

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA LINK SEVİYESİNDE
TOKALAŞMA İÇİN İLETİM GÜC KONTROLÜ**



DOKTORA TEZİ
Hüseyin Uğur YILDIZ

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bülent TAVLI

MART 2016



Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Doktora derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....
Doç. Dr. Tolga GİRİCİ
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **131217019** numaralı Doktora Öğrencisi **Hüseyin Uğur YILDIZ**'ın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA LINK SEVİYESİNDE TOKALAŞMA İÇİN İLETİM GÜÇ KONTROLÜ**" başlıklı tezi **16.03.2016** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı:
Prof. Dr. Bülent TAVLI
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri:
Doç. Dr. Tolga GİRİCİ (Başkan)
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

.....
Doç. Dr. Hakan GÜLTEKİN
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

.....
Prof. Dr. Ali KARA
Atılım Üniversitesi

.....
Yrd. Doç. Dr. Enver ÇAVUŞ
Yıldırım Beyazıt Üniversitesi



TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Hüseyin Uğur YILDIZ

İMZA



ÖZET

Doktora Tezi

KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA LİNK SEVİYESİNDE TOKALAŞMA İÇİN İLETİM GÜC KONTROLÜ

Hüseyin Uğur YILDIZ

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bülent TAVLI

Tarih: Mart 2016

Kablosuz Algılayıcı Ağlarda (KAA) link seviyesinde veri iletişimimin temel mekanizması tokalaşma ile gerçekleşmektedir. Ağ yaşam süresini eniyilemek için veri ve alınan veriyi onaylayan paketlerin (ACK) iletim güç seviyelerinin en iyi şekilde seçilmesi gerekmektedir. Eğer en yüksek iletim güç seviyesi kullanılrsa tokalaşmanın başarısız olma olasılığı minimize edilir. Ancak bu durum bazı linklerde gereksiz güç harcanmasına neden olacağı için her zaman en yüksek ağ yaşam süresini sağlamayabilir. Bu tez çalışmasında veri ve ACK paketlerinin iletim güç seviyelerinin en iyi şekilde ayarlanmasıın ağ yaşam süresine olan etkileri sistematik bir şekilde incelenmiştir. Bu kapsamda pratik varsayımlar altında KAA'ların enerji tüketiminin matematiksel programlama yöntemleri ile özgün bir şekilde modellenmesi gerçekleştirılmıştır. Ayrıca bu tez çalışmasında kablosuz haberleşme ve ağ araştırmalarında sıkça karşılaşılan kayıpsız geri besleme kanalı varsayıminin (ACK paketlerinin kayıpsız bir şekilde kanaldan ilettilmesi) geçerliliği incelenmiştir. Bu tez çalışması sonucunda bir KAA'da veri ve ACK paketleri için çözümeli zor bir problem olan global güç seviye atamasının yapılması yerine, çözümü daha basit bir problem olan link bazında güç seviye atamasının yapılması ağ yaşam süresini global duruma göre ciddi boyutlarda düşürmediği tespit edilmiştir. Ayrıca ACK paketlerinin kayıpsız bir şekilde iletildiği varsayılm olan kayıpsız geri besleme kanalı varsayıminin pratik uygulamalarda yaniltıcı olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kablosuz algılayıcı ağlar, Matematiksel programlama, Ağ yaşam süresi, İletim güç kontrolü, Enerji verimliliği.



ABSTRACT

Doctor of Philosophy

TRANSMISSION POWER CONTROL FOR LINK LEVEL HANDSHAKING IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

Hüseyin Uğur YILDIZ

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Bülent TAVLI

Date: March 2016

In practical Wireless Sensor Networks (WSNs) the main mechanism for link level data exchange is through handshaking. To maximize the network lifetime, transmission power levels for both data and acknowledgement (ACK) packets should be selected optimally. If the highest transmission power level is selected then handshake failure is minimized, however, minimizing handshake failure does not necessarily result in the maximized lifetime due to the fact that for some links selection of the maximum transmission power may not be necessary. In this dissertation study we investigate the impact of optimal transmission power assignment for data and ACK packets on network lifetime in WSNs. We built a novel family of mathematical programming formulations to accurately model the energy dissipation in WSNs under practical assumptions by considering a wide range of energy dissipation mechanisms. We also investigate the validity of a commonly made assumption in wireless communication and networking research: lossless feedback channel (*i.e.*, ACK packets never fail). Our results show that the global optimal assignment of data and ACK packets can be replaced with link scope power level assignment strategies without any significant deterioration of network lifetime. The assumption that ACK packets do not fail is shown to be misleading.

Keywords: Wireless sensor networks, Mathematical programming, Network lifetime, Transmission power control, Energy efficiency.



TEŞEKKÜR

Her şeyden önce çalışmalarım sırasında bilimsel katkıları ile bana yardımcı olan, doktora eğitimim süresince benden yardımlığını esirgemeyen, tez danışmanım ve akıl hocam Sayın Prof. Dr. Bülent Tavlı'ya en içten teşekkür ile saygılarımı sunarım. Doktora çalışmam için kendisinden daha iyi bir danışman ve akıl hocası olamazdı. Ayrıca doktora eğitimimi araştırma bursu kapsamında yapmamı sağlayan TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasında maddi ve manevi desteklerini hiç eksik etmeyen “Carleton Üniversitesi Sistemler ve Bilgisayar Mühendisliği” bölümünden Sayın Prof Dr. Halim Yanıkömeroğlu’ya şükranlarımı sunarım. Ayrıca kendilerine 2014 yılının Şubat ayında Carleton Üniversitesi’ndeki araştırma grubuna bu tez çalışması hakkında yaptığı sunum için çok teşekkür ederim.

2014 yılında bu tez çalışmasında elde ettiğim bulguları yaymak adına Amerika Birleşik Devletleri’ne yaptığım seyahatte bana seminer yapma imkanı sunan “Kaliforniya Üniversitesi: Irvine kampüsü Elektrik Mühendisliği ve Bilgisayar Bilimleri” bölümünden Sayın Prof. Dr. Ender Ayanoğlu’ya, “Buffalo Üniversitesi Elektrik Mühendisliği ve Bilgisayar Bilimi” bölümünden Sayın Doç. Dr. Tommaso Melodia’ya ve değerli dostum Emre Can Demirörs’e, “Güney Kaliforniya Üniversitesi Elektrik Mühendisliği” bölümünden Sayın Prof. Dr. Bhaskar Krishnamachari’ye, “Rochester Üniversitesi Elektrik Mühendisliği ve Bilgisayar Bilimi” bölümünden Sayın Prof. Dr. Wendi Heinzelman’a ve son olarak “Teksas Üniversitesi Dallas kampüsü Elektrik Mühendisliği” bölümünden Sayın Prof. Dr. Murat Torlak'a teşekkür ederim.

Tez sunumumda yorumları, kritikleri ve değerli görüşleri için tez komitesi üyeleri Sayın Doç. Dr. Tolga Girici’ye, Sayın Doç. Dr. Hakan Gültekin’e, “Atılım Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği” bölümünden Sayın Prof. Dr. Ali Kara’ya ve “Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Elektrik ve Haberleşme Mühendisliği” bölümünden Sayın Yrd. Doç. Dr. Enver Çavuş'a da teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez beni dünyaya getiren, bana maddi ve manevi her türlü desteği sağlayan ailem Dr. Şükran Yıldız'a, Dr. Mustafa Yıldız'a ve ablam Av. Ayşegül Yıldız Uluşahin'e adanmıştır. Her konuda sabırla yardımcı olan, bu tezi defalarca okuyup katkıda bulunan ve sevgisini benden hiç eksik etmeyen Ebru Kuçlu'ya desteğinden dolayı teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
KISALTMALAR	xii
SEMBOL LİSTESİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı	3
1.2 Problem Tanımı	3
1.3 Katkılar	4
2. LİTERATÜR TARAMASI	5
3. KURAMSAL TEMELLER	9
3.1 Kablosuz Algılayıcı Ağlar	9
3.1.1 Kablosuz algılayıcı ağların tasarsız ağlara göre avantajları	9
3.1.2 Kablosuz algılayıcı ağların tarihçesi	10
3.1.3 Kablosuz algılayıcı ağ bileşenleri	11
3.1.3.1 Algılayıcı ünitesi	12
3.1.3.2 Mikroişlemci ünitesi	13
3.1.3.3 Alıcı-verici ünitesi	13
3.1.3.4 Güç ünitesi	15
3.1.3.5 Yazılım & işletim sistemleri	15
3.1.4 Kablosuz algılayıcı ağ platformları	15
3.1.5 Kablosuz algılayıcı ağ çeşitleri	18
3.1.6 Kablosuz algılayıcı ağların uygulama alanları	18
3.1.7 Kablosuz algılayıcı ağ tasarımını etkileyen faktörler	19
3.1.8 Kablosuz algılayıcı ağ topolojileri	20
3.1.9 Kablosuz algılayıcı ağ protokol yığını	22
3.1.10 Kablosuz algılayıcı ağ güvenliği	23
3.2 Matematiksel Programlama	25
3.2.1 Matematiksel programlananın tarihçesi	25
3.2.2 Matematiksel programlananın temel özellikler	26
3.2.3 Doğrusal programlama	27
3.2.3.1 Doğrusal programlama model formları	28
3.2.3.2 Doğrusal programlama çözüm yöntemleri	30

3.2.4 Tamsayılı programlama	32
3.2.4.1 Tamsayılı programlama model formları	32
3.2.4.2 Tamsayılı programlama çözüm yöntemleri	34
3.2.5 Doğrusal olmayan programlama modelleri	36
3.3 Sezgisel Yöntemler	36
3.4 Kablosuz Algılayıcı Ağların Eniyilemesi	39
3.5 Faydalanan Materyaller ve Yöntemler	41
4. SİSTEM MODELİ	43
4.1 Özeti	43
4.2 Varsayımlar	43
4.3 Veri Link Katmanı Modeli	44
4.4 Matematiksel Programlama Formülleri	51
4.4.1 Global güç seviye karar stratejisi	52
4.4.2 Yerel güç seviye karar stratejisi	54
4.4.3 Eş güç seviye atamalı yerel güç seviye karar stratejisi	56
4.4.4 En yüksek ACK güç seviye atamalı yerel güç seviye karar stratejisi	56
4.4.5 En yüksek güç seviye atamalı yerel güç seviye karar stratejisi	57
4.4.6 Kayıpsız geri beslemeli yerel güç seviye karar stratejisi	57
4.4.7 Kayıpsız geri beslemeli ve sıfır ACK uzunluklu yerel güç seviye karar stratejisi	57
4.4.8 Tek güç atamalı global güç seviye karar stratejisi	58
4.5 Stratejilerin Değerlendirilmesi	58
5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	61
5.1 Veri Link Katmanı Analizi	61
5.2 Matematiksel Programlama Model Analizi: Basit Örnek	66
5.3 İletim Güç Kontrolü Stratejilerinin Analizi	72
5.3.1 Ağ yaşam süresi analizi	74
5.3.1.1 Sınırlı - sınırsız yeniden iletim yöntemlerinin karşılaşması	82
5.3.1.2 KTDP - DP gevşetme yöntemlerinin karşılaştırması	84
5.3.2 Çözüm süresi analizi	86
6. TARTIŞMA	91
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	93
KAYNAKLAR	97
EKLER	109
ÖZGEÇMİŞ	119

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1: Bir algılayıcı düğümdeki bileşenler	12
Şekil 3.2: Algılayıcı düğüm platformları	16
Şekil 3.3: Tek baz istasyonuna sahip tipik çok atlamalı KAA mimarisi	20
Şekil 3.4: Temsili KAA topolojileri	21
Şekil 3.5: Tipik bir MP modeli	26
Şekil 3.6: Tipik bir DP modeli	27
Şekil 3.7: Primal problem	29
Şekil 3.8: İkincil problem	30
Şekil 3.9: Grafik yöntemi ile olurlu bölgein tespit edilmesi	30
Şekil 3.10: Sabit maliyetli bir KTDP modeli	34
Şekil 3.11: Orijinal TP modeli	35
Şekil 3.12: Orijinal TP modelinin DP gevşetilmiş hali	35
Şekil 3.13: P, NP, NP-Tam ve NP-Zor problemlerinin Euler diyagramı ile $P \neq NP$ varsayıımı altında sınıflandırılması	38
Şekil 3.14: Doğrusal KAA topolojisi	39
Şekil 3.15: KAA yaşam süresinin eniyilemesi için kurulmuş KTDP modeli	40
Şekil 3.16: KTDP çözümü sonucu ağdaki en iyi rotalama	41
Şekil 4.1: Başarılı ve başarısız tokalaşma senaryoları	48
Şekil 4.2: Başarılı tokalaşma mekanizması	49
Şekil 4.3: Girişimli ve girişimsiz haberleşme örnekleri	54
Şekil 4.4: LPLD modeli	55
Şekil 5.1: Kablosuz kanal modeli için düğümler arası mesafeye (d_{int}) göre ortalama yol kaybı ($E[\Upsilon_{21}]$)	62
Şekil 5.2: Kablosuz kanal modeli için düğümler arası mesafeye (d_{int}) göre ortalama alıcı anten gücü ($E[P_{rx,21}^{ant}(l)]$)	63
Şekil 5.3: $M_P = 256$ ve 64 bayt için düğümler arası mesafeye (d_{int}) göre ortalama başarılı tokalaşma olasılığı ($E[p_{21}^{HS,S}(l,k)]$)	64
Şekil 5.4: $M_P = 256$ ve 64 bayt için $N_{rtr} \rightarrow \infty$ durumunda düğümler arası mesafeye (d_{int}) göre ortalama yeniden iletim oranı ($E[\lambda_{21}(l,k)]$)	65
Şekil 5.5: $M_P = 256$ ve 64 bayt için $N_{rtr} = 3$ durumunda düğümler arası mesafeye (d_{int}) göre ortalama yeniden iletim oranı ($E[\lambda_{21}(l,k)]$)	65
Şekil 5.6: $M_P = 256$ ve 64 bayt için $N_{rtr} \rightarrow \infty$ durumunda düğümler arası mesafeye (d_{int}) göre yeniden iletimlerin dâhil edildiği ortalama iletim enerji miktarı ($E[E_{tx,21}^D(l,k)]$)	66
Şekil 5.7: $M_P = 256$ ve 64 bayt için $N_{rtr} \rightarrow \infty$ durumunda düğümler arası mesafeye (d_{int}) göre yeniden iletimlerin dâhil edildiği ortalama alma enerji miktarı ($E[E_{rx,12}^D(l,k)]$)	66

Şekil 5.8: $M_P = 256$ ve 64 bayt için $N_{rtr} = 3$ durumunda düğümler arası mesafeye (d_{int}) göre yeniden iletimlerin dâhil edildiği ortalama iletim enerji miktarı ($E[E_{tx,21}^D(l,k)]$)	67
Şekil 5.9: $M_P = 256$ ve 64 bayt için $N_{rtr} = 3$ durumunda düğümler arası mesafeye (d_{int}) göre yeniden iletimlerin dâhil edildiği ortalama alma enerji miktarı ($E[E_{rx,12}^D(l,k)]$)	67
Şekil 5.10: Basit örnek için oluşturulmuş kare topoloji	68
Şekil 5.11: GPLD stratejisi için optimal çözüm ve rotalama	69
Şekil 5.12: LPLD stratejisi için optimal çözüm ve rotalama	70
Şekil 5.13: Rastgele bir ağ topolojisi	73
Şekil 5.14: $M_P = 256$ bayt ve $ApN = 100 \text{ m}^2$ iken tüm stratejiler için ağ yaşam süresi değerleri	74
Şekil 5.15: $M_P = 256$ bayt ve $ApN = 200 \text{ m}^2$ iken tüm stratejiler için ağ yaşam süresi değerleri	75
Şekil 5.16: $M_P = 256$ bayt ve $ApN = 300 \text{ m}^2$ iken tüm stratejiler için ağ yaşam süresi değerleri	76
Şekil 5.17: $M_P = 256$ bayt ve $N_N = 20$ iken tüm stratejiler için ağ yaşam süresi değerleri	77
Şekil 5.18: $M_P = 64$ bayt ve $ApN = 100 \text{ m}^2$ iken tüm stratejiler için ağ yaşam süresi değerleri	78
Şekil 5.19: $M_P = 64$ bayt ve $ApN = 200 \text{ m}^2$ iken tüm stratejiler için ağ yaşam süresi değerleri	79
Şekil 5.20: $M_P = 64$ bayt ve $ApN = 300 \text{ m}^2$ iken tüm stratejiler için ağ yaşam süresi değerleri	82
Şekil 5.21: $M_P = 64$ bayt ve $N_N = 20$ iken tüm stratejiler için ağ yaşam süresi değerleri	82
Şekil 5.22: $M_P = 256$ bayt iken KTDP modellerin $N_{rtr} \rightarrow \infty$ ve $N_{rtr} = 3$ için çözülmesiyle elde edilen ağ yaşam süreleri arasındaki fark (%) . . .	83
Şekil 5.23: $M_P = 64$ bayt iken KTDP modellerin $N_{rtr} \rightarrow \infty$ ve $N_{rtr} = 3$ için çözülmesiyle elde edilen ağ yaşam süreleri arasındaki fark (%) . . .	84
Şekil 5.24: $M_P = 256$ bayt iken $N_{rtr} \rightarrow \infty$ için KTDP ve DP gevşetilmiş modeller ile elde edilen ağ yaşam süreleri arasındaki fark (%)	85
Şekil 5.25: $M_P = 64$ bayt iken $N_{rtr} \rightarrow \infty$ için KTDP ve DP gevşetilmiş modeller ile elde edilen ağ yaşam süreleri arasındaki fark (%)	86
Şekil 5.26: $M_P = 256$ bayt iken $N_{rtr} \rightarrow \infty$ için KTDP ve DP gevşetilmiş modellerin çözüm süreleri (s)	87
Şekil 5.27: $M_P = 64$ bayt iken $N_{rtr} \rightarrow \infty$ için KTDP ve DP gevşetilmiş modellerin çözüm süreleri (s)	88

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1: Ticari amaçlı kullanılan KAA'ların tarihçesi ve özellikleri.	11
Çizelge 3.2: Algılayıcı düğüm platformlarında kullanılan çeşitli mikroişlemci ünitelerinin karşılaştırması.	13
Çizelge 3.3: Algılayıcı düğümler için çeşitli alıcı-verici ünitelerinin karşılaştırması.	14
Çizelge 3.4: Bazı önemli algılayıcı düğüm platformlarının karşılaştırması.	17
Çizelge 3.5: Eniyileme problemlerinin sınıflandırılması.	27
Çizelge 4.1: Mica2 düğümler ve CC1000 radyosu için l güç seviyesindeki iletim güç tüketimi ($P_{tx}^{crc}(l)$ mW) ve çıkış anten gücü ($P_{tx}^{ant}(l)$ mW).	45
Çizelge 4.2: Stratejiler, açıklamaları ve esin kaynağı olunan çalışmalar.	58
Çizelge 5.1: Basit örnek için kurulan topolojide yol kayıp değerleri (Υ_{ij} [dB]). . .	67
Çizelge 5.2: GPLD model çözümü sonucu ağıdaki akışlara bağlı olarak veri link katmanı ile ilgili parametreler.	69
Çizelge 5.3: GPLD model çözümü sonucu her düğümde kullanılan bant genişliği ($\zeta(i)$), meşgul olma zamanı ($T_{bsy,i}$), birim turda tüketilen enerji miktarı (ρ/N_{rnd}) ve batarya kullanımı.	70
Çizelge 5.4: LPLD modeli için yerel eniyileme sayesinde elde edilen optimum güç çifti.	71
Çizelge 5.5: LPLD model çözümü sonucu ağıdaki akışlara bağlı olarak veri link katmanı ile ilgili parametreler.	71
Çizelge 5.6: LPLD model çözümü sonucu her düğümde kullanılan bant genişliği ($\zeta(i)$), meşgul olma zamanı ($T_{bsy,i}$), birim turda tüketilen enerji miktarı (ρ/N_{rnd}) ve batarya kullanımı.	71
Çizelge 5.7: $M_P = 256$ bayt için %95 güven aralıklı ağ yaşam süreleri (yıl cinsinden).	80
Çizelge 5.8: $M_P = 64$ bayt için %95 güven aralıklı ağ yaşam süreleri (yıl cinsinden).	81
Çizelge 5.9: $M_P = 256$ bayt ve $N_{rtr} \rightarrow \infty$ iken DP gevşetilmiş problemler için ortalama çözüm süreleri (s) – %95 güven aralığı.	89
Çizelge 5.10: $M_P = 256$ bayt ve $N_{rtr} \rightarrow \infty$ iken KTDP problemleri için ortalama çözüm süreleri (s) – %95 güven aralığı.	90



KISALTMALAR

A1	: Yedek Problem (İng. Auxillary Problem)
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ACK	: Veriyi Onaylayan Paket (İng. Acknowledgment Packet)
AES	: Gelişmiş Şifreleme Standardı (İng. Advanced Encryption Standard)
ASK	: Genlik Kaydırma Anahtarlama (İng. Amplitude Shift Keying)
ADC	: Analog Dijital Dönüşürücü (İng. Analog-to-Digital Converter)
BUS	: Ortak Yol
CRC	: Dönüşsel Artıklık Denetimi (İng. Cyclic Redundancy Check)
CSMA/CA	: Taşıyıcı Sezmeli Çoklu Erişim ile Çarpışmadan Kaçınma (İng. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)
DARPA	: Amerika Birleşik Devletleri Savunma Bakanlığı İleri Araştırma Projeleri Ajansı (İng. United States Defense Advanced Research Projects Agency)
DP	: Doğrusal Programlama (İng. Linear Programming)
DPM	: Dinamik Güç Yönetimi (İng. Dynamic Power Management)
DSN	: Dağıtık Algılayıcı Ağlar (İng. Distributed Sensor Networks)
DVS	: Dinamik Voltaj Ölçeklendirme (İng. Dynamic Voltage Scaling)
EEPROM	: Elektriksel Silinebilir Programlanabilir Salt Okunur Bellekler (İng. Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)
FSK	: Frekans Kaydırma Anahtarlama (İng. Frequency Shift Keying)
GAMS	: Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (İng. The General Algebraic Modeling System)
GPLD	: Global Güç Seviye Karar (İng. Global Power Level Decisions) Stratejisi
GPLD-SPLA	: Tek Güç Atamalı Global Güç Seviye Karar (İng. Global Power Level Decisions with Single Power Level Assignment) Stratejisi
HCB	: Heinzelman-Chandrakasan-Balakrishnan Enerji Modeli
IP	: İnternet Protokolü (İng. Internet Protocol)
CAA	: Kablosuz Algılayıcı Ağ (İng. Wireless Sensor Networks)
KTDP	: Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (İng. Mixed Integer Linear Programming)

LPLD	: Yerel Güç Seviye Karar (İng. Local Power Level Decisions) Stratejisi
LPLD-EPL	: Eş Güç Seviye Atamalı Yerel Güç Seviye Karar (İng. Local Power Level Decisions with Equal Power Level Assignment) Stratejisi
LPLD-MAPL	: En Yüksek ACK Güç Seviye Atamalı Yerel Güç Seviye Karar (İng. Local Power Level Decisions with Maximum ACK Power Level Assignment) Stratejisi
LPLD-MPL	: En Yüksek Güç Seviye Atamalı Yerel Güç Seviye Karar (İng. Local Power Level Decisions with Maximum Power Level Assignment) Stratejisi
LPLD-PF	: Kayıpsız Geri Beslemeli Yerel Güç Seviye Karar (İng. Local Power Level Decisions with Perfect Feedback) Stratejisi
LPLD-PFZA	: Kayıpsız Geri Beslemeli ve Sıfır ACK Uzunluklu Yerel Güç Seviye Karar (İng. Local Power Level Decisions with Perfect Feedback and Zero ACK Length) Stratejisi
LWIM	: Düşük Güçlü Kablosuz Entegre Mikroalgılayıcılar (İng. Low Power Wireless Integrated Microsensors)
MATLAB	: MATris LABoratuvarı (İng. Matrix Laboratory)
MIT	: Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (İng. Massachusetts Institute of Technology)
MP	: Matematiksel Programlama (İng. Mathematical Programming)
Nİ	: Nesnelerin İnterneti (İng. Internet of Things)
NCFSK	: Tutarlı Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (İng. Non-Coherent Frequency Shift Keying)
NRZ	: Sıfıra Dönüşüz Kodlama (İng. Non-Return-to-Zero)
OOK	: Açı-Kapa Anahtarlama (İng. On-Off Keying)
O-QPSK	: Öteli Dördün Faz Kaydırmalı Anahtarlama (İng. Offset Quadrature Phase Shift Keying)
OSI	: Açık Sistem Ara Bağlantıları (İng. Open Systems Interconnection)
PRR	: Paket Alma Oranı (İng. Packet Reception Rate)
RAM	: Rastgele Erişim Hafızası (İng. Random Access Memory)
QoS	: Hizmet Kalitesi (İng. Quality of Service)
RF	: Radyo Frekansı (İng. Radio Frequency)
RSSI	: Radyo Sinyal Seviyesi Göstergesi (İng. Radio Signal Strength Indicator)
SNR	: Sinyal Gürültü Oranı (İng. Signal-to-Noise Ratio)
SMP	: Algılayıcı Yönetim Protokolü (İng. Sensor Management Protocol)
SOSUS	: Ses Gözetleme Sistemi (İng. Sound Surveillance System)

SQDDP	: Algılayıcı Sorgu & Veri Yaygınlaştırma Protokolu (İng. Sensor Query and Data Dissemination Protocol)
TADAP	: Görev Tahsis & Veri Duyurma Protokolu (İng. Task Assignment and Data Advertisement Protocol)
TCP	: İletim Kontrol Protokolu (İng. Transmission Control Protocol)
TDMA	: Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (İng. Time Division Multiple Access)
UC Berkeley	: Kaliforniya Üniversitesi Berkeley (İng. University of California: Berkeley) Kampüsü
UCLA	: Kaliforniya Üniversitesi Los Angeles (İng. University of California: Los Angeles) Kampüsü
WINS	: Kablosuz Entegre Ağ Algılayıcıları (İng. Wireless Integrated Network Sensors)
YA	: Yöneylem Araştırma (İng. Operations Research)



SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılan simgeler ve açıklamaları aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Link kümesi
ApN	Düğüm başına düşen alan (m^2)
B_N	Gürültü bant genişliği (30 kHz)
d_0	Referans uzaklık (1 m)
d_{ij}	i düğümü ile j düğümü arasındaki mesafe (m)
d_{int}	Komşu iki düğüm arası mesafe (m)
$E[\Upsilon_{ij}]$	(i, j) linki üzerinde ortalama yol kayıp değeri (dB)
E_b/N_0	Bit başına düşen SNR
E_{DA}	Veri alma enerjisi ($600 \mu J$)
$E_{rx,ji}^D(l,k)$	Tokalaşma sonucu yeniden iletimlerin dâhil edilmesiyle alıcı tarafta tüketilen toplam enerji miktarı (J)
$E_{tx,ij}^D(l,k)$	Tokalaşma sonucu yeniden iletimlerin dâhil edilmesiyle verici tarafta tüketilen toplam enerji miktarı (J)
$E[E_{rx,ji}^D(l,k)]$	Tokalaşma sonucu yeniden iletimlerin dâhil edilmesiyle alıcı tarafta tüketilen ortalama enerji miktarı (J)
$E[E_{tx,ij}^D(l,k)]$	Tokalaşma sonucu yeniden iletimlerin dâhil edilmesiyle verici tarafta tüketilen ortalama enerji miktarı (J)
E_{Elec}	Elektronik devrede harcanan enerji (50 nJ)
$E_{rx}^{HS,f}$	Başarılı olmayan bir tokalaşma için alıcı tarafta harcanan enerji miktarı (J)
$E_{rx}^{HS,s}(k, M_A)$	Alıcı tarafta başarılı tokalaşma sonucu harcanan enerji miktarı (J)
$E_{tx}^{HS}(l, M_P)$	Verici tarafta bir aralık süresi boyunca harcanan enerji miktarı (J)
$E[P_{rx,ij}^{ant}(l)]$	(i, j) linki için ortalama alıcı sinyal gücü (dBm)
$E[p_{ij}^{HS,s}(l,k)]$	(i, j) linki için ortalama başarılı tokalaşma olasılığı
E_{PP}	Paket işleme enerjisi ($120 \mu J$)
$E_{tx}^P(l, \varphi)$	φ -bayt uzunluklu paketin l güç seviyesi ile iletilmesi için gereken enerji (J)
E_{rx}	1 bit verinin alınması için gereken enerji (J)
$E_{tx,ij}$	Düğüm- i 'den düğüm- j 'ye 1 bit veri göndermek için gereken enerji miktarı (J)
F	Gürültü figürü (13 dB)
f_{ij}^{lk}	GPLD stratejisi için i düğümünden j düğümüne l güç seviyesi ile iletilen, bunun karşılığında k güç seviyesinde onaylanan paket sayısı
g_{ij}	Yerel link seviye stratejilerinde i düğümünden j düğüme iletilen paket sayısı
$G = (V, A)$	Ağ topolojisini temsil eden yönlü grafik
I_{jn}^i	Girişim fonksiyonu
l_{mak}	Maksimum güç seviyesi (seviye-26)

l_{min}	Minimum güç seviyesi (seviye-1)
k_B	Boltzmann sabiti ($1.38064852(79) \times 10^{-23}$ J/K)
k_{ji}^{opt}	j düğümünden i düğümüne iletilen bir ACK paketi için seçilen optimum güç seviyesi
l_{ij}^{opt}	i düğümünden j düğümüne iletilen bir veri paketi için seçilen optimum güç seviyesi
M_A	ACK paket boyutu (20 bayt)
M_P	Veri paket boyutu (64 & 255 bayt)
n	Yol kayıp katsayısı (4)
N_N	KAA'daki düğüm sayısı (5–25)
N_{rnd}	Ağ yaşam süresi (tur)
N_{rtr}	Maksimum yeniden iletme sınırı (3)
p	r bitin başarılı alınma olasılığı
P_{α_i}	α_i olayının gerçekleşme olasılığı
$P_{rx,ij}^{ant}(l)$	(i, j) linki üzerinde l güç seviyesinde iletim sonucu alıcı sinyal gücü (dBm)
$P_{tx}^{ant}(l)$	Anten çıkış gücü (-20 – 5 dBm)
P_{rcr}^{rc}	Alma güç harcaması (35.4 mW)
$P_{tx}^{crc}(l)$	l güç seviyesi ile iletim güç harcaması (mW)
P_{DA}	Veri işleme için gereken güç (30 mW)
P_e	Bit hata olasılığı
$p_{ij}^f(l, \varphi)$	(i, j) linki üzerinde l güç seviyesinde iletlenen φ -bayt uzunluklu paketin başarısız alınma olasılığı
$p_{ij}^{HS,f}(l, k)$	Başarısız tokalaşma olasılığı
$p_{ij}^{HS,s}(l, k)$	Başarılı tokalaşma olasılığı
P_i	Bit alınmasını temsil eden Bernoulli rastgele değişkeni
P_n	Gürültü gücü (-115 dBm)
$p_{ij}^s(l, \varphi)$	(i, j) linki üzerinde l güç seviyesinde iletlenen φ -bayt uzunluklu paketin başarılı alınma olasılığı
P_{slp}	Uyku modunda güç tüketimi ($3 \mu W$)
P_{sns}	Hassasiyet seviyesi (-102 dBm)
r	r bitlik veri
r_0	[0, 1] aralığında düzgün dağılımlı bir rastgele değişken (m)
r_i	i düğümünün yarıçapı (m)
R_{net}	KAA yarıçapı (m)
s_i	Her turda düğüm- i 'nin ürettiği veri paketi sayısı
S_L	Güç seviyeleri kümesi
T_0	Oda sıcaklığı (27 Celcius)
$T_{bsy,i}$	i düğümü için toplam meşgul olma süresi (ms)
T_{DA}	Veri işleme zamanı (20 ms)
T_{grd}	Koruma zamanı (100 μs)
T_{rnd}	Tur süresi (60 s)
T_{rsp}	Gecikme zamanı (500 μs)

T_{slot}	Aralık süresi (36 & 115 ms)
$T_{tx}(\varphi)$	φ -bayt uzunluklu paketin iletim süresi (ms)
V	Baz istasyonu dâhil olmak üzere tüm düğümlerin kümesi
W	Algılayıcı düğümler kümesi
X_σ	Ortalaması 0 ve standart sapması 4 olan gölgeleme Gauss değişkeni (dB)
α_1	Başarılı tokalaşma olayı
α_2	Başarısız tokalaşma olayı-1
α_3	Başarısız tokalaşma olayı-2
ϵ_{amp}	Vericinin efektifliği (100 pJ)
$\theta_{ij}(l, k)$	Sonlu sayıda yeniden iletim için modellenen kayıp oranı
$\lambda_{ij}(l, k)$	(i, j) linki üzerinde ortalama yeniden iletim oranı
ξ	Kanal veri hızı (19.2 Kbps)
ρ	Algılayıcı düğümlerin batarya enerjisi (25 KJ)
σ	Gölgeleme Gauss değişkeninin standart sapması (4 dB)
$\zeta(i)$	i düğümünün tüm ağ yaşam süresi boyunca kullandığı toplam bant genişlik miktarı (s)
Υ_0	Referans uzaklıktaki yol kaybı (55 dB)
Υ_{ij}	(i, j) linki üzerinde yol kaybı (dB)
$\psi_{ij}(l)$	j düğümünde i düğümünün l güç seviyesinde iletiminden kaynaklı SNR (dBm)



1. GİRİŞ

Kablosuz haberleşme ve elektronik sistemlerinde gerçekleştirilen teknolojik yenilikler ile düşük maliyetli, düşük güç tüketen, çok işlevli ve de kısa menzilde haberleşme imkânı sunabilen algılayıcı düğümlerin tasarımı mümkün olmuştur. Bu küçük algılayıcı düğümler bırakıldıkları ortamlarda meydana gelen fiziksel nicelikleri (örneğin, ısı, nem ve ışık şiddeti gibi) [1] ölçmesi için bir algılayıcı elektronik devreye, çevreden topladığı veriyi işleme (örneğin, sıkıştırma, birleştirme ve toplama gibi) yeteneğine ve de işlenmiş bu veriyi merkezi bir sisteme veya diğer farklı algılayıcı düğümlere kablosuz ortamda göndermeye yarayan bir alıcı-verici devresine sahiptir. Bu tip sayıca fazla algılayıcı düğümün bir araya gelmesi ile bir Kablosuz Algılayıcı Ağ (KAA) oluşmaktadır [2].

Tipik bir KAA çok sayıda kısıtlı batarya enerjisine sahip algılayıcı düğümün bir ortama bilinçli bir şekilde veya rastgele bırakılması ile kurulmaktadır. Algılayıcı düğümler çevrelerinden topladığı verileri merkezi bir istasyona (baz istasyonu) direkt olarak (İng. single-hop) veya diğer düğümleri rôle (İng. relay) olarak kullanarak çoklu atlama şeklinde (İng. multi-hop) baz istasyonuna iletmektedir [3]. Uygulama kolaylığı açısından algılayıcı düğümler genellikle rastgele bir şekilde bir ortama bırakılmaktadır [2]. Bu yerleşim fikrinin en büyük avantajı ulaşılması güç koşullarda (örneğin, dağlık ve ormanlık arazilerde) KAA'nın operasyonunun kolayca yönetilmesidir. Her ne kadar rastgele yerleşim senaryosu operasyon kolaylığı sağlasa da bu durumun en büyük engeli ağdaki düğümlere ulaşmanın zorluğu olmaktadır. KAA'daki düğümlerin baryalarını değiştirmek çoğu zaman mümkün olmamakla birlikte ağır kendi kendini yönetmesi ve haberleşme için harcanan enerjinin en iyi (optimal) şekilde ayarlanması gerekmektedir. Tipik bir KAA uygulamasında haberleşme için harcanan enerji hesaplama işlemleri için harcanan enerjiden daha fazladır [4]. Bu yüzden KAA'lar üzerine çalışan araştırmacılar protokol tasarımları yaparken ağır kendi kendini yönetmesi özelliğini de göz önünde bulundurmak zorundadırlar. KAA'larda bir başka özellik algılayıcı düğümlerin birbirlerine yardım ederek haberleşmeyi sağlamasıdır. Algılayıcı düğümlerde bulunan işlemcilerde çeşitli eniyileme (optimizasyon) tekniklerinin kullanılması ile veri akış miktarının arttırılması, harcanan toplam enerjinin azaltılması ve ağ yaşam süresinin artırılması mümkündür. Ayrıca bu işlemciler sayesinde çevreden toplanan ham veri bir düğümde sıkıştırılabilir veya diğer algılayıcı düğümden gelen veriler bir düğümde birleştirilebilir.

KAA'lar; sağlık [5–7], tarım [8–10], askeri [11–13] ve akıllı ev sistemleri uygulamaları [14–16] için gün geçtikçe kilit rol üstlenen bir teknoloji haline gelmiştir. Şu anda kullanılan çeşitli KAA çözümleri birbirlerinden farklı protokoller ve algoritmalar kullandığı için bu ağların ortak bir standart çerçevesinde tek bir geniş alan altında (İng. wide area network) toplanması oldukça önemli bir zorluğu beraberinde getirmektedir [17]. Bu yüzden yukarıda bahsedilen heterojen KAA'ların uyumlu bir şekilde çalışması için üst katmanlar (uygulama katmanı) ile alt katmanların uyumlu çalışması gerekmektedir.

Algılamacı düğümlerin kısıtlı batarya enerjisi ve iletim menzilinden dolayı dış dünya ile iletişim kurabilmesi güçtür. Bu durumda bir KAA'yı dış dünyaya bağlamak için çeşitli geçit (İng. gateway) cihazları kullanılmaktadır. Böylece KAA'dan elde edilen veri İnternet'e bağlı diğer cihazlara aktarılabilmektedir. Ancak veri akışının başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi için geçit cihazları içerisinde KAA protokollerile standart bir protokol arasındaki dönüşümlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bilindiği üzere İnternet Protokolü (IP) günümüzde en çok kabul gören standartlaşmış bir protokol olup KAA'ların IP ile dış ağlara ve dolayısıyla İnternet'e bağlanması en uygun görülen çözümüdür. Bu yöntem sayesinde akıllı algılamacı düğümler bir standart protokol çerçevesinde kullanılır ve böylece tipik bir Nesnelerin İnterneti (İng. Internet of Things) uygulaması gerçekleştirilmiş olur [18]. Bununla birlikte KAA'ların Nesnelerin İnterneti (NI) paradigması için önemli bir teknolojik altyapı oluşturduğu bilinmektedir [19, 20].

Bir KAA'nın yaşam süresini maksimize etmek için algılamacı düğümler çevreden aldığı verileri baz istasyonuna iletirken iş birliği kurmak zorundadırlar. Ayrıca algılamacı düğümler batarya enerjilerini dengeli bir şekilde harcayarak aşırı enerji tüketiminden kaynaklanabilecek batarya tüketim sorunlarından da kaçınmak zorundadırlar. Ancak bu şekilde ağ yaşam süresi maksimize edilebilmektedir [4, 21–23]. Enerji dengesinin kurulabilmesi için çeşitli kararlar (örneğin, noktadan noktaya her linkte ne kadar veri taşınacağı ve bu veri taşınırken hangi güç seviyesi kullanılacağı bilgisi gibi) en iyi şekilde verilmelidir. Literatürde yer alan KAA yaşam süresini maksimize etmeyi amaçlayan çoğu çalışmada gerçekle meydana gelen karmaşık olaylar çeşitli basitleştiriçi varsayımlar altında soyutlanarak daha basit modeller ile açıklanmaktadır. Bu varsayımlar arasında; güç seviyesinin ayrık olarak değil de sürekli (İng. continuous) bir şekilde modellenmesi, veri iletimi yapılan kanalın kayıpsız olması, alıcı tarafta alınan veriyi onaylayan paketlerin (İng. acknowledgement packet – ACK) kayıpsız kanalda iletilmesi – kayıpsız geri besleme kanalı ve sınırsız bant genişliği yer almaktadır [23–25].

