak hesaplanmaktadır. İkinci aşamada ise bir dinamik analiz yazılımı kullanılarak, çekilebilir dizin küçük parçalar halinde modellenmiş ve bu parçalar üzerine ilk aşamada hesaplanan kuvvetler uygulanmıştır. Böylelikle dizinin farklı çekme hızlarında aldığı şekil, bulunduğu derinlik, yaptığı salınım hareketleri ve bağlı olduğu vince uyguladığı kuvvetler hesaplanmıştır. Paralelde yapılan deneysel çalışmalar ile vince uygulanan kuvvetler bulunmuştur. Yukarıda bahsedilen yöntem ile bilgisayar ortamında hesaplanan kuvvetler, deneysel incelemeler ile bulunan değerler ile karşılaştırılarak yöntemin doğruluğu sınanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çekili Dizin, Deneysel Doğrulama, Hesaplamlı Akışkan Dinamiği, Kinematik Analiz, Simülasyon

MODELLING OF TOWED ARRAYS BY FLUID-KINEMATIC INTERACTION

ABSTRACT

In recent years, the utilization of towed arrays on marine platforms for the detection of submarine and torpedo threat is increasing. For the effective usage of these arrays, they must be towed with long cables. Because of the length of the system, the drag forces, which are induced on the towed array and the towing cable by the seawater, can reach to a considerable amount. Additionally, depending on the towing speed the shape, the towing depth and the motion of the towed array during its operation plays an important role on both the strength requirements of the array and the acoustic detection algorithm. The scope of this study is to develop a computational method for the prediction of the above-mentioned towing forces and parameters, such as the towing depth, shape and movement. The method consists of two phases. In the first phase, the forces, which are acting on the unit length of the different parts on the towed array, are calculated with the help of a computational fluid dynamics software. In the second phase, a dynamic analysis software is used, where the towed array parts are modeled as pinned finite elements and the previously calculated forces are applied. The result of the dynamic analysis is a prediction of the towing force, shape, depth and movement of the towed array. In addition to the numerical analysis, a prototype towed array, which is developed by Aselsan, is used in an experimental work in order to determine the actual towing forces.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Experimental Verification, Kinematic Analysis, Simulation, Towed Array

1. GİRİŞ

Çekilebilir dizinler, su üstü platformlara tehdit oluşturan denizaltı ve torpidoların tespit edilmesinde kullanılmaktadır. Bu uygulamada dizinler, ana geminin arkasından uzun kablolar kullanılarak salınılmaktadır. Uzun kablo kullanılmاسının en önemli sebepleri ise dizinlerin hem geniş bir alanda tehdit tespiti yapabilmesi hem de ana gemi gürültüsünden etkilenmemesidir. Kablo uzunluğu arttıkça da sürükleme kuvvetleri ciddi boyutlara ulaşmaktadır. Bu kuvvetler öncelikle dizinin bağlı olduğu vince ardından da su üstü platformuna etki etmektedir. Bu sebeple, ana gemiye entegre edilecek vinçlerin yüksek kuvvetlere dayanabilmesi için tasarımlarının bu gereği de içermesi gerekmektedir. Ayrıca, ana geminin farklı hızlarında kablonun aldığı şekil, dizin derinliği ve salınım hareketleri hem dizinin dayanımı hem de tespit algoritması açısından önemlidir. Bu çalışma kapsamında, yukarıda bahsedilen kuvvetlerin hesaplanması ve dizinin su içinde alacağı şekil ile yapacağı hareketlerin tahmin edilmesi için bilgisayar tabanlı bir analiz yöntemi geliştirilmiştir.

İki aşamalı olan bu yöntemin ilk aşamasında çekilebilir dizin üzerindeki çeşitli bölgelerin birim uzunluğu üzerine gelen tüm kuvvetler, bir Hesaplama Akışkanlar Dinamiği Analiz (HADA) yazılımı kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu kuvvetler, hem su üstü platformunun çekme hızına hem de kablonun atak açısına bağlı bir fonksiyon olarak bulunabilmektedir. İkinci aşamada ise bir dinamik analiz yazılımı kullanılarak, çekilebilir dizin küçük rıjıt parçalar halinde modellenmiş ve bu parçalar üzerine ilk aşamada hesaplanan kuvvetler uygulanmıştır. Böylelikle dizinin faklı çekme hızlarında aldığı şekil, bulunduğu derinlik, yaptığı salınım hareketleri ve bağlı olduğu vince uyguladığı kuvvetler hesaplanmıştır. Akışkan analizleri CF-Design ticari yazılımında, fonksiyon oluşturma işlemleri Excel ticari yazılımında, kinematik analizler de MSC.Adams ticari yazılımında tamamlanmıştır. Paralelde yapılan deneysel çalışmalar ile de vince uygulanan kuvvetler bulunmuştur. Yukarıda bahsedilen yöntem ile bilgisayar ortamında hesaplanan kuvvetler, deneysel incelemeler ile bulunan değerler ile karşılaştırılarak yöntemin doğruluğu sınanmıştır.

Bu tarz problemlerin çözümü için genel olarak Sonlu Elemanlar Analiz (SEA) yöntemi kullanılmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile kablo modellemesi için özel yazılımlar bulunmasının yanında bazı büyük ticari yazılımların bu işe özel modüller bulunmaktadır. Ancak, SEA yönteminde parametrelerin değiştirilerek modellenmesi ve analiz edilmesi uzun süreler almaktadır. Bu sebeple, akışkan-kinematik hesaplama yöntemleri ön plana çıkmıştır. Pedrazzi C. [1] tarafından ana gemiye kablo ile bağlanan mayın avlama sisteminin akışkan-kinematik hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplama larda her bir rıjıt kablo parçası üzerine gelecek olan sürükleme ve kaldırma kuvvetleri analitik olarak hesaplanarak MSC.Adams'a kuvvet fonksiyonları olarak girilmiştir. Simülasyonlarda sadece MSC.Adams ticari yazılımı kullanılmıştır. Bu makale

kapsamında ise sürükleme ve kaldırma kuvvetleri CF-Design ticari yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan kuvvetlerin açıya bağlı kuvvet haline getirilmesi için de Excel ticari yazılımı kullanılmıştır.

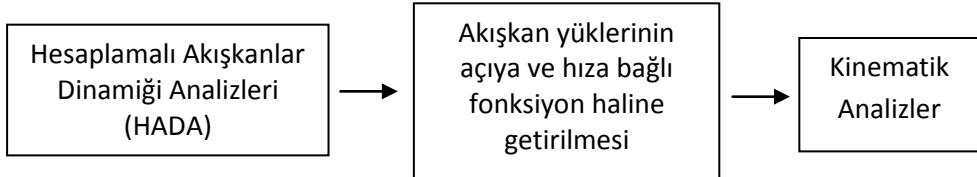
Tjavaras, A. A. [2] yapmış olduğu doktora tezinde yüksek oranda uzayabilen kabloların sultındaki davranışlarını incelemiştir. Analitik olarak şok dalgalarının formasyonunu ve kablo üzerinde oluşan gerilmeleri analiz etmeye çalışmıştır.