Gerçek KAA uygulama senaryolarında güç seviye atamaları ayrık güç seviyelerinin kullanılmasıyla yapılmaktadır. Bununla birlikte KAA'lardaki kablosuz kanal ortam şartlarına bağlı olarak paket hatalarına oldukça duyarlıdır. Bu duyarlılık ACK paketleri için de geçerli olup bu paketler için de kablosuz kanalda bit hataları meydana gelebilmektedir. Son olarak tipik kablosuz haberleşme sistemleri bilindiği üzere sınırlı bant genişliğine sahiptir. Bu yüzden yukarıda bahsedilen mekanizmaların kurulacak olan ağ modelinde yer olması ve de ağ yaşam süresine olan etkilerinin incelenmesi büyük önem arz etmektedir.

ACK paketleri Açık Sistem Ara Bağlantıları (İng. Open Systems Interconnection – OSI) modelinin ulaşım katmanında (İng. transport layer) uçtan uca yollarda paketlerin başarılı şekilde alınıp alınmadığını tespit eden paketlerdir [26]. Örneğin, OSI katmanında yer alan İletim Kontrol Protokolü (İng. Transmission Control Protocol – TCP) farklı tiplerde ACK paketleri kullanmaktadır (örneğin, seçici ACK, toplamalı ACK vb.) [27]. Ancak bu tez çalışmasında ulaşım katmanındaki tokalaşmadan (İng. handshake) ziyade veri link katmanı (İng. data link layer) seviyesinde tokalaşmanın incelenmesi hedeflenmiştir.

Geniş çapta veri link katmanında kullanılan kablosuz haberleşme standartları (örneğin, IEEE 802.11 [28] ve IEEE 802.15.4 [29]) veri alışverişi için link katmanında tokalaşmayı (alınan veri paketlerinin ACK paketleri ile cevaplanması) tanımlamaktadır. Yukarıda bahsedilen standartlar içerisinde IEEE 802.15.4 standarı KAA'larda sıkça kullanılmakta olup veri link katmanında güvenilir haberleşme sağlanabilmesi için ACK paketlerini kullanmaktadır [30]. Ulaşım katmanında ve veri link katmanında kullanılan ACK paketleri birbirlerini tamamlar niteliktedir. Veri link katmanında kullanılan ACK paketleri ulaşım katmanında kullanılan ACK paketlerinden daha hızlı tepki vermekte olup olacak paket kayıpları için daha hızlı aksiyon alınmasını mümkün kılmaktadır. Diğer taraftan ulaşım katmanında kullanılan ACK mekanizması sıkışma kontrolünde kullanılmaktadır. Bununla birlikte veri link katmanında kullanılan ACK paketleri sıkışma kontrolü yapmamaktadır. Bu yönü ile ulaşım ve veri link katmanlarında kullanılan ACK paketlerinin farklı amaçlarda kullanıldığı görülmektedir. Son olarak farklı katmanlarda yer alan tokalaşma mekanizmaları bir fazlalık olarak algılanmamalıdır. Aksine tüm sistemin eniyilemesi için alınan çok önemli bir tasarım karardır [31].

1.1 Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışmasında KAA'larda ağ yaşam süresini eniyilemek için doğruluğu kanıtlanmış ve de veri link katmanında gerçekçi enerji tüketim modellerini kullanan özgün matematiksel programlama yöntemleri sunulmuştur. Geliştirilen her bir yöntem bir spesifik veri/ACK iletimi stratejisi için oluşturulmuştur. Buna bağlı olarak KAA'nın yaşam süresini eniyilemek amaçlanmıştır. Gerçekte önerilen bu stratejilerin çoğu literatürde yer alan ve de sıkça kullanılan iletişim güç kontrol yaklaşımlarının temel fikirlerini baz almaktadır.

1.2 Problem Tanımı

Bu tez çalışmasında sunulan matematiksel programlama modelleri ile veri ve ACK paketleri iletiminin birlikte düşünüldüğü durumdaki çeşitli iletişim güç atama stratejilerinin sistematik ve de sayısal bir şekilde karşılaştırılması mümkündür. Daha ayrıntılı bir şekilde açıklanırsa, bu tez çalışmasındaki amaç aşağıda verilen araştırma sorularına cevap vermek üzerine kuruludur:

1. Veri ile ACK paket hatalarını içeren ve de KAA'nın yaşam süresini maksimize eden bir matematiksel programlama yöntemi veya yöntemleri önerilebilir mi?
2. Bu tip matematiksel programlama modelleri ciddi boyutta bir yakınsama hatası olmadan (sonuçları ciddi ölçüde değiştirmeden) polinom zamanda çözürlürebilir mi?
3. Veri ve ACK paketlerinin iletişim güç seviyelerinin global karar değişkenleri mi olması gereklidir?
4. Veri ve ACK paketlerinin iletişim güç seviyelerinin link bazında karar verilmesi durumunda, global duruma göre ağ yaşam süresi kaybı en fazla ne kadar olur?

5. Her linkte veri ve ACK paketi için aynı optimal iletim güç seviyesi kullanılabilir mi?
6. ACK paketleri için olası en yüksek iletim güç seviyesini kullanmak iyi bir strateji midir?
7. ACK paketlerinin her zaman hatasız şekilde iletilmesi varsayıminin ağ yaşam süresine olan etkileri nelerdir?

1.3 Katkılar

Literatürde mevcut KAA yaşam süresi eniyileme çalışmaları ile bu çalışma karşılaştıracak olursa bu çalışmanın özgün tarafı deneysel olarak doğrulanmış radyo yayılım ve kanal modelini içeren matematiksel programlama tabanlı bir KAA tasarımları yapmaktadır. Literatürde bu konu hakkında yapılan çalışmaların temelinde idealize edilen modeller (örneğin, basitleştirilmiş yol kayıp modelleri gibi) tercih edilmiştir. Bu çalışmada ise deneylerle ispatlanmış kanal ve veri link katmanı modellerinin matematiksel programlama yöntemleri sayesinde tasarlanan KAA modeline yedirilmesi ile ağ yaşam süresinin performansı oldukça basitleştirilmiş varsayımlar altında kurulmuş KAA'lar ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca mevcuttaki diğer çalışmalarında yer almayan veri ve ACK paket alışverişi (iki yönlü tokalaşma) için iletim güç kontrol stratejilerinin ağ yaşam süresine olan etkileri bu tez çalışmasında sistematik bir şekilde incelenmiştir. Bu çalışma ile hem veri hem de ACK paketlerinin iletim güç seviyelerinin beraber eniyilemesinin ağ yaşam süresini arttırmadaki en büyük etken olduğu sonucuna varılmıştır.

Bölüm 1.2'de sorulan araştırma soruları oldukça kritiktir. Bu araştırma soruları KAA literatüründe daha önce incelenmediği için bu sorulara verilen cevaplar bu tez çalışmasının özgün katkılarını göstermektedir. Bu çalışmada sunulan eniyileme yöntemleri ufak bir düzenleme yardımıyla KAA'lar ile ilgili çeşitli araştırma konularında rahatlıkla kullanılabilmektedir. Son olarak bu çalışma sayesinde KAA literatürüne teorik katkılar da sağlanmıştır. Bu tez çalışmasında tasarlanan matematiksel programlama yöntemleri hem kesin olarak hem de gevsetme teknikleri ile çözülmüştür. Kesin sonuç ve gevsetme teknikleri ile elde edilen farkın üst sınırının oldukça düşük olduğu hem teorik olarak hem de analizler yardımı ile gösterilmiştir. Ayrıca KAA'larda iletim güç kontrolü üzerine yayınlanan teorik çalışmalarda sıkça kullanılan kayıpsız geri besleme kanalı varsayıminin link seviye tokalaşmasındaki doğruluğu incelenmiştir.

Bu tez çalışmasının organizasyonu şu şekilde gerçekleştirilmiştir: KAA'larda iletim güç kontrolü ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar Bölüm 2'de sunulmuştur. Bölüm 3'te detaylı olarak KAA'lar, matematiksel programlama ve eniyileme problemleri için kuramsal temeller anlatılmıştır. Bölüm 4'te bu tez çalışmasına konu olan sistem modelleri (varsayımlar, enerji harcama modelleri ve matematiksel programlama problemi) ayrıntıları ile birlikte sunulmuştur. Bölüm 5'te sistem modelleri ile ilgili kapsamlı nümerik analizler yapılmış, elde edilen bulgular paylaşılmıştır. Bölüm 6'da bir önceki bölümde yer alan bulgulara ait tartışmaya yer verilmiştir. Bölüm 7'de bu tez çalışmasının sonuçları özetlenmiş ve ileriki çalışmalara öncülük edebilecek önerilere deñinlmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde KAA'larda iletim güç kontrolü etrafında yapılan bir konu olarak yerini almaktadır [32–35]. Pantazis ve Vergados [33], KAA'larda güç yönetimi ve iletim güç yaklaşımının sınıflandırılması üzerine çalışmıştır. Khemapech ve arkadaşları tarafından [34] ise KAA'larda iletim güç kontrolü ile ilgili başka bir özet çalışma sunulmuştur.

KAA'larda iletim güç kontrol yaklaşımı; ağ seviye stratejileri [36], düğüm seviye stratejileri [37, 38] ve link seviye stratejileri [32, 39–42] olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır. Ağ seviye stratejilerinde tüm ağ tek bir iletim güç seviyesini kullanmaktadır. Düğüm seviye stratejilerinde her düğüm komşu düğümlere veri iletirken optimal iletim güç seviyesini kullanmaktadır. Link seviye stratejilerinde her linkte kullanılan güç seviyeleri ayrı ayrı eniyilenir. Aslında son zamanlarda iletim güç kontrolü yaklaşımını kullanan ve KAA'ların yaşam süresini maksimize etmeyi amaçlayan literatürdeki yayınlanmış çalışmalarda çoğunluklu olarak link seviye stratejileri kullanılmaktadır. KAA'larda iletim güç kontrolü hakkında geniş bir literatür taraması sunan [33] çalışma baz alınarak, aşağıda link seviye temelli iletim güç kontrol stratejileri ile ağ yaşam süresini eniyilemeye çalışan ve yakın zamanlarda yayınlanan çalışmaların özetini sunulmaktadır.

KAA'larda iletim güç kontrolü konusunda yapılan en eski ve en göze çarpan çalışmaların birisi Lin ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadır [32]. Bu çalışmada yazarlar kapalı devre geri besleme üzerinden bir iletim güç kontrolü algoritması tasarlamışlardır. Tasarlanan bu algoritma linklerin kalitesini bireysel bir şekilde gözlemektedir. Bu algoritmanın ek yükünün düşük olduğu kapsamlı deneyler sonucunda gösterilmiştir. Ayrıca enerji verimliliği açısından link seviye temelli iletim güç kontrolü yaklaşımının düğüm seviye ve ağ seviye temelli yaklaşılara göre daha üstün olduğu gösterilmiştir. Kim ve arkadaşları [43], mevcut kablolu televizyon altyapısı üzerinde çalışan bir KAA tasarlayıp basit bir iletim güç kontrol teknigi önermiştir. Bu KAA geleneksel kablolu televizyon ağının boşta kalan bant genişliğini kullanarak ağ yaşam süresini uzatmak adına otomatik iletim güç kontrolünü desteklemektedir. Önerilen yöntem sayesinde ağ yaşam süresi 1.7 kat faktör ve %42 enerji verimliliği ile uzatılmıştır. Zongkai ve arkadaşları [44], büyük ölçekli KAA'ların yaşam süresinin uzatılması adına düğümlerde meydana gelen değişken trafikleri de göz önünde bulunduran bir iletim güç kontrol teknigi önermiştir. Panigrahi ve arkadaşları [45], girişimi, güç kontrolünü ve çeşitli yönlendirme (Ing. routing) stratejilerini birlikte incelemiştir, bu parametrelerin KAA yaşam süresine olan etkilerini araştırmıştır. Bu kapsamında güç kontrollü iletim senaryolarında ve girişim altında güç kontrollü en yakın yönlendirme ile ağ yaşam süresini eniyileyen yönlendirme protokollerini tasarlamıştır. Xin ve arkadaşları [46], röle düğümlerin ağ içine konumlandırılması ve iletim güç kontrolü sayesinde ağ yaşam süresinde meydana gelen değişikliklerin izlemesini amaçlamış, röle düğümlerin ağa dâhil edilmesiyle ağ yaşam süresinin ciddi ölçüde uzatıldığı görülmüştür.

Vales-Alonso ve arkadaşlarının çalışmasında [39], KAA'ların enerji verimliliğini artırmayı hedefleyen bir iletim güç kontrol mekanizması önerilmiştir. Bu mekanizmada her link için veri iletimi esnasında önceden belirlenen hedef paket hata olasılığını karşılayan minimum iletim güç seviyesi kullanılırken, kontrol paketleri (ACK paketleri) maksimum güç seviyesi ile iletilmektedir. Sadece ACK ve Negatif ACK paketlerinden elde edilen kanal geri beslemesi yardımcı ile iletim güç kontrolünü teorik olarak uygulayan bir çalışma, Srivastava ve Köksal tarafından sunulmuştur [40]. Bu çalışmada, kanal sonlu durumlu Markov kanalı (İng. finite state Markov channel) olarak modellenmiş, sonlu ufuk (İng. finite horizon) iletim güç atama problemi dinamik programlama yöntemi ile çözülmüştür. Barcelo ve arkadaşları [41], uçtan uca güvenilir iletişimini ve enerji verimliliğini artırmak adına yönlendirme ve iletim gücü ataması problemlerini birlikte incelemiştir. Düğümler kendi iletim güç seviyelerini ayarlayarak uçtan uca paket teslim oranını belirli bir seviyeden yukarıda tutmaktadır. Pöttner ve Wolf [42], sürekli çoklu iletim güç seviyeleri için link kalitesini gözlemleyen bir yaklaşım önermiştir. Buna göre güvenilir iletişim için hedeflenen seviyeye ulaşacak en düşük iletim güç seviyesinin seçilmesinin en uygun olduğu gözlenmiştir.

Her ne kadar literatürde KAA'ların yaşam süresini uzatmayı amaçlayan çeşitli iletim güç atama stratejileri önerilse de veri ve ACK paketlerinin iletim güç atamalarını birlikte incelemenin ağ yaşam süresine olan etkisi literatürde halen açık bir konudur. Bu tip bir analizi gerçekleştirebilmek adına detaylı ve tutarlı bir link katmanı modelinin kurulması gerekmektedir. KAA literatüründe çeşitli veri link katmanı modelleri önerilmiştir. Önerilen bu modeller içerisinde Heinzelman-Chandrakasan-Balakrishnan (HCB) enerji modeli veri alış verişinde oldukça sık kullanılan bir model olup KAA'lar hakkında yapılan araştırmaları uzun yıllar çok büyük ölçüde etkilemiştir [21].

HCB modeli temel olarak alıcı ve verici arasındaki uzaklığa bağlı olarak iletim gücünün sürekli bir aralıktan ayarlanması dayanır. Bu model ayrıca elektronik devrede iletim ve alım sırasında harcanan enerji tüketimlerini de içermektedir. HCB modeli ortama erişim katmanında oluşan karmaşıklığı gizleyebilen, böylece KAA'larda üst katmanlarda çalışan kişiler için fiziksel katmanın zorluklarını örten kusursuz bir modeldir. Ancak KAA yaşam süresini gerçekçi bir şekilde eniyilemek adına ortama erişim katmanı ve fiziksel katman mekanizmalarını detaylı ve tutarlı biçimde birlikte incelemek gerekmektedir. Bu kapsamda, doğruluğu deneylerle ispatlanmış radyo yayılım ve iletim enerji modellerini birlikte kullanmak gerekmektedir. HCB modelini iyileştirmek adına literatürde son yıllarda daha tutarlı enerji harcama modelleri kurulmuştur [47, 48]. Bahsi geçen çalışmalardan [47]'de log normal gölgeleme tabanlı bir enerji modeli tercih edilirken, [48]'deki çalışmada HCB modelinin daha gerçekçi bir versiyonu tasarlanmıştır.

Daha doğru ve gerçekçi radyo yayılım ile haberleşme enerji tüketim modelleri arayışı kapsamında son yıllarda analitik modeller yerine deneysel veriler sonucu ortaya çıkan modeller tercih edilmektedir. KAA'lar için halen devam eden birçok çalışmada tasarlanan radyo yayılım modelleri elde edilen deneysel verilerin ışığında kurulmaktadır [49–56].

Chen ve arkadaşları [49], çoklu atlamlı bir KAA'da düğüm başı trafik yükünü tahmin etmek için analitik bir model önermiştir. Bu kapsamında radyo modeli olarak log-normal gölgeleme tercih edilmiştir. Çalışma sonucunda gerçekçi olmayan bir radyo modelinin

kullanılması durumunda baz istasyonuna yakın düğümlerdeki trafik yükünün azaldığı; daha gerçekçi modeller kullanıldığı (log-normal gölgeleme modeli) zaman trafik yükünün arttığı tespit edilmiştir. Zuniga ve Krishnamachari [50], haberleşme teorisindeki matematiksel teknikleri kullanarak düşük güçlü kablosuz linkleri incelemiş, geçiş bölgesinin (sağlıksız linklere sahip olan bölge) boyutunu düşürmek için yapılması gereken yöntemlerden bahsetmiştir. Ayrıca başarılı paket alma olasılığının (İng. packet reception rate – PRR) uzaklığa bağlı olarak formülüne çeşitli modülasyon teknikleri için göstermiştir. Bu çalışmada önerilen paket alma formülü, KAA'ların gerçek hayatı kullanılarak olasılıksal haberleşme karakteristiğine oldukça benzettiği için bu tez çalışmasında kullanılan radyo yayılım modeli bu çalışmadan alınmıştır. Cerpa ve arkadaşları [51], parametrik olmayan istatistiksel yöntemler yardımıyla kablosuz tasarsız (İng. ad-hoc) ağlarda linkleri karakterize etmiştir. Bu istatistiksel yöntemlerin doğruluğu standart haberleşme uygulamaları için gösterilmiştir. Özellikle KAA'lar için üretilen radyo yayılım modelleri Kurt ve Tavlı tarafından özetlenmiştir [57].

Son yıllarda literatürde matematiksel programlama tabanlı KAA modelleme ve analizi giderek önem kazanmakta olup bu konuda yapılan araştırmalar hızla artmaktadır. Literatürde KAA'ların matematiksel programlama araçları yardımı ile modellenmesi ile ilgili yayınlanan araştırmalar hakkında özet bilgi vermek bu tez çalışmasının kapsamı dışında olup bu konu hakkında ilgili okuyucular için [58, 59] yayınlarının incelenmesi önerilmektedir. Ancak KAA'ların matematiksel programlama yöntemleri ile modellenmesi hakkında bu çalışma ile ilgili olan literatürdeki mevcut çalışmalar şu şekilde özetlenmektedir.

Matematiksel programlama araçları yardımı ile KAA modellemesi yaparak iletim gücünü eniyilemesini amaçlayan çalışmalar temel olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır: (i) sürekli iletim güç seviyesi varsayımini kullanan çalışmalar ve (ii) ayrık iletim güç seviyesi varsayımini kullanan çalışmalar. İlk grupta çeşitli iletim güç atama yöntemlerinin ağdaki her link için uygulanmasıyla KAA yaşam süresinin eniyilemesi hedeflenmiştir. Bu kapsamında iletim güç seviyelerinin sürekli bir aralıktan ayarlandığı varsayılmıştır [23, 25, 60–62]. İkinci gruptaki çalışmalar ise ağ yaşam süresinin uzatılması iletim güç eniyilemesinin ayrık iletim güç seviyeleri kullanılmasıyla yapılmıştır [48, 63–65]. Örneğin, [65]'te radyo platformunda ayrık güç seviyelerinin kullanılmasının etkileri incelenmiş olup farklı mesafeler ve güç seviyeleri için radyo sinyal seviyesi göstergesi (İng. radio signal strength indicator – RSSI) ile PRR ölçülmüştür. Çalışma sonunda paket boyutunun artması ile hata olasılığının arttığı gözlenmiş böylece ağ kalitesinin düşüğü görülmüştür.

Ancak yukarıda bahsedilen çalışmalar tam olarak bir tokalaşma mekanizmasını modelleyememiştir. Yani, ACK paketleri için de enerji tüketimi modelleyen ve iletim güç eniyilemesini hedefleyen matematiksel programlama temelli KAA modellenmesi ile analizi literatürde daha önce incelenmemiş bir konudur. Bu yüzden mevcuttaki diğer çalışmalarla yer almayan veri ve ACK paket alışverişi için kullanılan iletim güç kontrol stratejilerinin ağ yaşam süresine olan etkileri bu tez çalışmasının ileriki bölümünde sistematik bir şekilde incelenmiştir. Bir önceki bölümde de bahsedildiği üzere bu tez çalışması ile hem veri hem de ACK paketlerinin iletim güç seviyelerinin beraber eniyilemesinin ağ yaşam süresini arttırmadaki en büyük etken olduğu sonucuna varılmıştır.



3. KURAMSAL TEMELLER

3.1 Kablosuz Algılayıcı Ağlar

Hızla gelişen teknoloji sayesinde elektronik devrelerdeki güç tüketiminin azaltılması bu devrelerin fiziksel boyutlarını da küçültmüştür. Küçülen bu devrelerin üretim ve bakım maliyetlerinin düşmesi ile bu devrelerin kullanıldığı uygulama sayısı ciddi ölçüde artmıştır. Ayrıca elektronik devrelerin gelişmesine paralel olarak haberleşme sistemlerinde köklü yenilikler yaşanmış, küçük boyutlardaki yongaların (İng. chip) üretimi kolaylaşmıştır. Üretimin kolaylaşması ile birlikte elektronik devreler ve mikroişlemciler 2000'li yıllarda itibaren hayatın her alanında faydalı çözümler sunmaktadır. Bu teknolojik devrimin bir somut örneği algılayıcı sistemlerde görülmektedir.

Temel olarak küçük bir mikroişlemci ve haberleşme ünitesinden meydana gelen algılayıcı düğümler bırakıldıkları ortamlarda meydana gelen fiziksel nicelikleri (örneğin, ısı, nem ve ışık şiddeti gibi) ölçme, gerektiğinde toplanan veya işlenen verileri merkezi bir sisteme veya diğer farklı algılayıcı düğümlere kablosuz ortamda gönderme yeteneklerine sahiptir. Algılayıcıların kısıtlı özelliklerinden dolayı (örneğin, düşük menzilli haberleşme birimi ve kısıtlı pil enerjisi gibi) geniş bir alanda oldukça yüksek sayıda algılayıcı düğümün kullanılması gerekmektedir. Bu tip sayıca fazla algılayıcı düğümün bir araya gelmesi ile KAA'lar oluşmaktadır.

Günümüzde KAA'lar askeri uygulamalar başta olmak üzere; sağlık, tarım ve akıllı ev uygulamaları için sıkılıkla kullanılmaktadır. Genellikle iki adet kalem pille çalışan algılayıcı düğümler ulaşılması zor olan bölgelere yerleştirildiği için bu pillerin değiştirilmesi veya şarj edilmesi pratik değildir. Dolayısı ile algılayıcı düğümlerin pillerinin enerji tüketimini azaltarak haberleşmenin devamlılığını sağlamak bu alanda karşılaşılan en büyük zorluktur.

3.1.1 Kablosuz algılayıcı ağların tasarsız ağlara göre avantajları

KAA'ların tasarsız ağlara göre avantajları aşağıdaki gibi listelenmiştir [2]:

- KAA'lardaki toplam düğüm sayısı genellikle tasarsız ağdaki düğüm sayısından fazladır.
- KAA'lardaki düğümler tasarsız ağlara göre daha sık bir şekilde konumlandırılmalıdır.
- KAA'ların topolojisi çok sık değişir.

- Algılayıcı düğümler bozulmaya yatkındır.
- Genel olarak KAA'larda düğümler radyo yayını (İng. broadcast) ile haberleşmeyi sağlarken tasarsız ağlar noktadan noktaya haberleşme teknolojisini kullanırlar.
- Algılayıcı düğümler kısıtlı batarya gücüne, hesaplama kapasitesine ve hafizaya sahiptir.
- Algılayıcı düğümlerdeki trafik yükü fazla olduğu için her düğümün belirleyici bir kimliği olmayabilir.

3.1.2 Kablosuz algılayıcı ağların tarihçesi

Günümüzde tüketici ihtiyaçları ve hafif endüstri uygulamaları için sıkça tercih edilen KAA'ların geçmişi askeri ve ağır sanayi uygulamalarına dayanır. Modern KAA'ların atası olan ilk kablosuz ağ örneği Amerika Birleşik Devletleri (ABD) tarafından II. Dünya Savaşı sonrası Sovyet denizaltılarını incelemek için tasarlanan Ses Gözetleme Sistemi (İng. Sound Surveillance System – SOSUS) [66] olmuştur. Bu ağ akustik algılayıcıların ve hidrofonların Atlantik ve Pasifik okyanuslarına bırakılmasıyla oluşmaktadır. Bu algılama tekniği halen aktif bir şekilde çalışmakta olup artık deniz altındaki hayatın ve volkanik aktivitelerin incelenmesi için kullanılmaktadır.

1960'larda ve 1970'lerde yapılan yatırımlar neticesinde günümüz internetinin donanımları geliştirilmeye başlanmış ve ABD Savunma Bakanlığı İleri Araştırma Projeleri Ajansı (İng. United States Defense Advanced Research Projects Agency – DARPA) tarafından 1980'de dağıtık algılayıcı ağlar (İng. distributed sensor networks – DSN) programı başlatılmıştır. DSN programının gelişmesini takiben Carnegie Mellon Üniversitesi ile Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (İng. Massachusetts Institute of Technology – MIT) - Lincoln Laboratuvarı tarafından KAA'lar akademik camiada yerini almaya başlamıştır.

1980'lerin sonunda DARPA araştırma projelerinden elde edilen bulgular askeri mercilerin dikkatini çekmiştir. İlerleyen yıllarda askeri amaçlar için de KAA'lar kullanılmaya başlanmıştır. Askeri birliklerin ve hükümetlerin katkıları ile yapılan yatırımlar neticesinde 1990'ların başında KAA teknolojisi için yapılan araştırmalar önemli biçimde hızlandırılmıştır.

1990'ların sonu 2000'lerin başında hesaplama ve haberleşme teknolojilerinde meydana gelen köklü gelişmeler neticesinde KAA teknolojisiambaşka bir boyuta taşınmıştır. Her geçen zaman diliminde şirketler KAA teknolojisini standartlaştırarak ticari uygulamalar gerçekleştirebilmek için önemli atılımlarda bulunmuştur. 1960–1980 yılları arasında kullanılan tescilli protokoller yerine artık standartlarda yerini alan ZigBee [67] ve WirelessHART [68] gibi IEEE 802.15.4 radyo standardını kullanan protokoller geliştirilmiştir [69]. Çizelge 3.1'de 1980'lerden bu yana KAA'larda gelişen önemli özellikler listelenmiştir.

Çizelge 3.1: Ticari amaçlı kullanılan KAA'ların tarihçesi ve özellikleri.

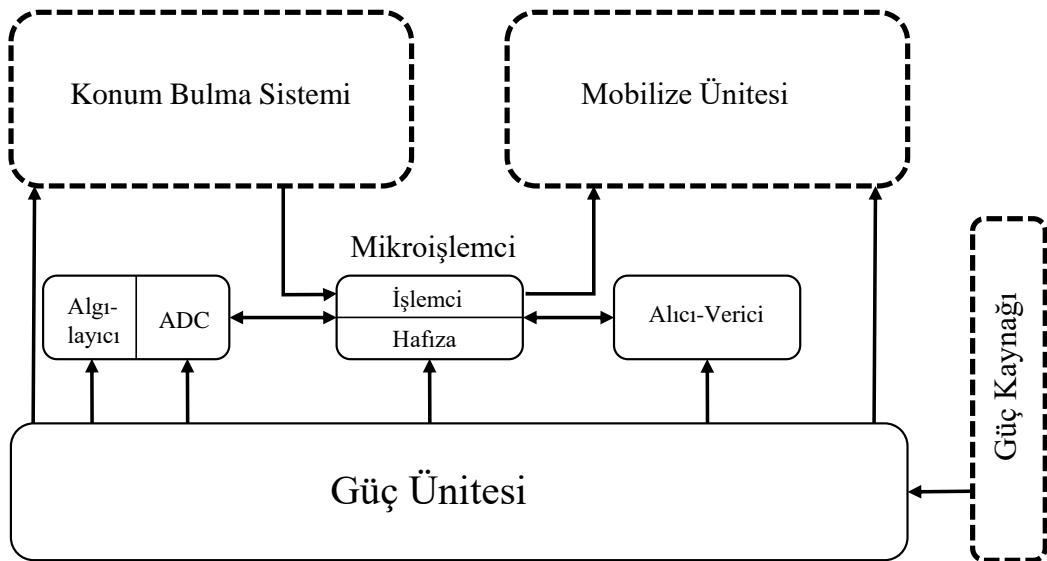
Özellik	1980–1990	2000'lerin başı	2000'lerin sonu
Boyut	Büyük	Kitap boyutunda	Toz parçası boyutlarında
Ağırlık	Pound	Ounce	Gram
Kurulum Tipi	Fiziksel kurulum veya havadan bırakma	Elle yerleştirme	Serpiştirme
Düğüm Mimarisi	Ayrik algılama, haberleşme, işlemci üniteleri	Entegre algılama, haberleşme, işlemci üniteleri	Tamamen algılama, haberleşme, işlemci üniteleri
Protokol	Tescilli	Tescilli	Standart: WiFi, ZigBee, WirelessHART vb.
Topoloji	Noktadan noktaya, yıldız, çok atlamalı	İstemci-Sunucu, eşler arası (Ing. peer-to-peer)	Tamamen eşler arası
Güç Kaynağı	Büyük batarya, kablo beslemeli	Kalem pil	Güneş enerjisi veya nanoteknoloji destekli batarya
Ağ Yaşam Süresi	Saat, gün ve daha fazla	Günler, haftalar	Aylar, yıllar

3.1.3 Kablosuz algılayıcı ağ bileşenleri

Bir KAA'daki her algılayıcı düğüm Şekil 3.1'de görüleceği üzere dört ana bölümden oluşmaktadır:

1. Çevrede meydana gelen fiziksel nicelikleri gözlemleyen *algılayıcı ünitesi*,
2. Algılayıcının kontrolünü, hesaplama işlemlerinin yapılabilmesini ve haberleşme protokollerinin düzgün bir şekilde çalışmasını sağlayan *mikroişlemci ünitesi*,
3. İletme, alma, boş ve uykuya durumlarında çalışabilen iç antene sahip kısa menzilli *alıcı-verici çifti (radio) ünitesi*,
4. Her algılayıcı düğüme ait *güç (batarya) ünitesi*.

Bazı özel KAA uygulamaları için *konum bulma sistemi*, *güç kaynağı* ve *mobilize ünitesi* de kullanılmaktadır. KAA'lar için tasarlanan bazı yönlendirme ve algılama teknikleri konumun yüksek doğruluk ile bilinmesini gerektirmektedir. Bu yüzden algılayıcı düğümlerde *konum bulma sistemi* entegre edilmektedir. Çevreden toplanan verilerin merkezi bir düğümde işlenmesi gerekiyorsa bu durumda yüksek hesaplama enerji maliyeti oluşacağı için merkezi işlemlerin yapıldığı bu düğümde *güç kaynağının* kullanılması gerekmektedir. Mobil KAA uygulamalarında ise *mobilize ünitesinin* kullanılması



Şekil 3.1: Bir algılayıcı düğümdeki bileşenler

son derece elzemdir. Takip eden alt başlıklarda Şekil 3.1'de görülen ana ünitelere ait bazı önemli bilgiler sunulmuştur.

3.1.3.1 Algılayıcı ünitesi

Algılayıcı ünitesi tipik olarak iki alt üniteden oluşmaktadır. Bunlar, algılayıcılar ile analog-dijital dönüştürücülerdir (İng. analog-to-digital converter – ADC). Algılayıcı ünitesi aşağıda belirtilen fiziksel değişimleri gözlemleyecek yapıdadır:

- Sıcaklık,
- Nem,
- Taşit hareketi (örneğin, hız ve yön gibi),
- Aydınlanma durumu,
- Basınç,
- Toprak kalitesi,
- Nesne takibi,
- Gürültü seviyesi.

Algılayıcı düğümler tarafından toplanan bilgiler analog veriler olup ADC ünitesi sayesinde bu veriler sayısal (dijital) hale dönüştürülmektedir. Sayısal biçimde dönüştürülen bu sinyaller *mikroişlemci ünitesine* iletılır.

3.1.3.2 Mikroişlemci ünitesi

Mikroişlemci ünitesi bir mikroişlemci (mikrodenetleyici) ile ufak boyutlu bir hafiza biriminden oluşmakta olup bir algılayıcı düğümün nasıl davranışını yöneten ve gerekli görülen işlemleri gerçekleştiren birimdir. Verilerin geçici olarak saklandığı bellek rastgele erişim hafızası (İng. random access memory – RAM) iken daha uzun süreli saklamalar için elektriksel silinebilir programlanabilir salt okunur bellekler (İng. electrically erasable programmable read-only memory – EEPROM) tercih edilmektedir. Diğer yandan büyük verilerin uzun süreli saklanması için FLASH kullanılmaktadır. Her ne kadar teknolojik yenilikler sayesinde küçük boyutlarda yüksek hesaplama gücüne sahip mikroişlemciler geliştirilmeye başlansa da yüksek hesaplama yapmak için halen kaynak (enerji) sıkıntısı bulunmaktadır. Algılayıcı düğümlerde sıkça kullanılan *mikroişlemci üniteleri* şu şekilde listelenmiştir: (i) Intel Strong ARM SA1100 [70], (ii) Texas Instruments MSP 430 [71] ve (iii) Atmel ATmega 128L serisi mikroişlemciler [72]. Çizelge 3.2’de bu üç mikroişlemciye ait bazı önemli parametreler listelenmiştir.

Çizelge 3.2: Algılayıcı düğüm platformlarında kullanılan çeşitli mikroişlemci ünitelerinin karşılaştırması.

Parametre	Intel Strong ARM SA1100	TI MSP430	Atmel ATmega 128L
Çekirdek	32-bit	16-bit RISC	8-bit RISC
Saat Hızı	59-206 MHz	8/16 MHz	8 MHz
Gerçek Zamanlı Saat Hızı	32.768 kHz	32 kHz	32 kHz
Depolama	4 MB	48 KB	128 KB
Bellek	1 MB	4 KB	4 KB
Aktif Mod Güç Tüketimi	1-200 mW	1.2mW	6-15mW

3.1.3.3 Alıcı-verici ünitesi

Alıcı-verici ünitesi algılayıcı düğümü ağa bağlayan birim olup diğer algılayıcı düğümler veya baz istasyonu ile kablosuz ortamda haberleşme görevini üstlenmektedir. Algılayıcı düğümlerdeki *alıcı-verici ünitesi* optik, radyo frekansı (İng. radio frequency – RF) vb. iletim ortamlarını kullanabilir. RF haberleşme yönteminde modülasyon, bant geçirgenliği, filtreleme, demodülasyon ve çoğullama (İng. multiplexing) teknikleri kullanıldığı için karmaşık ve pahalıdır. Ayrıca iki düğüm arasında haberleşme yapılrken meydana gelen yol kaybı (İng. path loss) yere yakın iletim yapıldığı için uzaklığın dördüncü derecesi ile ilişkilidir [73]. Buna rağmen KAA'larda iletilen paket boyutu ile veri iletim oranı düşük olduğu için RF haberleşme tercih edilmektedir. KAA'larda kullanılan birçok *alıcı-verici ünitesi* aşağıdaki temel dört duruma sahiptir:

- 1. İletme** (İng. Transmit): Verici kısmın aktif (veri gönderilmesine hazır) olduğu durumdur.
- 2. Alma** (İng. Receive): Alıcı kısmın aktif (veri almaya hazır) olduğu durumdur.
- 3. Boş** (İng. Idle): Veri almaya hazır olunan durum olup henüz veri alışverişine başlanmamıştır. Bu durumda alıcı-verici ünitesinin birçok kısmı aktif durumdadır.
- 4. Uyku** (İng. Sleep): Alıcı-verici ünitesinin birçok önemli biriminin kapalı halde bekletildiği durumdur.

Algılayıcı düğümlerde sıkça kullanılan *alıcı-verici üniteleri* şu şekilde listelenmiştir: (i) RFM TR1001 [74], (ii) Chipcon CC1000 [75], (iii) Chipcon CC2420 [76] ve (iv) Inineon TDA525x [77]. Çizelge 3.3'te yukarıda bahsedilen *alıcı-verici ünitelerine* ait bazı önemli parametreler listelenmiştir¹.

Çizelge 3.3: Algılayıcı düğümler için çeşitli alıcı-verici ünitelerinin karşılaştırması.

Parametre	RFM TR1001	Chipcon CC1000	Chipcon CC2420	Inineon TDA525x
Frekans	868.35 MHz	315/433/868/915 MHz	2.4 GHz	868 MHz
Modülasyon	ASK/OOK	FSK	O-QPSK	ASK/FSK
Veri Hızı	115.2 kbps	76.8 kbps	250 kbps	64 kbps
Maks. İletim Gücü	1.5 dBm	10 dBm (433 MHz)	0 dBm	13 dBm
Alıcı Hassasiyeti	-106 dBm	-107 dBm (868 MHz)	-94 dBm	-109 dBm
Alıcı Akımı	12 mA	26.7 mA	17.4 mA	9 mA
Verici Akımı	3.8 mA	9.6 mA	19.7 mA	12 mA
Menzil (Kapalı ortamlar)	100 m	–	50 m	30 m
Menzil (Dış or- tamlar)	>100 m	125 m	50 m	80 m

Chipcon CC1000 radyosunun frekans değerleri 250 Hz aralıklarla programlanabildiği için frekans atlamalı askeri uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır. CC2420 radyosu ise IEEE 802.15.4 standardını destekleyen ilk alıcı-verici ünitesi olarak bilinmektedir. KAA araştırmalarında sıkça tercih edilen bu radyo düşük güç tüketimi ve esnekliği ile ön plana çıkmaktadır. Diğer radyolarda olmayıp CC2420 radyosunda bulunan en önemli özelliklerden birisi Gelişmiş Şifreleme Standardı (İng. Advanced Encryption Standard – AES) 128 desteğini sağlamasıdır. Bu özelliği sayesinde KAA'larda güvenli haberleşmenin sağlanması mümkün kılmıştır.

¹Modülasyon tekniklerinde kullanılan kısaltmalar için “Kısaltmalar” bölümü incelenebilir.

3.1.3.4 Güç ünitesi

Algılayıcı düğümlerde algılama, haberleşme, hesaplama vb. işlemler doğası gereği ile enerji tüketmektedir. Bu işlemler için gereken enerji *güç ünitesi* vasıtasıyla karşılanmaktadır. Güç ünitesi bir algılayıcı düğümdeki en önemli bileşen olup kalem pil, güneş enerjisi vs. ile algılayıcı düğümü besler. Genellikle bir algılayıcı düğümde iki adet kalem pil kullanılmakta olup pillerin üretikleri gerilim 2.0 V ile 3.2 V arasında değişmektedir.