Clauss G.F. ve Vannahme M. [3] de çekili dizinlerin doğrusal olmayan dinamik davranışları üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında analitik yöntemler kullanılmış ve gemi hareketlerinin dizin üzerinde önemli uyarılma sebep olduğu görülmüştür. Ancak, yapılan çalışmada kısa kablo boyları için denemeler yapılmıştır. Uzun kablo boylarındaki durumun değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu makale kapsamında çok uzun kablolar üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

2. AKIŞKAN ve KİNEMATİK ANALİZLER

Çekilebilir dizin kablo probleminin hızlı, doğru ve parametrik olarak çözülebilmesi için bir yöntem belirlenmiştir. Bu yöntemde kablo, kinematik analizlerin yapılabilmesi için rıjt elemanlar olarak modellenmiştir. Bu elemanlar üzerine etki eden sürükleme, kaldırma, batmazlık (buoyancy) etkisi ve kablonun kütlesi altında dengenin kurulması ile sürekli halin çözümüne ulaşmaktadır. Rıjt elemanların üzerine gelecek olan kuvvetler de 1m'lik kablonun üzerine düşen akışkan yüklerinin analiz edilmesi ve elde edilen değerlerin eleman boyu ile çarpılması sonucu belirlenmiştir. Ayrıca bu yükler, kablonun deniz yüzeyi ile yaptığı açıya bağlı olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplama yöntemini doğrulamak amacıyla analitik çözümü mümkün olan bir durum çözülmüştür.

2 farklı akış hızı için 1m'lik kablo üzerinde yapılan analizlerin sonucu Excel'de fonksiyonlar haline getirilerek MSC.Adams yazılımindan kinematik modele aktarılmıştır. Sıfır derece konumunda tanımlanan ve rıjt elemanlardan oluşan kinematik kablo modeli, sürekli halin denge durumuna ulaşmak için, rıjt elemanların kütle merkezi üzerinde tanımlanan kuvvet fonksiyonlarını kullanarak ve birçok iterasyondan sonra denge durumuna ulaşmıştır. Denge durumunda her bir rıjt elemanın açısı ve dolayısı ile kablonun şekli ve dizin derinliği ortaya çıkmıştır. Ayrıca kablonun vince uyguladığı çekme yükü de hesaplanmıştır. Yapılan çalışmaları özetleyen akış diyagramı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Akışkan-kinematik etkileşimli analiz yöntemi akış diyagramı

2.1. Hesaplamlal Akışkanlar Dinamiği Analizleri

Bu bölümde, çekili dizinler için önerilen metodun akışkan dinamiği ile ilgili olan kısımları anlatılmaktadır. Öncelikle kullanılan akışkan dinamiği yazılımının doğruluğunun test edilmesi için yapılan bir çalışmadan bahsedilecek, ardından dizin parçaları üzerine etki eden kuvvetlerin bulunması için yapılan analizler detaylı olarak anlatılacaktır.

2.1.1. Analiz Doğrulama Çalışmaları

Bu bölümde, sürüklenme ve kaldırma kuvveti analizlerinin doğruluğundan emin olmak için, analizlerden bir tanesi analitik çözüm ile karşılaştırılmıştır. Diğer açılardaki analitik çözümlerin hata payları çok yüksek olduğu için, akış altındaki silindirlerde yalnızca dik akışın analitik çözümünde güvenilir sonuçlar elde edilebilmektedir. Doğrulama analizi için ekseni akışa dik 17,3 mm çapında bir silindirin, 9 knot akış hızı altında maruz kaldığı sürüklenme kuvveti hesaplanmıştır. Analiz sonucunda silindirin bir metresi için hesaplanan sürüklenme kuvveti aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

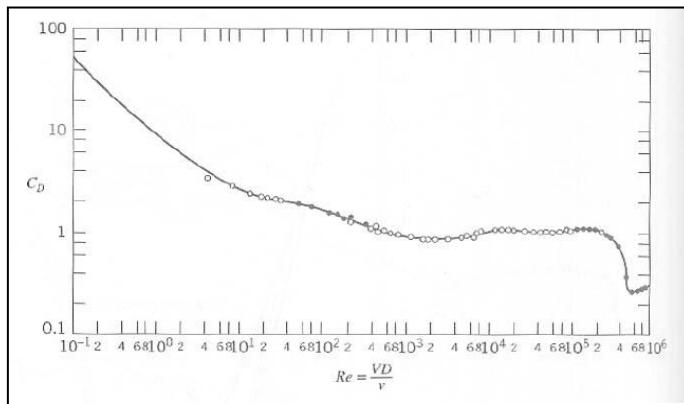
$$F_D = 185.40 \text{N'dur.}$$

Silindir üzeri akış için analitik çözümde,

$$F_D = \frac{1}{2} \rho u^2 C_D d \quad (1)$$

formülü uygulanır.

C_D , Reynold sayısının fonksiyonudur ve deneysel olarak belirlenmiştir. Bu katsayının Reynold sayısına göre dağılımını gösteren grafik Şekil 2 üzerinde verilmiştir.



Şekil 2 Sürükleme katsayısı (*Drag Coefficient*) vs *Reynold* sayısı [4]

$$Re_D = \rho \frac{ud}{\mu} \quad (2)$$

İncelenen durum için Reynold sayısı, 9 knot hızındaki akıntı için;

Akış hızı, $u = 4.63$ m/s

Su yoğunluğu, $\rho = 1024$ kg/m³

Silindir çapı, $d = 0.0173$ m

Dinamik Viskozite, $\mu = 0.00188$ Pa.s

olarak alındığında,

$$Re_D = 43,633$$

olarak hesaplanmaktadır. Dolayısıyla Şekil 2 üzerinde verilen grafik kullanılarak sürüklenme katsayısı aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

$$C_d = 1 - 1.3$$

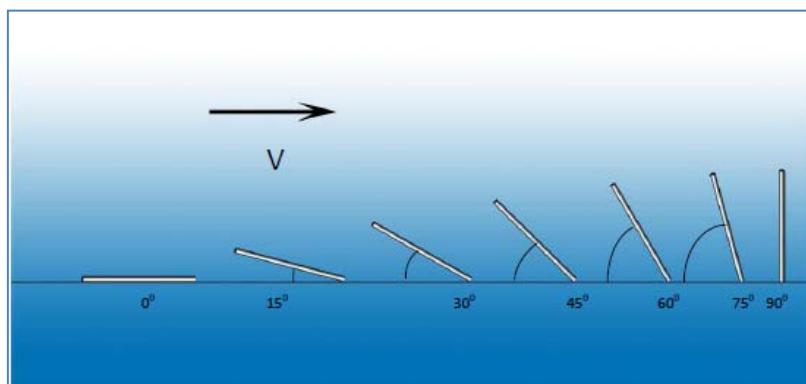
Yukarıda verilen analitik sürüklenme kuvveti formülü kullanıldığında, silindir üzerine etki eden kuvvet aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

$$F_D = 189.80\text{N}$$

Nümerik olarak hesaplanan sürüklenme kuvveti ile analitik olarak elde sonuç ile karşılaştırıldığında yaklaşık % 2 hata olduğu görülmektedir. Bu hata payının kabul edilebilir seviyede olduğu değerlendirilmiştir.

2.1.2. Çekili Dizin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizleri

Çekili dizinler farklı çaplara ve görevlere sahip bölümlerden oluşmaktadır. Dolayısıyla bütün bu bölümlere ait akışkan dinamiği analizlerinin yapılarak farklı durumlarda ilgili bölgenin üzerine düşen sürüklenme, kaldırma, batmazlık ve yerçekimi kuvvetlerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu amaçla kablonun farklı çapa sahip bölgeleri, çeşitli çekme hızlarında Şekil 3'de görüldüğü gibi 15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90° lik açılarda analiz edilmiştir. Analizler sırasında, kablolar pürüzsüz silindirler halinde ve üç boyutlu olarak modellenmiştir. Akışkan dinamiği ile yapılan analizlerde, silindirlerin 1 metrelik kısımları hesaplama alanı (computational domain) olarak belirlenmiştir. Bu sayede, analiz sonunda elde edilen sonuçların “metre kablo başına kuvvet” olarak alınması sağlanmıştır.