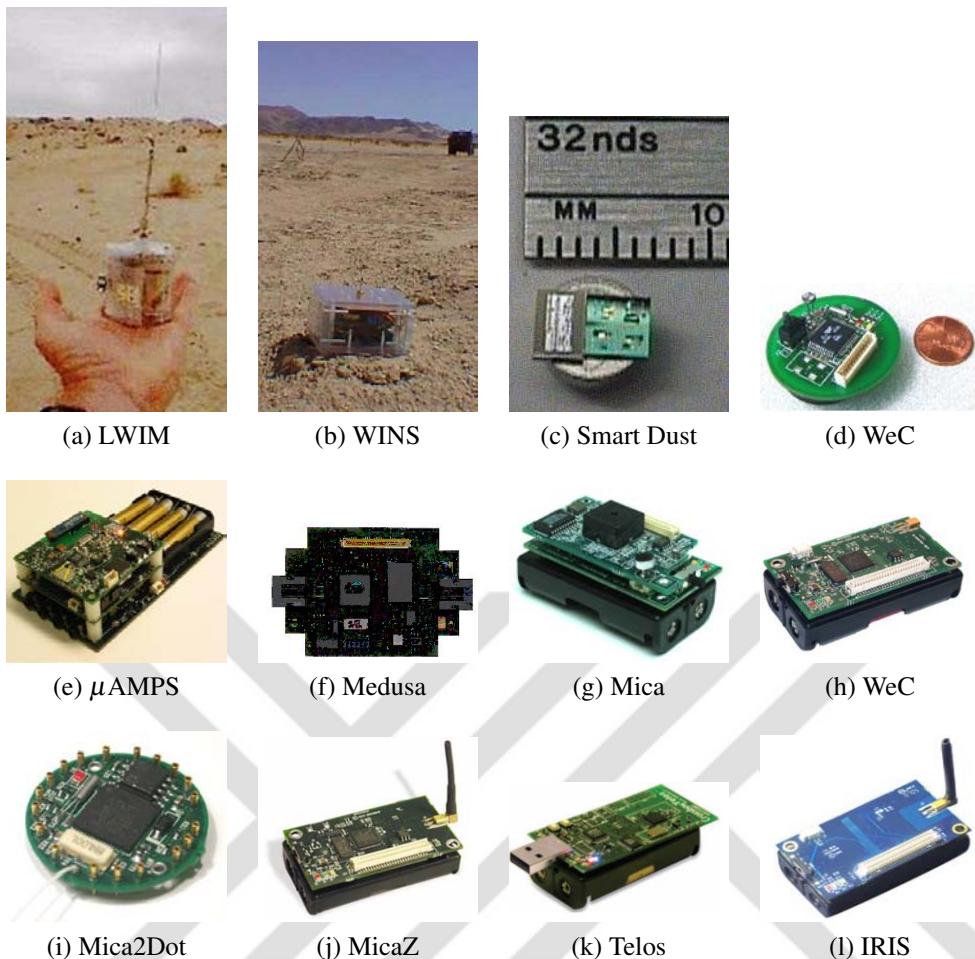
Tipik bir KAA uygulamasında haberleşme için harcanan enerji, hesaplama işlemleri (örneğin, algılama ve veri işleme gibi) için harcanan enerjiden daha fazladır [4]. Örneğin, 1 KB boyutunda bir veriyi 100 metre uzakta bulunan bir düğüme iletmek için harcanacak enerji, saniyede 100 milyon komut işleyen bir mikroişlemcide 3 milyon komut işlemek için gereken enerjiye eşittir [73]. Algılayıcı düğümlerde Dinamik Güç Yönetimi (İng. Dynamic Power Management – DPM) ve Dinamik Voltaj Ölçekendirme (İng. Dynamic Voltage Scaling – DVS) olmak üzere iki farklı güç tasarruf yöntemi vardır [78]. DPM sayesinde etkin olmayan birimlerin enerjileri kesilirken, DVS ile voltaj frekansı değiştirilerek işlemlerin önceliklerine/yüküne göre enerji geçişleri yapılmaktadır.

3.1.3.5 Yazılım & işletim sistemleri

KAA'lar için tasarlanan en önemli işletim sistemi TinyOS olup olay güdümlü (İng. event driven) şekilde çalışmaktadır. TinyOS'nın gömülü sistemler için de programlama arayüzü bulunmaktadır. TinyOS dışında KAA araştırmalarında sıkça kullanılan işletim sistemleri; SOS, CORMOS, EYES, PEEROS, MantisOS, Contiki vb. olup [79]'da bu işletim sistemlerine ait teknik özellikler ilgili okuyucular için sunulmuştur. KAA'ların sanal ortamda simülasyonları için sıkça kullanılan simülatörler/emülatörler ise; NS-2, OmNeT ++, OPNET ve TOSSIM'dir [80, 81].

3.1.4 Kablosuz algılayıcı ağ platformları

1996 yılında Kaliforniya Üniversitesi Los Angeles kampüsünde (İng. University of California: Los Angeles – UCLA) ve Rockwell bilim merkezinde Düşük Güçlü Kablosuz Entegre Mikroalgılayıcılar (İng. Low Power Wireless Integrated Microsensors – LWIM) üretilmiştir [82]. LWIM 1 mW vericiye, 10 m menzile ve 100 kbps kablosuz haberleşme yeteneğine sahiptir. Aynı takım 1998 yılında ikinci nesil ticari bir algılayıcı düğüm olan Kablosuz Entegre Ağ Algılayıcıları'ını (İng. Wireless Integrated Network Sensors – WINS) üretmiştir [83]. Bu algılayıcı düğümler Intel StrongARM SA1100 mikroişlemcisini ve 100 kbps veri hızını destekleyen alıcı-verici ünitesini kullanmaktadır.



Şekil 3.2: Algılayıcı düğüm platformları

Her ne kadar WINS güçlü hesaplama ve haberleşme yeteneğine sahip olsa da araştırmacılar daha küçük ve ucuz düğüm tasarımları konusunda çalışmalar devam etmiştir.

1999 yılında Kaliforniya Üniversitesi Berkeley kampüsünde (İng. University of California: Berkeley UC Berkeley) yürütülen “Smart Dust” çalışması ile WeC üretilmiştir. WeC Atmel ATmega mikroişlemci kullanmakta ve 10 kbps veri hızını desteklemektedir [82].

2000 yılında MIT tarafından geliştirilen μ AMPS (İng. Micro Adaptive Multi-domain Power Aware Sensors) platformu [84] Intel StrongARM mikroişlemci ünitesini desteklemekte ve kendi alıcı-verici ünitesi kullanmaktadır. Rene ve Dot isminde daha güçlü mikroişlemci ünitelerine sahip iki farklı düğüm 1999 ve 2000 yılında üretilmiştir [82].

2001 yılında Mica düğüm ailesi [85] üretilmeye başlamıştır. Bu ailede Mica, Mica2, Mica2dot ve MicaZ algılayıcı düğüm platformları bulunmaktadır. Mica düğümleri Atmel ATmega 103L mikroişlemci ünitesi kullanmakta ve RFM TR 1000 radyosu WeC ile hemen hemen aynı radyo enerjisi tüketmektedir.

Mica2 ve Mica2dot 2002 yılında Atmel ATmega128L mikroişlemcisini kullanarak piyasaya sürüldü ve radyo modülü Chipcon CC1000 ile değiştirilerek güçlendirildi. Bir yıl sonra MicaZ düğümü üretilerek radyosu Chipcon CC2420 ile değiştirildi. Bu radyo

modülü IEEE 802.15.4 ve ZigBee protokollerini kullanmaktadır. Kullanılan radyo modülü sayesinde 250 kbps veri hızına ulaşmak mümkündür. Bu radyo modülü şifreli haberleşmeyi desteklemektedir.

WINS'den farklı olarak basit sinyal işleme ve algılama işlemleri için 2002 yılında UCLA Gömülü Ağ Algılama Merkezi (Ing. Center of Embedded Networked Sensing) tarafından Medusa düğümler üretilmiştir. 2003 yılında UC Berkeley Kablosuz Araştırmalar Merkezi (Ing. Berkeley Wireless Research Center) tarafından gücünü güneşten ve titreşim sinyallerinden alan ilk kablosuz algılayıcı düğüm olan “Pico Beacon” piyasaya sürülmüştür [82].

Mica ailesinin en son üyesi Telos/Tmote Sky 2004 yılında üretilmiştir [86]. Mikroişlemci olarak Texas Instruments tercih edilmiş, alıcı-verici ve algılayıcı üniteler baskılı devre içine entegre edilmiştir. Bilgisayarlar ile kolay entegrasyon için harici bellek yuvası bu platformda mevcuttur. Son olarak UC Berkeley tarafından TinyOS işletim sistemi geliştirilmiş ve günümüzde KAA'lar üzerine yapılan çoğu araştırmada halen kullanılmaktadır.

2004-2011 yılları arasında çeşitli düğüm platformları üretilmiştir. Bunlar içinde Atmel ATmega1281 mikroişlemci ünitesi ve 2.4 GHz radyo frekansını kullanarak 250 kbps veri hızına sahip IRIS düğüm platformu [87] KAA araştırmalarında sıkça tercih edilen bir platform olmuştur. Yukarıda bahsedilen bu platformlar Şekil 3.2'de gösterilmiş olup ticari amaçlı kullanılan bazı önemli KAA platformlarının teknik açıdan karşılaştırması Çizelge 3.4'te sunulmuştur.

Çizelge 3.4: Bazı önemli algılayıcı düğüm platformlarının karşılaştırması.

Parametre	MICA2	MICAz	TelosB/Tmote Sky	IRIS
Mikroişlemci	Atmel AT-mega128L	Atmel AT-mega128L	TI MSP430F149	Atmel AT-mega1281
Radyo	CC1000	CC2420	CC2420	RF230
RAM	4 KB	4 KB	10 KB	8 KB
EEPROM	512 KB	512 KB	256 B	4 KB
FLASH	512 KB	512 KB	48 B	640 KB
İşletim Sistemi	TinyOS	TinyOS-SOS-MantisOS	TinyOS-SOS-MantisOS	MoteWorks
Yıl	2002	2002	2005	2011
Üretici	Crossbow	Crossbow	Crossbow-Moteiv-UC Berkeley	Memsic

3.1.5 Kablosuz algılayıcı ağ çeşitleri

KAAs çeşitleri; *karasal*, *yer altı*, *su altı*, *çoklu medya* (İng. multi-media) ve *mobil* KAA'lar olarak beşen ayrılmaktadır [88]. Tipik *karasal* KAA'lar tasarsız veya planlı bir şekilde kurulabilmektedir. *Yer altı* uygulamaları için kullanılan KAA'lar- in planları önceden yapılmışken kurulum ve bakım açısından *karasal* KAA'lara göre daha maliyetlidir. *Su altı* KAA'lar birkaç algılayıcı düğümden oluşanak seyrek bir yapılanmayı beraberinde getirmektedir. Ortam şartlarının zorluğundan ötürü *karasal* KAA'lara göre daha maliyetlidir. Akustik dalga haberleşmesinden kaynaklanan kısıtlı bant genişliği, uzun yayılım gecikmesi (İng. propagation delay) ve sökümlenme bu tip ağlarda sıkça görülmektedir. *Çoklu medya* KAA'larda kullanılan algılayıcı düğümler kameralar ve mikrofonlar ile donatılmış olup yüksek bant genişliği gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu tip KAA'larda; hizmet kalitesi (İng. quality of service – QoS), filtreleme, veri işleme ve sıkıştırma teknikleri düğümler tarafından sıkça kullanılır. Son olarak *mobil* KAA'larda algılayıcı düğümlerin konumları sıkça değişmektedir. İlk kurulum yapıldıktan sonra çevreden bilginin toplanması için algılayıcı düğümler hareket etmeye başlar. Bu tip KAA'larda karşılaşılan sorunlar genellikle; konum bilgisinin tespit edilmesi, navigasyon, kontrol, kapsama alanı, enerji tüketimi ve bakım üzerindedir.

3.1.6 Kablosuz algılayıcı ağların uygulama alanları

KAA'ların uygulama alanları genel olarak *izleme* (İng. monitoring) ve *takip* (İng. tracking) üzerine kuruludur [88]. *İzleme* uygulamaları temelde; iç/dış mekanların izlenmesi, kişilerin sağlık durumunun kontrol edilmesi, fabrikalarda enerji tüketiminin, envanter durum kontrolünün izlenmesi ve askeri birliklerin izlenmesi üzerine kuruludur. *Takip* uygulamaları ise çoğunlukla nesnelerin, hayvanların, insanların ve taşıtların takip edilmesi üzerine kuruludur.

Aşağıda bu ana başlıklar kapsamındaki tipik KAA uygulamaları listelenmiştir:

1. İzleme uygulamaları

- (a) Doğa uygulamaları: Hayvanların ve bitkilerin doğal yaşam ortamlarındaki davranışlarının izlenmesi, doğal felaketlerin izlenmesi gibi,
- (b) Askeri uygulamalar: Düşman bölgesinin izlenmesi gibi,
- (c) Endüstriyel/Ticari uygulamalar: Fabrikaların üretim, dağıtım ve üketim birimlerinin kontrolü; envanter, yapısal, kimyasal, performans izlenmesi gibi,
- (d) Çevre uygulamaları: Hava durumu tahminlerinin doğru biçimde belirlenmesi, basınç, nem gibi niceliklerin izlenmesi gibi,
- (e) Sağlık uygulamaları: Hasta vücutuna yerleştirilen algılayıcı düğümler ile hastanın ve fizyolojik ve piskolojik durumunun izlenmesi gibi.

2. Takip uygulamaları

- (a) Doğa uygulamaları: Göç eden hayvanların takibi, nesli tükenmeye olan hayvanların kontrollü biçimde takip edilmesi gibi,
- (b) Askeri uygulamalar: Düşman birliklerinin hareketlerinin takip edilmesi gibi,
- (c) Endüstriyel/Ticari uygulamalar: Trafiğin ve araç filolarının gözlenmesi, bu gözlemlere dayanarak rotaların etkin planlanması ve otoparklarda boş ve dolu alanların belirlenmesi, otoparklarda ve benzeri tesislerde güvenliğin sağlanması gibi,

3.1.7 Kablosuz algılayıcı ağ tasarımını etkileyen faktörler

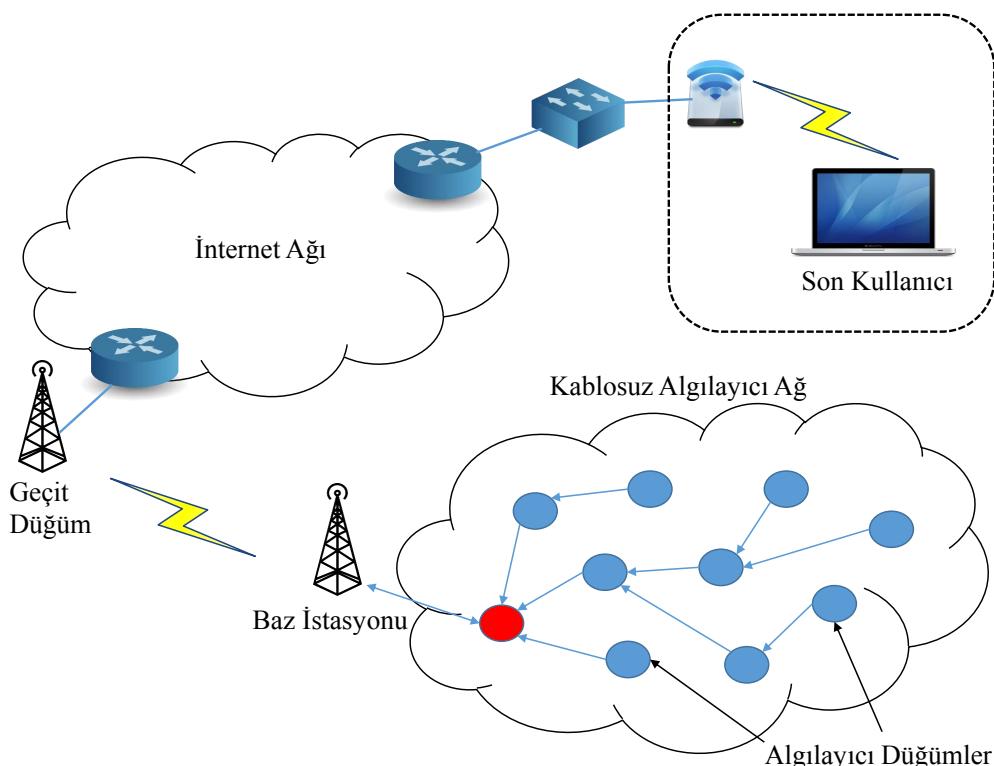
CAA'ların tasarımını etkileyen temel faktörler aşağıdaki gibi listelenmiştir [2]:

- 1. Hata Toleransı:** Algılayıcı düğümler bir ortama bırakıldıktan sonra belirli bir süre içinde bozulmaya meyillidir. Bununla birlikte bozulan bir algılayıcı düğüme ulaşıp o düğümü yeniden tamir etmek zor olduğu için bir CAA düğüm hatalarını tolere edecek şekilde tasarlanmalıdır. Bu tolerans seviyesi uygulamaya göre değişmektedir.
- 2. Ölçeklenebilirlik:** Bir CAA'ya yeni eklenen düğümler ağıın normal çalışma prensibini bozmamalıdır.
- 3. Üretim Maliyeti:** Yüzlerce veya binlerce düğümden oluşan bir CAA için düğüm maliyetinin önemi çok büyüktür. İdeal olan durumda bir algılayıcı düğümün maliyetinin bir dolardan (veya TL'den, Euro'dan vs.) daha düşük olması beklenmektedir.
- 4. Donanım Kısıtları:** Algılayıcı düğüm mimarisinde bulunan donanımların (bkz. Bölüm 3.1.3) küçük bir devre içerisinde yerleştirilmesi ve de düşük güç tüketmesi beklenmektedir.
- 5. Topolojik Kısıtlar:** Tipik bir CAA yüzlerce hatta binlerce algılayıcı düğümdenoluştugu için rastgele yerleştirilen düğümler yüzünden ağı heterojen bir hale gelebilir. Kimi CAA uygulamaları homojen düğüm dağılımını tercih ederken, kimi diğer uygulamalar heterojen ağları tercih etmektedir. Ayrıca ağıın çalışma performansı düğümlerin hareketinden veya ağa yeni katılan düğümler tarafından etkilenmemelidir.
- 6. Çevresel Kısıtlar:** Algılayıcı düğümler arasındaki haberleşmenin kalitesi; fabrika içinde, yere yakın durumda, okyanus dibinde, savaş alanında, büyük yerleşim yerlerinde, binalarda ve hızlı giden araçların bulunduğu ortamlarda değişceği için paket kayiplarına oldukça duyarlıdır.
- 7. İletim Ortam Kısıtları:** Algılayıcı düğümler kablosuz ortamda birbirleri ve/veya baz istasyonu ile iletişim içindedir. Kablosuz ortam; RF, kızıl ötesi veya optik dalga haberleşme sinyallerini içerdigi için CAA'lar bu ortamlarda çalışabilmelidir.

8. Güç Tüketim Kısıtları: Çoğu KAA kısıtlı algılama, haberleşme ve hesaplama enerjisi ile kendi kendini yönetmelidir. Bu yüzden algılayıcı düğümler enerji kaynaklarını verimli bir şekilde tüketerek ağır canlılığını korumak zorundadır.

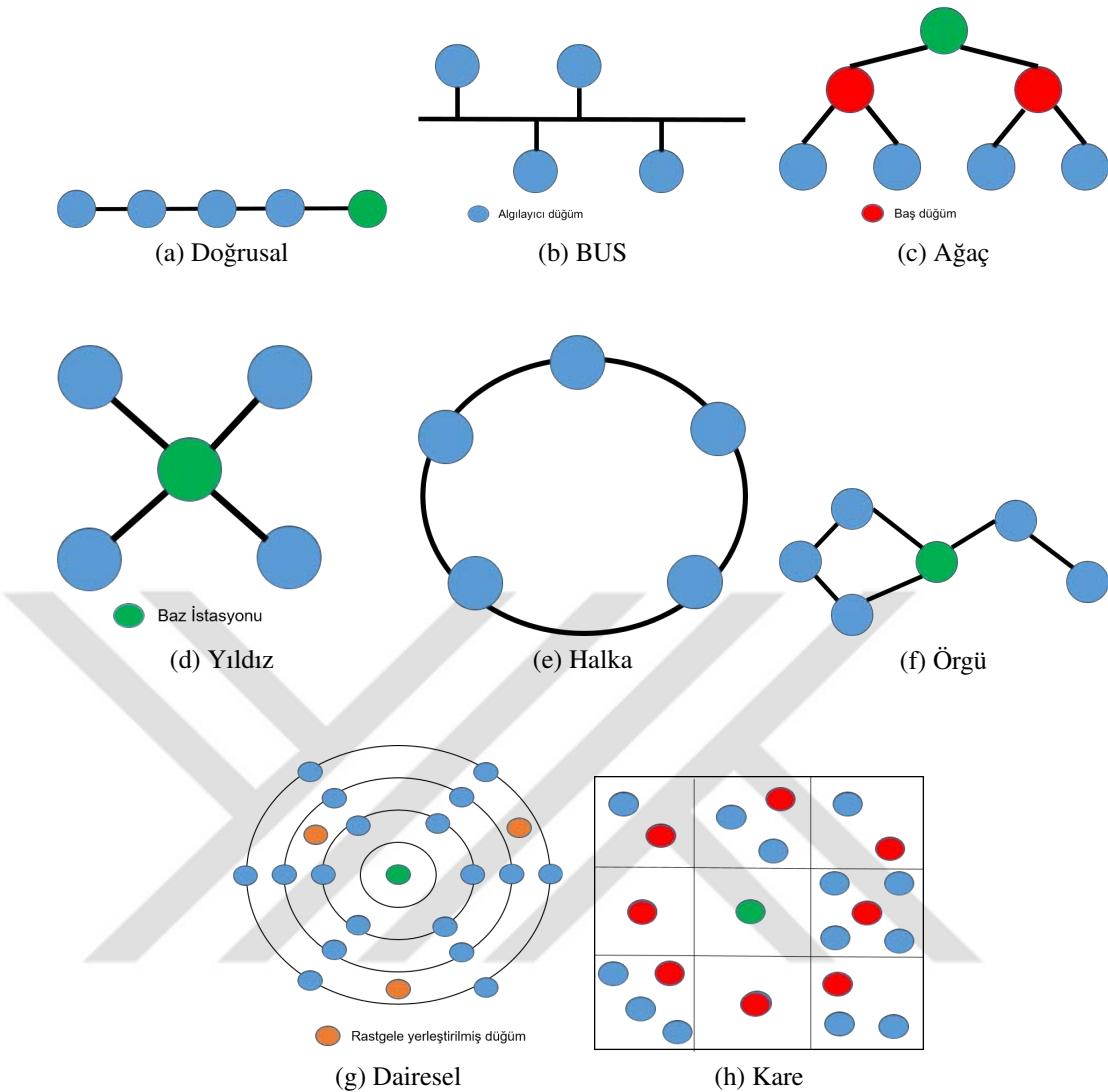
3.1.8 Kablosuz algılayıcı ağ topolojileri

Şekil 3.3'te basit bir KAA mimarisi verilmiştir. KAA'lar üzerine başlanan çoğu çalışma bu geleneksel mimariye sadık kalmıştır. Fakat bu mimari ölçeklenebilir değildir çünkü KAA'daki düğüm sayısı arttığı zaman baz istasyonunda toplanan verinin miktarı artarak baz istasyonu kapasitesine ulaşmakta olup KAA daha fazla genişletilemez [89].



Şekil 3.3: Tek baz istasyonuna sahip tipik çok atlamalı KAA mimarisi

Bu tip sorunları gidermek ve daha karmaşık KAA senaryolarını uygulamak adına; çizgi (İng. line), ortak yol (İng. BUS), ağaç (İng. tree), yıldız (İng. star), halka (İng. ring), örgü (İng. mesh), dairesel (İng. circular) ve kare (İng. grid) gibi topolojiler KAA araştırmalarında kullanılmıştır [90]. Bu topolojilere ait temsili çizimler Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4: Temsili KAA topolojileri

Bu şekilde mavi düğümler algılayıcı düğümleri, kırmızı düğümler baş düğümleri, yeşil düğümler baz istasyonunu ve turuncu düğümler ağa rastgele eklenen düğümleri temsil etmektedir.

Çoğu büyük KAA'da düğümlerin yönetimini kolaylaştırmak için hiyerarşik bir topoloji yapısı kullanılmaktadır. Bu tip topolojilerde genellikle KAA bir dizi kümelere (İng. cluster) ayrılır ve her kümenin bir baş düğümü (İng. cluster head) bulunmaktadır. Bir kümeye içinde baş olmayan diğer algılayıcı düğümler kendi kümelerindeki baş düğüme öncelikle verilerini gönderir ve kümeler arası haberleşmeden baş düğümler sorumlu olur [91].

Kümelendirme yapmanın avantajları aşağıdaki gibi listelenmiştir:

- Birleştirilmiş veri baz istasyonuna gönderilir.
- Haberleşme için daha az düğüm devreye girerek olası çakışmaların (İng. collision) önüne geçilir.
- Enerji, kullanışlı biçimde tüketilir.
- KAA'nın ölçeklenebilirliği rahatlıkla arttırılabilir.
- Tek atlamlı ve çok atlamlı haberleşmeden kaynaklı ek yük azaltılır.

Her ne kadar yukarıdaki topolojiler sıkça kullanılsa da enerji verimli optimal bir topoloji yaratmak (örneğin, kapsama alanını artırmak ve ağını bağlanılabilirliğini artırmak gibi) adına KAA'larda sıkça topoloji kontrolü yöntemleri kullanılmaktadır [92–94]. Topoloji kontrol mekanizmaları genellikle *güç kontrolü* ve *uyku planlaması* yapılarak gerçekleştirilmektedir [94]. *Güç kontrolü* topoloji yönetimi ile algılayıcı düğümler en yüksek güç seviyesi yerine ihtiyaç olunan güç seviyelerini kendi aralarında seçmektedir. *Uyku planlaması* yöntemi ise boş durumda olan düğümlerin uyku durumuna geçirilmesi ile gerçekleştirilmektedir.

3.1.9 Kablosuz algılayıcı ağ protokol yiğini

KAA'lar OSI mimarisindeki klasik katmanları (*fiziksel*, *veri link*, *ağ*, *taşıma* ve *uygulama*) kullanmakla birlikte *güç yönetimi*, *mobilite yönetimi* ve *görev yönetimi* katmanlarını da kullanmaktadır. Aşağıda bu katmanların işlevleri kısaca açıklanmıştır:

- 1. Fiziksel Katman:** Frekans seçimi, taşıyıcı frekans üretimi, sinyal sezimi (İng. detection), modülasyon ve şifreleme işlemlerinin gerçekleştirildiği katmandır. Araştırmacılar bu katmanda çeşitli modülasyon teknikleri, yayılım etkilerini azaltmak ve alıcı-verici tasarımını üzerine çalışmaktadır.
- 2. Veri Link Katmanı:** Verinin çoğullamasının, veri çerçevesinin (İng. frame) sezmilmesinin, ortama erişimin kontrolünün (İng. Medium Access Control – MAC) yapıldığı ve hata kontrolünün gerçekleştirildiği katmandır. Bu katmanda günümüzde yapılan çalışmalar; mobil KAA'lar için MAC protokol tasarımı, hata kontrol kodlama tekniklerinin iyileştirilmesi ve güç koruma durumlarının tasarımı üzerindedir.
- 3. Ağ Katmanı:** Algılayıcı düğümlerden iletilen verilerin baz istayonun ulaştırılması için rotalamanın ve yönlendirmenin yapıldığı katmandır. Bu katmanda yapılan araştırmalar; topolojinin sıkça değiştiği KAA'larda verimli bir şekilde yönlendirmenin gerçekleştirilmesi ve çeşitli KAA'larda ortak kullanılabilecek yönlendirme protokollerinin tasarılanması üzerindedir.
- 4. Taşıma Katmanı:** KAA'ların Internet veya diğer dış ağlara bağlantısının gerçekleştirildiği katmandır. Bu katmanda yapılan araştırmalar, ACK paketlerinin maliyetinden dolayı baz istasyonunda noktadan noktaya haberleşmeyi bölecek çalışmalar üzerindedir.

- 5. Uygulama Katmanı:** Alt seviyelerden elde edilen bilgilerin yönetimi üzerine yoğunlaşan katmandır. Bu katmanda; Algılamacı Yönetim Protokolü (İng. Sensor Management Protocol – SMP), Görev Tahsisisi & Veri Duyurma Protokolü (İng. Task Assignment and Data Advertisement Protocol – TADAP) ve Algılamacı Sorgu & Veri Yaygınlaştırma Protokolü (İng. Sensor Query and Data Dissemination Protocol – SQDDP) olmak üzere üç protokol tasarlanmıştır.
- 6. Güç Yönetimi Katmanı:** Bir veri paketinin alındıktan sonra alıcı-verici modülün kapatılmasını veya uyutulmasını sağlayan katmandır.
- 7. Mobilite Yönetimi Katmanı:** Algılamacı düğümlerin hareketlerini sezip yeni rotaların üretilmesini sağlayan katmandır.
- 8. Görev Yönetimi Katmanı:** Bir bölgedeki algılama görevlerinin planını ve denemesini yapan katmandır (örneğin, hangi düğüm hangi zamanda hangi bir tip veriyi algılamalı gibi).

KAAs için enerji en büyük sıkıntı olup bir KAA'nın yaşam süresini belirleyen en önemli faktördür. Algılamacı düğümlerde enerji tüketiminin efektif bir biçimde gerçekleştirilebilmesi adına son yıllarda literatürde birtakım MAC protokolleri geliştirilmiştir. Bu protokollerden en önemlileri; SMAC [95], TMAC [96] vb. olup ilgili okuyucuların [97, 98] numaralı çalışmaları incelemeleri tavsiye edilmektedir. Özette bu protokoller; enerji verimliliğini artttirmayı, gecikmeyi azaltmayı, veri akış miktarını artttirmayı ve tarafsızlığı (İng. fairness) hedeflemektedir [99]. Her ne kadar enerjinin verimli bir biçimde tüketilmesini hedefleyen bu MAC protokolleri tasarlansa da yine de KAA'larda gereksiz yere enerji harcaması olabilir. Bu tip gereksiz enerji harcamalarına; çakışma, ek kontrol paketi yükü (İng. control packet overhead), boş dinleme (İng. idle listening) ve fazla dinleme (İng. overhearing) [96] örnek olarak verilebilir.

KAAs için tasarlanan yönlendirme protokolleri de son zamanlarda giderek artmıştır. Temel olarak KAA yönlendirme protokolleri üç kategoriye ayrılmaktadır: (i) veri merkezli, (ii) hiyerarşik ve (iii) konum temelli protokoller [100]. *Veri merkezli protokoller*, istenen verinin önceliklendirilerek gereksiz iletimlerin elimine edilmesi mantığı ile çalışmaktadır. *Hiyerarşik yönlendirme protokoller* bir önceki bölümde bahsedilen kümeleme mantığı ile çalışmaktadır. *Konum temelli yönlendirme teknikleri* ise verinin tüm ağa ilettilmesi yerine sadice istenilen bölgeye gönderilmesi üzerine kurulmaktadır. KAAs için tasarlanan en önemli yönlendirme protokolleri; SPIN, LEACH, PEGASIS, TEEN ve APTEEN'dir [101].

3.1.10 Kablosuz algılamacı ağ güvenliği

Bazı kritik KAA uygulamaları için gizlilik ve güvenlik konuları oldukça büyük önem arz etmektedir. Örneğin, askeri uygulamalar için sıkça kullanılan ve sürekli geliştirilen KAAs'ların güvenli biçimde işletilmesi gerekmektedir. Savaş alanında toplanan bilginin üçüncü parti kişilerin eline geçmesi, bilgiyi toplayan birime karşı güçlü bir silah olarak kullanılabilir. Bu tip kritik uygulamalar için güvenlik seviyesinin en üstte tutulması önemlidir [102, 103].

KAAsında iyi bir güvenlik mekanizmasının kurulması uygulamalara ve ağın içinde bulunduğu fiziksel çevreye göre farklılık göstermektedir. Ayrıca bu güvenlik mekanizmaları algılayıcı düğümlerin mikroişlemcilerinde hesaplama ve depolama kaynağı kullanılarak gerçekleştirilmektedir [104]. Son olarak mesajın tazeliği ve ağa izinsiz giriş yapanların tespit edilmesi gibi konular KAA güvenliği için unutulmaması gereken hususlardandır.

KAAsının güvenliği konusunda yaşanan en büyük zorluklar aşağıdaki gibidir:

- KAA'larda sıkılıkla algılayıcı düğümlerin verileri bir düğümde (örneğin, küme başı düğümde) toplanarak birleştirilir ve baz istasyonuna birleştiren veri iletilir.
- Güvenlik ve gizlilik için hesaplama kaynağı harcanacağından dolayı enerji tüketiminin verimli biçimde gerçekleştirilmesi gereklidir.
- Fazla miktarda düğüm sayısından dolayı güvenliğin uygulanması zorlaşmaktadır.

Güvenli bir KAA yaratmak için aşağıdaki maddelerin uygulanması gereklidir [105]:

- **Veri bütünlüğü:** Alıcı düğümün aldığı paketlerin kötü niyetli kişilerce haberleşme sırasında değiştirilmediğini garantilemek için kullanılan yöntemdir.
- **Veri doğrulama:** Alıcı düğümün aldığı paketlerin gerçekten verici düğümden gelip gelmediğini kontrol etmek için kullanılan yöntemdir.
- **Veri gizliliği:** Bir KAA'daki bilginin komşu diğer ağlara sızdırılmamasını garantilemek için kullanılan yöntemdir.
- **Verinin tazeliği:** Bir KAA anlık değişen verileri algıladığı için her mesajın tazeliğinin de garanti edilmesini sağlamak için kullanılan yöntemdir.

3.2 Matematiksel Programlama

Matematiksel Programlama (MP) matematiksel olarak modellenebilen eniyileme problemlerinin analiz edilmesini ve de optimal sonuca ulaşabilmek için kullanılan çözüm yöntemlerini içeren bir bilim dalı olarak tanımlanmaktadır [106, 107]. En temel anlamıyla eniyileme eldeki kısıtlı kaynakların en efektif şekilde kullanılması olarak tanımlanabilir [108]. Matematiksel olarak ise eniyileme bir fonksiyonun minimize veya maximize edilmesi olarak tanımlanabilir [109]. Pratik uygulamalar düşünülecek olursa eniyileme, bir sistemdeki kısıtlı kaynakların (örneğin, iş gücü, donanım, malzeme gibi) en verimli şekilde kullanılmasıyla belirli amaçların (örneğin, maliyetin düşürülmesi, kârın veya verimliliğin artırılması gibi) karşılanması hedefleyen bir bilim dalıdır [110].

3.2.1 Matematiksel programlamanın tarihçesi

Günümüzde kullanılan eniyileme problemlerinin temelleri her ne kadar II. Dünya Savaşı'na kadar uzansa da, ölçme ve karar verme şeklinde yapılan ilk eniyileme yöntemi antik Mısır'da Nil nehrinin taşmasından ve çekilmesinden dolayı sınırların yeniden çizilmesi için gösterilen çalışmalar olarak bilinmektedir. Bu çalışmalar sonucu Nil nehrinin en doğru ne zaman çekileceğini bildiren bir takvim hazırlanmıştır [111]. 17. yüzyılda Fermat ve Lagrange sürekli ve türevi alınabilen bir fonksiyonun yerel optimal değerini bulabilmek adına kalkülüs (İng. calculus) temelli formüller üretmiştir. Aynı yıllarda Newton ve Gauss tekrarlamalı (İng. iterative) yöntemler ile optimal sonuca yakınsayan yöntemler geliştirmiştirlerdir. Ancak burada üretilen yöntemler sadece düzgün davranışlı fonksiyonlar (örneğin, sadece azalan veya artan fonksiyonlar) için geçerli olup daha karmaşık problemler için kalkülüs temelli yaklaşımlar yetersiz kalmaktadır [111]. İlerleyen yıllarda kısıtlara (İng. constrained) sahip olan problemlerin eniyilemesi adına Lagrange bazı yöntemler geliştirmiştir. Cauchy ise kısıtlara sahip olmayan (İng. unconstrained) problemlerin çözülmESİ üzerine çalışmıştır.

1939 yılında Rus matematikçi ve ekonomist Kantorovich tarafından eniyileme problemlerinin teorisi ortaya konsa da 1959 yılına kadar çalışmasını duyuramamıştır [112]. Aynı yıllarda (1940'lar) Dantzig, Kantorovich ile benzer konular üzerinde çalışmıştır. Bu sırada II. Dünya Savaşı devam ederken İngiltere'nin ve ABD'nin önemli atılımları ile yöneylem araştırma (Ing. operations research) grupları kurulmuştur. Dantzig'in rolü ise ABD ordusunda lojistik ve eğitim planlaması yapmakti. Savaşın yaşadığı yıllarda doğrusal programlamanın (DP) [113] temelini attığı için DP'nin atası olarak Kantorovich yerine Dantzig anılmaktadır [112]. Dantzig, DP'nin çözümü için kullanılan Simpleks yöntemini [114] 1947 yılında oluşturmuştur. Dantzig'in bu buluşunu aynı yıl içinde von Neumann'ın ikincilik (İng. duality) teorisinin üretilmesi takip etmiştir. II. Dünya Savaşı sonrası Kuhn ve Tucker 1951 yılında MP model çözümlerinin optimal olmasının gerekli ve yeterli şartlarını açıklamıştır [115]. Bu açıklamalar sonraki yıllarda üretilen doğrusal olmayan (İng. non-linear) programlama modellerinin temelleri olarak kullanılmıştır. Bellman 1954 yılında dinamik programlama yöntemini tanıtmış ve çözümünü belirtmiştir. 1955 yılında Dantzig, Charnes ve Cooper stokastik programlamayı geliştirmiştir. 1958 yılına gelindiğinde Gomory halen eniyileme problemleri içinde en dikkat çeken ve hızla gelişen tamsayılı programlamayı (İng. in-

teger programming) geliştirmiştir. 1960'larda Zoutendijk ve Rosen doğrusal olmayan programlama modellerinin temellerini atmıştır. 1990'lı yillardan itibaren; benzetilmiş tavlama (İng. simulated annealing), genetik algoritma (İng. genetic algorithm) ve yapay sinir ağları (İng. neural networks) gibi sezgisel (İng. heuristics) yaklaşımlar MP teknikleri arasında yerlerini almıştır.

20. yüzyılın ortalarından itibaren yüksek hesaplama gücüne sahip bilgisayarların üretilmesi ile karmaşık eniyileme problemleri çözülmeye başlanmış olup kesin çözümü bulunamayan problemler için çeşitli sezgisel algoritmaların geliştirilmesi hızla devam etmektedir.

3.2.2 Matematiksel programlamanın temel özelliklerı

Eniyileme modelleri kurulurken gerçek hayatı karşılaşılan problemlerin özellikleri ve mekanikleri matematiksel ifadeler ile açıklanmaya çalışılmaktadır. Tipik bir eniyileme probleminin üç temel elemanı bulunmaktadır: (i) eniyilenecek bir amaç fonksiyonu, (ii) kısıtlar (eşitlik veya eşitsizlik şeklinde) ve (iii) karar değişkenleri ile sınırları. Tipik bir MP modeli Şekil 3.5'teki gibi tanımlanmaktadır.