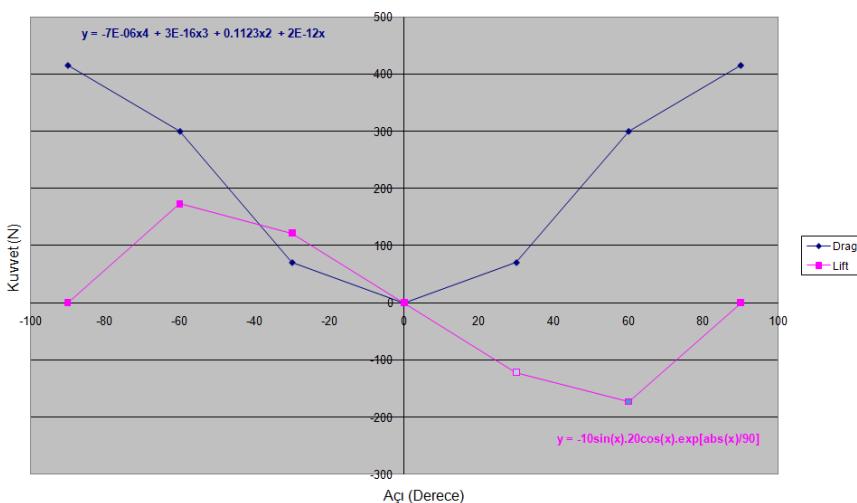
Şekil 3. Kablonun HADA analizlerinin yapıldığı durumların görüntüler

Sistem deniz suyunda çalışacağı için akışkan malzemesinde deniz suyu özellikleri kullanılmıştır. 20 derece sıcaklık ve %35 tuz yoğunluğuna sahip deniz suyu modeli için dinamik viskozite 0.00108 Pa.s ve yoğunluk 1024.8 kg/m^3 [5] alınmıştır.

Akış hızları, hesaplama alanına “sınır koşulu” olarak girilmiştir. Örneğin 10 knot akış hızı için hesaplama alanının giriş olarak alınan yüzeyine $5,14 \text{ m/s}$ değerinde bir hız sınır koşulu tanımlanırken, çıkış olarak belirlenen yüzeye sıfır görece basınç sınır koşulu tanımlanmıştır.

Yapılan analizler sonunda birinci kablo bölümü için elde edilen sonuçlar Şekil 4'te verilmiştir. Grafikte, Drag eğrisi sürüklenme kuvvetini, Lift eğrisi ise yerçekimi, kaldırma kuvveti ve batmazlık sonucu oluşan bileşke kuvveti göstermektedir. Analizler 15° - 90° arasındaki kablo açılarında yapılmış, 360° açıya, simetri yöntemleri kullanılarak yansıtılmıştır.

Bu şekilde, bütün kablo bölümlerinin her bir atak açısı değeri ve akış hızı için analizleri tamamlanmış ve tablolar halinde ham veri elde edilmiştir. Kinematik analizlerin yapılacağı MSC.Adams yazılımına sürekli bir girdinin sağlanması için toplanan veriler Excel ticari yazılımında eğri uydurma metotları kullanılarak denklemler halinde ifade edilmiştir.



Şekil 4 Birinci kablo bölümünün üzerinde 10 knot hızında etki eden kuvvetlerin açıya göre değişimi

2.2. Kinematik Analizler

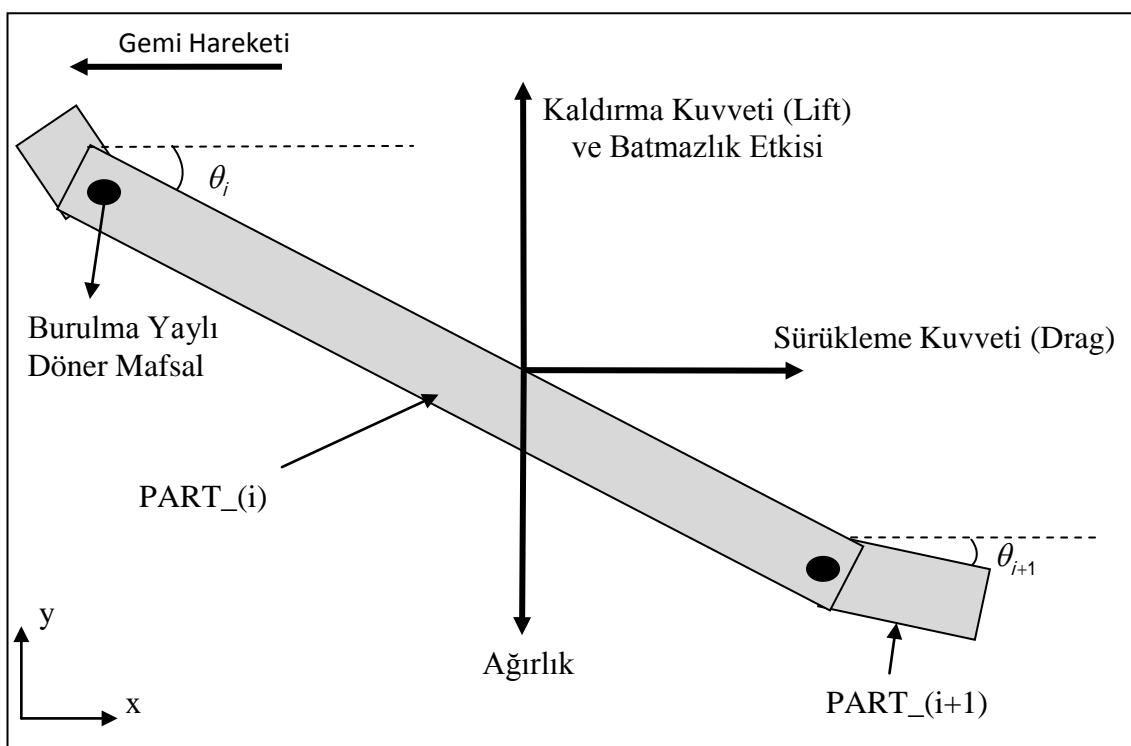
Toplamda 550 metrelük kablo MSC.Adams programında eklemlı rijit parçalara bölmeye yöntemiyle modellenmiştir. Kablo, 3 farklı bölümden oluşmaktadır ve her bir bölümde kablo kalınlıkları ve yoğunlukları farklıdır. Her bölüm 50m'lik düz parçaların (LINK), döner mafşallarla (REVOLUTE_JOINT) birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Bölümler de birbirlerine yine döner mafşallarla bağlanmıştır. Kinematik simülasyon sırasında kablo rijit elemanlarının köşe oluşturacak şekilde bükülmemesi için mafşalların üzerinde burulma yayı (TORSION_SPRING) tanımlanmıştır. Ancak, kablonun eğilme yükü (moment) taşıyamayacağı düşünülerek yay üzerinde sadece sönüm (TORSION_DAMPING) tanımlanmıştır. HADA programından alınan açıya bağlı kuvvet değerleri rijit elemanların merkezlerinin üzerinde ve daima aynı doğrultuda kalacak şekilde kuvvetler (SFORCE) uygulanmıştır.

HADA programından alınan y-eksenindeki kuvvetlerde parçaların ağırlıkları da hesaba katıldığı için modelde yerçekimi yoktur. Hesaplamalar sırasında, kablo salınımının sürekli duruma geldiği durum önemli olduğu için modelde parçaların hızına bağlı olarak değişen bir sıvı direnci eklenmemiştir.

Sönüm katsayısı sabittir ve geçici hal süresini kısaltmak amacıyla kullanılmıştır. Sürekli halde parçalar üzerinde moment oluşmayacağı için burulma yayının etkisi

kalmayacaktır. Bu durumun doğrulanması için farklı sabitler için deneme yapılmış ve aynı sonuç alınmıştır.

Yöntem Şekil 5’de şematik olarak açıklanmaya çalışılmıştır. Bu kuvvetlerin doğrultuları parçanın hareketinden etkilenmemekte ve analiz boyunca, global eksene göre aynı doğrultuda kalmaktadır. Ancak kuvvetin büyüklüğü, üzerinde bulunduğu parçanın yatayla yaptığı açıya ve ana gemi hızına bağlı olarak değişmektedir.



Sekil 5 Yöntemin sematik açıklaması

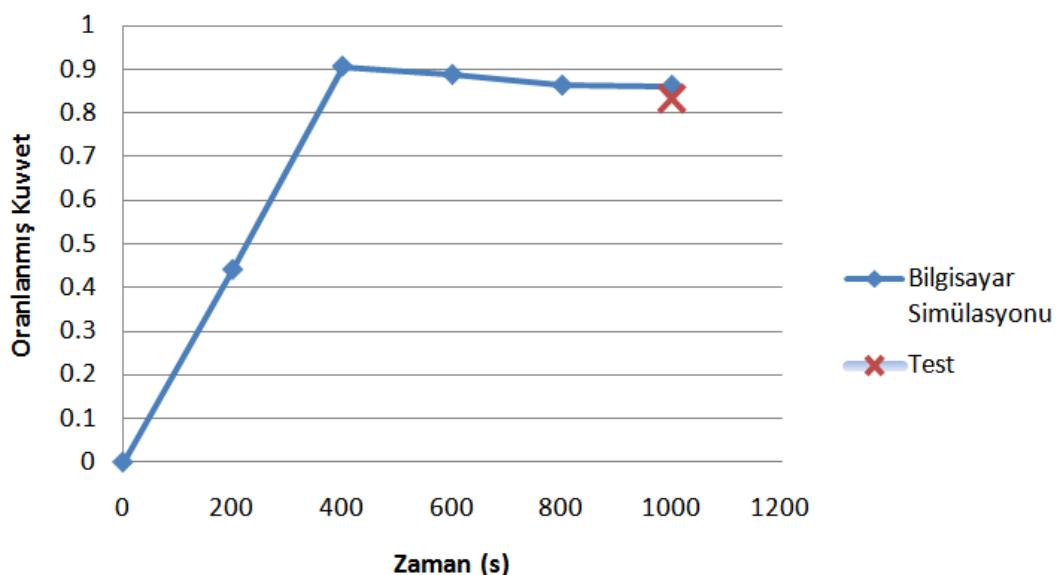
Modeller hazırlandıktan sonra 1000 s ve 10,000 adım değerleri ile analizler yapılmıştır. Bağlantılarda kullanılan sönümleyici katsayı $50,000 \text{ N.m.s}^{\circ}$ olarak seçilmiştir.

Ayrıca, yukarıda anlatılan akışkan-kinematik etkileşimli analiz yönteminin doğrulanması amacı ile deniz ortamında testler gerçekleştirilmiştir. Testler kapsamında 9 knot hızında yol alan ana gemiden denize bırakılan kablonun vince bağlandığı noktada kuvvetölçer ile kuvvet verisi elde edilmiştir. Kablo ve kuvvetölçer Şekil 6'de gösterilmiştir.



Şekil 6 Kablo ve kuvvetölçer gösterimi

9 knot gemi hızı için yapılan simülasyonlar ve testler sonucunda vince gelen kuvvetin oranlanmış hali Şekil 7'de gösterilmiştir. Kablo salınımı sürekli duruma geldiği zaman hesaplanan kuvvet değeri ile ölçülen kuvvet değeri arasında yaklaşık % 5 fark oluşmuştur. Bu farkın, dalga durumunun analizlere eklenmemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 7 9 knot hızda vince gelen kuvvet

3. SONUÇ

Mekanik tasarımların ve sistemlerin hem hafif hem de sağlam olmasına yönelik çalışmalar günümüzde daha da artmıştır. Çekili dizin sisteminde kullanılan vinç ve kablonun seçimleri bu kapsamda önem arz etmektedir. Düşük güçe sahip vinç ve ince kablo seçiminde hem kablo hem de vincin taşımama olasılığı olabilmektedir. Benzer şekilde çok yüksek güçe sahip vinç ve kalın kablo seçildiğinde de hem ağırlık hem de maddi boyutunda sıkıntı oluşturmaktadır. Vinç ve kablo seçimlerinin doğru ve hızlı bir şekilde yapılabilmesi için çeşitli yöntemler ile analizler yapılmaktadır. Sonlu elemanlar analiz yönteminde hem modelleme hem de çözüm uzun süreler almaktadır. Buna karşın akışkan-kinematik analiz yönteminde SEA'daki modelleme ve çözüm süreleri çok daha az zaman almaktadır. Bu kapsamda akışkan-kinematik yöntemi kullanılarak çekili dizin kablo analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar deneysel testler ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda akışkan-kinematik analiz yönteminin kabul edilebilir seviyede doğruluğa sahip olduğu değerlendirilmiştir

4. KAYNAKÇA

- [1] Pedrazzi, C., (1997), Dog on lead minehunting underwater cable simulation, 12th European ADAMS Users' Conference, Malburg, Almanya
- [2] Tjavaras, A. A., (1996), The Dynamics of Highly Extensible Cables, Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, ABD
- [3] Clauss G.F., Vannahme M., (2001), Nonlinear dynamics of towed underwater vehicle, Institute of Naval Architecture and Ocean Engineering Technical University, Berlin, Almanya
- [4] Bruschi G., Nishioka T., Tsang K., Rick Wang., (2003), Drag coefficient of a cylinder
- [5] http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_7/2_7_9.html

GEMİLERDE YALPA SÖNÜMLEYİCİ AKTİF FİN SİSTEMİ BENZETİMİ VE DENEYSEL UYGULAMASI

Melek ERTOGAN^(a), Şeniz ERTUĞRUL^(b), Metin TAYLAN^(c)

^(a) İ.T.Ü. Denizcilik Fakültesi, Gemi Makinaları İşletme Mühendisliği Bölümü, Tuzla,
İstanbul, ertogan@itu.edu.tr

^(b) İ.T.Ü. Makine Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Gümüşsuyu, İstanbul,
seniz@itu.edu.tr

^(c) İ.T.Ü. Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, Gemi İnşaatı ve Makinaları
Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul
taylan@itu.edu.tr

ÖZ

Yalpa azaltıcı sistemler, gemilerde yalpaya karşı güvenlik ve konforun sağlanması amacıyla kullanılır. Gemi kararlılığı (stabilitesi) denetim sistemi uygulamasını yapan firmaların sayısı uluslararası alanda da sınırlı olmakla birlikte, ülkemizde bu konuda henüz üretim aşamasına gelmemiştir. Gemi yapımlarında tüm denetim sistemleri yurtdışından temin edilmektedir. Bu çalışmada, hidrolik tahrik sistemi ile çalışan aktif fin sistemi donanımının ve denetiminin yurttaşınca gerçekleştirilebilmesi için gerekli bilgi ve deneyim birikiminin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Aktif fin stabilizer kontrolörünün, gemilerin yalpa sönümlemesinde en uygun sinyali üretebilmesi matematik modellemeye bağlıdır. Bu nedenle, stabilizer kontrolörünün tasarımının çalışıldığı geminin matematik modeli gerçeğe yakın olması önem taşır. Sistemin, gemi üzerinde efektif bir biçimde çalışması için, İ.T.Ü.'ye ait Martı Gemisi'nde yapılan ölçümlerde elde edilen veriler kullanılarak benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Matlab-Simulink ile yapılan benzetim çalışmalarında altı serbestlik dereceli ve doğrusal olmayan çok karmaşık gemi dinamiği incelenerek, sisteme en uygun, gerçek zamanda uygulanabilir ileri bir denetim algoritması geliştirilmesine çalışılmaktadır. İleriki çalışmalarında, geliştirilen ileri denetim sistemi, Martı Gemisi ile gerçek deniz koşullarında seyir yapılarak performans testleri yapılacaktır.