Bu eniyilime probleminde *amaç fonksiyonu* $z = f(x, y)$ şeklinde, x ve y *karar değişkenlerinin* bir fonksiyonu, $f(\cdot)$, olarak tanımlanmış olup *amaç fonksiyonunun* maksimize (veya minimize) edilmesi hedeflenmiştir.

Maksimum (Minimum) $z = f(x, y)$
Kısıtlar:
$h(x, y) \leq 0 \quad (\geq 0)$ (3.1)
$g(x, y) = 0$ (3.2)
$x \in \Re^+$ (3.3)
$y \in \mathbb{Z}^+$ (3.4)

Şekil 3.5: Tipik bir MP modeli

Matematiksel olarak tanımlanan *amaç fonksiyonu* gerçek bir sistemin performansı olarak değerlendirilebilir. Sistemin özelliklerini temsil eden *kısıtlar* 3.1'de ve 3.2'de tanımlanan $h(x, y) \leq 0$ eşitsizliği ve $g(x, y) = 0$ eşitliği ile modellenmiştir. Karar değişkenlerinin *tanım kümeleri* 3.3'te ve 3.4'te açıklanmıştır. Bu tanımlarda x , pozitif reel sayılar kümesinden değerler alabilmekte; y ise pozitif tamsayılar kümesinden değerler alabilmektedir.

Bu eniyilime probleminde y değişkeninin olmadığı varsayılp; $f(x)$, $h(x)$ ve $g(x)$ fonksiyonlarının doğrusal olduğu biliniyorsa bu model bir *doğrusal programlama* (İng. linear programming) modeline dönüşmektedir. Ancak $f(x)$, $h(x)$ ve $g(x)$ fonksiyonlarından herhangi birisinin doğrusal olmadığı biliniyorsa bu model *doğrusal olmayan programlama* (İng. non-linear programming) sınıfına girmektedir. Diğer taraftan eğer ana modelde y değişkeni yer alıyorsa ayrıca $f(x, y)$, $h(x, y)$ ve $g(x, y)$ fonksiyonlarının

doğrusal olduğu biliniyorsa, *karma tamsayılı doğrusal programlama* (İng. mixed integer programming) modeli elde edilirken; $f(x,y)$, $h(x,y)$ ve $g(x,y)$ fonksiyonlarından herhangi birisinin doğrusal olmadığı durumda bu tip bir model *karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama* (İng. mixed integer non-linear programming) modeline dönüşmektedir. Çizelge 3.5'te eniyileme problemlerinin sınıflandırılması sunulmuştur.

Çizelge 3.5: Eniyileme problemlerinin sınıflandırılması.

Karakteristik	Özellik	Sınıflandırma
Karar Değişken Sayısı	Tek	Tek Değişkenli
	Birden fazla	Çok Değişkenli
Karar Değişken Tipi	Sürekli	Sürekli
	Tamsayı	Tamsayılı
	Hem sürekli hem de tamsayılı	Karma Tamsayılı
Amaç ve Kısıt Fonksiyonları	Doğrusal	Doğrusal
	Kuadratik	Kuadratik
	Doğrusal olmayan	Doğrusal olmayan
Problem Formülasyonu	Kısıtlama Var	Kısıtlı
	Kısıtlama Yok	Kısıtsız

3.2.3 Doğrusal programlama

Doğrusal Programlama, MP'nin bir alt dalı olup bir önceki kısımda anlatıldığı gibi belirli doğrusal kısıtlar altında doğrusal bir amaç fonksiyonunun eniyilemesini hedeflemektedir.

$$\text{Maksimum/Minimum } z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

Kısıtlar:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i, \quad i \in \{1, \dots, m\} \quad (3.5)$$

$$x_j \geq 0, \quad j \in \{1, \dots, n\} \quad (3.6)$$

Şekil 3.6: Tipik bir DP modeli

Yöneylem Araştırma (YA) çalışmalarında kullanılan DP modelleri; üretim ve beslenme programlarının hazırlanmasında, fabrika stok kontrolünde, üretim hatlarının dengelemenmesi vb. uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır.

Tipik bir DP modeli Şekil 3.6'da sunulmuştur. Bu tip DP modellerinde kullanılan parametrelerin deterministik (sabit) olduğu varsayılmaktadır. Örneğin, Şekil 3.6'daki modelde a_{ij} 'nin i aktivitesi için j tipi kaynakları temsil ettiği, c_j 'nin buna bağlı maliyeti gösterdiği ve mevcut iş kaynak gücünün ise b_j ile sınırlandırıldığı varsayılsın. Bu varsayımlar altında DP modelleri hızlıca çözülebilmektedir. Fakat gerçek uygulamalarda bu parametrelerin değişmesi sıkılıkla karşılaşıldığı için duyarlılık analizi (Ing. sensitivity analysis) yardımıyla parametre değişiklerinin etkilerinin incelenmesi gerekmektedir. Şekil 3.6'da sunulan DP modeli ile ilgili bazı özellikler aşağıdaki gibi listelenmiştir:

- Bir DP modelinin tüm kısıtlarını aynı anda sağlayan birden çok optimal alt çözümler (Ing. suboptimal solutions) olabilir. Ancak en iyi çözüm (Ing. best solution) genellikle bir tanedir.
- a_{ij}, c_j, b_j vb. değerler deterministik olup DP modelinde *parametre* olarak adlandırılmaktadır.
- Amaç fonksiyonu ve kısıtlar doğrusal olup matematiksel olarak *eşitlik* ve *eşitsizlikler* cinsinden ifade edilmektedir.
- Kaynak miktarları (b_j) kısıtlıdır.
- Karar değişkenleri (x_j) *negatif* olamaz.

3.2.3.1 Doğrusal programlama model formları

DP modelleri genellikle dört farklı şekilde düzenlenmektedir: (i) primal form, (ii) kanonik form, (iii) standart form ve (iv) ikincil form (Ing. dual). Aşağıda bu formlara ilişkin açıklamalara yer verilmiştir:

1. **Primal form** DP genellikle verilen gerçek hayat problemi için kurulan ilk model olup önceki bölümde (bkz. Bölüm 3.2.3) belirtilen özelliklerin hepsine sahiptir. Ayrıca bu form DP model kısıtlarında; küçük eşittir (\leq), büyük eşittir (\geq) veya eşittir (=) işaretleri kullanılabilir.
2. **Kanonik form** DP'lerde ise amaç fonksiyonu sadece *maksimizasyon* şeklinde tanımlanırken, kısıtlarda yalnızca \leq ifadesi kullanılır. Bu forma uymayan DP'ler aşağıdaki yöntemle kanonik forma çevrilir:
 - Min. $f(x)$ olarak tanımlanan bir amaç fonksiyonu, max $-f(x)$ şeklinde tanımlanır.
 - \geq şeklinde tanımlanan kısıt eşitsizliği -1 ile çarpılarak \leq şeklinde yazılır.
 - $ax_1 + bx_2 = c$ veya $|ax_1 + bx_2| \leq c$ olarak tanımlanan kısıtlar için $ax_1 + bx_2 \leq c$ ve $-ax_1 - bx_2 \leq -c$ biçiminde iki eşitsizlik tanımlanır.
 - Sınırları belli olmayan x değişkeni $x = x^+ - x^-$ şeklinde iki farklı negatif olmayan değişkenin (x^+ ve x^-) farkı biçiminde yazılır.

3. Standart form DP modellerinde amaç fonksiyonu klasik olarak minimizasyon veya maksimizasyon şeklinde tanımlanmaktadır. Kısıtlar *eşitlik* şeklinde tanımlanırken bu eşitliklerin sağ tarafı (İng. right-hand side) negatif olmayan değerler almaktadır. Eşitlik dışında tanımlanan kısıtlar aşağıdaki adımlarda belirtilen yöntemler sayesinde eşitlik haline getirilir:

- Bir eşitsizliğin \leq olarak tanımlandığı durumda (örneğin, $4x_1 + 5x_2 \leq 60$ gibi) S diye bir gevşek değişken (İng. slack variable) tanımlanarak eşitsizlik, eşitlik haline getirilir (örneğin, $4x_1 + 5x_2 + S = 60$ gibi).
- Eğer bir eşitsizlik \geq olarak tanımlanırsa (örneğin, $4x_1 + 5x_2 \geq 60$ gibi) E fazlalık değişkeni (İng. excess variable) tanımlanarak eşitsizlik, eşitlik haline getirilir (örneğin, $4x_1 + 5x_2 - E = 60$ gibi).
- $4x_1 + 5x_2 \geq -60$ şeklinde sağ tarafı negatif değer alan eşitsizliklerin her iki tarafı -1 ile çarpılarak sağ tarafın pozitif olması ($-4x_1 - 5x_2 \leq 60$) sağlanır.
- Sınırları belli olmayan x değişkeni $x = x^+ - x^-$ şeklinde iki farklı negatif olmayan değişkenin (x^+ ve x^-) farkı biçiminde yazılır.

4. İkincil form DP'ler primal form DP'lerden türetilen problemler olup primal problemin çözümünün zor olması halinde belirli dönüşümlerin yapılmasıyla problemin ikincil bir probleme dönüştürülmesi mümkündür. Bu ikincil problem, primal problemin optimal çözümü için bir üst sınır belirleyerek primal problemin çözüm aralığı hakkında fikir verir. Şekil 3.7'de ve 3.8'de tipik primal ve ikincil DP modelleri sunulmuştur.

Primal ve ikincil problemler çözüldüğü zaman z ve v arasında, Maksimum $z =$ Minimum v eşitliğinin geçerli olduğu gözlenmektedir. Primal problemin amaç fonksiyonunun katsayıları (c_j), ikincil problemin sağ taraf sabitlerini oluşturmaktadır. Bununla birlikte primal problemin sağ taraf katsayıları (b_i), ikincil problemin amaç fonksiyonunun katsayılarını oluşturmaktadır. Ayrıca primal problemdeki kısıtları tanımlayan eşitsizliklerin yönü, ikincil problemde zıt şekilde değiştirilmektedir. Son olarak primal problem n adet değişken ile m adet kısıt içermekte olup, ikincil problem m adet değişken ile n adet kısıta sahiptir.

Maksimum $z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$
 Kısıtlar:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i, \quad i \in \{1, \dots, m\} \quad (3.7)$$

$$x_j \geq 0, \quad j \in \{1, \dots, n\} \quad (3.8)$$

Şekil 3.7: Primal problem

$$\text{Minimum } v = \sum_{i=1}^n b_i y_i$$

Kısıtlar:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} y_j \geq c_j, \quad j \in \{1, \dots, n\} \quad (3.9)$$

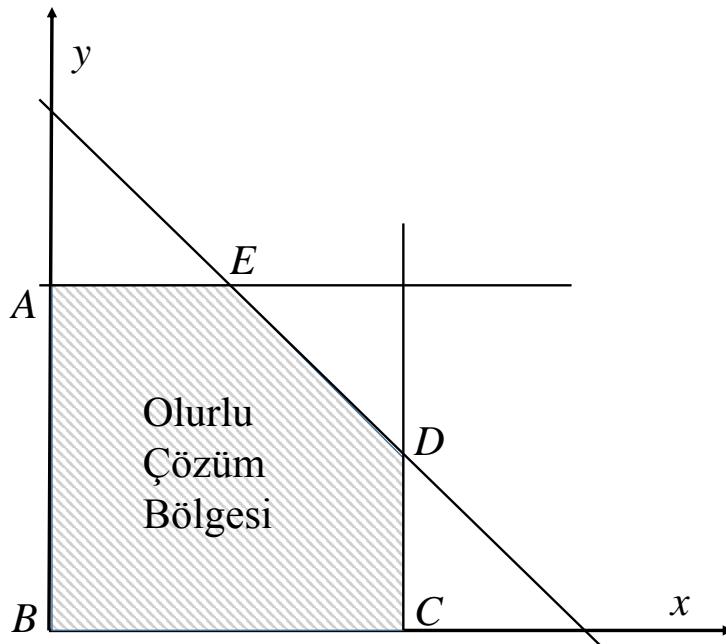
$$y_i \geq 0, \quad i \in \{1, \dots, m\} \quad (3.10)$$

Şekil 3.8: İkincil problem

3.2.3.2 Doğrusal programlama çözüm yöntemleri

Bir DP modeli çözüldüğü zaman: (i) en iyi çözüm (İng. optimal solution), (ii) olurlu çözüm (İng. feasible solution), (iii) olurlu olmayan çözüm (İng. infeasible solution) ve (iv) sınırlı olmayan problem (İng. unbounded problem) sonuçlarından birisi ile karşılaşmaktadır.

Eğer bir DP' nin çözümü sonrası tüm kısıtlar sağlanıyorsa bu çözüm, *olurlu bölge* (İng. feasible region) içinde olup bulunan bu çözüme *olurlu çözüm* denilmektedir.



Şekil 3.9: Grafik yöntemi ile olurlu bölgenin tespit edilmesi

Olurlu çözümler kümesi içinde amaç fonksiyonunu en iyi yapan (örneğin, minimum veya maksimum gibi) çözüm ise *en iyi çözüm* olarak adlandırılmaktadır. Diğer taraftan bir DP' nin tüm kısıtlarını aynı anda sağlayan bir çözüm bulunamazsa bulunan çözümler *olurlu olmayan çözümler* olarak adlandırılır. Son olarak eğer bir DP çözüldüğünde olurlu çözüm kümesi içindeki çözümler amaç fonksiyonunun değerini sonsuza götürüyorsa bu DP probleminin *sınırlı olmadığı* sonucuna varılabilir.

DP modellerinin çözümünde *grafik yöntemi* [107], *Simpleks yöntemi* [113] ve *Karmarkar yöntemi* [116] sıkılıkla kullanılmaktadır. *Grafik çözüm yöntemi* sadece iki karar değişkenine sahip DP modelleri için geçerlidir. Bu yöntemde eşitliklerden veya eşitsizliklerden oluşan kısıtlar iki eksenli bir grafik üzerinde çizdirilir. Daha sonra modelin tüm kısıtlarının sağlandığı olurlu çözümleri içeren bölge belirlenerek bu bölge içinde optimal çözüm aranmaya çalışılır.

Bir DP modelinde en iyi çözüm varsa bu çözüm olurlu bölgenin köşe noktalarından birinde veya birkaçında ortaya çıkar. Bununla birlikte olurlu bölge kısıtlar tarafından sınırlandırılmışsa amaç fonksiyonunun optimal değeri (minimum veya maksimum) vardır. Son olarak olurlu bölge sınırlandırılmamışsa ve amaç fonksiyonunun katsayıları pozitif ise amaç fonksiyonunun *minimum* değeri vardır.

Şekil 3.9'da x ve y karar değişkenlerinin varsayıldığı bir kısıtlı DP modeli çözüldürümüş ve taralı bölgenin olurlu bölgeyi temsil ettiği varsayılmıştır. Bu bölge içinde yer alan tüm noktalar olurlu çözümlerdir. Ancak optimal çözüm; A , B , C , D veya E noktalarından sadece bir tanesi veya daha fazlası üzerindedir.

İkiden fazla karar değişkenine sahip DP modellerinin çözümü için grafik yöntemi uygulanamamaktadır. Bu tip DP modelleri Dantzig tarafından geliştirilen Simpleks algoritması sayesinde çözülmektedir [113]. Simpleks yöntemi temel olarak belirlenen olurlu bölgenin üç noktalarını sistematik bir şekilde tarayarak en iyi çözüme ulaşmayı hedefleyen tekrarlı bir algoritmadır. Simpleks yönteminin adımları aşağıda belirtilmiştir:

1. DP modeli standart forma dönüştürülür.
2. Temel olurlu bir çözüm bulunur.
3. Bir önceki adımda bulunan çözümün optimal çözüm olup olmadığı araştırılır. Eğer bu çözüm en iyi çözümse durulur, aksi durumda bir sonraki adıma geçilir.
4. 2. adımdaki çözüm optimal çözüm değilse, amaç fonksiyonunu iyileştirmek için hangi değişkenin temel değişken olmasına karar verilir.
5. Bir önceki yöntem ile yeni bir olurlu çözüm elde edilir ve 3. adıma dönülür.

Her ne kadar Simpleks yöntemi olurlu bölgenin üç noktalarında optimal çözümü arasa da 1984 yılında Karmarkar tarafından iç nokta algoritması (Ing. interior-point algorithm) geliştirilmiştir [116]. Bu algoritma olurlu bölge içindeki bir noktadan başlayarak her adımda yine iç bir noktanın seçilerek amaç fonksiyonunun değerinin iyileştirilmesi ve de optimal çözüme ulaşılması üzerine kurulmuştur. Karmarkar'ın yöntemi ile DP çözüm teknikleri üzerine araştırmalar hız kazanmış ve bu algoritmanın iyileştirilmesi için çeşitli çalışmalar yapılmıştır [117–121].

3.2.4 Tamsayılı programlama

Çoğu eniyileme problemi modellenirken karar değişkenlerinin tamsayılı değerler alması istenmektedir. Örneğin, bir fabrikada günde 100 adet araba üretilmesi, işçilerin ilgili olduğu işlere en uygun şekilde atanması, elektrik jeneratöründe üretilen elektrik miktarı vb. pratik uygulamalarda karar değişkenlerinin tamsayılı değerler alması gerekmektedir.

Bir DP modelinde tüm karar değişkenlerinin tamsayılı değerler alması gerekiği belirtiliyorsa bu tip modeller *tamsayılı doğrusal programlama* (İng. integer linear programming) modellerine dönüşmektedir. Ancak bazı karar değişkenlerinin tamsayılı olması isteniyorsa bu tip problemler *karma tamsayılı doğrusal programlama* modelleri olarak adlandırılmaktadır. Kimi zaman bazı modellerde *evet* veya *hayır* şeklinde kararlar alınması istenmektedir. Örneğin, bir fabrikanın A şehrine mi kurulması yoksa B şehrine mi kurulması, bu fabrikada üretim için bir sabit yatırımın yapılmış olup yapılmayacağı vb. durumlar tipik *evet-hayır* kararları olup matematiksel olarak 0 ve 1 ile modellenmektedir (örneğin, sabit bir yatırım yapılacaksa 1 ile yapılmayacaksa 0 ile modelleme yapılmalı gibi). Bu tip değişkenler 0-1 ikili (İng. binary) değişkenler olarak adlandırılmaktadır. Doğrusal tamsayılı programlama (TP) modellerinde tüm karar değişkenlerinin 0 veya 1 değerleri alması isteniyorsa, bu modeller *ikili tamsayılı doğrusal programlama* (İng. binary integer linear programming) modellerine dönüşmektedir. Ancak bazı karar değişkenlerin 0-1 değerleri alması, kalan diğer değişkenlerin ise sürekli değerler alınması isteniyorsa bu problemler *ikili karma tamsayılı doğrusal programlama* (İng. binary mixed integer programming) modelleri olarak adlandırılmaktadır.

TP modellerinin sıkça kullanıldığı pratik uygulama örnekleri aşağıdaki gibi listelenmiştir:

- Personel programlaması (örneğin, i işçisinin j işine atanması gibi),
- Kuruluş yeri planlaması (örneğin, bir fabrikanın hangi şehre kurulması gibi),
- Sırt çantası problemi (örneğin, kısıtlı kapasiteye sahip bir çantanın içine konulacak en iyi materyaller gibi),
- Sabit maliyetli kurulum problemi (örneğin, bir fabrikada i ürününün üretilmesi için yapılması gereken sabit maliyetin modellenmesi gibi),
- En iyi kapsama alanının belirlenmesi (örneğin, bir şehirdeki semtlere itfaiye merkezleri nasıl yerleştirilmeli ki yangın ihtimali en aza indirilsin gibi),
- Haberleşme ağlarının performansının eniyilemesi (örneğin, bir KAA'nın yaşam süresinin maksimize edilmesi gibi).

3.2.4.1 Tamsayılı programlama model formları

TP sınıfına giren karma tamsayılı doğrusal programlama (KTDP) modellerinin tasarımında sıkça karşılaşılan kısıt tipleri aşağıdaki gibi listelenmiştir:

- 1. Ya/Ya da kısıdı:** Bir KTDP modelinde iki kısıttan sadece birisinin seçilmesi istenebilir. Örneğin, bir fabrikada A ürünü için $x_1 + x_2 \leq 4$ kısıtı kullanılırken, B ürünü için $x_1 + 1.5x_2 \leq 6$ kısıtı kullanılmaktadır. Bu fabrika ya A ürününü ya da B ürününü aynı anda üretebilmektedir. Buna göre fabrika hangi ürünü üretmeli olup kâr maksimize edilsin? Bu soruya cevap vermek adına şu formülasyon yöntemi KTDP modelinde kullanılabilir. Öncelikle M diye sonuçları değiştirmeyen oldukça büyük bir sayı (İng. Big M) ile y isminde ikili değişkeni tanımlanır. Daha sonra 3.11 ve 3.12 eşitlikleri,

$$x_1 + x_2 \leq 4 + My, \quad (3.11)$$

$$x_1 + 1.5x_2 \leq 6 + M(1 - y), \quad (3.12)$$

tanımlanarak KTDP modeline eklenir. Burada $y = 0$ için $x_1 + x_2 \leq 4 + My$ kısıtı, $x_1 + x_2 \leq 4$ olarak ve $x_1 + 1.5x_2 \leq 6 + M(1 - y)$ kısıtı ise $x_1 + 1.5x_2 \leq 6 + M$ olarak dönüşür ve böylece her koşulda sağlanacağı garantielenir. Bu durumda aktif olan kısıt $x_1 + x_2 \leq 4$ olur. Tam tersi durumda, yani $y = 1$ için 3.11 ve 3.12 eşitliklerinde belirtilen kısıtlar, $x_1 + 1.5x_2 \leq 6$ ve $x_1 + x_2 \leq 4 + M$ haline dönüşerek $x_1 + 1.5x_2 \leq 6$ kısıtlının aktif olduğu garantielenir. Özette,

$$\text{Kısıt: } \begin{cases} x_1 + x_2 \leq 4, & y = 1 \\ x_1 + 1.5x_2 \leq 6, & y = 0 \end{cases}$$

şeklinde ya/ya da kısıtı tanımlanabilir.

- 2. N tane kısıttan sadece k tanesinin aktif olması kısıdı:** Bu durum bir önceki maddede açıklanan ya/ya da kısıt mantığının gelişmiş halidir. Örneğin, $f_i(x) \leq b_i, \forall i \in \{1, \dots, N\}$ şeklinde N tane kısıt tanımlanmış olsun. Bunlardan sadece k tanesinin aktif olması için kısıtlar (3.13 ile 3.14) aşağıdaki gibi tanımlanarak,

$$f_i(x) \leq b_i + My_i, \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}, \quad (3.13)$$

$$\sum_{i=1}^N y_i = N - k, \quad (3.14)$$

KTDP modeline konulur. Böylece $N - k$ tane kısıt $y = 1$ değeri alacağı için M büyük değerinden dolayı pasif olacaktır. Kalan k kısıt için de $y = 0$ olacağı için bu kısıtlar da aktif olacaktır.

- 3. N ayrık değerden 1 tanesini alan fonksiyonlar:** Bazı durumlarda birden fazla ayrık değer alabilen bir fonksiyonun sadece 1 değer alması istenebilir. Örneğin, bir makinenin 3 farklı ayarı bulunup bunlardan sadece 1 tanesinin çalıştırılması istenebilir. Böyle bir durumun modellenmesi için,

$$f_i(x) = \sum_{i=1}^N b_i y_i, \quad (3.15)$$

$$\sum_{i=1}^N y_i = 1, \quad (3.16)$$

şeklinde iki eşitlik tanımlanır. 3.16'da tanımlanan eşitlik sayesinde sadece 1 tane ayrik değer (makine ayarı) seçilmesi garantilenir.

- 4. Sabit maliyetler:** Sabit maliyetler KTDP araştırmalarında sıkça karşılaşılan bir durumdur. Örneğin, bir fabrikada üretim yapılması için tek seferlik bir cihaz satın alınması bir sabit maliyeti temsil etmektedir. Matematiksel olarak sabit maliyetler,

$$f(x_i) = \begin{cases} 0, & x_i = 0 \\ K + c_i x_i, & x_i > 0 \end{cases} \quad \forall i,$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada K , tek seferlik maliyetleri sembolize etmekte olup $x_i = 0$ iken yani x_i malının üretilmediği durumda herhangi bir sabit maliyetin eklenmeyeceğini gösterir. Ancak x_i malı üretilirse ($x_i > 0$) bu durumda sabit maliyet (K) ve diğer maliyetlerin ($c_i x_i$) ekleneceği görülebilir. Sabit maliyet genellikle amaç fonksiyonu içine, Minimum $Z = f(x_i) + (\text{kalan diğer maliyetler})$ şeklinde eklenmektedir. Daha güçlü formülasyona sahip başka bir model Şekil 3.10'da sunulmuştur.

Minimum $Z = (Ky + c_i x_i) + (\text{kalan diğer maliyetler})$
Kısıtlar:

$$x_i \leq My, \quad \forall i \tag{3.17}$$

$$x_i \in \{0, 1, \dots\}, \quad \forall i \tag{3.18}$$

$$y \in \{0, 1\} \tag{3.19}$$

Şekil 3.10: Sabit maliyetli bir KTDP modeli

Bu modelde eğer $x_i > 0$ ise, y her zaman 1 değerini alarak sabit maliyeti (Ky) amaç fonksiyonuna ekler. Ancak $x_i = 0$ olursa 3.17 eşitsizliği y 'nin değeri hakkında bilgi vermez. Ancak bu problem bir minimizasyon problemi olduğu için model, sabit maliyetten kaçınmak adına y 'nin 0 değerini almasına zorlamaktadır.

Bunun dışında doğrusal olmayan kısıtların doğrusallaştırılması vb. teknikler TP problemlerinde sıkça kullanılmaktadır [122].

3.2.4.2 Tamsayılı programlama çözüm yöntemleri

TP modelleri için çözüm yöntemleri *genel* ve *özel* amaçlı olarak ikiye ayrılmaktadır. *Genel amaçlı* algoritmalar herhangi bir TP modelini çözebilecek yapıda algoritmalar olup etkin işlem yapma yeteneğine sahip değildir. Çünkü TP modellerinde kullanılan tamsayılı değişkenler programlama modelinin konveks (İng. convex) olma özelliğini bozarak problemin çözümünü oldukça zorlaştırmaktadır. Bu yüzden TP modelleri hesaplama teorisine göre NP-Zor (bkz. Bölüm 3.3) problem sınıfına girmektedir [123].

KTDP modelleri ise TP modellerinin bir varyasyonu olduğu için TP problemleri kadar zor çözülen problemlerdir.

TP modellerinin çözümü için *genel amaçlı* kullanılan çözüm yöntemleri: (i) dal sınır (İng. branch and bound) ve (ii) kesen yüzeyler (İng. cutting planes) algoritmaları olmak üzere ikiye ayrılmaktadır [124–126]. *Dal sınır* yöntemleri olurlu çözüm bölgesinin uygun alt kümesinde çözümlerin sayilarak optimal sonuca ulaşılması için kullanılmaktadır. TP modellerinin çözümü için diğer bir *genel amaçlı* yaklaşım Gomory tarafından tasarlanan *kesen yüzeyler* algoritmasıdır [127]. Bu algoritmda tamsayılı karar değişkenlerinin DP gevşetilmesine ardışık olarak geçerli eşitsizliklerin (İng. valid inequalities) eklenmesi yardımıyla tamsayılı çözümlerin elde edilmesi hedeflenir. Literatürde dal sınır ve kesen yüzeyler yöntemlerinin birleştirilerek zor problemlerin çözülmesini hedefleyen çalışmalar giderek artmaktadır. Johnson ve arkadaşları tarafından bu yöntemler özetlenmiş ve ilgili okuyucuların bilgisine sunulmuştur [128]. Diğer taraftan kurulan TP modeline *özel çözüm* algoritmalarının geliştirilmesi de YA araştırmalarında oldukça popüler konudur.

TP modellerinin gevşetilerek (İng. relaxation) DP yardımı ile çözülmesi için TP modelinde yer alan tamsayılı veya 0-1 ikili değişkenleri sürekli karar değişkenleri olarak kabul ederek (gevsetme) elde edilen gevşetilmiş DP'nin çözümü ve de optimal sonuç için bir üst sınırın belirlenmesi gerekmektedir. Böylece DP gevsetme tekniği, TP'den daha az kısıtlayıcı olup daha rahat çözürlükmektedir.

Maksimum $z = x_1 + x_2 + x_3$

Kısıtlar: ...

$$x_1 \geq 0, \quad x_2 \in \{0\} \cup \mathbb{Z}^+, \quad x_3 \in \{0, 1\} \quad (3.20)$$

Şekil 3.11: Orijinal TP modeli

Maksimum $z = x_1 + x_2 + x_3$

Kısıtlar: ...

$$x_1, x_2 \geq 0, \quad 0 \leq x_3 \leq 1 \quad (3.21)$$

Şekil 3.12: Orijinal TP modelin DP gevşetilmiş hali

Şekil 3.11'de ve 3.12'de tipik bir TP modelinin DP gevşetmesi örneği sunulmuştur. Şekil 3.11'deki TP modelinde; x_1 sürekli, x_2 tamsayılı ve x_3 0-1 karar değişkenleri olarak tanımlanmıştır. Bu modelin DP gevşetilmiş hali Şekil 3.12'de sunulmuş olup x_2 tamsayılı değişkeni sürekli bir karar değişkeni haline getirilmiş, x_3 ikili karar değişkeni ise 0 ile 1 değerleri arasında reel sayılar kümesinden değer alabilen sürekli bir karar değişkenine dönüştürülmüştür. Her ne kadar TP'nin olurlu çözüm bölgesi, DP gevşetilmiş problemin olurlu çözüm bölgesinin bir alt kümesi olsa da TP problemi çözümlemek DP gevşetilmiş problemi çözmekten daha zordur. Diğer taraftan DP gevşetmesi TP modelinin en iyi çözümünün sınırını belirler. DP gevşetmesi ile aşağıdaki durumlarla karşılaşmak mümkündür:

- DP gevsetme çözümünde tüm karar değişkenleri tamsayılı değerler alıyorsa bulunan bu çözüm orijinal TP model çözümünün de optimal çözümüdür.
- DP gevsetme çözümünde tüm karar değişkenleri tamsayılı değerler alımıyorsa,
 - Maksimizasyon problemleri için DP gevsetilmiş çözümün optimal değeri TP'inkine eşit veya daha *büyük*tür.
 - Minimizasyon problemleri için DP gevsetilmiş çözümün optimal değeri TP'inkine eşit veya daha *küçük*tür.
 - Eğer DP gevsetilmiş problem olurlu değilse TP modeli de olurlu değildir.

Bu tez çalışmasında Bölüm 4'te kurulan KTDP modelleri kesin sonucu bulacak şekilde ve DP gevsetmesi yardımı ile Bölüm 5'te çözüdürülp iki çözüm arasındaki farkın maksimum değeri hesaplanarak ispatı Bölüm Ek 2'de gösterilmiştir.

3.2.5 Doğrusal olmayan programlama modelleri

Önceki bölümlerde (bkz. Bölüm 3.2.3 ve 3.2.4) kurulan modellerin (örneğin, DP, TP ve KTDP gibi) doğrusal olduğu varsayılmıştır. Ancak gerçek hayatı karşılaşılan çoğu problemin doğrusal olmadığı bilinmektedir. Eğer matematiksel olarak ifade edilen bir modelde doğrusal olmayan amaç fonksiyonu ve/veya kısıtlar bulunuyorsa bu tip problemler *doğrusal olmayan programlama modelleri* olarak anılmaktadır [129]. Her ne kadar bu tez çalışması kapsamı dışında kalsa da bu tip modellerde en iyi çözümün Karush-Kuhn-Tucker şartlarına uyması gereklidir [130]. Doğrusal olmayan programlama modellerinin çözümü için mantık tabanlı yöntemler [131], dal sınır algoritmaları [132, 133], dal kes (İng. branch and cut) algoritmaları [134] ve Bender ayrıştırma (İng. Bender's decomposition) [135] yöntemleri kullanılmaktadır.

3.3 Sezgisel Yöntemler

Bilim, mühendislik, işletme ve ekonomi alanlarında MP çatısı ile modellenebilen çoğu problem kombinatoriyel eniyilime (İng. combinatorial optimization) sınıfına girmektedir. Bu sınıftaki problemlerin karar değişkenleri ayrik değerler almaktır, çözümün aranıldığı uzay geniş bir boyutta ve amaç fonksiyonu tekil veya çoğul biçiminde tanımlanmaktadır. Gezgin satıcı (İng. Travelling salesman), sağlanabilirlik (İng. satisfiability) ve Steiner ağacı (İng. Steiner tree) problemleri kombinatoriyel eniyileme problemlerine örnek olarak verilebilir. Ancak bu tip problemlerde kesin çözüme makul zamanda ulaşmak çoğu zaman mümkün değildir. Bununla birlikte problemin boyutu arttığı zaman taranacak çözüm uzayı büyüyeceği için geleneksel dal sınır ve dal kes yöntemleri ile bu tip problemlerin çözümü imkânsız hale gelebilermektedir. Bu durumda optimal olmayan ancak iyi sayılabilen bir çözüm bulmak kabul edilebilir bir strateji olarak değerlendirilmektedir. Bunun için tüm çözüm uzayının aratılmadığı sadece belirli bir kısmının tarandığı algoritmaların tasarılanması çözüm süresini oldukça hızlandırmaktadır. Bu tip algoritmalar optimal sonucu garantilemeyen ancak iyi sayılan olurlu çözümleri makul sürede bulan *sezgisel yöntemler* olarak bilinmektedir. Bir önceki bölümde anlatılan

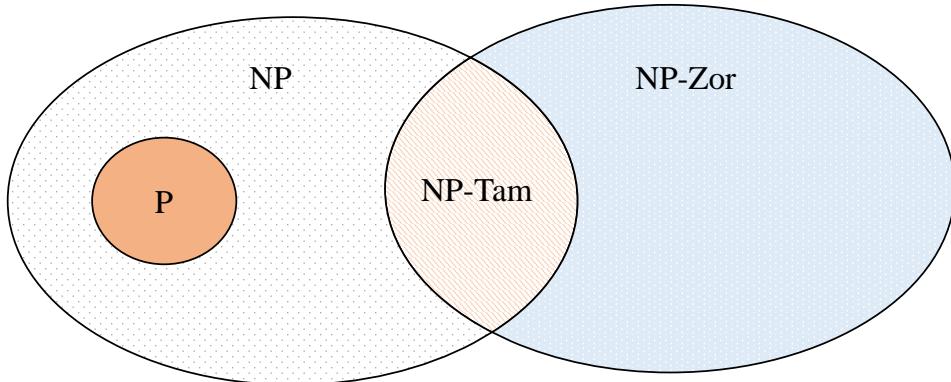
teknikler ile küçük boyutlu problemler rahatlıkla çözürlüse de problemin boyutu arttığı zaman (çözümün aratılacağı uzay büyürse) bu tip algoritmaların optimal sonuca ulaşması için gereken süre günümüz bilgisayarları ile yüzyıllar sürebilir. Böyle bir durumda sezgisel yöntemler kullanılarak optimal sonuç yerine olurlu bir çözümün kısa zamanda bulunması kabul edilebilen bir stratejidir.

Sezgisel yöntemler algoritma tabanlı oldukları için hesaplama karmaşıklığının (İng. computational complexity) incelenmesi oldukça önemlidir. Hesaplama karmaşıklığı analizi, n boyutlu bir problemi çözmek için gereken adım sayısı olarak tanımlanmaktadır. Bu analiz ile problem çözümünün asimptotik sınırları belirlenmekte ve problemin ölçeklenebilirliği test edilmektedir. Hesaplama karmaşıklığında sıkça kullanılan notasyon Büyük O notasyonu olup $f(n) \leq cg(n)$, $\forall n > n_0$ şeklinde tanımlanan bir $f(n)$ algoritmasının hesaplama karmaşıklığı $O(g(n))$ olarak ifade edilmektedir. $p(n) = a_k n^k + \dots + a_j n^j + \dots + a_1 n + a_0$, $\forall a_k > 0$, $a_j > 0$, $k > 1$ şeklinde tanımlanan algoritmalar ise *polinom algoritmalar* olup hesaplama karmaşıklığı $O(n^k)$ 'dır. Örneğin, Dijkstra en kısa yol (İng. shortest path) bulma algoritmasının karmaşıklığı $O(n^2)$ 'dır. Son olarak üstel (logaritmik) algoritmaların karmaşıklığı $O(c^n)$, $\forall c \in \mathbb{R}$, $n > 1$ şeklinde tanımlanmaktadır. Hesaplama karmaşıklığının analiz edilmesi hususunda Alan Turing tarafından teorik ve matematiksel temellere dayalı, her türlü matematiksel hesabı yapabilme yeteneğine sahip sanal bir makine olan Turing makinesi [136] kullanılmaktadır.

Verilen bir problemin karmaşıklığı bu problemi çözen en iyi yöntemin karmaşıklığı ile eşittir. Genellikle problemler: (i) polinom zamanlı bir algoritma ile çözülebilen problemler ve (ii) verilen problemi çözecek bilinen bir algoritmanın bulunmadığı problemler olarak iki ana kategori altında incelenmektedir. Daha genel olarak her problem aşağıda bahsedilen karmaşıklık sınıfından birisine dâhildir:

- 1. P:** Bu sınıfındaki problemler belirli (İng. deterministic) Turing makinesi tarafından polinom zamanda çözürlülebilen problemlerdir. Çözüm süresi polinom algoritmanın boyutuna bağlıdır. P sınıfı problemlerine örnek olarak; bir liste içinde arama yapma, DP modelleri, n basmaklı bir sayının asal sayı olup olmadığını tespit edilmesi verilebilir.
- 2. NP:** Bu sınıfındaki problemler belirsiz (İng. non-deterministic) Turing makinesi tarafından polinom zamanda çözürlülebilmektedir. Ancak böyle bir Turing makinesi olmadığı için bu problemleri çözdürmek adına bilinen en iyi polinom zamanlı bir algoritma bulunmamaktadır. NP sınıfı problemlerine örnek olarak; iki çizgenin aynı şekli oluşturacak şekilde çiziliip çizilemeyeceğinin hesaplanması, n basmaklı bir sayının asal çarpanlarının tespit edilmesi verilebilir.
- 3. NP-Tam:** Bir X problemi NP sınıfındaysa ve diğer tüm NP problemleri polinom zamanda X problemine indirgenebiliyorsa bu X problemine NP-Tam (İng. NP-complete) problemi denir. NP-Tam problemler NP sınıfının en zor problemleri olarak bilinmektedir. Eğer bir NP-Tam problemi için polinom zamanlı bir algoritma bulunabilirse kalan diğer tüm NP problemleri için de polinom zamanlı çözüm yöntemlerinin geliştirilebileceği ispatlanmıştır. Hamilton Döngüsü (İng. Hamiltonian Cycle) problemi NP-Tam problemine örnek olarak verilebilir.

4. NP-Zor: Bu sınıfındaki problemler en azından NP-Tam problemleri kadar zor olan problemlerdir. NP-Tam olduğu bilinen problemler ayrıca NP-Zor (İng. NP-Hard) problemlerdir. Her ne kadar bu tip problemler NP-Tam problemlerine benzese de bu tip problemlerin NP olma gibi bir zorunluluğu yoktur. NP-Zor problemlerini çözebilen algoritmaların bulunması imkânsız olabilir. NP-Zor problemlerine örnek olarak; TP modelleri, gezgin satıcı problemi, set kapsama (İng. set cover) problemi ve sırt çantası (İng. knapsack) problemi verilebilir.