Anahtar Kelimeler: Elektro-hidrolik aktif fin sistemi, gemilerde baş-kıç vurma ve yalpa birleşik hareketleri, gemilerde yalpa sönümleme, gerçek zamanlı denetim, stabilizer

SIMULATION OF ROLL DAMPING BY ACTIVE FIN SYSTEMS AND SEA TRIALS

ABSTRACT

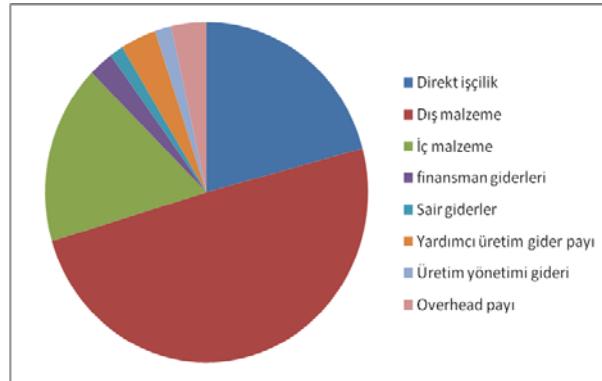
Roll reducing systems are used to provide comfort and safety in ships. The number of ship stabilizer providers is limited and there are no national companies in this field. All control systems are imported in ship building industry in Turkey. In this research, the hardware and control of a hydraulic actuated fin system have been studied to obtain know-how so that these systems can be developed nationally. The mathematical model to represent the dynamics of the real system is necessary, because the control signal of the active fin stabilizer system for the real ship will be produced based on the ship mathematical model. Simulation programs have been verified using experimental data obtained from the training ship "Martı" owned by ITU Maritime Faculty. Six degrees of freedom nonlinear ship dynamics have been studied via simulations so that the most effective advanced control algorithm could be developed and implemented. In future work, the developed advanced control algorithm will be tested on Martı in real sea trials.

Keywords: Electro-hydraulic active fin systems, real-time control, roll reduction, ship trim-roll coupling, stabilizer.

1. GİRİŞ

Türkiye'deki gemi inşa sanayi, 2002 yılında dünya sıralamasında 23'üncü sırada iken, 2005 yılında 1,8 Milyon deadweight tonluk (DWT) siparişle 8'inci sıraya kadar yükselmiştir ve halen 5'inciği zorlamaktadır. Ancak, Çizelge 1'de görüldüğü gibi maliyetin yarısını ithal malzemeler oluşturmaktadır [Türkiye Gemi İnşa Sanayicileri Birliği raporları, 2006]. Gemi denetim sistemleri de bu ithal malzemeler arasındadır. Türk Deniz Kuvvetleri için 12 adet korvet gemi inşası öngören ve yerli yapımı hedefleyen "Milgem Projesi" kapsamındaki ilk Türk Korveti "Heybeliada" da, stabilite denetim sistemi donanımı yurtdışından temin edilmiştir. Bu çalışmada, hidrolik tıhrik sistemi ile çalışan aktif fin sistemi donanımının ve denetiminin yurtiçinde gerçekleştirilebilmesi için gerekli bilgi ve deneyim birikiminin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Yapılan çalışma, doktora tez çalışması olup, benzetim çalışmalarının yanı sıra T.C. Sanayi Bakanlığı ve İ.T.Ü. Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'nin desteği ile tam ölçekli – gerçek zamanlı uygulama çalışmalarını da kapsamaktadır.

Çizelge 1. Gemi inşa maliyetlerinin grafik olarak gösterimi

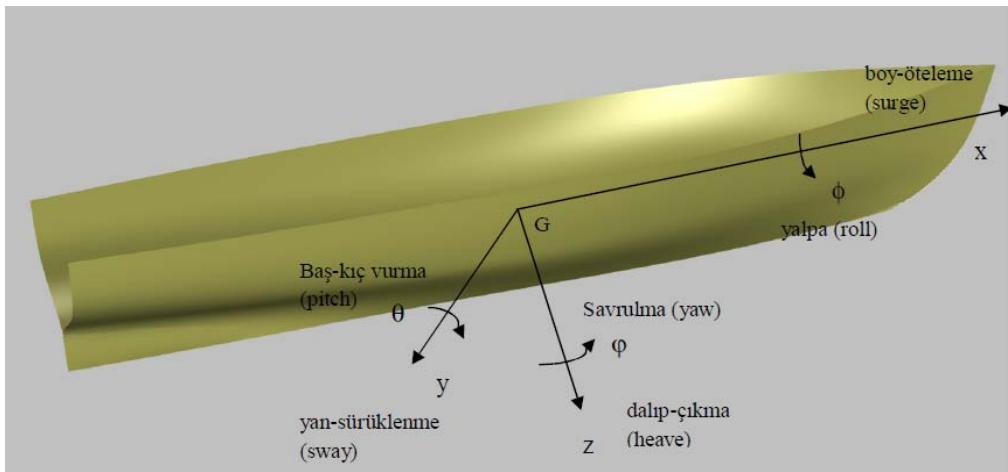


2. GEMİLERDE YALPA HAREKETİ PROBLEMİNİN TANIMI

Yalpa azaltıcı sistemler, yolcu ve yük gemilerine güvenlik ve konforun sağlanması amacıyla ile, savaş gemilerine ise daha çok yalpanın sebep olduğu bazı önemli sorunların giderilmesi düşüncesi ile monte edilir. Örneğin, yalpası azaltılmış bir savaş gemisinden top atışları daha isabetli olabileceği gibi, uçak ve helikopterlerin gemiye inişleri daha güvenli bir şekilde yapılabilir. Gemilerde yalpa azaltıcı sistemler, aktif ve pasif olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Aktif sistemler, hidrolik, pnömatik veya elektrik motorları ile yalpa açısı ölçülerek dinamik olarak kontrol edilen sistemlerdir. Pasif sistemlerde ise kontrol uygulanmamaktadır, geminin hidrostatik stabilitesinin iyileştirilmesi için geminin yapısına eklenen statik sistemlerdir. Aktif sistemler; aktif yalpa finleri, aktif yalpa tankları ve yalpa jiroskopları olarak sıralanabilir. Bunların arasında yolcu gemilerinde, yatlarda ve savaş gemilerinde en çok kullanılan sistem, aktif yalpa finleridir.

Şekil 1'de gemi hareketlerini tanımlayan eksen takımları görülmektedir. Bu eksen takımlarına göre gemi dinamiği 6 serbestlik dereceli doğrusal olmayan denklemlerle ifade edilmektedir. Doğrusallaştırılmış gemi dinamiği denklemi ise (1)'de verilmiştir [1,3].

$$\sum_{k=1}^6 [(M_{jk} + A_{jk}) \ddot{\eta}_k + B_{jk} \dot{\eta}_k + C_{jk} \eta_k] = F_j e^{i\omega t} \quad j=1, \dots, 6 \quad (1)$$



Şekil 1: Gemi hareketlerini tanımlamaya yarayan eksen takımları.

Geminin yan öteleme ve savrulma hareketleri ihmal edilerek, ayrıca sabit rotada seyrettiği kabul edilerek doğrusallaştırılmış gemi yalpa hareketi (2)'deki gibi verilebilir.

$$(I + A)\phi'' + B\phi' + C\phi = M_w \quad (2)$$

ϕ : Geminin boyuna eksen etrafındaki yalpa açısı

I: Kütle atalet momenti katsayısi.

A: Ek su kütlesi atalet momenti katsayısi.

B: Yalpa hızıyla orantılı sönüm kuvveti momenti katsayısi.

C: Gemiyi doğrultucu hidrostatik su kuvvetleri momenti katsayısi.

M_w : Dış kuvvetlerin oluşturduğu moment.

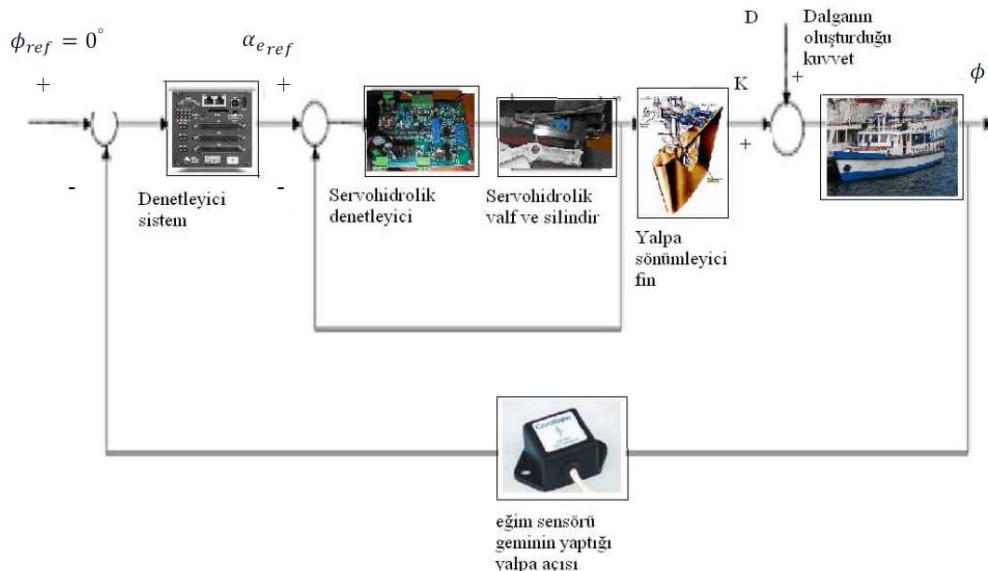
3. HİDROLİK YALPA SÖNMLEYİCİ FİN DENETİMİ DENEY DÜZENEĞİ

Yapılan ilk çalışmalarda, yalpa sönümleyici hidrolik fin sisteminin gerçek zamanda bilgisayarla denetimi laboratuar ortamında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, hidrolik fin sisteminin İ.T.Ü.'ye ait olan Martı Gemisi'ne montajı gerçekleştirilmiş ve gemi suya indirilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Yalpa finlerinin Martı Gemisi’nde yerlesimi

Hidrolik fin sisteminin kapalı çevrim blok diagramı Şekil 3’té görülmektedir. Sistemde Crossbow CXTA02 2 eksenli eğim ölçer [13], Simulink ile programlanabilen United Electronic Industries firmasına ait UAISIM300 gömülü sistemi gerçek zamanlı denetleyici olarak kullanılmaktadır [14].



Şekil 3. Martı gemisi yalpa sönmüleyici aktif fin sisteminin kapalı çevrim blok diagramı

4. DENEYSEL VE TEORİK ÇALIŞMALAR

(2)'de verilen yalpa hareket denkleminin çözümünde kullanılan ve deneysel verilerden elde edilmiş empirik katsayılar aşağıda verilmiştir [2].

$$C = \rho g V \overline{GM} \quad (3)$$

$$I = (0.4B_G)^2 \rho V \quad (4)$$

$$A = 0.3I \quad (5)$$

$$B = 2\beta \sqrt{C(I + A)}, \quad \beta = 0.075 \text{ (sönümleme oranı)} \quad (6)$$

GM: Metasantır yüksekliği

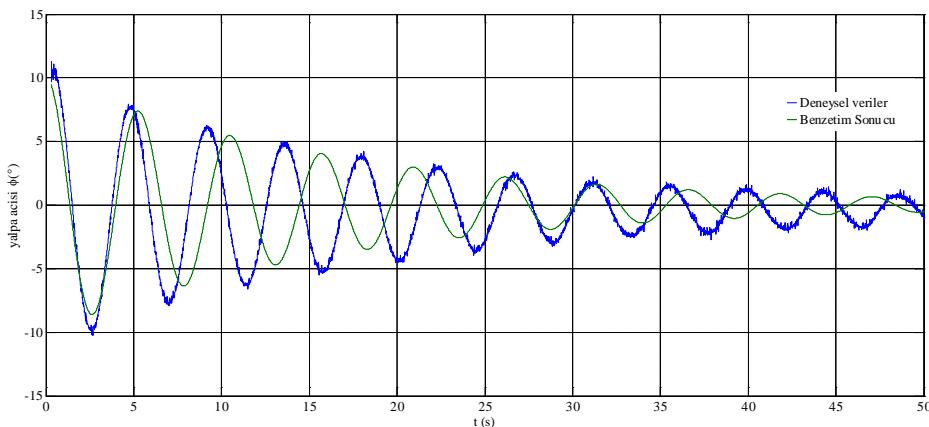
V: Geminin sualtındaki hacmi

B_G : Geminin tam genişliği

g: yerçekimi ivmesi

ρ : Deniz suyu yoğunluğu

Mart Gemisi sıfır hızda iken belirli ani kuvvetlerin gemiye uygulanması sonucu yalpa eğrileri elde edilmiştir. Doğrusallaştırılmış yalpa denklemi kullanılarak yapılan benzetim sonucu ile Martı Gemisi'nde yapılan deneylerle elde edilen sonuçların karşılaştırılması Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. Martı gemisinin yalpa sökümlenmesinde, deneyel veriler ile doğrusal matematik model kullanılarak yapılan benzetim sonucunun karşılaştırılması.

Gerçek sistemin doğrusal olmadığı ve geminin GM değerinin değişmesi ile B ile verilen sökümleme katsayısının da değiştiği bilinmektedir. Geminin sökümleme karakteristiğinin benzetim çalışmaları literatürde çok sayıda vardır ve bu çalışmalar halen devam etmektedir. Literatürde yapılan bu çalışmaları ve Şekil 4'te verilen karşılaştırma, geminin gerçek sökümleme katsayılarının, benzetim çalışmalarından elde edilmesindeki güçlüğü kanıtlamaktadır. Bu nedenle, değişik hızlarda ve yükleme

durumlarında sakin suda yapılacak deneylerle, elde edilecek olan yalpa açılarındaki azalma eğrilerinden, Martı gemisine ait benzetimde kullanılacak gerçek sökütleme karakteristiği elde edilecektir.

Geminin sökütleme karakteristiği, yalpa açılarındaki azalma eğrisinden, her salınımda yalpa açılarındaki azalma, $\delta\phi$, bunlara karşı gelen ortalama yalpa açıları, ϕ_m , üzerine ordinat olarak çizilirse, elde edilecek azalma eğrisi (7)'deki gibi ifade edilebilir. Deney verilerinden, (7)'deki K₁ ve K₂ katsayılarının tespiti ile bulunacak dinamik stabilitedeki azalma (8)'de verilmiştir [4].

$$\delta\phi = K_1\phi_m + K_2\phi_m^2 \quad (7)$$

$$B\phi' = \rho g \overline{VGM} \phi_m \delta\phi , \quad (8)$$

Yalpa azaltıcı fin tarafından oluşturulan yalpa momenti doğrusallaştırılmış yalpa denklemine (9)'da verildiği gibi eklenmektedir. Yalpa azaltıcı fin tarafından oluşturulan yalpa momenti M_c ise (10) ile tanımlanmıştır. Deneysel çalışmalarla elde edilecek bir başka önemli katsayı, fine ait kaldırma kuvveti katsayıları olan C_L değeridir [7].