Şekil 3.13: P, NP, NP-Tam ve NP-Zor problemlerinin Euler diyagramı ile $P \neq NP$ varsayıımı altında sınıflandırılması

Şekil 3.13'te P, NP, NP-Tam ve NP-Zor problemleri Euler diyagramı yardımıyla $P \neq NP$ varsayıımı altında sınıflandırılmıştır. Hesaplama teorisinin en meşhur sorusu $P = ?$ NP olup bir başka deyişle “NP kategorisinde olup da P kategorisinde olmayan problemler var mıdır?” sorusu halen araştırmaya açık bir konudur. Örnek olarak, verilen n basamaklı sayının asal çarpanlarının bulunması için polinom sürede çalışan bir algoritma gerçekten yok mudur, varsa da bulunamıyor mu? Konu hakkında çalışan kimi araştırmacılar böyle bir algoritmanın olmadığı için bulunamadığını ($P \neq NP$) savunular da bu sorunun cevabı halen belirsizdir.

Sezgisel yöntemler NP-Tam veya NP-Zor olarak sınıflandırılan problemler için optimum sonuca ulaşmayan olurlu çözümler sunmaktadır. Bulunan bu olurlu çözümlerin optimal çözüme ne kadar yakın olduğunu tespit edilebilmesi için dikkat edilmesi gereken hususlar şu şekilde sıralanmıştır: (i) problemin alt ve üst sınırlarının belirlenmesi, (ii) optimal çözüm ile sezgisel çözüm arasındaki farkın küçük problemler için karşılaştırılması, (iii) tasarlanan algoritmanın pratik uygulamalardaki performansı ve (iv) istatistikî olarak algoritmanın kaç adımda sonuca ulaşacağının beklenen değeri.

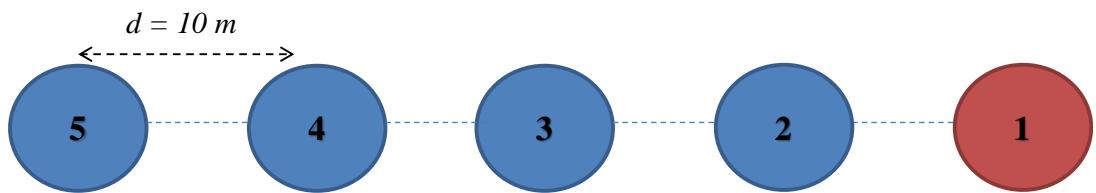
Sezgisel algoritmalar *yapıcı* (İng. constructive) ve *geliştirici* (İng. improvement) algoritmalar olarak ikiye ayrılmaktadır. *Yapıcı* algoritmalar kısmî sonuçlar elde ederek tüm çözümün olduğu zaman duran algoritmalarıdır. Örneğin, aç gözlü algoritmalar (İng. greedy algorithms) bu kategoriye girmektedir. *Geliştirici* yöntemlerde ise ilk çözüm bulunduktan sonra adım adım çözüm iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Son olarak *meta sezgisel* yöntemler uygulamaya özel algoritmalar olmayıp, genel problemler için arama uzayının nasıl taranması gerektiği fikrine dayanmaktadır. Popüler meta sezgisel

yöntemlerine örnek olarak; benzetilmiş tavlama, tabu arama (İng. tabu search) ve karınca koloni (İng. ant colony) algoritmaları verilebilir. Meta sevgisel yöntemler her ne kadar esnek olsalar da optimal sonuca yakınsamaları oldukça düşük olup bu yöntemlerin stokastik özelliklerinden dolayı aynı problem için farklı sonuçlar üretebilmektedir.

3.4 Kablosuz Algılayıcı Ağların Eniyilemesi

Bu bölümde bir KAA'nın KTDP yöntemi ile yaşam süresinin eniyilemesinin formülasyonu ve çözümü hakkında temel bir örnek sunulmuştur. Her ne kadar bu örnek gerçekçi KAA tasarım problemleri için basit kalsa da MP modelleme tekniklerinin KAA uygulamalarında nasıl kullanılacağına dair önemli ipuçları vermektedir.

Şekil 3.14'te 4 tane algılayıcı düğüme ve de bir tane baz istasyonuna sahip bir KAA görülmektedir. Bu topoloji tipik bir doğrusal topoloji örneğidir. Baz istasyonu düğüm-1 olarak temsil edilmiş ve en sağ köşede kırmızı renk ile işaretlenmiştir. Algılayıcı düğümler ise mavi renk ile gösterilmiştir; düğüm-2, 3, 4 ve 5 şeklinde numaralandırılmıştır. Aşağıdaki tüm düğümler arası mesafe eşit ve 10 metre olarak alınmıştır.



Şekil 3.14: Doğrusal KAA topolojisi

Bu örnek kapsamında HCB radyo dalga yayılım modelinin [23] kullanıldığı varsayılmıştır. Bu kanal modeline göre düğüm- i 'den düğüm- j 'ye 1 bit veri göndermek için gereken enerji miktarı (J cinsinden), $E_{tx,ij} = E_{Elec} + \epsilon_{amp} d_{ij}^n$ olarak tanımlanmıştır. 1 bit verinin alınması için gereken enerji (J cinsinden) sabit olup, $E_{rx} = E_{Elec}$ olarak hesaplanmaktadır. Bu denklemlerde $E_{Elec} = 50$ nJ, elektronik devrede harcanan enerjiyi ifade ederken $\epsilon_{amp} = 100$ pJ vericinin efektifliğini göstermektedir. Yol kayıp katsayısı $n = 4$ olarak kabul edilmiştir. Düğüm- i ile düğüm- j arasındaki uzaklık ise d_{ij} metre olarak tanımlanmıştır.

Her algılayıcı düğümün veri üretim hızı $s_i = 1$ bit/tur olarak varsayılmıştır. Algılayıcı düğümlerde üretilen veri, baz istasyonuna ya direkt olarak gidebilir ya da diğer algılayıcı düğümler üzerinden aktarılara iletilebilir. Fakat ortam koşullarından dolayı ($n = 4$) herhangi bir düğümün 30 metreden daha uzağa veri gönderemeyeceği kısıdı verilmiştir. Düğüm- i 'den düğüm- j 'ye iletilen veri miktarı (bit cinsinden) g_{ij} tamsayılı karar değişkeni ile ifade edilmiştir. Zamanın 10 saniye süreli turlara bölündüğü varsayılmıştır. Her algılayıcı düğümün batarya enerjisi 10 J olup baz istasyonu için herhangi bir enerji kısıdı verilmemiştir.

KAA literatüründeki tanımlara sadık kalarak ağ yaşam süresinin ilk algılayıcı düğümün tüm batarya gücünü tükettiği zaman olarak tanımlanmıştır [23]. Bu KAA'nın ya-

Maksimum N_{rnd}

Kısıtlar:

$$\sum_{j=1}^5 g_{ij} - \sum_{j=2}^5 g_{ji} = N_{rnd} \times s_i, \forall i \in \{2, 3, 4, 5\} \quad (3.22)$$

$$\sum_{j=1}^5 g_{ij} E_{tx,ij} + E_{rx} \sum_{j=2}^5 g_{ji} \leq 10 \text{ J}, \forall i \in \{2, 3, 4, 5\} \quad (3.23)$$

$$g_{ij} = 0, \forall (i, j) \text{ eğer } d_{ij} > 30 \text{ m} \quad (3.24)$$

$$g_{1j} = 0, \forall j \in \{1, 2, 3, 4, 5\} \quad (3.25)$$

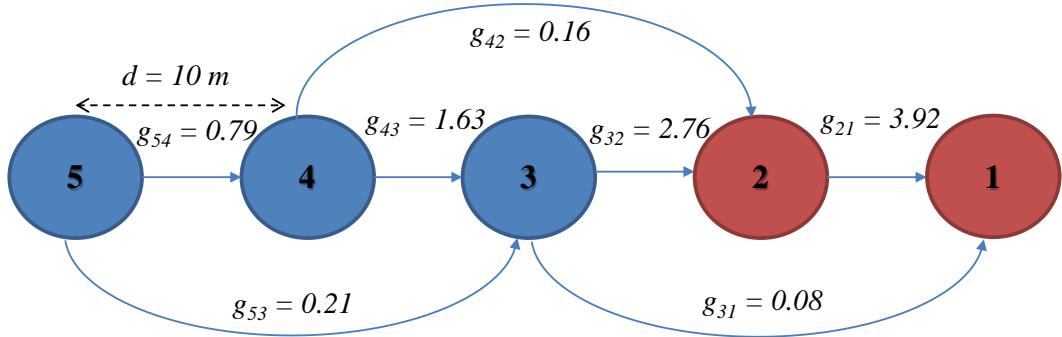
$$g_{ij} \geq 0, \forall (i, j) \& i \neq j \quad (3.26)$$

Şekil 3.15: KAA yaşam süresinin eniyilemesi için kurulmuş KTDP modeli

şam süresi tur cinsinden N_{rnd} ile temsil edilmekte olup maksimizasyonu istenmektedir. Yukarıda doğrusal biçimde kısıtları ve amacı tanımlanan bu KAA problemi KTDP yöntemi ile eniyilenebilir. Buna göre ağ yaşam süresini (amaç fonksiyonu N_{rnd} 'yi) maksimize etmeyi amaçlayan eniyileme problemi Şekil 3.15'te tanımlanmıştır.

Kısıt 3.22 *akum dengeleme* kişidi olup baz istasyonu dışında kalan tüm algılayıcı düğümler için (düğüm-2, 3, 4 ve 5), bir düğümden çıkan akımlar ile bu düğüme gelen akımlar arasındaki farkın o düğümde yaşam süresi boyunca üretilen toplam veri miktarına ($s_i \times N_{rnd}$) eşit olduğunu belirtmektedir. Kısıt 3.23 algılayıcı düğümler için *enerji kişidini* ifade etmektedir. Bir algılayıcı düğümdeki toplam enerji tüketimi; alma ve iletim enerjilerini içermektedir. Bu kısıtta toplam iletim enerjisi $\sum_{j=1}^5 g_{ij} E_{tx,ij}$ şeklinde gösterilmiş olup düğümler arası uzaklığa bağlıdır. Toplam alma enerjisi ise $E_{rx} \sum_{j=2}^5 g_{ji}$ şeklinde ifade edilmiş ve düğümler arası uzaklıktan bağımsızdır. Ayrıca bu kısıtta tanım gereği hiçbir algılayıcı düğüm batarya enerjisinden (10 J) daha fazla enerji tüketmemektedir. Kısıt 3.24 ile iki düğüm arasındaki mesafenin 30 metreden daha fazla olduğu durumda iletimin yapılamayacağı garantilenir. Kısıt 3.25 baz istasyonunun veri üretmeyeceğini göstermektedir. Dikkat edilirse 3.22 ve 3.23 numaralı kısıtlarda $\sum_{j=2}^5 g_{ji}$ toplamında baz istasyonu eklenmemiştir. Ancak 3.25 kişidi daha güçlü bir kısıt olduğu için bu toplamı $\sum_{j=1}^5 g_{ji}$ şeklinde yazmakta hiçbir sakınca bulunmamaktadır. Son olarak kısıt 3.26, ağdaki tüm akımların negatif olamayacağını belirten kısıt olup bir düğümün kendine veri göndermesini de engelleyerek döngü (Ing. loop) oluşum olasılığı ortadan kaldırır kısıttır.

Şekil 3.15'te verilen KTDP modeli çözüldürülünce ağ yaşam süresi $N_{rnd} = 2345723$ tur olarak bulunmuştur. Bu da KAA'nın herhangi bir müdahaleye maruz kalmadan yaklaşık 271 gün boyunca sorunsuz çalışacağının göstermektedir. Bu KAA'daki birim turdaki normalize yönlendirme (rotalama) Şekil 3.16'da sunulmuştur. Burada sunulan rotalama sonuçları tüm yaşam süresi boyunca elde edilen akım (g_{ij}) değerlerinin yaşam süresine (N_{rnd}) bölünmesi şeklinde gösterilmiştir. Yani Şekil 3.16'da birim saniyedeki rotalama miktarları normalize edilmiştir. Örneğin, düğüm-5 ürettiği verinin %79'unu



Şekil 3.16: KTDP çözümü sonucu ağdaki en iyi rotalama

düğüm-4'e, benzer şekilde %21'ini düğüm-3'e göndermektedir. Bu değerler yaşam süresi ile çarpıldığında bu linklerden yaşam süresi boyunca akan toplam veri miktarları $g_{54} = 1843257$ ve $g_{53} = 502466$ bit olarak bulunmaktadır. İletim kişisinden dolayı (3.24) düğüm-5 ve düğüm-4 baz istasyonuna direkt olarak veri gönderememektedir, bu yüzden çok atlamlı haberleşme yaparak baz istasyonuna ulaşmışlardır. Düğümler-4'e gelen normalize akım miktarı 0.79 iken, bu düğümden çıkan normalize veri miktarı 1.79'dur. Böylece birim zamanda düğüm-4'ün birim mikarda ($1.79 - 0.79 = 1.00$) veri ürettiği; kendi verisi ile birlikte düğüm-5'in verisini de taşıdığı görülmektedir. Diğer algılayıcı düğümler için de benzer yorumlar yapılabilir. Son olarak baz istasyonundaki normalize edilmiş veri miktarı 4 olup diğer algılayıcı düğümlerin birim saniyede ürettiği verilerin baz istasyonunda toplandığı görülmektedir.

Bu bölümde sunulan KTDP modelinin temeli Ergen ve Varaiya'nın çalışmasından esinlenmiştir [3]. Yazarlar bu çalışmada KAA'larda enerji verimliliğinin sağlanması adına iki farklı DP modeli önermiştir. Önerilen ilk DP modeli ağ yaşam süresini maksimize etmeye çalışırken ikinci DP modeli toplam enerji harcamasını minimize etmemiştir. Bu çalışma sonunda enerji harcamasının minimuma indirgenmesinin ağ yaşam süresine olan katkısının yeterli olmadığı belirtilmiş, düğümlerin dengeli bir şekilde enerji harcaması yaparak ancak ağ yaşam süresinin eniyileneceği belirtilmiştir. İşte bu yüzden [3]'te tanımlanan iki DP modeli primal ve ikincil şeklinde gözükmekte de aslında birbirlerinin aynısı değildir.

3.5 Faydalanan Materyaller ve Yöntemler

Bu tez çalışmasında Bölüm 4.4'te sunulan MP modellerinin tasarımları için GAMS (İng. The General Algebraic Modeling System) [137] kullanılmıştır. GAMS, MP problemlerinin modellenmesi için kullanılan bir derleyicidir. GAMS ile oluşturulan modeller beraberinde gelen ticari çözücüler yardımcı ile çözülmektedir. GAMS derleyicisinin desteklediği çözüçülerden en önemlileri; ILOG CPLEX, FICO XPRESS ve GUROBI'dır [138]. Bir GAMS modeli kurulurken izlenecek adımlar aşağıdaki gibi listelenmiştir:

1. Tanım kümelerinin tanımlanması (örneğin, algılayıcı düğümler kümesi, bir taşıma problemi için şehirleri belirten küme gibi),

2. Parametre girişinin yapılması (örneğin, iletim-alma enerji miktarları, taşıma problemi için yoldaki taşıma maliyeti gibi),
3. Karar değişkenlerinin tanımlanması (örneğin, ikili, sürekli, tamsayılı vb. karar değişkenleri gibi),
4. Kısıtların (GAMS dili ile denklemlerin) tanımlanması,
5. Modelin oluşturulması ve model ile ilgili çözüm kriterlerinin girilmesi,
6. Modelin ticari çözücüler yardımı ile çözdürülmesi.

GAMS'e parametre girişi MATLAB, Microsoft Excel vb. uygulamalar aracılığı ile de yapılabilmektedir. Bu tez çalışmasında veri link katmanının tasarımı (bkz. Bölüm 4.3) MATLAB [139] ile gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlar GAMS'e parametre girişi şeklinde verilerek MP modelleri (bkz. Bölüm 4.4) çözdürülmüştür (bkz. Bölüm 5). MATLAB ile GAMS arasında veri alışverişinin nasıl yapılacağına dair açıklamalar Ek 1'de ilgili okuyucular için sunulmuştur.

4. SİSTEM MODELİ

Tez çalışmasının bu bölümünde; iletim güç kontrol stratejileri için tasarlanan sistem modelinin özeti (bkz. Bölüm 4.1), varsayımlar (bkz. Bölüm 4.2), veri link katmanı modeli (bkz. Bölüm 4.3) ve MP formülasyonları (bkz. Bölüm 4.4) sunulmuştur.

4.1 Özet

Bu tez çalışmasında kullanılan KAA bir tane baz istasyonu ve N_N tane algılayıcı düğümden oluşmakta ve düğümler disk şeklindeki bir alana rastgele bırakılmaktadır. Algılayıcı düğümler etraftan topladığı çeşitli bilgileri baz istasyonuna tek atlamalı veya çok atlamalı şekilde iletmeyle yükümlüdür. Zaman eşit süreli turlara bölünmüş olup her bir turun süresi 60 saniye olarak belirlenmiştir ($T_{rnd} = 60$ s). Her turda i algılayıcı düğümü s_i tane veri paketi üretmektedir. Veri ve ACK paketleri için iletim güç seviyeleri ayrı bir kümeden seçilmektedir. Bir düğüm çifti arasındaki veri alışverişi iki yönlü tokalaşma mekanizması ile gerçekleştirilmektedir. Bir KAA'nın yaşam süresinin eniyilemesi problemi kapsamında *ağ yaşam süresi* tanımının doğru bir şekilde yapılması oldukça önem arz etmektedir. Buna göre ağ yaşam süresi, bir KAA'da batarya enerjisini ilk önce bitiren düğümün tüm enerjisini harcayana kadar geçen süre olarak tanımlanmıştır [23, 58, 59]. Yukarıdaki tanımda ilk düğüm tüm enerjisini bitirdiğinde diğer düğümlerde fazla miktarda batarya enerjisi kalabilir. Bu yüzden klasik ağ yaşam süresi tanımının enerji verimliliği konusunda herhangi bir yaptırımı yoktur.

Eniyileme problemi bu çalışmada gibi bir *MaXMiN* problemi olarak tanımlanabilir. Burada bahsedilen *MaXMiN* kavramı, en düşük yaşam süresine sahip düğümün yaşam süresini maksimize etmeyi sağlamaktadır. Bu durumda tüm düğümler işbirliği içine girip erken düğüm ölümlerinin önüne geçmeye çalışmaktadır. Böylece ağda oluşabilecek aşırı miktarda veri iletiminin önüne geçilerek, ağda yük dengelemesi yapılmaktadır. Bu yüzden bu çalışmada tanımlanan ağ yaşam süresi ile önerilen stratejiler enerji verimliliğini yeterli ölçüde sağlamaktadır. Ağ yaşam süresini eniyilemek adına her linkte veri ve ACK paketlerinin kullandığı iletim güç seviyeleri ile bu güç seviyelerinin kullanılması sonucu linkten akan veri miktarı eniyileme probleminin karar değişkenleri olarak tanımlanmıştır.

4.2 Varsayımlar

Sistem modelinde kabul edilen varsayımlar aşağıdaki gibi listelenmiştir:

- Sönümleme (İng. fading) etkilerini ortadan kaldırmak adına ağdaki tüm düğümlerin statik olduğu, herhangi bir şekilde ağ içinde mobilite olmadığı varsayılmıştır.

- Her linkte akan veri miktarının eniyilemesi merkezi bir şekilde yapılmaktadır. Ayrıca Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (İng. Time Division Multiple Access – TDMA) aralık süresi (İng. slot time) atamaları de merkezi bir şekilde yapılmaktadır. Baz istasyonunun ağ topolojisi hakkında tüm bilgileri (örneğin, düğümlerin koordinatları, her linkteki yol kaybı vb.) bildiğini varsayılmaktadır. Fakat bu tez çalışmasının ileriki bölgelerinde önerilen iki strateji dışında (bkz. Bölüm 4.4.1 ve 4.4.8) kalan diğer tüm stratejilerde düğümler iletim güç atamalarını kendileri yapmaktadır. Son olarak baz istasyonunun yüksek veri işleme kapasitesine, veri akış planlaması yeteneğine ve de enerji kaynağuna sahip olduğu varsayılmıştır.
- Tüm düğümler hemen hemen senkron çalışmaktadır. KAA’lar için literatürde herhangi bir ek yük getirmeyen ve de makul seviyede senkronizasyon sağlayan çok sayıda senkronizasyon protokolü geliştirilmiştir [140].
- Tipik bir KAA’dı ağın yeniden organizasyon periyodu yeterince uzundur [22]. Bu yüzden topoloji keşfi ve rota yaratma operasyonları için harcanan enerji miktarı ağda toplam harcanan enerji miktarının %1’inden azdır [141]. Ağdaki çeşitli kontroller için gereken enerji toplam harcanan enerjiden çok küçük olduğu için bu çalışma kapsamında kontrol için harcanan enerji ihmâl edilmiştir.
- TDMA tabanlı bir MAC protokolü faaliyette olup zaman aralıklı atama algoritması sayesinde aktif linklerde girişimin (İng. interference) azaltıldığı varsayılmıştır. Çotuk ve arkadaşları [142] yeterli miktarda bant genişliği talebinin sağlanması durumunda çakışmasız haberleşmenin mümkün olduğunu göstermiştir. Ayrıca dinamik TDMA yaklaşımı ile tasarlanan MAC protokollerinde veri paket çakışmalarının ihmâl edilecek seviyelere kadar düşünülebildiği Demirkol ve arkadaşları [97] tarafından gösterilmiştir. TDMA tabanlı MAC protokollerini istemeyen dinlemeleri önlemek adına kullanılması da gereklidir.
- Her linkteki yol kaybı değerleri kapalı devre kontrol mekanizması [32] ile hesaplanabilmekte ve bu çalışmada böyle bir mekanizmanın etkin olduğu varsayılmıştır.
- Düğümlerde üretilen veri paketleri atomik veriler şeklinde olup ara düğümlerde bu veriler herhangi bir şekilde bölünemez veya birleştirilemez.

4.3 Veri Link Katmanı Modeli

Bu çalışmada veri link katmanı modeli kurulurken Mica2 algılayıcı düğümlerinin enerji tüketim karakteristiklerinden faydalانılmıştır. Mica2 düğümler [39] deneysel KAA araştırma konularında sıkça tercih edilen bir platform olup Atmel Atmega 128L işlemci ile Chipcon CC1000 radyosunu kullanmaktadır. Mica2 düğümlerine ait alıcı-verici güç tüketimleri ve buna karşılık gelen çıkış anten güçleri Çizelge 4.1’de sunulmaktadır [39]. l güç seviyesinde iletim için harcanan güç $P_{tx}^{crc}(l)$ olarak ifade edilmiş olup, anten çıkış gücü ise $P_{tx}^{ant}(l)$ (-20 dBm ile 5 dBm arasında) olarak temsil edilmiştir. Güç seviyelerini içeren küme S_L olarak tanımlanmış, 26 ayrık güç seviyesi bu tez çalışması kapsamında ele alınmıştır. Alıcı tarafta veriyi almak için gereken güç miktarı sabit ve $P_{rx}^{crc} = 35.4$ mW’dır.

Her turda her algılayıcı düğüm çevresinden veri almak (İng. *acquisite*) için belirli miktarında enerji harcamaktadır. Bu enerji miktarı E_{DA} olarak tanımlanmış olup değeri 600 μJ 'dir. Bu değer işlemciyi çalıştırırmak ve de algılayıcı modülünün aktif moda çalışması için gereken güç miktarının ($P_{DA} = 30 \text{ mW}$) [143] verinin alınma süresi ($T_{DA} = 20 \text{ ms}$) ile çarpımı sonucu bulunmaktadır. Her algılayıcı düğüm aynı platforma sahip olduğu için her turda aynı miktarda veri ürettiği varsayılmıştır. Her turun sonunda (60 saniye sonra) bir tane 256 baytlık veri paketi üretilmektedir. Bölüm 5'teki analizleri detaylandırmak için 64 bayt uzunluklu veri paketleri de bu çalışma kapsamında üretilmiştir.

Çizelge 4.1: Mica2 düğümler ve CC1000 radyosu için l güç seviyesindeki iletim güç tüketimi ($P_{tx}^{crc}(l)$ mW) ve çıkış anten gücü ($P_{tx}^{ant}(l)$ mW).

l	$P_{tx}^{crc}(l)$	$P_{tx}^{ant}(l)$	l	$P_{tx}^{crc}(l)$	$P_{tx}^{ant}(l)$
1 (l_{min})	25.8	0.0100	14	32.4	0.1995
2	26.4	0.0126	15	33.3	0.2512
3	27.0	0.0158	16	41.4	0.3162
4	27.1	0.0200	17	43.5	0.3981
5	27.3	0.0251	18	43.6	0.5012
6	27.8	0.0316	19	45.3	0.6310
7	27.9	0.0398	20	47.4	0.7943
8	28.5	0.0501	21	50.4	1.0000
9	29.1	0.0631	22	51.6	1.2589
10	29.7	0.0794	23	55.5	1.5849
11	30.3	0.1000	24	57.6	1.9953
12	31.2	0.1259	25	63.9	2.5119
13	31.8	0.1585	26 (l_{mak})	76.2	3.1623

Veri ve ACK paket boyutları sırasıyla M_P ve M_A bayt olarak tanımlanmıştır. Alıcı-verici çifti arasındaki veri iletişimi aralık süresi içinde gerçekleşmektedir. Alıcı-verici çifti arasında tam senkronizasyon sağlanamayacağı için pratik uygulamalarda *koruma zamanları* (İng. *guard time*) kullanılmaktadır. Koruma zamanları veri aralığının başlangıcı ve sonunda kullanılmaktadır [144]. Daha önce de belirtildiği gibi KAA'lar için literatürde herhangi bir ek yük getirmeyen ve makul şekilde senkronizasyonu sağlayan çok sayıda senkronizasyon protokolü geliştirilmiştir [140]. Örneğin, zaman senkron protokollerini senkronizasyon için sırtta taşıma (İng. *piggyback*) yöntemi kullanmaktadır [145]. Senkronizasyon hatasının ortalama değeri 16.9 μs olarak raporlanmış olup en kötü durumda alınacak hatanın 44 μs olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle bu tez çalışmasında *koruma zamanı* 100 μs olarak alınmıştır ($T_{grd} = 100 \mu\text{s}$). Bu değer alınacak maksimum hatanın yaklaşık olarak iki katından biraz daha fazladır.

Kaynak düğümde veri paket iletiminin bittiği yerden ACK paketinin başlangıcının aldığı yere kadar geçen sürede çeşitli gecikmeler meydana gelmektedir (örneğin, yayılım gecikmesi ve alınan paketlerin sıralanması gibi). Bu tip gecikmeler 500 μs olarak modellenmiştir ($T_{rsp} = 500 \mu\text{s}$). Yukarıda açıklanan durumlar modellendiği zaman M_P

bayt uzunluklu veri paketi ve M_A bayt uzunluklu ACK paketi için aralık süresi,

$$T_{slot} = [2 \times T_{grd} + T_{tx}(M_P) + T_{rsp} + T_{tx}(M_A)], \quad (4.1)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu denklemde $T_{tx}(M_P)$ M_P bayt uzunluklu verinin iletilme süresini gösterirken, $T_{tx}(M_A)$ ise M_A bayt uzunluklu ACK paketinin iletim süresini temsil etmektedir. Bu değer veri paketi (veya ACK paketi) uzunluğunun kanalın veri hızına ($\xi = 19.2$ Kbps) bölünmesi ile elde edilmektedir. $M_P = 256$ bayt ve 64 bayt uzunluklu veri paketleri için aralık süreleri sırasıyla 115 ms ve 36 ms olarak hesaplanmıştır.

Kablosuz haberleşmede bir linkin güvenilirliği (İng. reliability) kanalın kalitesine (yol kaybının fazla olduğu durumda dâhi) ve fiziksel katmanda kullanılan parametrelere (örneğin, modülasyon ve kodlama teknikleri gibi) bağlıdır. KAA'larda uzaklığın artmasına bağlı olarak yükselen ve log-normal gölgeleme (İng. shadowing) ile rastgelelik kazanan yol kaybının pratik uygulamalarda kullanılması gerçekçi analizler yapmayı sağlar [50, 146, 147]. Bu çalışmada [50]'de sunulan yol kaybı modeli, log-normal gölgeleme, baz alınarak yayılının etkileri dikkate alınmıştır.

(i, j) linkindeki yol kaybı Υ_{ij} olarak gösterilmiş olup değeri (dB cinsinden) aşağıdaki denklem ile bulunmaktadır [57].

$$\Upsilon_{ij}[\text{dB}] = \Upsilon_0[\text{dB}] + 10n\log_{10}\left(\frac{d_{ij}}{d_0}\right) + X_\sigma \text{ [dB]} \quad (4.2)$$

Bu denklemde d_{ij} , i düğümü ile j düğümü arasındaki uzaklığı göstermekte, d_0 referans uzaklığı temsil etmekte ve Υ_0 ise referans uzaklıktaki yol kaybını dB cinsinden ifade etmektedir. n yol kayıp katsayısını göstermekte olup X_σ ortalama değeri 0, standart sapması olan σ dB olan, gölgeleme etkilerini modelleyen bir Gauss rastgele değişkeni olarak temsil edilmiştir. Mica2 düğümleri için Zuniga ve Krishnamachari'nin çalışmasında verdiği yol kaybı değerleri bu tez çalışmasında kullanılmıştır [50]. Bu kapsamda $n = 4$, $\sigma = 4$ dB, $d_0 = 1$ m ve $\Upsilon_0 = 55$ dB olarak alınmıştır [50]. 5.19 dBi olan monopol çeyrek dalga anten kazançlarının Υ_0 içine dâhil edildiği varsayılmıştır [148].

(i, j) linki üzerinde l güç seviyesinde alınan sinyalin gücü $P_{rx,ij}^{ant}(l)$ olarak tanımlanmaktadır,

$$P_{rx,ij}^{ant}(l)[\text{dBm}] = P_{tx}^{ant}(l)[\text{dBm}] - \Upsilon_{ij}[\text{dB}], \quad (4.3)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. $T_0 = 300$ Kelvin sıcaklığında (27 Celcius) gürültünün gücü,

$$P_n = (F + 1)k_B T_0 B_N, \quad (4.4)$$

olarak hesaplanmaktadır. Bu denklemde $F = 13$ dB gürültü figürünü (İng. noise figure), k_B Boltzmann sabitini ve $B_N = 30$ kHz Mica2 düğümleri için gürültünün bant genişliğini göstermekte olup bu değerler yukarıdaki denklemde yerine konulduğunda $P_n = -115$ dBm olarak hesaplanmıştır [50]. Buna göre sinyal-gürültü oranı (İng. signal-to-noise ratio – SNR) aşağıdaki denklemde tanımlanmaktadır.

$$\psi_{ij}(l)[\text{dB}] = P_{rx,ij}^{ant}(l)[\text{dBm}] - P_n[\text{dBm}] \quad (4.5)$$

P_i 'lerin birbirlerinden bağımsız Bernoulli rastgele değişkenleri olarak tanımlandığı varsayılsın. $P_i = 1$, i . bitin başarılı alındığını; $P_i = 0$ ise bitin başarılı bir şekilde alınamadığını temsil etsin. r bitin iletiminden sonra bit alma oranı $\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r P_i$ şeklinde tanımlanabilir. P_i rastgele değişkenleri bağımsız ve eş dağılımlı (İng. independent and identically distributed) olduğu için büyük sayıların zayıf yasasına (İng. weak law of large

numbers) göre ortalama başarılı bit alma oranı $E[P_i]$ şeklinde ifade edilebilir. Mica2 düğümlerde sıfıra dönüsüz kodlama (İng. non-return-to-zero – NRZ) ile tutarsız frekans kaydırma anahtarlama (İng. non-coherent frequency shift keying – NCFSK) kullanılmaktadır. NRZ kullanıldığı zaman bir bit için başarılı paket alma olasılığı ($1 - P_e$) şeklinde tanımlanmaktadır. Bağımsızlıktan ötürü r bitin başarılı bir şekilde alınma olasılığı ise,

$$p = (1 - P_e)^r, \quad (4.6)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu denklemde P_e bit hata olasılığını (İng. bit error rate – BER) temsil etmektedir. P_e kullanılan modülasyon tekniğine göre değişiklik gösterir. Bu tez çalışmasında kullanılan NCFSK modülasyon tekniği için P_e ,

$$P_e = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{E_b}{2N_0}\right), \quad (4.7)$$

olarak hesaplanmaktadır. SNR ($\psi_{ij}(l)$) ile bit başına düşen SNR ($\frac{E_b}{N_0}$) arasındaki ilişki,

$$\psi_{ij}(l) = \frac{E_b}{N_0} \frac{\xi}{B_N}, \quad (4.8)$$

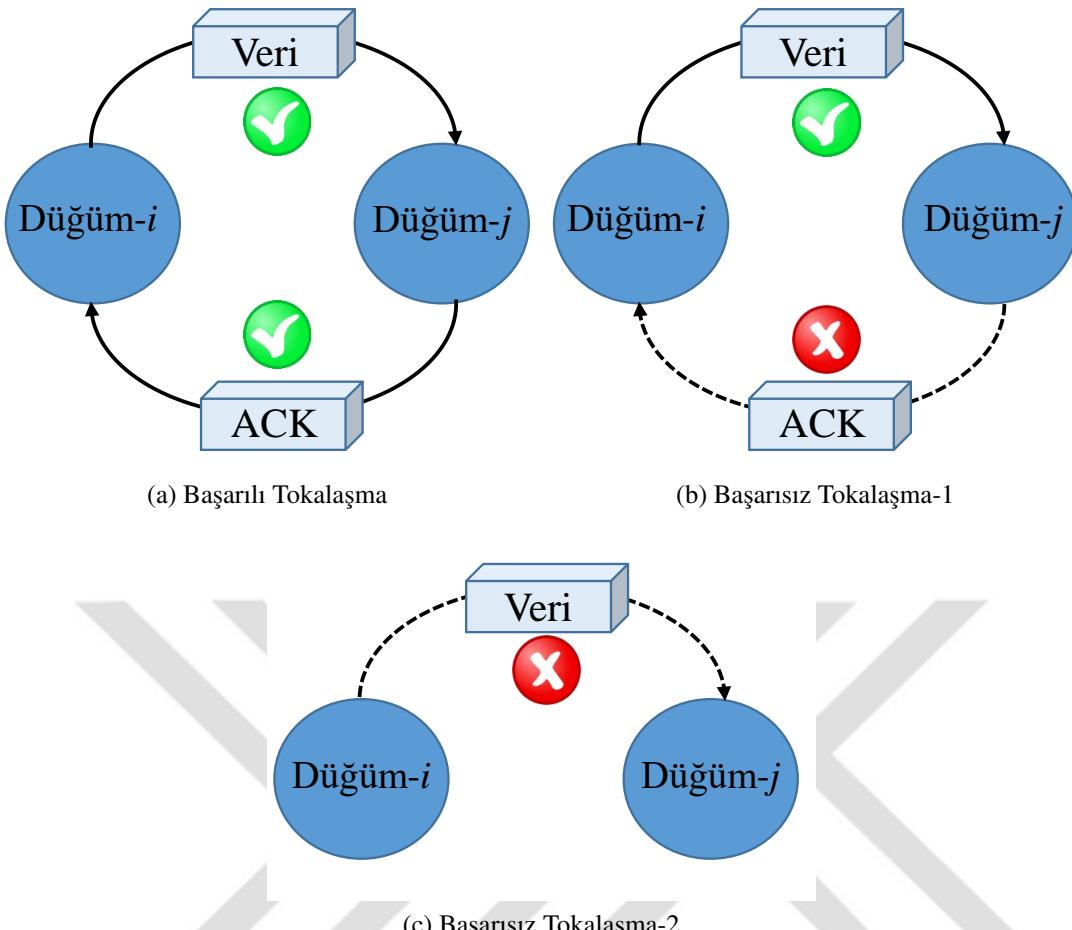
şeklinde tanımlanmaktadır. 4.6, 4.7 ve 4.8 numaralı denklemler kullanılarak, φ -bayt uzunluklu bir paketin l güç seviyesi ile (i, j) linki üzerinde iletildesinden sonra bu paketin başarılı bir şekilde alınma olasılığı [50],

$$p_{ij}^s(l, \varphi) = \left(1 - \frac{1}{2} \exp\left(\frac{-\psi_{ij}(l)}{2} \frac{1}{0.64}\right)\right)^{8\varphi}, \quad (4.9)$$

olarak hesaplanmaktadır. Bu paketin başarısız alınma olasılığı, $p_{ij}^f(l, \varphi)$, aşağıdaki denklemdeki gibi hesaplanmaktadır.

$$p_{ij}^f(l, \varphi) = 1 - p_{ij}^s(l, \varphi) \quad (4.10)$$

Başarılı bir tokalaşma hem veri hem de ACK paketinin ilgili alıcılarında başarılı bir şekilde alınması ile gerçekleşmektedir (bkz. Şekil 4.1a). Başarısız bir tokalaşmanın iki nedeni vardır: (i) veri paketi başarılı bir şekilde iletildirken ACK paketinde hata meydana gelebilir (bkz. Şekil 4.1b) veya (ii) veri paketi kanalın kötü şartlarından dolayı başarılı bir şekilde iletilemeyebilir (bkz. Şekil 4.1c). Bu durumda herhangi bir ACK paketi alıcı taraftan verici tarafa gönderilmez. Bu iki durumda tokalaşma işleminin tekrar edilmesi gereklidir, bu da ek enerji harcanmasına neden olarak enerji verimliliğini düşürmektedir.



Şekil 4.1: Başarılı ve başarısız tokalaşma senaryoları

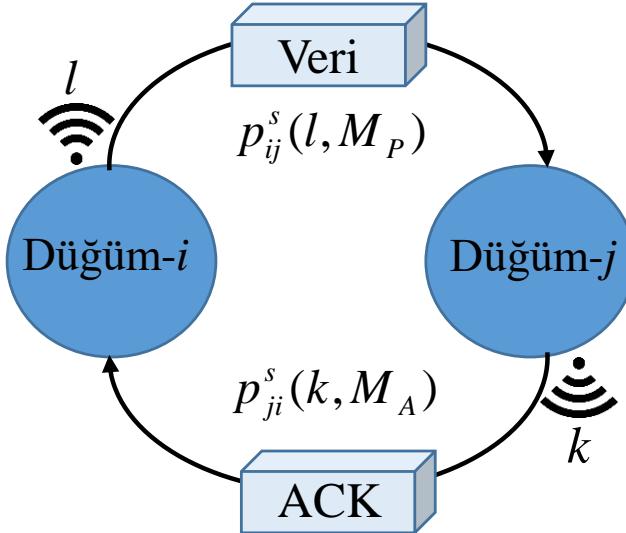
İletilen veri paketi alıcı tarafta başarılı bir şekilde alınmasa bile verici tarafta harcanan enerji başarılı alma için harcanacak enerji ile aynıdır. Bunun nedeni verici tarafın veriyi ilettikten sonra beklediği ACK paketini dinlemek zorunda olduğu içindir. CC1000 radyo modüllerinde veri alma enerjisi ile boş dinleme enerjisi arasında herhangi bir fark yoktur. Veri paketi iletimi sonrasında ACK paketinin alınamaması doğal olarak paket kaybını göstermektedir.