$$(I + A)\phi'' + B\phi' + C\phi = M_w + M_c \quad (9)$$

$$M_c = \frac{1}{2} \rho r_f V_{fl}^2 A_f C_L(\alpha_e) \quad (10)$$

ρ : su yoğunluğu

r_f : fin moment kolu

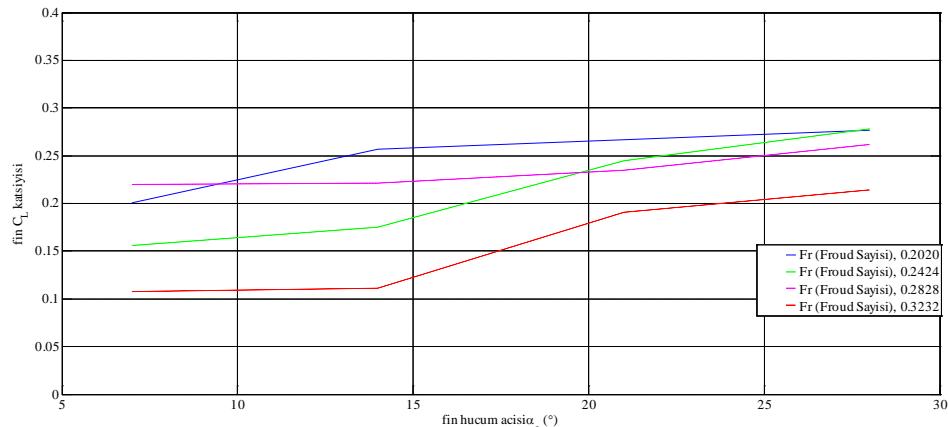
V_{fl} : finin, akış hızına göre bağıl hızı (genelde denetim tasarımları problemlerinde, $V_{fl} \approx U$, gemi hızı, olarak alınır.)

A_f : fin yüzey alanı

C_L : kaldırma kuvveti katsayıları olup $C_L(\alpha_e) \approx \bar{C}_L \alpha_e$ ile ifade edilir ve $\bar{C}_L \equiv \frac{\partial C_L}{\partial \alpha_e} |_{\alpha_e=0}$

α_e : efektif fin açısı olup, fin ile akış hızı arasındaki açıdır.

Martı gemisi ile durgun suda, yalpa finleri, çeşitli hücum açılarında çalıştırılarak geminin belli hızlarında kaç derece yalpa yaptırdığı eğim alıcısı ile ölçülmüştür. Elde edilen bu yalpa açılarına göre, yalpa finlerinin gemiye yaptırdığı moment değerleri, geminin hidrostatik moment değerlerine eşitlenerek, teknenin çeşitli hızlarında, finin hücum açılarına göre, C_L kaldırma kuvveti katsayıları eğrileri elde edilmiş ve Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. Martı gemisine ait finin çeşitli hücum açılarında, kaldırma kuvveti katsayıları

Yalpa fininin değişen açılarına göre, tekneye etkidiği moment değerini, ϕ, ϕ' ve ϕ'' büyülüklerine göre matematik modeli oluşturulduğunda;

$$\alpha_{e1} = a\phi, \alpha_{e2} = b\phi', \alpha_{e3} = c\phi''$$

yazılabilir. Böylece, durgun suda finin eklenmesi ile, yalpa hareket denklemi aşağıdaki gibi düzenlenir [4].

$$(I + A + KC_L c)\phi'' + (B + KC_L b)\phi' + (C + KC_L a)\phi = 0 \quad (11)$$

$$K = \frac{1}{2}\rho r_f V_{fl}^2 A_f \quad (12)$$

Yalpa fininin kütle atalet momenti, geminin atalet momentine göre çok küçük olduğundan ihmal edilerek, (13)'deki gibi yazılabılır [4].

$$(I + A)\phi'' + (B + KC_L b)\phi' + (C + KC_L a)\phi = 0 \quad (13)$$

Yalpa fini yüzeyine ait, $\overline{C}_L a, \overline{C}_L b$ katsayıları, birbirine bağlı olarak, optimal çalışmayı sağlayacak değerler, teknede yapılacak deneyler sonucu tespit edilecektir.

5. SONUÇ

Yapılan ilk çalışmalarda, laboratuar ortamında yalpa sönümleyici hidrolik fin sisteminin gerçek zamanda bilgisayarla denetimi gerçekleştirilmiştir. Laboratuar çalışmalarının paralelinde, gemi sıfır hızda iken belirli anı kuvvetlerin gemiye uygulanması sonucu alınan yalpa eğrilerinin verileri ile Martı gemisinin yalpa sönümleme karakteristiği elde edilmiştir. Aktif fin sisteminin, gemi üzerinde efektif bir biçimde çalışması için,

İ.T.Ü.'ye ait Martı Gemisinin bakım işlemleri ve hidrolik fin sisteminin tekneye montajı tamamlanarak denize indirilmiştir. Martı Gemisi'nde durgun suda, Tuzla'da İ.T.Ü. Denizcilik Fakültesi'nin konumlandığı bölgenin kıyısı açıklarında, belirli fin hücum açı aralıklarında çalıştırılarak, belli hızlarda eğim algılayıcısı ile geminin yalpa açı değerleri ölçülmüştür. Kayıt edilen bu açı değerlerine göre, finin kaldırma kuvveti katsayı değerleri bulunmuştur. Uygulanan testlerden elde edilen tüm bu verilerle, gemi dinamiği modeli gerçek verilerle örtüsecek şekilde elde edilmiş ve benzetim çalışmaları yapılmıştır.

Matlab-Simulink ile yapılan benzetim çalışmalarında altı serbestlik dereceli ve doğrusal olmayan çok karmaşık gemi dinamiği incelemek, sisteme en uygun, gerçek zamanda uygulanabilir ileri bir denetim algoritması geliştirilmesine çalışılmaktadır. Uygulanacak ileri denetim algoritmaları ilk önce benzetim modeli ile denenecek, daha sonra gerçek deniz şartlarında test edilecektir. Gerçek deniz şartlarında dalga karakteristiğinin ölçülmesi için ultrasonik sensör kullanılacak ve dalga spektrumu benzetim çalışmalarına eklenecektir. İleriki çalışmalarda, geliştirilen ileri denetim sistemi, gerçek zamanda uygulanarak Martı Gemisi ile gerçek deniz koşullarında seyir yapılarak performans testleri yapılacaktır.

6. TEŞEKKÜR

Bu çalışma, T.C. Sanayi Bakanlığı tarafından “Teknogirişim Sermaye Desteği” (Proje No: 0067.TGS.2009) ve İ.T.Ü. BAP kapsamında desteklenmektedir (Proje No: 33369).

7. KAYNAKÇA

- [1] Milgram, J.H. (2003), *Numerical Methods in Incompressible Fluid Mechanics*, Lecture Notes-Version 3, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, ABD.
- [2] Vanden Berg, S.M. (2007), *Non-Linear Rolling of Ships in Large Sea Waves*, Master's Degree Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, ABD.
- [3] Milgram, J.H. (2007), Strip Theory for Underwater Vehicles in water of Finite Depth, *Journal of Applied Mathematics*, Volume 58, Numbers 1-4, pp. 31-50.
- [4] Sabuncu, T. (1993), *Gemi Hareketleri*, İ.T.Ü. Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, Maslak, İstanbul.
- [5] Kawazoe T., Nishikido S., Wada Y. (1994), Effect of Fin Area and Control Methods on Reduction of Roll Motion with Fin Stabilizers, *Bulletin of the M.E.S.J. (Marine Engineers Society in Japan)*, 22(1), pp. 25-32.

- [6] Surendran S., Lee S.K., Kim S.Y. (2007), Studies on an Algorithm to Control Motion Using Active Fins, *Ocean Engineering*, 34, 542-551.
- [7] Perez P., Goodwin G.C. (2008), Constrained Predictive Control of Ship Fin stabilizers to Prevent Dynamic Stall, *Control Engineering Practice*, 16, 482-494.
- [8] Fortune L., Muscato G. (1996), A Roll Stabilisation System for a Monohull Ship:Modelling, Identification, and Adaptive Control, *IEEE Transactions On Control Systems Technology*, Vol. 4, No.1,pp. 18-28.
- [9] Fossen T.I. (1994), *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons Ltd., England.
- [10] Perez T. (2005), *Ship Motion Control Course Keeping and Roll Stabilisation Using Rudder Fins*, Springer-Verlag, London.
- [11] Hickey N.A., Grimble M.J., Johnson M.A., Katebi M.R., Melville R. (1997), Robust Fin Roll Stabilisation of Surface Ships, *Proceedings of the 36th Conference on Decision & Control San Diego*, California USA, pp. 4225-4230.
- [12] Bell J., (1957), Ship Stabilisation: Automatic Controls, Computed and in Practice, *Proceedings of the IEE- Part B:Radio and Electronic Engineering*, Vol. 104, pp. 20-26.
- [13] Crossbow, (2009), CXTA02 2 eksenli eğim ölçer, <http://www.xbow.com>
- [14] United Electronic Industries, (2009), UEISIM300 gerçek zamanlı gömülü denetleyici sistemi, <http://www.ueidaq.com/data-acquisition-chassis/simulink-rtw-targets/ueisim-300.html>

YAZAR DİZİNİ

AK Onur	158
AK Serdar	679
AKDAĞ Remzi	242
AKDEMİR Cemil	253
AKIN H. Umut	474
AKSOY Serkan	332
ALDANMAZ Şenol Lokman	386
ALEMDAROĞLU Nafiz	597, 710
ALTILAR D. Turgay	667
ALTUNEL Fatih	730
ALTUNOK Taner	59
ARICA Nafiz	297
ARIKAN Uğur	547
ARSLAN Ömer	288
ATUN Murat	182
AY Cüneyt	253
AYBEK Fulya	113, 123
AYGÜNEŞ Haluk	134, 276
AYKAN Murat	730
AYKIR Tayfun	193
BACANAK Hüseyin	547
BALCI Özgür	404
BAŞARAN Serkan	524
BAŞBİLEN Koray	182, 265
BEKKİNE Aziz	620
BİCAN Özgür Saygın	688
BİL Halil	730
BOZBULUT Ali Rıza	212
CAVCAR Aydan	113, 123
CİCİBAŞ Halil	297
CUMHUR Tayfun	38
ÇADALLI Nail	342
ÇAĞILTAY Kürşat	464
ÇELİK Turgay	235, 655
ÇELİK Fatih	374
ÇETEK Cem	113, 123
ÇETİNKAYA Serdar	265
ÇINAR Ertan	113, 123

ÇULHA Onur	435
DEDEHAYIR Birsel	496
DEĞERLİ Ahmet Turan	242
DEMİR Kadir Alpaslan	297
DEMİRKIRAN Zuhal Kale	59
DEMİRÖRS Onur	3
DOĞAN Ozan	193
DUMAN Muhammed	90
DURAK Umut	547
EFE Murat	182
EKİCİ Bülent	505
EKSİ Abdulkadir	505
EKÜTEKİN Vedat	435
ERALTAY Kadir	79
ERBİL Yılmaz	505
ERDEM Ahmet	386
ERDİK Atıl	505
ERKORKMAZ Serap	386
ERTOGAN Melek	741
ERTUĞRUL Şeniz	741
FİLİZ Anıl Yiğit	394, 575
FIRAT Engin	414
GAZEL Serkan	404, 679
GENÇ Hakkı Murat	699
GERİDÖNMEZ Fatih	710
GÖKÇELİ İbrahim Gökhan	587
GÖRÜR Bilge Kaan	353
GÖZÜTOK Mesut	386, 394, 575
GÜLEÇ Emre	608
GÜDER Hatice	547
GÜL Nebi	67
GÜLKAN Polat	309
GÜNAL Hasan	426
GÜRBÜZ Ali Cafer	90
GÜRÇAY Haşmet	565
GÜRDAL Serkan	464
GÜRDAMAR Ayçin	38
GÜREL Oral	644
HATİP Aylin	524
HİNDİSTAN Mehmet Ali	555

HOCAOĞLU Mehmet F.	632
İŞÇİ Hakan	443
İÇEN İlker	67
İLÇE Çağrı	452
İLHAN Hacer	565
İLTER Burak	394, 575
İNAL Tolga	101
İŞLER Veysi	353, 414, 464
KABARCIK Ahmet	134
KAHRAMAN Eren	597
KALPAKLI Bora	320
KANDİLLER Levent	134, 265, 276
KARACA Coşkun	484
KARADAĞLI Mert	158
KARADEMİRÇİ Olgun	365
KARAGÖZ Özkan	535
KARAGÖZ N. Alpay	3
KARAKAŞ Deniz	535
KARAKAŞ Mehmet	535
KARAKAYA Murat	146
KARAKULAK Ceyda Berk	67
KARAKUŞ Türkan	464
KARAKÜÇÜK Hüsnü	253
KARAMANOĞLU Yunus Emre	484
KASIM Başar	386, 394, 575
KAVAFOĞLU Zümra	565
KAYGISIZ H. Burak	342
KAYGUSUZ Yasin	101, 452
KAYNAK Ünver	608
KAYNAR Kerem	170, 223
KEMİK Ernur	288
KILIÇ Namık	426, 505
KORUCU Hasan	309
KULAÇ Oray	50
KURŞUN Birkan	524
KURŞUN Engin	464
KURTOĞLU Abdullah	193
KUTLUCA Hüseyin	235, 655
KÜÇÜKYAVUZ Fatih	3
MAHMUTYAZİCİOĞLU Gökmen	514

METİN Mehmet Özer	158, 170, 223
NALBANTOĞLU Volkan	597
OKUTAN Cevdet	699
ÖZAKIN Mehmet Burak	332
ÖZDEMİR Caner	202
ÖZEK Mehmet Ömer	394, 575
ÖZEL Koray	101
ÖZEN Umut	720
ÖZGÖREN M. Kemal	514
ÖZKAN Günay	235, 655
ÖZKAN Bülent	514
ÖZKAYMAK Serkan	620
ÖZKAZANÇ Yakup	79, 587
ÖZKİL Altan	59, 365, 474
ÖZKÜTÜK Emre	26
ÖZYÖRÜK Yusuf	320
SEMİZ Fatih	688
SEVERCAN Mete	212
SEYLAN Çağlar	688
SOLMAZ Mehmet Burak	608
SÖNMEZ Tolga	342
SULTANOĞLU Serdar	404
ŞEN Bekir	342
ŞENYILMAZ H. Kemal	496
ŞENYİĞİT Abdullah Murat	353
ŞİMŞEK Sema	443
TARMAN Hakan I.	320
TAYLAN Metin	741
TEKELİOĞLU Semih	608
TERCAN Erhan	555
TEZCAN Ümit	464
TİFTİKÇİ Hakan	535
TİMAR Yasemin	253
TOKMAK Vahap Oğuz	414
TOKTAŞ Feyza	202
TOPAN İpek Seyran	276
TOPÇU Okan	14
TUĞAÇ Serdar	620
TUĞCU Mert	644
TULUMOĞLU Şafak	575

TURHAN Serhat	386
UÇAN Ferhat	667
UYAR Soner	452
UYSAL Halil	212
UZOL Nilay Sezer	608
ÜNAL Ömer	14
ÜNDEĞER Çağatay	38
ÜNLÜSOY Y. Samim	426
ÜNVER Bahtiyar	555
YILMAZ Aslı	353, 464
YILMAZ Deniz	353
YILMAZ Betül	202
YILMAZ Anıl	426
ZENGİN Ahmet	374
ZENGİN Uğur	597
ZORBA Orkun	182, 620