(i, j) linki üzerinde l güç seviyesinde veri iletimi yapılırken ve bu paketin karşılığında k güç seviyesinde ACK paketi iletimi yapılması durumunda tokalaşmanın başarılı olma olasılığı Şekil 4.2'deki gibi gösterilmiş ve Denklem 4.11'deki gibi matematiksel olarak ifade edilmiştir.

$$p_{ji}^{HS,s}(l,k) = p_{ij}^s(l, M_P) \times p_{ji}^s(k, M_A) \quad (4.11)$$

Bu denklemde $p_{ij}^s(l, M_P)$, M_P uzunluklu bir veri paketinin l güç seviyesinde i düğümünden iletilirken j düğümünde başarılı şekilde alınma olasılığını göstermekte; $p_{ji}^s(k, M_A)$, k güç seviyesinde j düğümünden iletilen M_A uzunluklu ACK paketinin i düğümünde başarılı şekilde alınma olasılığını temsil etmektedir.

Denklem 4.11 şu şartlar altında geçerlidir: $P_{rx,ij}^{ant}(l) \geq P_{sns}$ ve $P_{rx,ji}^{ant}(k) \geq P_{sns}$. Bu şart alıcı taraflardaki (bu örnekte veri paketi için j düğümü ve ACK paketi için i düğümü)



Şekil 4.2: Başarılı tokalaşma mekanizması

anten alma güçlerinin ($P_{rx,ij}^{ant}(l)$ ve $P_{rx,ji}^{ant}(k)$) alıcı hassasiyeti eşik değerinden (P_{sns}) büyük olması gerektiğini ifade etmektedir. Ancak bu şartlar altında haberleşme yapılabilmektedir. Diğer türlü (yani $P_{rx,ij}^{ant}(l) < P_{sns}$ ve $P_{rx,ji}^{ant}(k) < P_{sns}$ olması durumunda) $p_{ij}^{HS,s}(l,k) = 0$ olur. Mica2 düğüm platformunda $P_{sns} = -102$ dBm olarak alınmıştır. Tokalaşmanın başarısız olma olasılığı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$p_{ij}^{HS,f}(l,k) = 1 - p_{ij}^{HS,s}(l,k) \quad (4.12)$$

Bit hatalarından kaynaklı paket kayıplarının önüne geçebilmek adına kaybolan paketlerin yeniden iletilmesi (İng. ret-transmission) gerekmektedir. Bu kapsamda paket hataları dâhil edilerek ortalamada her veri paketi $\lambda_{ij}(l,k)$ kere iletilmekte olup,

$$\lambda_{ij}(l,k) = 1 + \sum_{n=1}^{N_{rtr}} [p_{ij}^{HS,f}(l,k)]^n, \quad (4.13)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu denklemde N_{rtr} maksimum yeniden iletim limitini temsil etmektedir. *Maksimum yeniden iletim* sayısı (macMaxFrameRetries) IEEE 802.15.4 protokolünde standart olarak 3 olarak alınmaktadır ($N_{rtr} = 3$) [35]. Ancak N_{rtr} üzerine bir sınır konulmadığı zaman yani $N_{rtr} \rightarrow \infty$ olduğu durumda $\lambda_{ij}(l,k)$ ile $p_{ij}^{HS,s}(l,k)$ arasında aşağıdaki denklemdeki ilişki ortaya çıkmaktadır.

$$\begin{aligned} \lambda_{ij}(l,k) &= 1 + \sum_{n=1}^{\infty} [p_{ij}^{HS,f}(l,k)]^n \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} [p_{ij}^{HS,f}(l,k)]^n \\ &= \frac{1}{1 - p_{ij}^{HS,f}(l,k)} \\ &= \frac{1}{p_{ij}^{HS,s}(l,k)} \end{aligned} \quad (4.14)$$

M_P bayt uzunluklu verinin l güç seviyesi ile i düğümünden j düğümüne iletilmesi $T_{tx}(M_P)$ saniyede gerçekleşirken bu sırada harcanan enerji miktarı $P_{tx}^{crc}(l) \times T_{tx}(M_P)$ şeklinde hesaplanmaktadır.

$$E_{tx}^P(l, M_P) = P_{tx}^{crc}(l) T_{tx}(M_P) \quad (4.15)$$

Verici düğüm veri paketini ilettiği andan itibaren (yani $T_{tx}(M_P)$ saniye sonra) aktif aralık süresi içinde (yani $T_{slot} - T_{tx}(M_P)$ saniye süresince) alıcı moda geçmektedir. Alıcı modda $T_{slot} - T_{tx}(M_P)$ saniye boyunca harcanan enerji $P_{rx}^{crc} \times (T_{slot} - T_{tx}(M_P))$ olarak ifade edilmektedir. Bu durumda verici düğümde T_{slot} süresince (tek bir tokalaşma evresinde) harcanan toplam enerji miktarı $E_{tx}^{HS}(l, M_P)$ olup aşağıdaki denklem ile bulunmaktadır.

$$E_{tx}^{HS}(l, M_P) = E_{tx}^P(l, M_P) + P_{rx}^{crc}(T_{slot} - T_{tx}(M_P)) \quad (4.16)$$

Verici düğümde paket hataları ve yeniden iletim miktarı göz önünde bulundurulursa T_{slot} süre içinde harcanan toplam enerji $\lambda_{ij}(l, k) \times E_{tx}^{HS}(l, M_P)$ şeklinde hesaplanmaktadır. Veri link katmanında dönüşsel artıklık denetimi (Ing. cyclic redundancy check – CRC) kullanıldığından dolayı iletilen bir veri paketi içinde bulunduğu zaman diliinde bir ACK paketi ile onaylanmazsa veri paketi tekrardan iletilmelidir. Diğer taraftan paket işleme enerjisi (E_{PP}) bir defaya mahsus harcanan enerji olup takip eden yeniden iletimlerde bu enerji tüketilmez. Bu yüzden verici tarafta harcanan toplam enerji, $E_{tx,ij}^D(l, k)$, aşağıdaki denklemdeki gibi tanımlanmaktadır.

$$E_{tx,ij}^D(l, k) = E_{PP} + \lambda_{ij}(l, k) E_{tx}^{HS}(l, M_P) \quad (4.17)$$

Bu denklemde E_{PP} Mica2 platformunda aktif modda tüketilen güç miktarı (24 mW) [4] ile her paket için işlemcideki işleme süresinin çarpımı ile elde edilmiştir. Buna göre $E_{PP} = 120 \mu\text{J}$ olarak hesaplanmıştır.

Alicı düğümde bir veri paketinin başarılı bir şekilde alınması için gerekli enerji $P_{rx}^{crc} \times (T_{slot} - T_{tx}(M_A))$ olarak tanımlanmıştır. Alicının aldığı veri paketini ACK paketi ile doğrulaması için harcadığı enerji miktarı ise $E_{tx}^P(k, M_A)$ şeklinde hesaplanmaktadır. Alicı taraf ACK paketini göndermek için $T_{tx}(M_A)$ saniye süre harcamakta, aralık süresinin kalan $T_{slot} - T_{tx}(M_A)$ zamanı boyunca da veri paketini alma moduna geçecektir. Böylece başarılı bir tokalaşma sonunda (bkz. Şekil 4.1a) alıcı tarafta toplam enerji harcaması ($E_{rx}^{HS,S}(k, M_A)$),

$$E_{rx}^{HS,S}(k, M_A) = P_{rx}^{crc}(T_{slot} - T_{tx}(M_A)) + E_{tx}^P(k, M_A) \quad (4.18)$$

olarak hesaplanmaktadır.

Tokalaşma işlemi ACK paketinde meydana gelebilecek bit hataları sebebi ile de oluşabilir (bkz. Şekil 4.1b). Ancak bu durum alıcı tarafta, alicının ACK paketi göndermek için verici konumuna geçmesi yüzünden aynı enerji maliyetine (Denklem 4.18'de belirtilen) sebep olmaktadır.

Eğer tokalaşma hatası veri paketinde meydana gelen bit hatalarından kaynaklı ise (bkz. Şekil 4.1c) alıcı düğüm ACK paketi gönderemeyecektir. Bu durum matematiksel olarak Denklem 4.18'de $T_{tx}(M_A) = E_{tx}^P(k, M_A) = 0$ şeklinde modellenmekte ve bu durumda alma enerjisi aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$E_{rx}^{HS,f} = P_{rx}^{crc} T_{slot} \quad (4.19)$$

Eğer bir veri paketi başarılı bir şekilde alınmadıysa, alıcı düğüm ilgili aralık süresinin sonunda uyku moduna geçer. Alıcı tarafta paket hatalarının dâhil edildiği durumda enerji tüketim değerini hesaplamak için ortalamada ne kadar yeniden iletim yapılması gerektiğine karar verilmelidir. Bu durumu modellemek adına aşağıdaki 3 olay tanımlanmıştır.

$$\alpha_1 = \{\text{Başarılı Tokalaşma (Şekil 4.1a)}\} \quad (4.20)$$

$$\alpha_2 = \{\text{Başarısız Tokalaşma-1 (Şekil 4.1b)}\} \quad (4.21)$$

$$\alpha_3 = \{\text{Başarısız Tokalaşma-2 (Şekil 4.1c)}\} \quad (4.22)$$

Bu üç olayın gerçekleşme olasılıklarının sırasıyla P_{α_1} , P_{α_2} ve P_{α_3} olarak tanımlandığı varsayılsın.

$$P_{\alpha_1} = p_{ij}^s(l, M_P) p_{ji}^s(k, M_A) \quad (4.23)$$

$$P_{\alpha_2} = p_{ij}^s(l, M_P) p_{ji}^f(k, M_A) \quad (4.24)$$

$$P_{\alpha_3} = \underbrace{p_{ij}^f(l, M_P)}_{=1} p_{ji}^f(k, M_A) \quad (4.25)$$

Denklem 4.25'te $p_{ij}^f(l, M_P) = 1$ olmasının sebebi veri paketinin başarılı şekilde iletilmediği bilindiği içindir. P_{α_1} , P_{α_2} ve P_{α_3} olasılıkları yardımcı ile ortalama yeniden iletim oranları sırasıyla; $P_{\alpha_1} \times \lambda_{ij}(l, k)$, $P_{\alpha_2} \times \lambda_{ij}(l, k)$ ve $P_{\alpha_3} \times \lambda_{ij}(l, k)$ olarak hesaplanmaktadır.

Yukarıdaki bilgiler ışığında alıcı tarafta paket hataları ve paket işleme süreci dâhil edilerek harcanan toplam enerji, $E_{rx,ji}^D(l, k)$ olarak tanımlanmakta ve aşağıdaki denklemdeki gibi hesaplanmaktadır.

$$E_{rx,ji}^D(l, k) = E_{PP} + \lambda_{ij}(l, k) \left[E_{rx}^{HS,s}(k, M_A) \times (P_{\alpha_1} + P_{\alpha_2}) + P_{\alpha_3} \times E_{rx}^{HS,f} \right] \quad (4.26)$$

4.4 Matematiksel Programlama Formülleri

Bu bölümde KAA yaşam süresinin eniyilemesini amaçlayan veri link katmanında tokalaşma mekanizması ile iletim güç atama problemlerini beraber harmanlayan MP formülleri sunulmuştur. Ağ topolojisi yönlü bir grafik olan $G = (V, A)$ şeklinde tanımlanmış olup V kümesi ağdaki tüm düğümleri (baz istasyonu olan düğüm-1 de dâhil olmak üzere) temsil etmektedir. Ayrıca $W = V \setminus \{1\}$ kümesi sadece algılayıcı düğümleri içeren küme olarak tanımlanmıştır. $A = \{(i, j) : i \in W, j \in V - i\}$ kümesi ağdaki tüm linkleri temsil etmektedir. Dikkat edilecek olursa bu kümede hiçbir düğüm kendisine veri göndermemekte ve baz istasyonu veri üretmemektedir. Bu yöntemle olası döngülerin önüne geçilmektedir. i düğümünden j düğümüne l güç seviyesi ile iletilen, bunun karşılığında k güç seviyesinde onaylanan paket sayısı f_{ij}^{lk} olarak tanımlanmıştır.

Önerilen eniyileme problemleri için amaç fonksiyonu tur sayısının (N_{rnd}) maksimize edilmesi,

$$\text{Maksimum } N_{rnd}, \quad (4.27)$$

şeklinde matematiksel olarak tanımlanmıştır. Bu tez çalışması kapsamında önerilen tüm stratejilerde ağ yaşam süresi, geçen tur sayısı ile tur süresinin çarpımı olarak ($N_{rnd} \times T_{rnd}$) saniye cinsinden tanımlanmıştır.

4.4.1 Global güç seviye karar stratejisi

Global Güç Seviye Karar (İng. Global Power Level Decisions – GPLD) stratejisi her linkte veri ve ACK paket iletim güç seviyelerinin ve iletilen paket miktarlarının tüm olası kombinasyonlarını dikkate alarak ağ yaşam süresinin maksimize edilmesi üzerine kurulmuş bir modeldir. ACK paket iletim güç seviyesi hakkında herhangi bir kısıtlama bulunmamaktadır. GPLD stratejisini oluşturan eniyileme modelinin amaç fonksiyonu 4.27 ile kısıtları 4.28–4.34 ile tanımlanmıştır.

Akan veri miktarının negatif olmaması için aşağıdaki kısıt tanımlanmıştır.

$$f_{ij}^{lk} \geq 0, \quad \forall l \in S_L, \forall k \in S_L, \forall (i, j) \in A, N_{rnd} \geq 0 \quad (4.28)$$

Bu kısıtta S_L güç seviyelerini içeren kümeyi temsil etmektedir (bkz. Çizelge 4.1).

i düğümüne giren veri miktarı ($\sum_{l \in S_L} \sum_{k \in S_L} \sum_{(j,i) \in A} \theta_{ji}(l,k) f_{ji}^{lk}$) ile i düğümünün her turda ürettiği veri miktarının ($N_{rnd} \times s_i$) toplamı i düğümünden çıkan veri miktarına ($\sum_{l \in S_L} \sum_{k \in S_L} \sum_{(i,j) \in A} f_{ij}^{lk}$) eşittir. Bu denklem *akış dengeleme* kişidi olarak bilinmektedir.

$$\sum_{l \in S_L} \sum_{k \in S_L} \sum_{(i,j) \in A} f_{ij}^{lk} - \sum_{l \in S_L} \sum_{k \in S_L} \sum_{(j,i) \in A} \theta_{ji}(l,k) f_{ji}^{lk} = N_{rnd} \times s_i, \quad \forall i \in W \quad (4.29)$$

Bu denklemde $\theta_{ij}(l,k)$ sınırlı sayıda (İng. finite) yeniden iletim için modellenen kayıp oranını temsил etmekte olup aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$\theta_{ij}(l,k) = 1 - [p_{ij}^{HS,f}(l,k)]^{(N_{rtr}+1)} \quad (4.30)$$

Bu denklemde $0 \leq p_{ij}^{HS,f}(l,k) \leq 1$ olduğu için $N_{rtr} \rightarrow \infty$ iken $\theta_{ij}(l,k) \rightarrow 1$ 'e giderek sınırsız yeniden ileme sayesinde herhangi bir paket kaybı yaşanmayacağı modellenmiştir.

i algılayıcı düğümünün toplam meşgul olma zamanı $T_{bsy,i}$ ile sembolize edilmiş olup bu süre i düğümünün iletim ve alma durumlarındaki geçen süre ile çevreden veri toplama sürelerinin toplamı kadardır. Buna göre bir i düğümünde iletim için (yeniden iletimlerin dâhil edilerek) geçen toplam süre, $T_{slot} \sum_{l \in S_L} \sum_{k \in S_L} \sum_{(i,j) \in A} \lambda_{ij}(l,k) f_{ij}^{lk}$ olarak tanımlanmaktadır. Benzer bir şekilde alma için geçen toplam süre, $T_{slot} \sum_{l \in S_L} \sum_{k \in S_L} \sum_{(j,i) \in A} \lambda_{ji}(l,k) f_{ji}^{lk}$ dir. Son olarak yaşam süresi boyunca veri toplama zamanı ise $N_{rnd} \times T_{DA}$ olarak modellenmiştir. Bu tanımlamalar yardımı ile $T_{bsy,i}$ aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$T_{bsy,i} = T_{slot} \sum_{l \in S_L} \sum_{k \in S_L} \left\{ \sum_{(i,j) \in A} \lambda_{ij}(l,k) f_{ij}^{lk} + \sum_{(j,i) \in A} \lambda_{ji}(l,k) f_{ji}^{lk} \right\} + N_{rnd} \times T_{DA}, \quad \forall i \in W \quad (4.31)$$

Eğer bir i düğümü herhangi bir aralık süresinde alıcı veya verici durumunda değilse veya veri toplamıyorsa bu düğüm bu süre zarfında uyku modundadır. Uyku zamanı ağ

yaşam süresinden ($N_{rnd} \times T_{rnd}$) bu düğümün toplam meşgul olma zamanının ($T_{bsy,i}$) çıkarılması ($N_{rnd} \times T_{rnd} - T_{bsy,i}$) ile elde edilmektedir.

Her algilayıcı düğümde toplam enerji tüketimi düğümdeki batarya enerjisi (ρ) ile kısıtlıdır. Denklem 4.32'nin sağ tarafında kalan terimler sırasıyla; iletim, uyku (CC1000 radyo modülünün uyku modundaki güç tüketimi $P_{slp} = 3 \mu\text{W}$ olarak tanımlanmıştır), alma ve veri toplamak için harcanan toplam enerjiyi göstermektedir. Mica2 düğümleri iki tane kalem pile sahip olduğu için $\rho = 25 \text{ KJ}$ olarak kabul edilmiştir.

$$\begin{aligned} \rho \geq & \underbrace{\sum_{l \in S_L} \sum_{k \in S_L} \sum_{(i,j) \in A} E_{tx,ij}^D(l,k) f_{ij}^{lk}}_{\text{iletim}} + \underbrace{P_{slp}(N_{rnd} \times T_{rnd} - T_{bsy,i})}_{\text{uyku}} \\ & + \underbrace{\sum_{l \in S_L} \sum_{k \in S_L} \sum_{(j,i) \in A} E_{rx,ji}^D(l,k) f_{ji}^{lk}}_{\text{alma}} + \underbrace{N_{rnd} \times E_{DA}}_{\text{veri toplama}}, \forall i \in W \end{aligned} \quad (4.32)$$

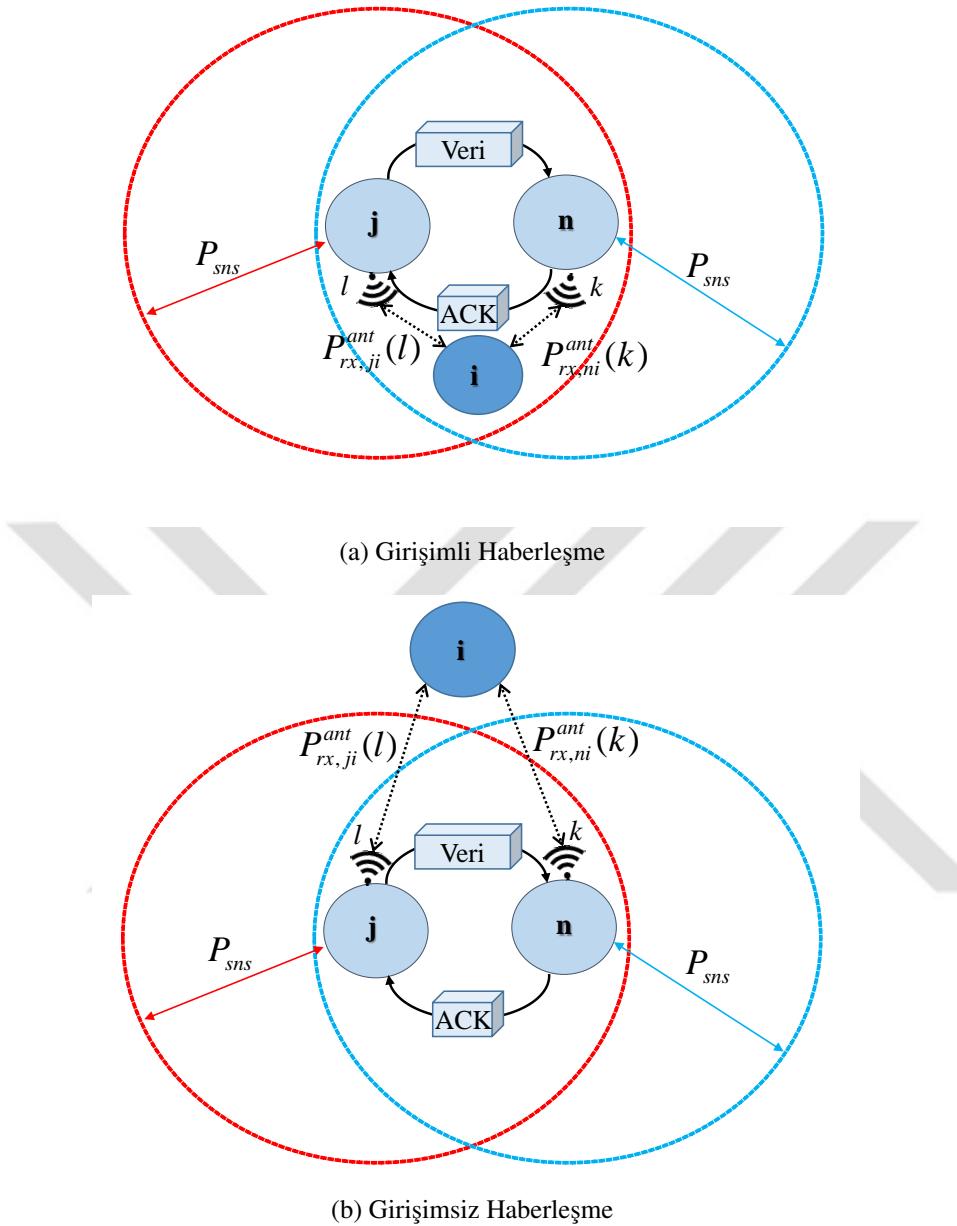
Veri akışı yapılan ortamda her düğümde iletim ve alma için gereken bant genişliğinin en fazla mevcut bant genişliği kadar olması gerekmektedir. Bu tip bir kısıt paylaşılan kapasitelerin dikkate alınması ile gerçekleştirilebilir. i düğümü etrafındaki akışlar i düğümünün bant genişliği olumsuz biçimde etkileyerek girişimi oluşturur (bu akımların i düğümünden çıkan veya bu düğüme giren akımlar olmadığı varsayılmıştır). i düğümünün tüm ağ yaşam süresi boyunca kullandığı toplam bant genişliği miktarı $\varsigma(i)$ ile ifade edilmiştir (bkz. Denklem 4.33). Bant genişliği ihtiyacının üst limiti ise ağ yaşam süresi kadardır ($\varsigma(i) \leq N_{rnd} \times T_{rnd}$).

$$\begin{aligned} \varsigma(i) \geq & T_{slot} \sum_{l \in S_L} \sum_{k \in S_L} \left\{ \sum_{(i,j) \in A} \lambda_{ij}(l,k) f_{ij}^{lk} + \sum_{(j,i) \in A} \lambda_{ji}(l,k) f_{ji}^{lk} \right\} \\ & + T_{slot} \sum_{l \in S_L} \sum_{k \in S_L} \sum_{(j,n) \in A} \lambda_{jn}(l,k) f_{jn}^{lk} I_{jnlk}^i, \forall i \in V \end{aligned} \quad (4.33)$$

Denklem 4.33 tüm düğümler için (baz istasyonu dâhil olmak üzere, $\forall i \in V$) geçerli olup bir düğüme gelen akışların süresi ($T_{slot} \sum_{l \in S_L} \sum_{k \in S_L} \sum_{(j,i) \in A} \lambda_{ji}(l,k) f_{ji}^{lk}$), düğümden çıkan akışların süresi ($T_{slot} \sum_{l \in S_L} \sum_{k \in S_L} \sum_{(i,j) \in A} \lambda_{ij}(l,k) f_{ij}^{lk}$) ve girişime neden olan akışların toplam süresi ($T_{slot} \sum_{l \in S_L} \sum_{k \in S_L} \sum_{(j,n) \in A} \lambda_{jn}(l,k) f_{jn}^{lk} I_{jnlk}^i$) ağ yaşam süresi ile sınırlanmıştır. Bu kısıt [142, 149]'da sunulan çalışmalardaki yeterli şartın değiştirilmiş bir versiyonudur. Denklem 4.33'te belirtilen I_{jnlk}^i girişim fonksiyonu temsil etmekte ve aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$I_{jnlk}^i = \begin{cases} 1, & \text{eğer } P_{rx,ji}^{ant}(l) \geq P_{sns} \text{ veya } P_{rx,ni}^{ant}(k) \geq P_{sns} \\ 0, & \text{diğer türlü} \end{cases} \quad (4.34)$$

Bu modelde girişimin belirlenmesi, i düğümündeki anten alım gücü ($P_{rx,ji}^{ant}(l)$ ve $P_{rx,ni}^{ant}(k)$) ve hassasiyet seviyesi (P_{sns}) ile ilişkilidir. Eğer i düğümü, j düğümü ile n düğümü arasında l güç seviyesinde gerçekleşen veri paketi iletiminin girişim bölgesi içerisinde



Şekil 4.3: Girişimli ve girişimsiz haberleşme örnekleri

veya n düğümü ile j düğümü arasında k güç seviyesinde gerçekleşen ACK paketi iletiminin girişim bölgesi içerisinde ise, i düğümünde girişimin olduğu söylenebilir (bkz. Şekil 4.3a). Bu durumda girişim fonksiyonu 1 değerini alırken diğer türlü 0 değerini almaktadır (bkz. Şekil 4.3b).

4.4.2 Yerel güç seviye karar stratejisi

Yerel Güç Seviye Karar (İng. Local Power Level Decisions – LPLD) stratejisinde veri ve ACK paketleri için iletim güç seviyeleri her (i, j) linkinde harcanan iletim ve alma enerji miktarlarına göre belirlenmektedir. Bu kapsamda her linkte veri paketi iletimi

bir tane optimal güç seviyesi l_{ij}^{opt} belirlenirken ACK paketi iletimi için de bir tane k_{ji}^{opt} optimal güç seviyesi kullanılmaktadır. Yani (i, j) linki üzerinde veri paketleri l_{ij}^{opt} güç seviyesi ile iletilirken ACK paketleri k_{ji}^{opt} güç seviyesi ile iletilmektedir. Bu iki güç seviyesi aşağıdaki yerel eniyileme yöntemi ile belirlenmektedir.

$$\{l_{ij}^{opt}, k_{ji}^{opt}\} = \underset{l \in S_L, k \in S_L}{\operatorname{argmin}} \left(E_{tx,ij}^D(l, k) + E_{rx,ji}^D(l, k) \right) \quad (4.35)$$

Bu yerel eniyileme yöntemi bir (i, j) linki üzerinde harcanan iletim ve alma enerjilerini ($E_{tx,ij}^D(l, k)$ ve $E_{rx,ji}^D(l, k)$) minimum yapan optimal güç seviye çiftini belirlemek üzerine tasarlanmıştır.

Maksimum N_{rnd}

Kısıtlar:

$$\sum_{(i,j) \in A} g_{ij} - \sum_{(j,i) \in A} \theta_{ij}(l_{ij}^{opt}, k_{ji}^{opt}) g_{ji} = N_{rnd} \times s_i, \quad \forall i \in W \quad (4.36)$$

$$T_{bsy,i} = T_{slot} \left\{ \sum_{(i,j) \in A} \lambda_{ij}(l_{ij}^{opt}, k_{ji}^{opt}) g_{ij} + \sum_{(j,i) \in A} \lambda_{ji}(l_{ij}^{opt}, k_{ji}^{opt}) g_{ji} \right\} + N_{rnd} \times T_{DA}, \quad \forall i \in W \quad (4.37)$$

$$\underbrace{\sum_{(i,j) \in A} E_{tx,ij}^D(l_{ij}^{opt}, k_{ji}^{opt}) g_{ij}}_{\text{iletim}} + \underbrace{P_{slp}(N_{rnd} T_{rnd} - T_{bsy,i})}_{\text{uyku}} + \underbrace{\sum_{(j,i) \in A} E_{rx,ji}^D(l_{ij}^{opt}, k_{ji}^{opt}) g_{ji}}_{\text{alma}} + \underbrace{N_{rnd} \times E_{DA}}_{\text{veri toplama}} \leq \rho, \quad \forall i \in W \quad (4.38)$$

$$T_{slot} \left\{ \sum_{(i,j) \in A} \lambda_{ij}(l_{ij}^{opt}, k_{ji}^{opt}) g_{ij} + \sum_{(j,i) \in A} \lambda_{ji}(l_{ij}^{opt}, k_{ji}^{opt}) g_{ji} \right. \\ \left. + \sum_{(j,n) \in A} \lambda_{jn}(l_{jn}^{opt}, k_{nj}^{opt}) g_{jn} I_{jn}^i(l_{ij}^{opt}, k_{in}^{opt}) \right\} \leq N_{rnd} \times T_{rnd}, \quad \forall i \in V \quad (4.39)$$

$$I_{jn}^i(l_{ij}^{opt}, k_{in}^{opt}) = \begin{cases} 1, & \text{eğer } P_{rx,ji}^{ant}(l_{ij}^{opt}) \geq P_{sns} \text{ veya } P_{rx,ni}^{ant}(k_{in}^{opt}) \geq P_{sns} \\ 0, & \text{diğer türlü} \end{cases} \quad (4.40)$$

$$g_{ij} \geq 0, \quad \forall (i, j) \in A \quad (4.41)$$

Şekil 4.4: LPLD modeli

GPLD stratejisinde eniyileme probleminin karar değişkenleri f_{ij}^{lk} iken LPLD stratejisinde karar değişkenleri g_{ij} olarak tanımlanmıştır. Bu yüzden LPLD stratejisinin hesaplama karmaşıklığı GPLD'ye göre daha düşüktür. LPLD stratejisi için her linkte

kullanılan en iyi $\{l_{ij}^{opt}, k_{ji}^{opt}\}$ değerleri belirlendikten sonra GPLD stratejisini oluşturan matematiksel programlama modeli LPLD modeli içinde kullanılabilir. Bunun için (l, k) değişkenleri yerine öncelikle $\{l_{ij}^{opt}, k_{ji}^{opt}\}$ değerleri kullanılır. Daha sonra Bölüm 4.4.1'de tanımlanan kısıtlarda $\sum_{l \in S_L}$ ve $\sum_{k \in S_L}$ toplamları silinerek model çözdürülür. Şekil 4.4'te LPLD modelinin formülatasyonu sunulmuştur.

4.4.3 Eş güç seviye atamalı yerel güç seviye karar stratejisi

LPLD stratejisinde veri ve ACK paketleri için optimal güç seviyeleri link bazında (yerel) seçilirken her linkte veri ve ACK paketlerinin güç seviyelerinin aynı olması gibi bir zorunluluk bulunmamaktadır. Alternatif bir yöntem olarak her linkte veri ve ACK paketleri için aynı güç seviyesinin kullanılması mümkündür. Ayrıca veri ve ACK paketleri için farklı güç seviyeleri atanması her zaman en iyi ağ yaşam süresi değerini vermeyebilir. Bu yüzden Eş Güç Seviye Atamalı Yerel Güç Seviye Karar (İng. Local Power Level Decisions with Equal Power Level Assignment – LPLD-EPL) stratejisinde her (i, j) linki üzerinde veri ve ACK paketleri için en iyi tek bir güç seviyesi (m_{ij}^{opt}) kullanılmakta olup aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$m_{ij}^{opt} = k_{ji}^{opt} = l_{ij}^{opt}, \forall (i, j) \in A \quad (4.42)$$

m_{ij}^{opt} değeri aşağıdaki denklemdeki gibi hesaplanmaktadır.

$$m_{ij}^{opt} = \operatorname{argmin}_{l \in S_L} \left(E_{tx,ij}^D(l, l) + E_{rx,ji}^D(l, l) \right) \quad (4.43)$$

LPLD-EPL stratejisinin matematiksel programlama modeli LPLD stratejisi için kullanılan model ile aynıdır (bkz. Şekil 4.4). Aradaki tek fark LPLD-EPL stratejisinde $\{l_{ij}^{opt}, k_{ji}^{opt}\}$ güç seviyeleri yerine m_{ij}^{opt} güç seviyesinin kullanılmasıdır.

4.4.4 En yüksek ACK güç seviye atamalı yerel güç seviye karar stratejisi

ACK paketlerinin kablosuz kanalda iletilirken başarısız olması tokalaşma işleminin yeniden başlatılmasına neden olmaktadır. Bu durumu önlemek için ACK paketlerinin en yüksek iletim güç seviyesi ile iletilmesi makul bir yaklaşımdır. Böyle bir durumda her linkte sadece veri paketi iletimi için optimal güç seviye atamasının yapılması yeterlidir. En Yüksek ACK Güç Seviye Atamalı Yerel Güç Seviye Karar (İng. Local Power Level Decisions with Maximum ACK Power Level Assignment – LPLD-MAPL) stratejisinde veri paketleri iletimi için her linkte optimal güç seviyesi (n_{ij}^{opt}) belirlenirken ACK paketleri için en yüksek iletim güç seviyesi ($l_{mak} = 26$) kullanılmaktadır. Link bazındaki bu eniyileme problemi aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$n_{ij}^{opt} = \operatorname{argmin}_{l \in S_L} \left(E_{tx,ij}^D(l, l_{mak}) + E_{rx,ji}^D(l, l_{mak}) \right) \quad (4.44)$$

LPLD stratejisi ile LPLD-MAPL stratejisi arasındaki temel fark l_{ij}^{opt} yerine n_{ij}^{opt} kullanılması olup $k_{ji}^{opt} = l_{mak}$ eşitliğinin sağlanmasıdır.

4.4.5 En yüksek güç seviye atamalı yerel güç seviye karar stratejisi

Veri ve ACK paketlerinin iletim güç seviyelerinin arttırılması tokalaşmanın başarısız olma olasılığını düşürmektedir. Bu yüzden eğer en yüksek güç seviyesi hem veri paketi iletimi hem de ACK paketi iletimi için kullanılrsa yeniden iletimler için harcanan enerji miktarı en aza indirilir. Ancak bu yaklaşım hem veri hem de ACK paketlerinin iletilmesi için harcanan enerji masrafını da artırmaktadır. Ağ yaşam süresini eniyilemek adına yeniden iletimlerin minimize edilmesi ve iletim gücünün artırılması ödünlendirmesinin (İng. trade-off) incelenmesi için bu stratejinin kurulması büyük önem arz etmektedir. En Yüksek Güç Seviye Atamalı Yerel Güç Seviye Karar (İng. Local Power Level Decisions with Maximum Power Level Assignment – LPLD-MPL) stratejisinde hem veri paketleri hem de ACK paketleri için en yüksek iletim güç seviyesi kullanılmıştır.

LPLD-MPL stratejisi LPLD-EPL stratejisi ile aynı matematiksel programlama modeline sahip olup aradaki tek fark iletim güç seviyelerinin en yüksek olmasıdır. Matematiksel olarak bu model aşağıda ifade edilmiştir.

$$m_{ij}^{opt} = l_{mak} = 26, \forall (i, j) \in A \quad (4.45)$$

4.4.6 Kayıpsız geri beslemeli yerel güç seviye karar stratejisi

Kayıpsız Geri Beslemeli Yerel Güç Seviye Karar (İng. Local Power Level Decisions with Perfect Feedback – LPLD-PF) stratejisinde ACK paketlerinin başarısız olma olasılığı sıfıra eşitlenmiştir ($p_{ji}^f(k, M_A) = 0$). Böylece tokalaşmanın başarılı olması sadece veri paketlerinin başarılı şekilde gönderildiği durumda gerçekleşmektedir. LPLD-EPL stratejisi için kurulan matematiksel programlama modeli LPLD-PF stratejisinin temelini oluşturmaktır olup veri ve ACK paketleri için aynı en iyi güç seviyesi (m_{ij}^{opt}) kullanılmaktadır. Her ne kadar ACK paketleri başarılı bir şekilde gönderilip alınsa da 20 bayt boyutundaki ACK paketlerinin iletimi için gereken enerji harcaması modele dâhil edilmiştir.

4.4.7 Kayıpsız geri beslemeli ve sıfır ACK uzunluklu yerel güç seviye karar stratejisi

Kayıpsız Geri Beslemeli ve Sıfır ACK Uzunluklu Yerel Güç Seviye Karar (İng. Local Power Level Decisions with Perfect Feedback and Zero ACK Length – LPLD-PFZA) stratejisinde ACK paketlerinin iletimi ve alınması tamamen ihmâl edilmiştir. LPLD-PF stratejisinden farklı olarak bu stratejide ACK paketinin uzunluğu sıfır olarak alınmıştır ($M_A = 0$ bayt). Matematiksel olarak sıfır uzunluklu ACK paketleri ($M_A = 0$ bayt) hipotetik kayıpsız bir kanalda ($p_{ji}^s(k, M_A) = 1$) iletilemektedir. Bu stratejideki yaklaşımda her şeyi bilen bir izleyici tarafından veri paketlerinin başarılı ilettilip iletilemediği gözlenmeyecektir olup paket hataları düşümler tarafından bu izleyiciye bildirilmektedir. Bu yaklaşım kablosuz haberleşme ve ağ araştırmalarında sıkça kullanılan bir varsayımdır.

Çizelge 4.2: Stratejiler, açıklamaları ve esin kaynağı olunan çalışmalar.

Strateji	Açıklama	Esin kaynağı
GPLD	Her linkte güç seviyeleri ile iletilen veri miktarı global olarak birlikte seçilmektedir.	–
LPLD	Güç seviyeleri yerel şekilde belirlenmektedir.	–
LPLD-EPL	Her linkte veri ve ACK paketleri için aynı güç seviyesi kullanılmaktadır.	[32, 40, 41]
LPLD-MAPL	Sadece veri paket iletim güçleri yerel şekilde eniyilenirken ACK paketleri en yüksek güç seviyesi ile iletilmektedir.	[39]
LPLD-MPL	Ağdaki tüm linklerde veri ve ACK paketleri en yüksek güç seviyesi ile iletilmektedir.	[42, 150]
LPLD-PF	ACK paketlerinin hatasız bir şekilde iletildiği varsayılmıştır.	[151]
LPLD-PFZA	ACK paketleri 0 uzunluklu olup ACK paketlerinin hatasız bir şekilde iletildiği varsayılmıştır.	[23, 25, 48, 60–64, 152–157]
GPLD-SPLA	Veri ve ACK paketleri için en yüksek ağ yaşam süresini veren güç seviyesi tek bir güç seviyesi olarak ağ seviyesinde kullanılmaktadır.	[37, 38]

4.4.8 Tek güç atamalı global güç seviye karar stratejisi

Tek Güç Atamalı Global Güç Seviye Karar (İng. Global Power Level Decisions with Single Power Level Assignment – GPLD-SPLA) stratejisinde ağdaki tüm linkler üzerinde veri paketleri için kullanılan tek bir güç seviyesi l_{ij}^{opt} iken ACK paketleri için de tek bir güç seviyesi k_{ji}^{opt} şeklinde kullanılmaktadır. LPLD stratejisi kullanılarak öncelikle olası tüm (l, k) kombinasyonları için LPLD modeli çözürlükmekte, en yüksek ağ yaşam süresi değerini sağlayan $(l, k) = \{l_{ij}^{opt}, k_{ji}^{opt}\}$ çifti ağ seviyesinde iletim güç seviyeleri olarak kullanılmaktadır.

4.5 Stratejilerin Değerlendirilmesi

Bu tez çalışmasında GPLD ve LPLD stratejileri dışında kalan diğer tüm stratejiler KAA literatüründe sıkça kullanılan belli başlı iletim güç kontrol yaklaşımlarından esinlenerek tasarlanmıştır. Aslında KAA araştırmalarında tasarılanan bu iletim güç kontrol yaklaşımına atıfta bulunarak çeşitli iletim güç kontrol stratejilerinin daha farklı bir açıdan sunulması bu bölümde motive edilmiştir. Bu tez çalışmasının en büyük katkısı KAA çalışmalarında kullanılan iletim güç kontrol yaklaşımının ağ yaşam süresi bakımından karşılaştırmasını bir MP çatısı altında birleştirmesidir. Kurulan her bir MP tabanlı strateji literatürde yer alan bu yaklaşımın avantaj ve dezavantajlarını optimal durumlar için sergilemektedir. Ayrıca sunulan her bir strateji link seviyesinde tokalaşma sırasında iletim güç eniyilemesi hipotezinin testi için tasarlanmıştır. Bölüm 1.2'de sunulan araştırma soruları bu bölümde üretilen stratejiler yardımı ile bir sonraki bölümde cevaplandırılmıştır.

GPLD stratejisi bu çalışma kapsamında sunulan en genel strateji olup her linkte veri ve ACK paket iletim güç seviyelerinin ve buna bağlı aktarılan veri miktarının tüm olası kombinasyonlarını dikkate alarak ağ yaşam süresinin maksimize edilmesi üzerine kurulmuş bir modeldir. Bu tez çalışmasında üretilen tüm stratejilerin performansı GPLD stratejisi ile karşılaştırıldığı için GPLD stratejisi bu çalışmanın altın standarı olarak kabul edilmektedir. GPLD ve GPLD-SPLA stratejileri haricinde kalan diğer tüm stratejiler link seviye stratejileri kategorisine girmekte, her linkte veri ve ACK paket iletim güç seviyeleri o linkte iletim ve alma enerjilerinin toplamının minimize edilmesine dayanmaktadır. Bu mantıkla üretilen tüm link seviye stratejileri ile (LPLD-PF ve LPLD-PFZA stratejileri dışında) elde edilen ağ yaşam süre değerleri GPLD stratejisi ile elde edilen yaşam süresi değerinden problemin doğası gereği daha düşüktür.

LPLD stratejisinde iletim güç seviye kararları her linkte enerji tüketiminin minimize edilmesine dayanır. Her linkte veri ve ACK paketlerinin iletim güç seviyeleri mevcut güç seviyelerinin herhangi bir çiftini alır. LPLD-EPL stratejisinde ise veri ve ACK paketleri için ortak bir iletim güç seviyesi kullanılmaktadır. LPLD-EPL stratejisi link seviyesinde iletim güç kontrolü için bir ideal bir soyutlamadır [32, 39–42]. LPLD-MAPL stratejisinde [39]’daki iletim güç kontrolü yaklaşımına benzer şekilde ACK paketleri en yüksek iletim güç seviyesi ile iletilmekte ve veri paketleri için iletim güç seviyeleri her linkte eniyilenmektedir. En yüksek iletim güç kontrolünü kullanan çalışmalar [42, 150] numaralı çalışmalarında sunulan yöntemlere karşı kullanılmaktadır. LPLD-MPL stratejisi ağdaki tüm linklerde veri ve ACK paketleri için en yüksek iletim güç seviyesinin kullanılmasına dayanmaktadır.

Bölüm 2’de bahsedildiği üzere ağ seviye stratejileri [37, 38] iletim güç kontrol stratejileri içerisinde önemli yere sahiptir. Bu yüzden GPLD-SPLA stratejisi ağ seviye stratejilerinin ideal bir soyutlaması olarak kabul edilmektedir. Literatürde ACK paketleri üzerinde ortak bir varsayımdır, ACK paketlerinin başarısız iletiminin enerji harcaması karakterizasyon hatalarına yol açmadan göz ardı edilebilir olduğudur [152, 153]. Gerçekte literatürdeki çoğu çalışmada kayıpsız geri beslemeli bir kanalın varlığı kabul edilmiştir [151, 154–157]. Her ne kadar bir KAA’da ACK paket hataları nedeniyle link seviyesinde tokalaşmanın başarısız olmasının enerji maliyeti açısından önemsiz olduğunu belirtmek cazip olsa da, bu konuda herhangi bir bilimsel kanıt ya da böyle bir varsayımlı destekleyecek sistematik bir analizin yapıldığına inanmak güçtür. LPLD-PF ve LPLD-PFZA stratejileri kayıpsız geri besleme kanal varsayımlını geliştiren stratejilerdir. Bu stratejilerde ACK paketlerinin başarılı bir şekilde ilettilme olasılığı 1’dir. ACK paket uzunlukları LPLD-PF için 20 bayt, LPLD-PFZA stratejisi için 0 bayt olarak alınmıştır. Böylece LPLD-PF ve LPLD-PFZA stratejileri ile elde edilen ağ yaşam süreleri diğer link seviye stratejilerinden daha yüksek yaşam sürelerine sahiptir.

Bu çalışmada üretilen çoğu strateji literatürde mevcut iletim güç kontrol yaklaşımından esinlenmesine rağmen daha önce ACK paketleri için de iletim güç seviye atamasının yapılması daha önce ele alınmamış bir konudur (tek istisna [39] numaralı çalışmada ACK paketleri için maksimum güç seviyesinin atanmasıdır). Dolayısıyla bu çalışmada veri paketleri için güç seviye atamasının yanında ACK paketleri için de güç seviye atamasının yapılması ile tipik bir tokalaşma mekanizmasının modellenmesi bu çalışma kapsamında gerçekleştirılmıştır. Çizelge 4.2’de kolaylık sağlanması için önerilen sekiz güç atama stratejisinin yoğunlaştırılmış özeti sunulmuştur.



5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde; veri link katmanı ve eniyileme yöntemlerinin performansları çeşitli senaryolar altında sistematik bir şekilde incelenmiş ve nümerik sonuçlara ilişkin değerlendirmeler paylaşılmıştır. Her ne kadar bu bölümün ilerleyen kısımlarında analizlerin detayları hakkında bilgi verilse de bu bölümün kısa bir özeti aşağıdaki gibi sunulmuştur.

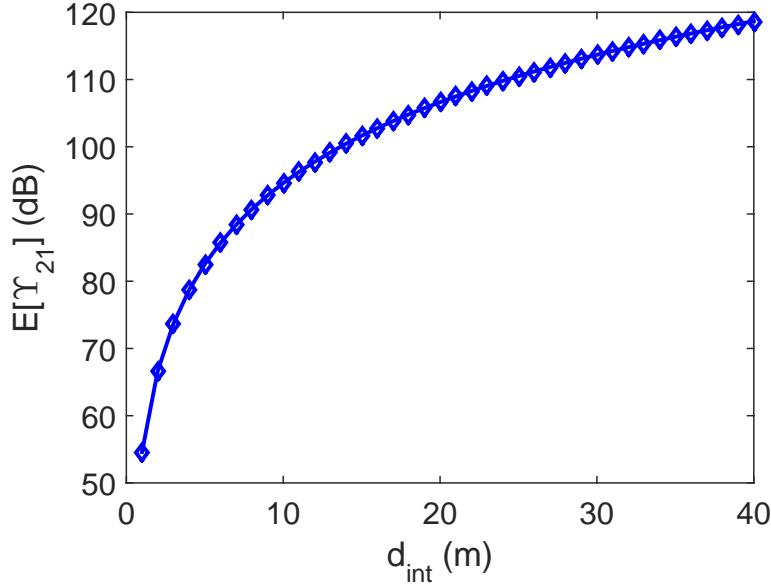
Bölüm 5.1'de veri link katmanında iki düğüm arasında gerçekleşen haberleşmeye ait yol kaybı, alıcı anten güçleri, başarılı tokalaşma olasılıkları, iletim-alma enerji miktarları vb. parametreler ile ilgili MATLAB ortamında basit bir analiz gerçekleştirilmiş ve sonuçlar paylaşılmıştır. Bu temel analizlerin ışığında Bölüm 5.2'de beş tane düğümle oluşturulan bir kare topoloji düşünülmüş, CPLD ve LPLD modelleri GAMS ile çözülmüştür. Eniyileme problemlerinin çözümü sayesinde optimum durumda elde edilen ağ yaşam süresi ve buna bağlı ağıda akan akışlar ile ilgili sonuçlar not edilmiştir. Bu basit örnek yardımı ile kurulan modeller hakkında temel bir fikir elde edildikten sonra Bölüm 5.3'te parametre uzayı daha da genişletilerek rastgele topolojiler üretilmiş ve fazla sayıda düğümün ağa dâhil edilmesi ile sonuçlar irdelenmiştir. Bunun için veri link katmanına ait parametreler MATLAB ile hesaplandıktan sonra GAMS'e giriş değişkenleri olarak verilmiş ve eniyileme problemleri GAMS ortamında çözülmüştür.

5.1 Veri Link Katmanı Analizi

Bu kısımda veri link katmanı hakkında basit bir analiz gerçekleştirilmiş ve bu analize bağlı çeşitli sayısal sonuçlar sunulmuştur. Bu analizin gerçekleştirilmesi adına ağıda iki tane düğüm olduğu varsayılmış ve bu iki düğüm birbirinden d_{int} metre uzaklık ile ayrılmıştır. Bu topolojide düğüm-2, düğüm-1'e 256 bayt veya 64 bayt uzunluklu bir tane veri paketi göndermektedir. Gönderilen veri paketi için $l = 1$, $l = 13$ ve $l = 26$ olmak üzere üç farklı güç seviyesi kullanılmıştır (bkz. Çizelge 4.1). Düğüm-1 ise düğüm-2'den başarılı bir şekilde gelmesi hedeflenen veri paketi için 20 bayt uzunluklu bir ACK paketi göndermektedir.

Alicı taraf ACK paketini, LPLD-EPL stratejisinde belirtilen şekilde, veri paketi ile aynı güç seviyesinde göndermeyi hedeflemektedir ($l = k$). Ancak d_{int} uzaklığına bağlı olarak yol kaybı ve alıcı anten güçleri değiştiği için tokalaşmanın başarılı olma olasılığı da değişmektedir. Bununla birlikte yol kaybındaki gölgeleme etkilerini gösteren değişken (X_σ) rastgele olduğu için bu bölümde 100 farklı denemenin ortalamaları grafiklerde sunulmuştur.

Denklem 4.2'de tanımlanan yol kaybı modeli d_{int} uzaklığına bağlı olarak Şekil 5.1'de çizdirilmiştir. Bu şekilde d_{int} değeri 1 metreden başlatılarak 40 metreye kadar artırılmıştır. d_{int} değerinin artması ile ortalama yol kaybı değerinin ($E[\Upsilon_{21}]$) arttığı gözlenmiştir.

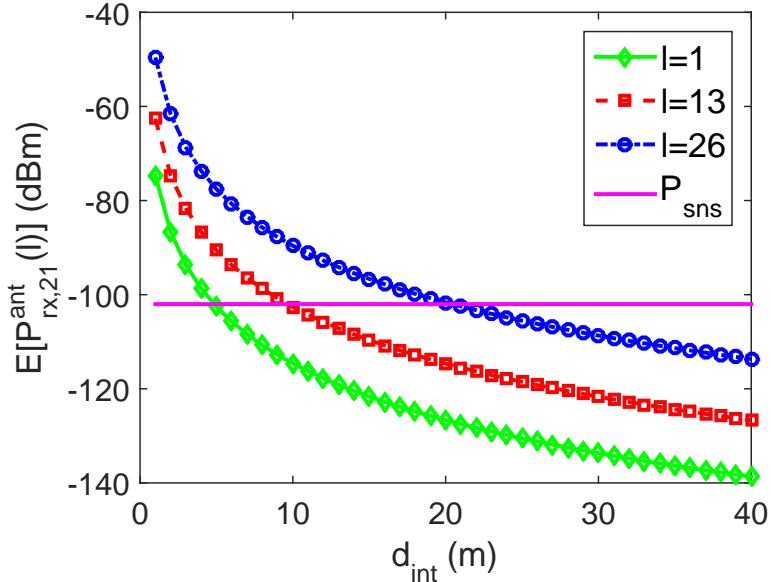


Şekil 5.1: Kablosuz kanal modeli için düğümler arası mesafeye (d_{int}) göre ortalama yol kaybı ($E[Y_{21}]$)

Örneğin, $d_{int} = 1$ metre için $E[Y_{21}] = 54.60$ dB iken $d_{int} = 40$ metre için $E[Y_{21}] = 118.68$ dB'dir.

İletim güç seviyesinin artması ile alıcı anten gücünün arttığı gözlenmiştir. Örneğin, $d_{int} = 1$ metre ve $l = 1$ için $E[P_{rx,21}^{ant}(l=1)] = -74.60$ dBm iken $l = 26$ için bu değer -49.60 dBm olarak ölçülmüştür. Fakat belirtilen üç farklı iletişim güç seviyesi için düğüm-1'deki alıcı anten gücünün ($E[P_{rx,21}^{ant}(l)]$) uzaklığın artması ile azaldığı Şekil 5.2'de görülmektedir. Örneğin, $d_{int} = 40$ metre için $E[P_{rx,21}^{ant}(l=1)] = -138.68$ dBm iken $l = 26$ için bu değer -113.68 dBm olarak kaydedilmiştir. Bu şekilde mor çizgi ile gösterilen değer Mica2 düğümleri için tanımlanan alıcı hassasiyetini ($P_{sns} = -102$ dBm) [39] temsil etmektedir. Eğer alıcı anten gücü bu alıcı hassasiyeti değerinden daha küçük olursa (yani $P_{rx,21}^{ant}(l) < P_{sns}$ ve $P_{rx,12}^{ant}(k) < P_{sns}$ olması durumunda) paket alımı yapılamamaktadır. Bu da tokalaşmanın başarısız olduğunu göstermektedir. İşlem kolaylığı adına bu durum; $p_{21}^{HS,s}(l,k) = 10^{-6}$ olarak modellenmiştir.

Şekil 5.3'te 256 bayt ve 64 bayt veri paketleri için ortalama başarılı tokalaşma olasılık değerleri ($E[p_{21}^{HS,s}(l,k)]$), üç farklı güç seviyesi ve d_{int} uzaklığına göre sunulmuştur. Denklem 4.11'de tanımlandığı üzere başarılı tokalaşma olasılığı iletim güç seviyele-rine bağlı olduğu için, üç farklı *geçiş bölgesi* gözlenmiştir. Bu şekilde görüleceği üzere geçiş bölgelerinin aralığını paket boyutundan ziyâde, yol kaybı modelindeki X_σ ve n değerleri belirlemektedir. Örneğin, $l = 1$ için geçiş bölgesi 3–15 metre aralığında gözlenmiştir. Bu aralıkta $E[p_{21}^{HS,s}(l=1,k=1)]$ değeri birden daha küçük olup uzaklığın artması ile sıfıra yaklaşmaktadır. Benzer bir şekilde, $l = 13$ için geçiş bölgesi 6–29 metre olarak ölçülmüştür. Son olarak, $l = 26$ iken geçiş bölgesi daha uzak ve geniş bir aralık olan 13–40 metre aralığında tespit edilmiştir. Geçiş bölgesinde linkin kalitesi güvenilir olmadığı için tasarımlar gerçekleştirilirken bu bölgeden mümkün mertebe kaçınmak gerekmektedir.

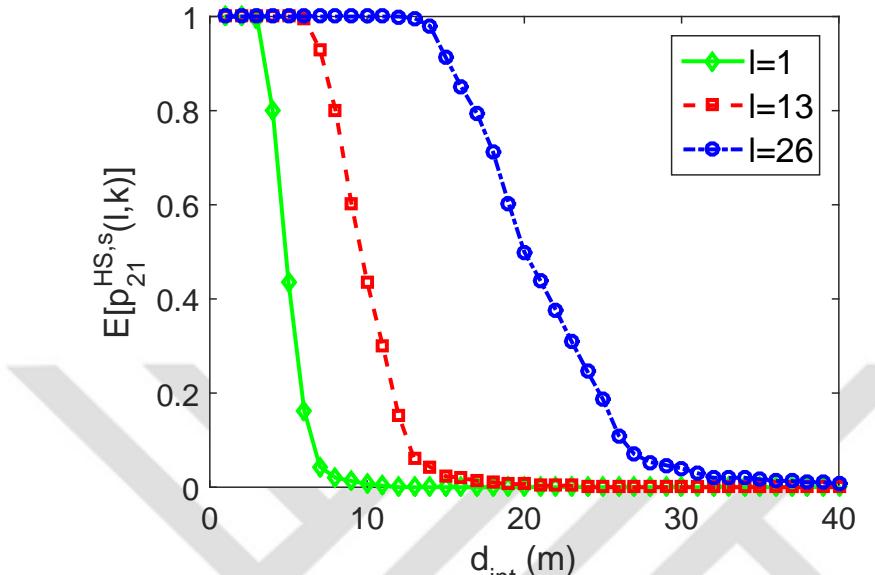


Şekil 5.2: Kablosuz kanal modeli için düğümler arası mesafeye (d_{int}) göre ortalama alıcı anten gücü ($E[P_{rx,21}^{ant}(l)]$)

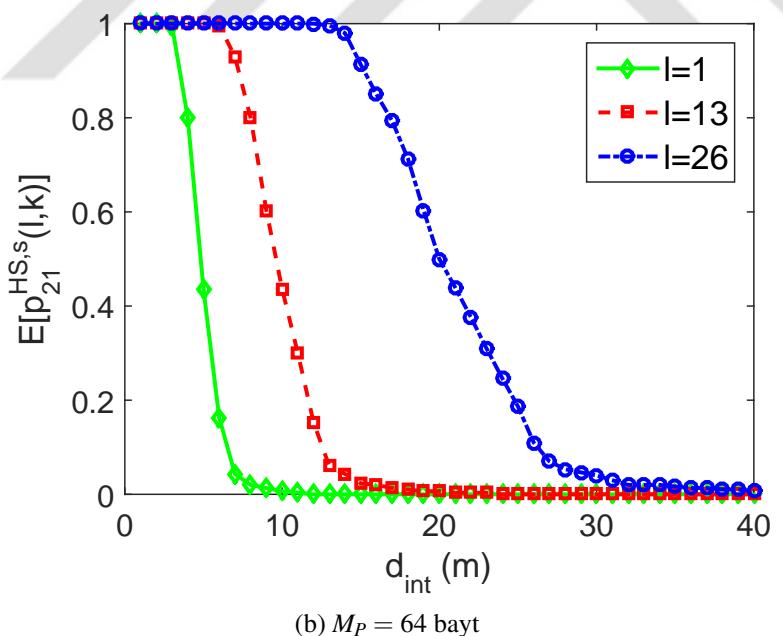
Bu kısımda incelenmiş başka bir önemli konu ise kötü kanal koşullarından dolayı oluşan yeniden iletim oranı üzerinedir. Bu kapsamda Şekil 5.4’te 256 ve 64 bayt veri paket boyutları için sonsuz yeniden iletim varsayılmıştır ($N_{rtr} \rightarrow \infty$). Bu varsayımda düğümler arası mesafeye (d_{int}) göre ortalama yeniden iletim oranı ($E[\lambda_{21}(l, k)]$) değerleri çizdirilmiştir. Uzaklılığın artmasıyla tokalaşmanın başarılı olma olasılığı sıfıra yaklaştığı için yeniden iletim oranı bir milyon kat artmıştır. Örneğin, Şekil 5.4a’da $l = 26$ için geçiş bölgesi daha önce bahsedildiği üzere 13 metreden itibaren başmaktadır. Bu uzaklığı kadar $E[p_{21}^{HS,s}(l = 26, k = 26)]$ değeri 1 olduğu için Denklem 4.14’e göre $E[\lambda_{21}(l = 26, k = 26)] = 1$ değerini alarak kanal koşullarının iyi olduğu ve paketlerin başarılı bir şekilde alıcı taraflara iletildiği yorumuna varılabilir. Böylece herhangi bir şekilde yeniden iletim yapılmasına gerek kalmamıştır. Ancak $d_{int} = 40$ için $E[p_{21}^{HS,s}(l = 26, k = 26)] = 10^{-6}$

olarak ölçülmüş böylece bir veri paketinin başarılı bir şekilde iletilebilmesi için 10^6 kere yeniden iletim yapılması gerekmektedir. Diğer taraftan sınırlı yeniden iletim yapıldığı zaman (yani $N_{rtr} = 3$ durumunda – Denklem 4.13), Şekil 5.5’té belirtildiği gibi uzaklılığın artmasıyla yeniden iletim oranı paket boyutundan bağımsız olmak üzere en fazla 4 olmaktadır.

Son olarak Şekil 5.4’te ve Şekil 5.5’té elde edilen sonuçlar neticesinde paket boyutunun yeniden iletim oranını ciddi ölçüde değiştirmemiş gözlenmiştir. Şekil 5.6’da ve Şekil 5.7’de $N_{rtr} \rightarrow \infty$ varsayıımı altında iletim ve alma enerjilerinin ortalama değerleri 256 bayt ve 64 bayt paket uzunlukları için sunulmuştur. Bu değerler Denklem 4.17 ve 4.26 kullanılarak her bir d_{int} uzaklığına göre hesaplanmıştır. Tüm şekillerde belirli bir d_{int} uzaklığına kadar enerji tüketiminin oldukça düşük olduğu gözlenmiştir. Aslında bu kritik uzaklık Şekil 5.3’té bahsedilen geçiş bölgelerinin başlangıç noktalarıdır. Örneğin, 256 bayt uzunluklu veri paketi düşünüldüğünde $l = 26$ güç seviyesi için kritik nokta Şekil 5.3a’da $d_{int} = 13$ metre olarak belirlenmiştir. Bu uzaklıkta $E[p_{21}^{HS,s}(l = 26, k = 26)] = 0.99$ olup ortalamada her bir paket $1/0.99 = 1.03$ kez daha

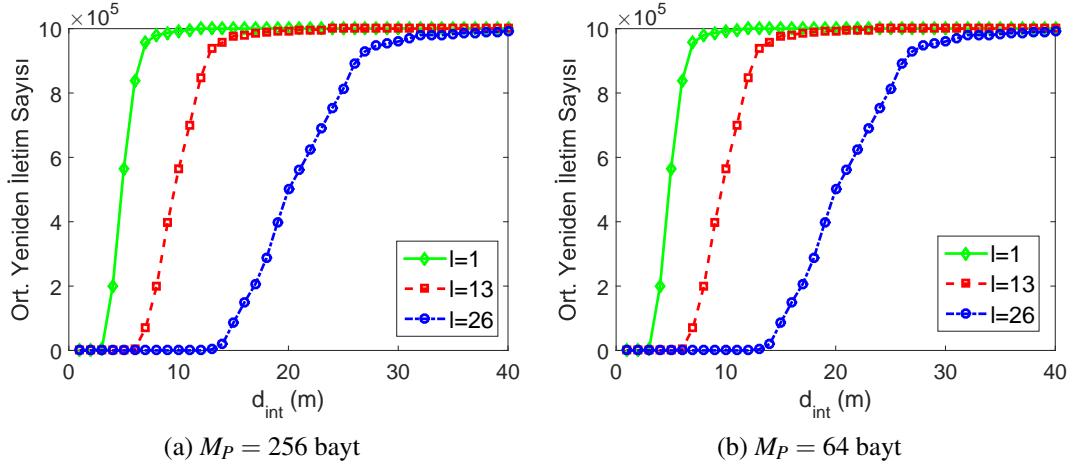


(a) $M_P = 256$ bayt

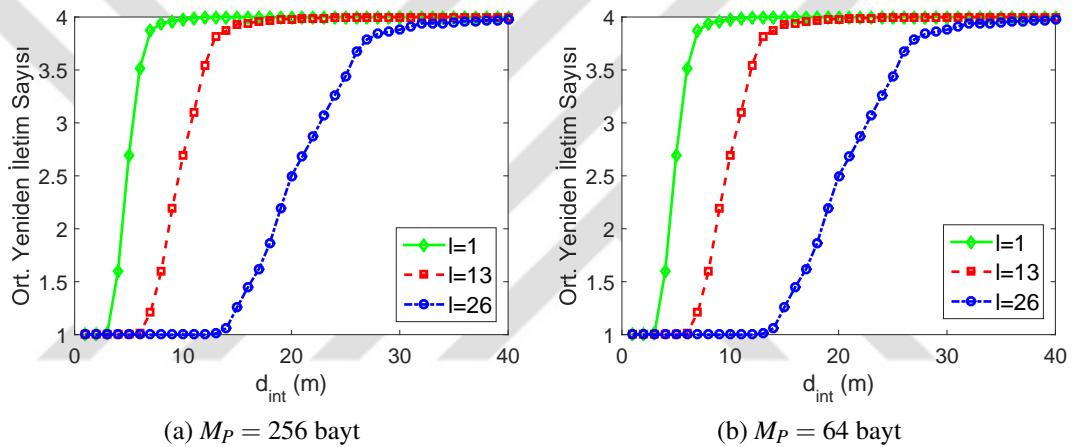


(b) $M_P = 64$ bayt

Şekil 5.3: $M_P = 256$ ve 64 bayt için düğümler arası mesafeye (d_{int}) göre ortalama başarılı tokalaşma olasılığı ($E[p_{21}^{HS,s}(l,k)]$)

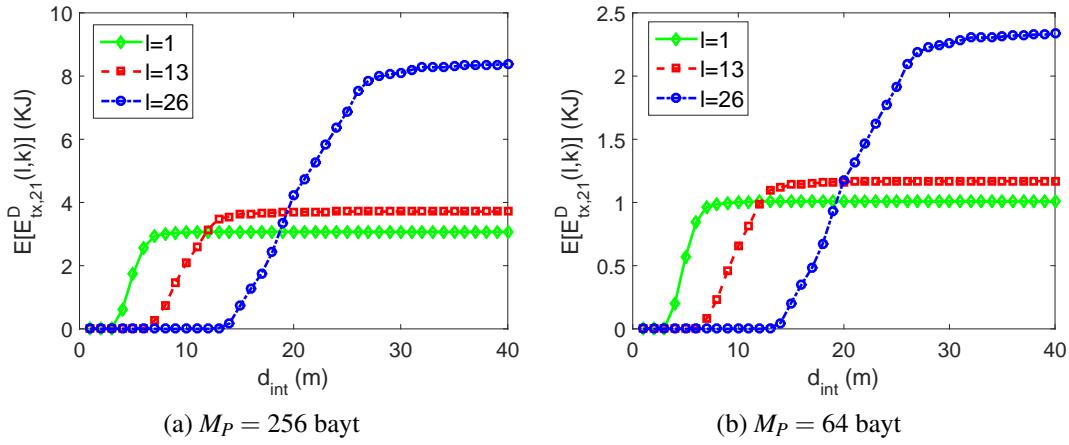


Şekil 5.4: $M_P = 256$ ve 64 bayt için $N_{rtr} \rightarrow \infty$ durumunda düğümler arası mesafeye (d_{int}) göre ortalama yeniden iletim oranı ($E[\lambda_{21}(l, k)]$)

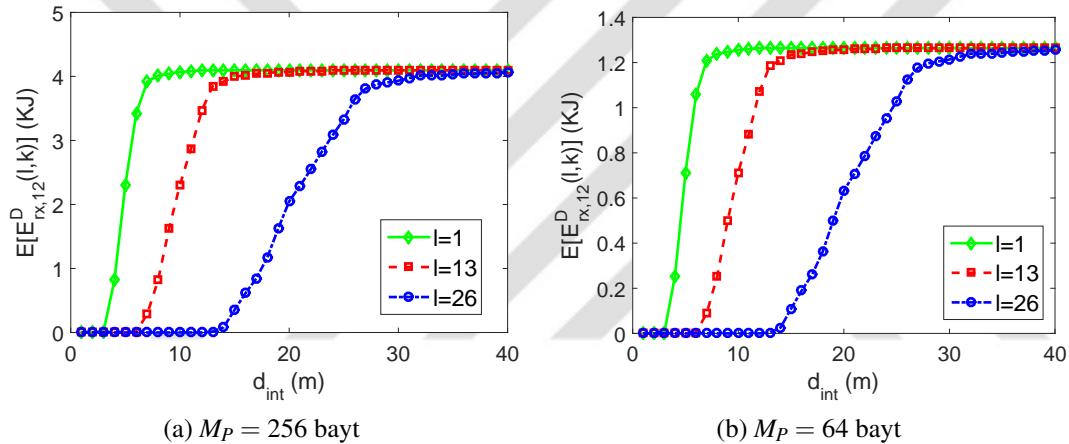


Şekil 5.5: $M_P = 256$ ve 64 bayt için $N_{rtr} = 3$ durumunda düğümler arası mesafeye (d_{int}) göre ortalama yeniden iletim oranı ($E[\lambda_{21}(l, k)]$)

fazla gönderilmektedir. Böylece bu durumda geçiş bölgesinin hemen girişinde haberleşmenin yapıldığı sonucuna varılabilir. $d_{int} = 13$ metre olduğu durumda iletim için harcanan enerji $E[E_{tx,21}^D(l = 26, k = 26)] = 28.17$ J olarak ölçülürken veri alma için harcanan enerji $E[E_{rx,21}^D(l = 26, k = 26)] = 13.66$ J olarak hesaplanmıştır. Aynı paket uzunluğu ve güç seviyesi için $d_{int} \leq 13$ metre olduğu durumda en yüksek alma ve iletme enerjileri sırasıyla 4.56 mJ ve 8.57 mJ olarak hesaplanmıştır. Benzer sonuçlar diğer güç seviyeleri ($l = 1$ ve $l = 13$) için de gözlenmiştir. Düğümler arası uzaklığın yaklaşık 40 metre olduğu durumda (yani geçiş bölgesinin sonunda) harcanan maksimum iletim enerjisi 8.39 KJ ($l = 26$ ve $M_P = 264$ bayt için) iken alma için harcanan maksimum enerji 4.07 KJ olarak ölçülmüştür. $M_P = 64$ bayt için alma ve iletim enerjilerinin maksimum değerleri sırasıyla 2.34 KJ ve 1.26 KJ olarak gözlenmiştir. Diğer taraftan Şekil 5.8'de ve Şekil 5.9'da $N_{rtr} = 3$ varsayılarak iletim ve alma enerji hesabı yapılmıştır. Sınırlı yeniden iletim sayesinde geçiş bölgesinin sonunda ($d_{int} = 40$ metre) iletim yapılan bir veri paketi için harcanan maksimum iletim enerjisi 33.74 mJ ($l = 26$ ve $M_P = 264$ bayt için) iken alma için harcanan maksimum enerji 20.83 mJ



Şekil 5.6: $M_P = 256$ ve 64 bayt için $N_{rtr} \rightarrow \infty$ durumunda düğümler arası mesafeye (d_{int}) göre yeniden iletimlerin dâhil edildiği ortalama iletim enerji miktarı ($E[E_{tx,21}^D(l,k)]$)

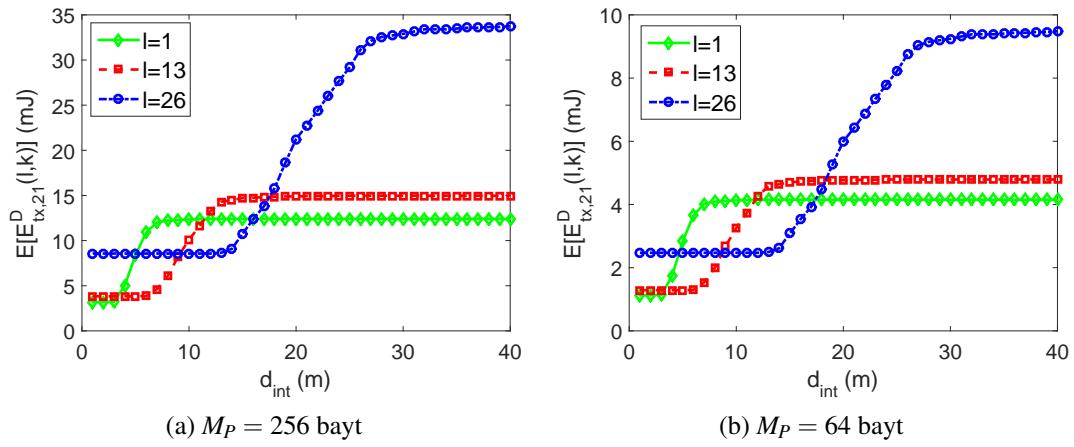


Şekil 5.7: $M_P = 256$ ve 64 bayt için $N_{rtr} \rightarrow \infty$ durumunda düğümler arası mesafeye (d_{int}) göre yeniden iletimlerin dâhil edildiği ortalama alma enerji miktarı ($E[E_{rx,12}^D(l,k)]$)

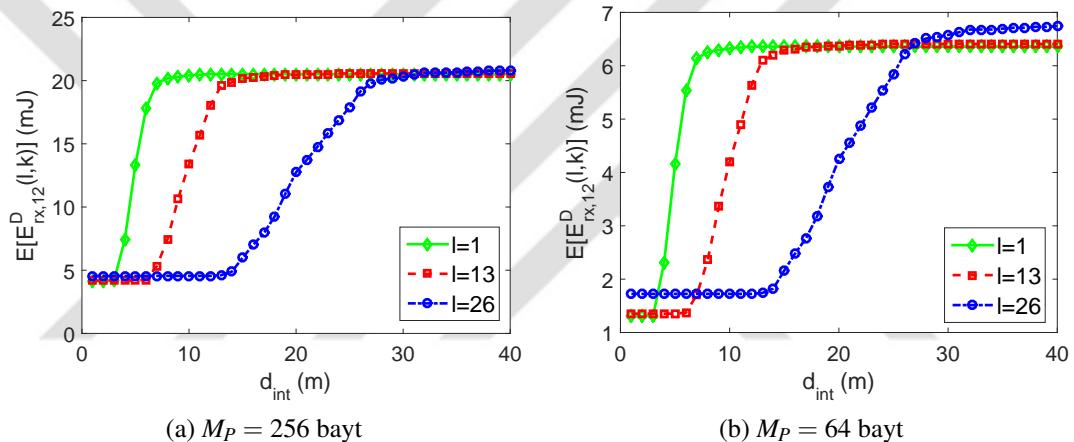
olarak ölçülmüştür. $M_P = 64$ bayt için alma ve iletim enerjilerinin maksimum değerleri sırasıyla 6.75 mJ ve 9.48 mJ olarak kaydedilmiştir.

5.2 Matematiksel Programlama Model Analizi: Basit Örnek

Bu kısımda veri link katmanı için elde edilen sonuçlardan faydalananlarak Bölüm 4.4'te tanımlanan LPLD ve GPLD stratejilerinin basit bir topoloji üzerinde GAMS ortamında çözürtlmesi gerçekleştirılmıştır. Bir önceki kısımdan farklı olarak bu analizde dört algılayıcı düğüm (düğüm-2, 3, 4 ve 5) ve bir tane baz istasyonundan (düğüm-1) oluşan kare şeklinde bir topoloji ele alınmıştır. Algılayıcı düğümler bir kenarı 10 metre olan bu kare içine düzgün dağılım ile rastgele bırakılmıştır. Her algılayıcı düğüm her turda bir tane 256 baytlık veri paketi üretmektedir. Şekil 5.10'da bu kısımda kullanılan topoloji görülmektedir. Verilen bu topoloji için yol kayıp değerleri Çizelge 5.1'de sunulmuştur.



Şekil 5.8: $M_P = 256$ ve 64 bayt için $N_{rtr} = 3$ durumunda düğümler arası mesafeye (d_{int}) göre yeniden iletimlerin dâhil edildiği ortalama iletim enerji miktarı ($E[E_{tx,21}^D(l,k)]$)

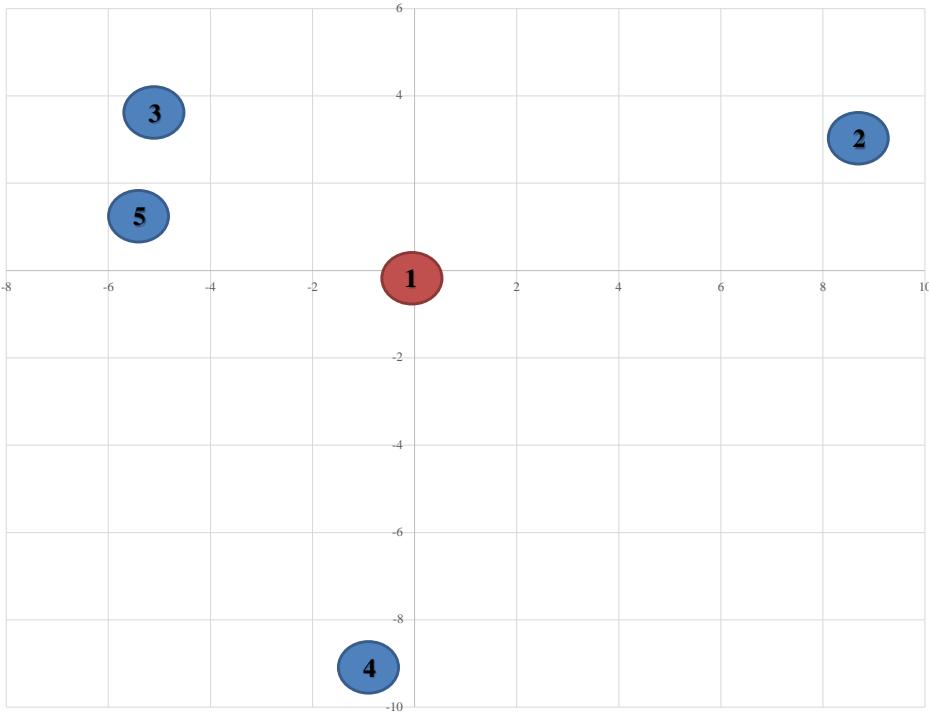


Şekil 5.9: $M_P = 256$ ve 64 bayt için $N_{rtr} = 3$ durumunda düğümler arası mesafeye (d_{int}) göre yeniden iletimlerin dâhil edildiği ortalama alma enerji miktarı ($E[E_{rx,12}^D(l,k)]$)

Çizelge 5.1: Basit örnek için kurulan topolojide yol kayıp değerleri (γ_{ij} [dB]).

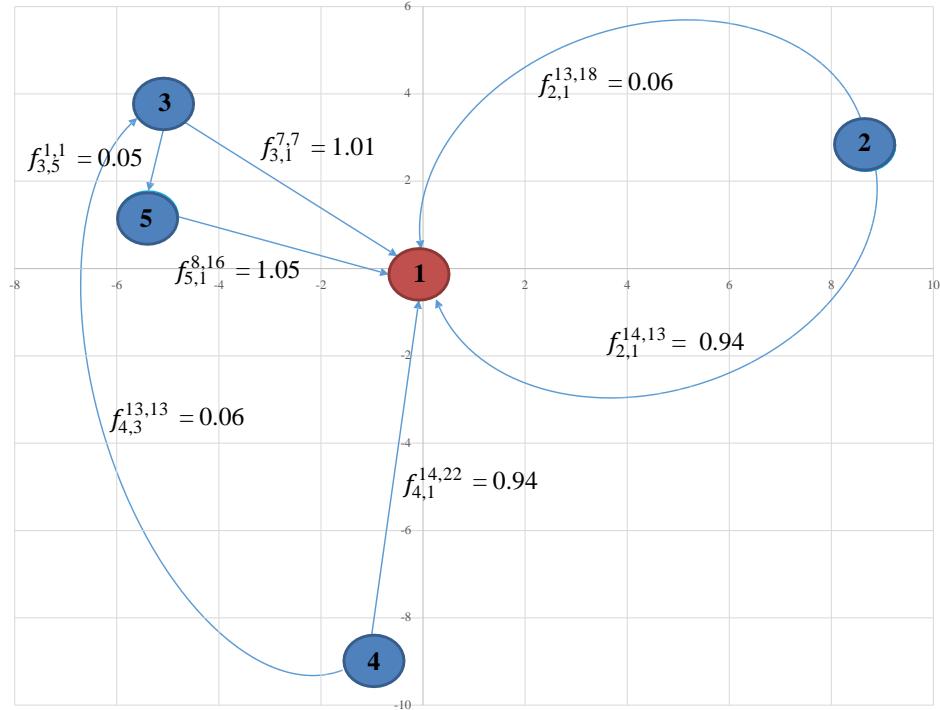
Υ_{ij} [dB]	1	2	3	4	5
1	-	93.23	87.74	94.33	88.29
2	93.23	-	97.60	107.69	102.62
3	87.74	97.60	-	93.59	66.70
4	94.33	107.69	93.59	-	95.20
5	88.29	102.62	66.70	95.20	-

Bu topoloji ile kurulan KAA; GPLD ve LPLD modelleri kullanılarak çözülmüştür. Optimal çözümlerin GAMS ortamında elde edilmesi ile ağ yaşam süreleri, bu değeri maksimize eden en iyi rotalar ve bu sonuçların veri link katmanı açısından incelenmesi bu bölüm kapsamında tetkik edilmiştir.



Şekil 5.10: Basit örnek için oluşturulmuş kare topoloji

Bu örnek topoloji GPLD modeli ile çözülmüş ve Şekil 5.11'de ağdaki optimal akışlar sunulmuştur. Kolaylık açısından $N_{rtr} \rightarrow \infty$ ve dolayısıyla $\theta_{ij}(l, k) \rightarrow 1$ (bkz. Denklem 4.30) kabul edilmiştir. GPLD stratejisi ile elde edilen ağ yaşam süresi $N_{rnd} = 5351804$ tur olarak bulunmuştur. Saniye cinsinden ağ yaşam süresi ise $N_{rnd} \times T_{rnd} = 5351804 \times 60 = 321108240$ olarak hesaplanmıştır. Bu da KAA'nın yaklaşık 10 yıl boyunca çalışacağını göstermektedir. Ağdaki en iyi akışların incelenmesi adına birim tur için rotalama Şekil 5.11'de gösterilmiştir. Birim turda akan veri miktarının hesaplanması için bir link üzerinde ağ yaşam süresi boyunca akan veri miktarı tur sayısına (N_{rnd}) bölünmüştür. Örneğin, düğüm-4 birim turda bir tane veri paketi üretmekte ($s_4 = 1$) ve ürettiği bu verinin %94'ünü direkt olarak baz istasyonuna 14. güç seviyesi ile iletmektedir ($l = 14$). Baz istasyonu bu veriyi aldığı zaman 22. güç seviyesi ile düğüm-4'e ACK paketi yollamaktadır ($k = 22$). Baz istasyonu tarafında $l = 14$ ve $k = 22$ için alıcı anten güçleri sırasıyla, $P_{rx,41}^{ant}(l = 14) = -101.33$ dBm ve $P_{rx,41}^{ant}(k = 22) = -93.33$ dBm olarak ölçüldüğü için bu veri paketinin alınması mümkünür (yani $P_{rx,ij}^{ant}(l = 14) \geq P_{sns}$ ve $P_{rx,41}^{ant}(k = 22) \geq P_{sns}$ eşitsizlikleri sağlanmaktadır). Diğer taraftan $P_{rx,41}^{ant}(l < 14) < P_{sns}$ gözlendiği için veri paketi en az 14. güç seviyesi ile gönderilmiştir. Bu durumda başarılı tokalaşma olasılığı, $p_{41}^{HS,s}(l = 14, k = 22) = 1$ olarak ölçülmüş ve yeniden iletme gerek kalmadığı sonucuna varılmıştır ($\lambda_{41}(l = 14, k = 22) = 1$). 256 baytlik bu veri paketinin baz istasyonuna iletimi için harcanan enerji $E_{tx,41}^D(l = 14, k = 22) = 3.90$ mJ olarak not edilmiştir. Alıcı tarafta (yani baz istasyonunda) harcanan enerji ise $E_{rx,14}^D(l = 14, k = 22) = 4.35$ mJ'dür. Düğüm-4'ün kalan %6'lık verisi ise düğüm-3'e $l = 1$ ile iletilmiştir, bu durumda düğüm-3 ACK paketi yollamak için yine aynı güç seviyesini tercih etmiştir ($k = 1$). Benzer yorumlar ağdaki diğer akışlar için de geçerli olup veri link katmanı ile ilgili daha detaylı sonuçlar Çizelge 5.2'de sunulmuştur.



Şekil 5.11: GPLD stratejisi için optimal çözüm ve rotalama

GPLD stratejisi daha önceki bölümde belirtildiği üzere her linkte veri ve ACK paket iletim güç seviyelerinin ve iletilen paket miktarlarının tüm olası kombinasyonlarını dikkate alarak ağ yaşam süresinin maksimize edilmesi üzerine kurulmuş bir modeldir. Örneğin, (2, 1) linki üzerinde iki farklı veri iletimi oluşmuştur.

Düğüm-2 birim turda ürettiği bir paketin %94'ünü ($l = 14$, $k = 13$) güç seviye çifti ile baz istasyonuna iletirken kalan %6'lık verisini ($l = 13$, $k = 18$) güç seviye çifti ile iletmektedir. Bu örnek, GPLD modelinde bant genişliği kullanımı (bkz. Kısıt 4.33) hakkında da detaylı bilgi vermektedir. Buna göre düğümlerde (baz istasyonu da dahil olmak üzere) gereken bant genişliği miktarının ($\zeta(i)$) toplam bant genişliği miktarının %0.41–%0.79'u kadar olduğu sonucuna varılmıştır. Bu da çakışma olmadan haberleşme yapıldığını garantilemektedir. Bununla birlikte $T_{bsy,i}$ (bkz. Denklem 4.31), her

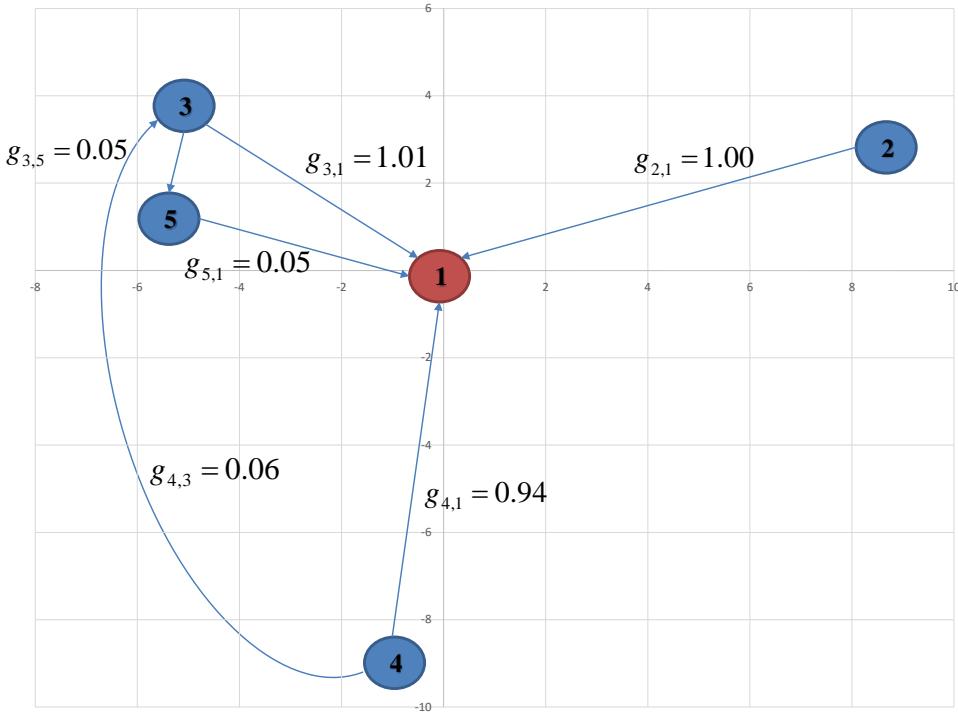
Çizelge 5.2: GPLD model çözümü sonucu ağırlıklara bağlı olarak veri link katmanı ile ilgili parametreler.

f_{ij}^{lk}	$p_{ij}^{HS,s}(l,k)$	$\lambda_{ij}(l,k)$	$E_{tx,ji}^D(l,k)$ [mJ]	$E_{rx,ji}^D(l,k)$ [mJ]	$P_{rx,ij}^{ant}(l)$ [dBm]	$P_{rx,ji}^{ant}(k)$ [dBm]
$f_{3,5}^{1,1}$	1.00	1.00	3.19	4.14	-86.70	-86.70
$f_{3,1}^{7,7}$	1.00	1.00	3.42	4.15	-101.74	-101.74
$f_{5,1}^{8,16}$	1.00	1.00	3.48	4.27	-101.29	-93.29
$f_{4,3}^{13,13}$	1.00	1.00	3.83	4.19	-101.59	-101.59
$f_{2,1}^{13,18}$	1.00	1.00	3.83	4.28	-101.23	-96.23
$f_{2,1}^{14,13}$	1.00	1.00	3.83	4.19	-100.23	-101.23
$f_{2,1}^{14,22}$	1.00	1.00	3.90	4.35	-101.33	-93.33

Çizelge 5.3: GPLD model çözümü sonucu her düğümde kullanılan bant genişliği ($\zeta(i)$), meşgul olma zamanı ($T_{bsy,i}$), birim turda tüketilen enerji miktarı (ρ/N_{rnd}) ve batarya kullanımı.

Düğüm	$\zeta(i) (%)$	$T_{bsy,i} (%)$	ρ/N_{rnd} (mJ)	Batarya Kullanım (%)
1	0.78	-	-	-
2	0.58	0.23	4.61	99
3	0.79	0.25	4.67	100
4	0.41	0.23	4.67	100
5	0.79	0.25	4.67	100

düğümün ağ yaşam süresinin %0.23 ilâ %0.25'i kadar aktif modda çalıştığını göstermektedir. Ağ yaşam süresinin kalan zamanında ise düğümler uykuya geçmiştir. Birim turda harcanan enerji miktarları (ρ/N_{rnd}) ise 4.61–4.67 mJ aralığındadır (bkz. Kısıt 4.32). Kurulan eniyileme modeli tüm düğümlerin batarya enerjilerini aynı anda bitirmeye çalışmıştır. 3, 4 ve 5 numaralı düğümler tüm batarya enerjilerini tüketirken sadece düğüm-2 %1'lik batarya enerjisini (250 J) kullanamamıştır. Yukarıda bahsedilen hususlar Çizelge 5.3'te detaylandırılmıştır. Son olarak bu bölümdeki analizler $N_{ntr} = 3$ için de gerçekleştirilmiş ve birebir aynı sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.12: LPLD stratejisi için optimal çözüm ve rotalama

Şekil 5.11'deki ağ aynı parametre uzayı ile LPLD modeli kullanılarak çözülmüşdür. Bu durumda elde edilen ağ yaşam süresi GPLD ile elde edilen yaşam süresinden 4 tur daha düşüktür. Ağ yaşam süresi $N_{rnd} = 5351800$ tur olarak bulunmuştur. Buna bağlı olarak ağdaki birim tur rotalama Şekil 5.12'de gösterilmiştir. LPLD stratejisinde bilindiği gibi her linkte veri paketi iletimi bir tane optimal güç seviyesi l_{ij}^{opt} olarak

belirlenirken, ACK paketi iletimi için de bir tane optimal k_{ji}^{opt} güç seviyesi kullanılmaktadır. Yani (i, j) linki üzerinde veri paketleri l_{ij}^{opt} güç seviyesi ile iletilirken ACK paketleri k_{ji}^{opt} güç seviyesi ile iletilmektedir. Denklem 4.35'te tanımlanan yerel eniyileme yöntemi ile tüm linklerde tespit edilen optimum güç seviye çiftleri, $\{l_{ij}^{opt}, k_{ji}^{opt}\}$, Çizelge 5.4'te gösterilmiştir.

Örneğin, düğüm-4 birim turda bir tane veri paketi üretmekte ($s_4 = 1$) ve ürettiği bu verinin %94'ünü direkt olarak baz istasyonuna 14. güç seviyesi ile iletmektedir ($l = 14$). Baz istasyonu bu veriyi aldığı zaman yine aynı güç seviyesi ile düğüm-4'e ACK paketi yollamaktadır ($k = 14$). Diğer taraftan, düğüm-4'ün kalan %6'luk verisi (ve bu veriye bağlı ACK paketi) ise düğüm-3'e $\{l_{ij}^{opt}, k_{ji}^{opt}\} = \{13, 13\}$ güç seviye çifti ile iletilmiştir. Benzer yorumlar ağdaki diğer akışlar için de geçerli olup veri link katmanı ile ilgili daha detaylı sonuçlar Çizelge 5.5'te sunulmuştur.

Çizelge 5.4: LPLD modeli için yerel eniyileme sayesinde elde edilen optimum güç çifti.

$\{l_{ij}^{opt}, k_{ji}^{opt}\}$	1	2	3	4	5
1	-	{13,13}	{7,7}	{14,14}	{8,8}
2	{13,13}	-	{17,17}	{26,26}	{22,22}
3	{7,7}	{17,17}	-	{13,13}	{1,1}
4	{14,14}	{26,26}	{13,13}	-	{15,15}
5	{8,8}	{22,22}	{1,1}	{15,15}	-

Çizelge 5.5: LPLD model çözümü sonucu ağdaki akışlara bağlı olarak veri link katmanı ile ilgili parametreler.

g_{ij}	$p_{ij}^{HS,s}$	λ_{ij}	$E_{tx,ij}^D$ [mJ]	$E_{rx,ji}^D$ [mJ]	$P_{rx,ij}^{ant}(l)$ [dBm]	$P_{rx,ji}^{ant}(k)$ [dBm]
$g_{2,1}$	1.00	1.00	3.83	4.19	-101.23	-101.23
$g_{3,1}$	1.00	1.00	3.42	4.15	-101.74	-101.74
$g_{3,5}$	1.00	1.00	3.19	4.14	-86.70	-86.70
$g_{4,1}$	1.00	1.00	3.90	4.19	-101.33	-101.33
$g_{4,3}$	1.00	1.00	3.83	4.19	-101.59	-101.59
$g_{5,1}$	1.00	1.00	3.48	4.16	-100.29	-101.29

Çizelge 5.6: LPLD model çözümü sonucu her düğümde kullanılan bant genişliği ($\zeta(i)$), meşgul olma zamanı ($T_{bsy,i}$), birim turda tüketilen enerji miktarı (ρ/N_{rnd}) ve batarya kullanımı.

Düğüm	$\zeta(i)$ (%)	$T_{bsy,i}$ (%)	ρ/N_{rnd} (mJ)	Batarya Kullanım (%)
1	0.79	-	-	-
2	0.79	0.23	4.61	99
3	0.79	0.25	4.67	100
4	0.79	0.23	4.67	100
5	0.79	0.25	4.67	100

Tüm düğümlerde gereken bant genişliği miktarının ($\zeta(i)$) toplam yaşam süresinin % 0.79'u kadardır. GPLD ile elde edilen sonuçlara benzer şekilde her düğüm ağ yaşam süresinin %0.23–%0.25'i kadar aktif modda çalışmaktadır. Ayrıca, bir turda harcanan enerji miktarları ise 4.61–4.67 mJ aralığındadır. Yukarıda bahsedilen hususlar Çizelge 5.6'da detaylandırılmıştır. Son olarak bu bölümdeki analizler $N_{rtr} = 3$ için de gerçekleştirilmiş ve birebir aynı sonuçlar alınmıştır.

Bu bölümdeki örnekte LPLD modeli ile elde edilen sonuçların GPLD ile elde edilen sonuçlara oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte Çizelge 5.4'te belirtilen optimum güç seviye çiftleri arasında $l_{ij}^{opt} = k_{ji}^{opt}$ ilişkisi tespit edilmiş olup LPLD modelinin LPLD-EPL modeli ile aynı sonuç verdiği açıkça görülmektedir.

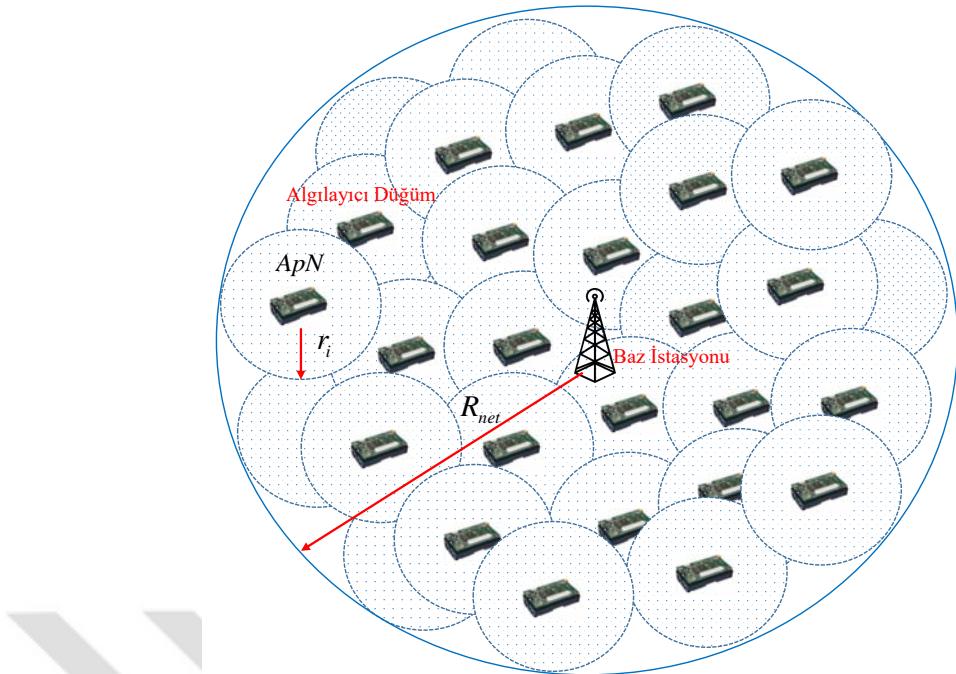
Bölüm 1.2'de sorulan “Veri ve ACK paketlerinin iletim güç seviyelerinin link bazında karar verilmesi durumunda, global duruma göre ağ yaşam süresi kaybı en fazla ne kadar olur?” sorusuna bu bölümde kısmen de olsa cevap verilmiştir. Fakat bir sonraki bölümde yapılan kapsamlı analizler sonucunda GPLD modelinin çözdürme zorluğundan ötürü ağ yaşam süresinden taviz vermeden LPLD modelinin kullanılabileceği daha detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

5.3 İletim Güç Kontrolü Stratejilerinin Analizi

Bir önceki bölümde yapılan basit bir analizin daha da genişletilmesi ve kurulan stratejilerin performansının daha genel topolojiler için yorumlanması bu bölüm çerçevesinde gerçekleştirilmiştir.

Bu kısımda KAA disk şeklinde tanımlanmış olup Şekil 5.13'te rastgele kurulan bir topoloji örneği gösterilmiştir. Bu topolojide R_{net} ağın yarıçapını göstermekte ve algılayıcı düğümler bu disk içine düzgün biçimde rastgele bırakılmıştır. Diskin ortasında yer alan düğüm ise baz istasyonunu göstermektedir. Bir algılayıcı düğümün dairesel kapsama alanı (Ing. Area per Node) ApN olarak ifade edilmiştir. Burada tanımlanan düğüm alan tanımı aslında ağdaki düğüm yoğunluğunu temsil etmektedir [2]. R_{net} , ağdaki düğüm sayısı (N_N) ve ApN arasında $\pi \times R_{net}^2 = N_N \times ApN$ olarak tanımlanan bir ilişki vardır. ApN değeri arttırdığı zaman mesafeler uzamakta ve buna bağlı olarak yol kaybı değerleri artmaktadır. Yani ApN değerleri arttığı zaman ağ seyrekleşmeye başlamaktadır. Ağdaki düğüm sayısı değiştirilerek yüksek link sayısı ile ağ yaşam süresi arasındaki ilişkiyi incelemek bu bölümde hedeflenmiştir.

Algılayıcı düğümlerin konumları kutupsal koordinat sistemi ile tanımlanmış; açı ve yarıçap değerleri ile belirlenmiştir. Bir düğüme ait açı, $[0, 2\pi]$ arasında düzgün dağılımlı bir rastgele değişken olarak tanımlanmıştır. Her düğümünün yarıçapı ise $[0, 1]$ aralığında düzgün dağılımlı bir r_0 rastgele değişkeni ile sembolize edilmiştir. Böylece i düğümünün ApN alanının yarıçapı ise $r_i = R_{net}\sqrt{r_0}$ olarak hesaplanmaktadır. Bu şekilde düğümlerin gerçekten R_{net} yarıçaplı bir diskin içine düzgün bir şekilde bırakıldığı kesinleştirilmiştir. Bu bölümdeki analizlerde verilen N_N ve ApN değerleri için rastgele topolojiler oluşturulmuştur. Şekil 5.13'te $N_N = 10$ düğüm ve $ApN = 100 \text{ m}^2$ için $R_{net} = 17.84$ metre olarak hesaplanmıştır. $ApN = 100 \text{ m}^2$ için $r_i = 5.64$ metre olarak hesaplanmıştır.

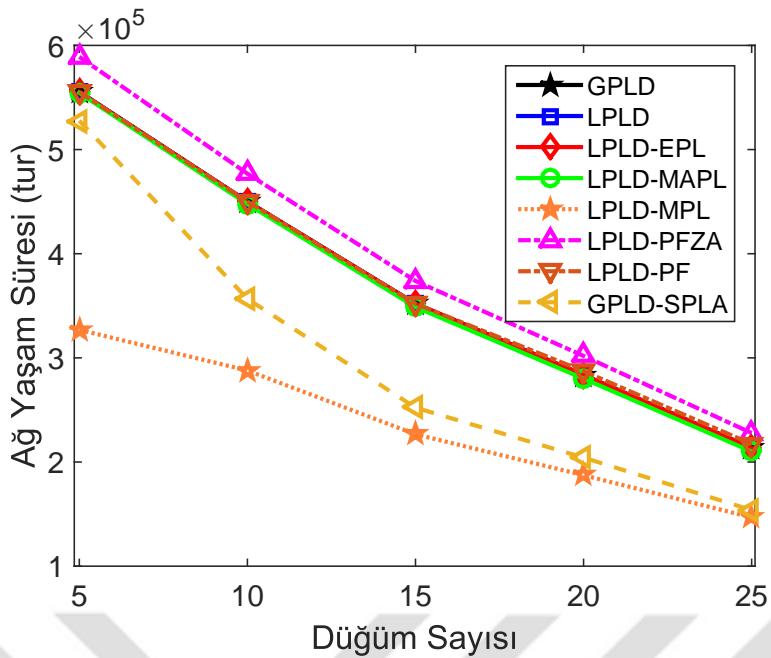


Şekil 5.13: Rastgele bir ağ topolojisi

Mica2 düğümlerinde kullanılan CC1000 radyoları için kullanılabilen en uzun paket boyutu 256 bayttır [158]. Bu yüzden bu bölümdeki analizlerde veri paket uzunlukları $M_P = 256$ bayt ve $M_P = 64$ bayt olarak alınmıştır. ACK paketinin boyutu ise $M_A = 20$ bayttır. Bir turda her düğüm bir tane paket üretmektedir ($s_i = 1$ paket). MP modelerin akış karar değişkenleri (f_{ij}^{lk} ve g_{ij}) tamsayılı ve $T_{bsy,i}$ değişkeni sürekli değişken olduğu için incelenen stratejilerin hepsi KTDP modelleri olup bu modeller GAMS ortamında öncelikle optimal sonucu verecek şekilde çözdürülmüştür. Ayrıca KTDP modellerinin çözüm zorluğundan dolayı bu modeller DP gevşetmesi ile de çözdürülmüştür.

Bölüm 4.3'te tasarlanan veri katmanı modeli MATLAB ortamında kurulmuş olup Bölüm 4.4'te tanıtılan eniyileme problemleri GAMS ortamında çözdürülmüştür. MATLAB ile GAMS arasında veri alışverişinin nasıl yapılacağına dair açıklamalar Ek 1'de ilgili okuyucular için sunulmuştur. Topoloji ve gölgeleme parametreleri rastgele olduğu için her bir denemede düğümlerin koordinatları ile buna bağlı olarak yol kaybı değerleri yeniden hesaplanmaktadır. Bu yüzden bu bölümde yüz farklı denemenin sonucunun ortalaması sunulmuştur.

Bu bölümün organizasyonu şu şekilde yapılmıştır: Bölüm 5.3.1'de sınırsız yeniden iletimin varsayıldığı durumda KTDP modelleri çözdürülümüş ve ağ yaşam süreleri %95 güven aralıkları (İng. confidence intervals) ile birlikte sunulmuştur. Bu bölümün alt başlıkları olan Bölüm 5.3.1.1'de sınırsız ve sınırlı yeniden iletim mekanizmaları için ağ yaşam süreleri arasındaki fark sunulurken Bölüm 5.3.1.2'de KTDP problemlerinin DP gevşetmesi yöntemi ile çözdürülmesiyle ağ yaşam süreleri arasındaki fark gösterilmiştir. Son olarak Bölüm 5.3.2'de KTDP modelleri ve DP gevşetilmiş modellerin çözüm süreleri ile ilgili analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.14: $M_P = 256$ bayt ve $ApN = 100 \text{ m}^2$ iken tüm stratejiler için ağ yaşam süresi değerleri

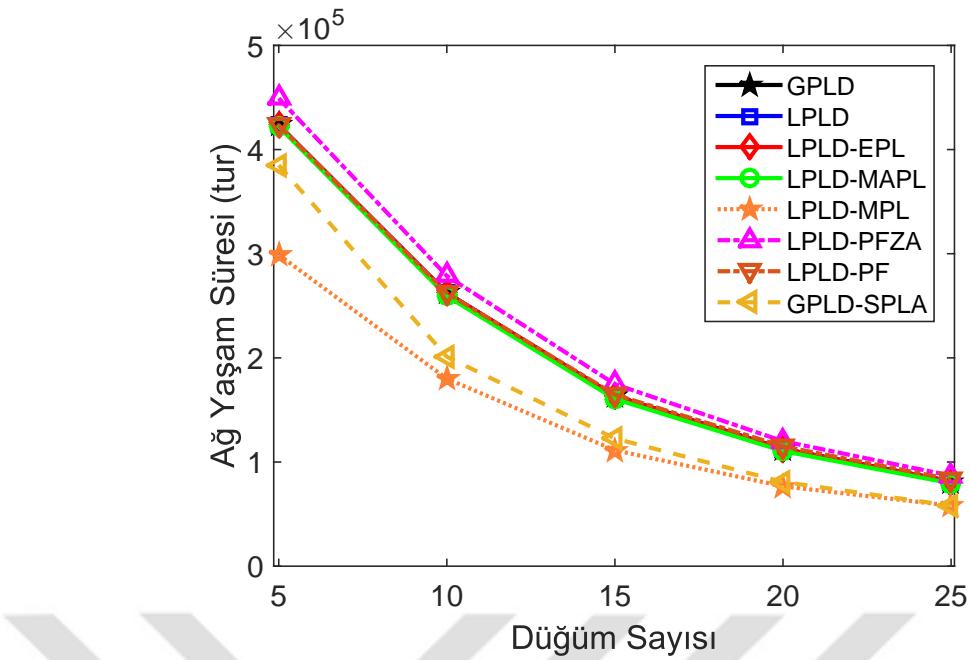
5.3.1 Ağ yaşam süresi analizi

Bu bölümde sınırsız yeniden iletme mekanizmasının aktif olduğu varsayılarak ($N_{ntr} \rightarrow \infty \Rightarrow \theta_{ji}(l, k) = 1$) Bölüm 4.4'te tanımlanan KTDP modelleri farklı parametre uzayı altında çözülmüştür.

Şekil 5.14–5.17'de üretilen sekiz farklı strateji için veri paket uzunluğunun 256 bayt alındığı durumda ($M_P = 256$ bayt), N_N ve ApN değerleri değiştirilerek ağ yaşam süreleri tur cinsinden sunulmuştur. Veri paket uzunluğunun etkilerini incelemek adına Şekil 5.18–5.21'de $M_P = 64$ bayt olarak alınmıştır. Bu iki durum arasındaki fark sadece paket boyutu olup $M_P = 256$ bayt için bahsedilen N_N ve ApN parametreleri $M_P = 64$ bayt iken de aynen kullanılmıştır.

Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da ApN değerleri sırasıyla 100 m^2 , 200 m^2 ve 300 m^2 olarak alınmıştır. Böylece her şekilde sabit bir ApN değeri için N_N değişiminin etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Örneğin, $N_N = 20$ olduğu zaman bir düğüm çifti arasındaki ortalama uzaklık $ApN = 100 \text{ m}^2$, $ApN = 200 \text{ m}^2$ ve $ApN = 300 \text{ m}^2$ için sırasıyla 21.07 m , 29.79 m ve 36.49 m olarak hesaplanmıştır. Ağdaki düğüm sayısının değişmesi ile artan link sayısının ağ yaşam süresine olan etkilerinin incelenmesi de bu bölüm kapsamında gerçekleştirılmıştır. Örneğin, LPLD-MPL stratejisinde $N_N = 5$ iken ortalama link sayıları $ApN = 100 \text{ m}^2$, $ApN = 200 \text{ m}^2$ ve $ApN = 300 \text{ m}^2$ için 3.75 , 3.13 ve 2.71 olarak hesaplanmıştır. $N_N = 25$ için bu değerler sırasıyla 9.12 , 5.33 ve 4.46 olarak not edilmiştir.

ApN arttığı zaman yani ağ seyrekleştirildiği zaman ağ yaşam süresinin düşüğü gözlenmiştir. Şekil 5.17'de ise $N_N = 20$ düğüm alınarak ApN değerleri değiştirilmiştir. ApN arttığı zaman ağ yaşam süresinin yine düşüğü gözlenmiştir. Örneğin, $ApN = 100 \text{ m}^2$ olduğu durumda LPLD stratejisi incelendiği zaman ağ yaşam süresi degeri-

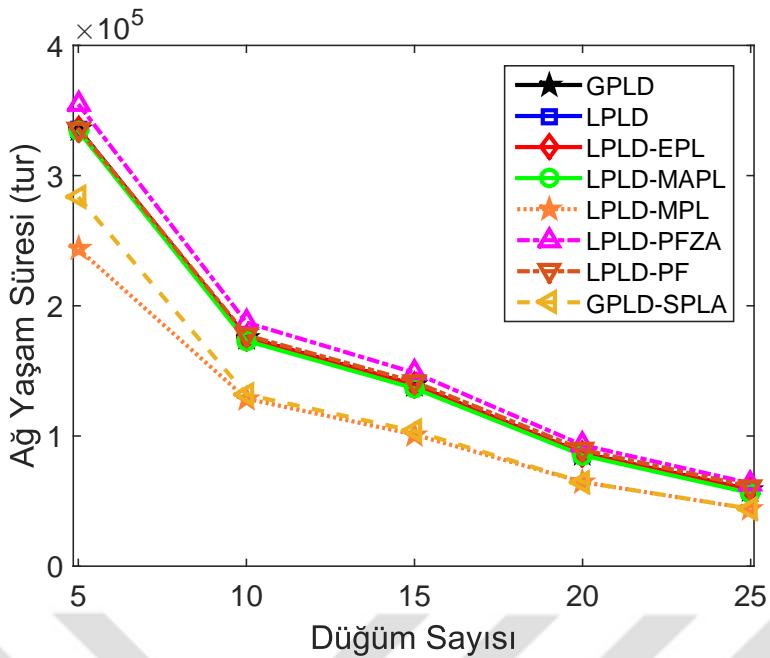


Şekil 5.15: $M_P = 256$ bayt ve $ApN = 200 \text{ m}^2$ iken tüm stratejiler için ağ yaşam süresi değerleri

nin 2.83×10^5 tur olduğu gözlenmiştir. Benzer bir şekilde $ApN = 200 \text{ m}^2$ ve $ApN = 300 \text{ m}^2$ için ağ yaşam süreleri 1.13×10^5 ve 0.87×10^5 tur olarak hesaplanmıştır. Baz istasyonuna ulaşmak için gereken ortalama uzaklık arttığı zaman haberleşme için daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Örneğin, LPLD stratejisinde $N_N = 20$ iken $ApN = 100 \text{ m}^2$, $ApN = 200 \text{ m}^2$ ve $ApN = 300 \text{ m}^2$ için baz istasyona ulaşmak adına gereken mesafeler 20.58 m, 34.89 m ve 44.93 m olarak ölçülmüştür. Aşağıdaki düğüm sayısının artmasıyla ağ yaşam süreleri tüm stratejiler için azalmaktadır. Şekil 5.15'te LPLD stratejisi düşünülürse $N_N = 10$, 15 ve 20 için ağ yaşam süresi değerleri sırasıyla 2.62×10^5 , 1.63×10^5 ve 1.13×10^5 tur olarak bulunmuştur. Bu senaryo altında baz istasyonuna ulaşmak için gereken mesafeler de 20.92 m, 28.01 m ve 34.89 m olarak not edilmiştir.

Kayıpsız geri besleme kanal varsayımlı yapılan modeller (LPLD-PF ve LPLD-PFZA) dışında GPLD ile elde edilen ağ yaşam süreleri diğer tüm stratejiler ile elde edilen ağ yaşam sürelerinden daha büyüktür. Çünkü GPLD stratejisi global şekilde güç seviyesi ve veri miktarı atamasını beraber gerçekleştirirken diğer tüm stratejiler sadece link seviyesinde eniyileme yaparak optimum güç seviyelerini belirlemektedir. Ancak LPLD ve LPLD-EPL stratejileri ile elde edilen ağ yaşam süreleri GPLD ile elde edilen ağ yaşam süresinden en fazla %1 daha düşüktür. Örneğin, Şekil 5.16'da $N_N = 25$ iken LPLD ve LPLD-EPL stratejileri ile elde edilen ay yaşam süreleri 58633 tur olarak gözlenirken GPLD için bu değer 58634 turdur. Bu değer yaklaşık olarak 40 güne denk gelmektedir. Bu davranışın sebebi GPLD ile LPLD stratejilerinde atanen güç seviyelerinin linklerin çoğu aynı olmasından kaynaklanmaktadır.

Ayrıca genel olarak LPLD stratejisi ile elde edilen ağ yaşam süreleri LPLD-EPL ile elde edilen ağ yaşam sürelerinden nispeten biraz daha fazladır. Çünkü LPLD-EPL stratejisi LPLD stratejisinden daha az serbesttir. Daha önce de belirtildiği gibi LPLD-EPL stratejisinde bir linkte veri ve ACK paketi için aynı güç seviyesi kullanılırken

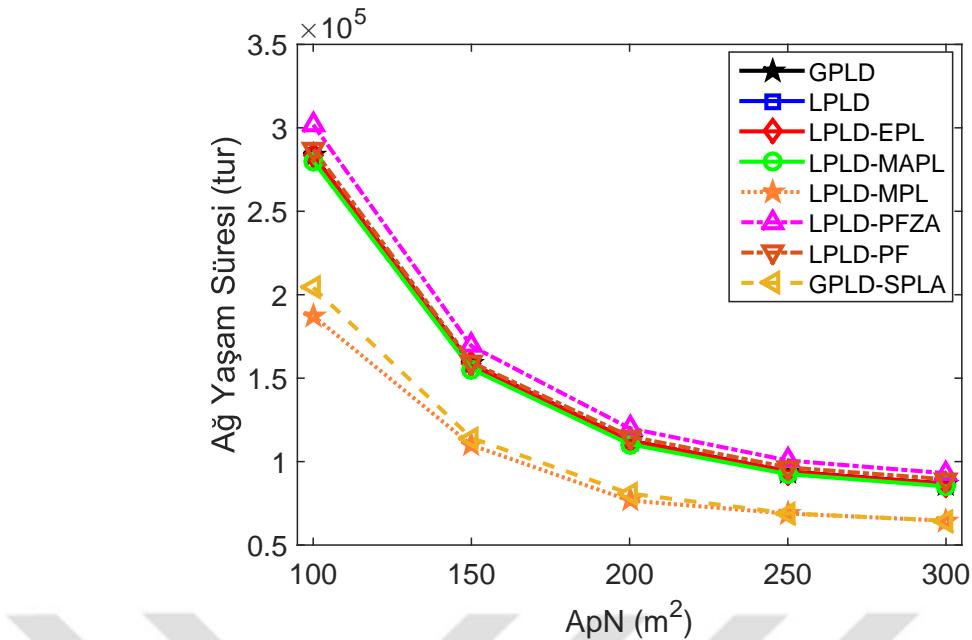


Şekil 5.16: $M_P = 256$ bayt ve $ApN = 300 \text{ m}^2$ iken tüm stratejiler için ağ yaşam süresi değerleri

LPLD stratejisinde ise aynı linkte iki farklı güç seviyesi tercih edilebilir. Bununla birlikte bu sonuçlarla KAA'larda güç seviyelerinin global şekilde eniyilemesi yerine iyi tasarılanmış link seviye güç atama sezgisel stratejileri ile ağ yaşam süresinden pek taviz verilmeden çözüdürülebileceği gösterilmiştir.

GPLD ile LPLD-MAPL stratejileri arasındaki farkın %6.0'dan daha az olduğu gözlenmiştir. Örneğin, Şekil 5.19'da $N_N = 25$ ve $ApN = 200 \text{ m}^2$ için LPLD-MAPL ile GPLD stratejileri ile elde edilen ağ yaşam süreleri 2.25×10^5 tur ile 2.39×10^5 tur olarak bulunmuştur. Bu durumda LPLD-MAPL stratejisi GPLD'den %5.86 daha düşük ağ yaşam süresi değeri vermiştir. GPLD modeli için linklerin önemli bir çoğunluğunda en yüksek güç seviyesinin ($l_{max} = 26$) ACK paketleri için kullanılmadığı tespit edilmiştir. Ancak LPLD-MAPL stratejisinde ACK paketleri en yüksek güç seviyesi ile iletildiği için ACK paketlerinin ilettilmesinde gereksiz enerji harcanmıştır. Örneğin, bir (i, j) linki için yol kaybı değerinin 93 dB olarak ölçüldüğü kabul edilsin ($\Upsilon_{ij} = 93 \text{ dB}$). i düğümünün j düğümüne veri paketi ilettiği, buna karşılık j düğümünün i düğümüne ACK paketi gönderdiği kabul edilsin. $l = 3$ için ACK paketinin (j, i) linki üzerinde başarılı bir şekilde alınma olasılığı Denklem 4.9'a göre $p_{ij}^s(l = 3, M_A) > 0.999$ olarak hesaplanmıştır. Bu durumda iletim için harcanan enerji Denklem 4.15'e göre 0.23 mJ'dır ($E_{tx}^P(l = 3, M_A) = 0.23 \text{ mJ}$). Fakat en yüksek güç seviyesi ile bu ACK paketi iletilirse harcanan enerji yaklaşık üç katına çıkararak $E_{tx}^P(l_{max} = 26, M_A) = 0.64 \text{ mJ}$ olarak hesaplanmaktadır.

LPLD-MPL bu tez çalışmasındaki en basit strateji olup veri ve ACK paketleri için en yüksek güç seviyesi bütün ağ üzerinde kullanılmaktadır. Genel olarak LPLD-MPL ağ yaşam süresi ile GPLD ağ yaşam süresi oranı ApN arttıkça artmaktadır. Çünkü ApN arttıkça link mesafeleri artmada buna bağlı olarak yol kaybı değerleri artmaktadır. ApN arttığı zaman GPLD yüksek güç seviyelerini kullanmakta GPLD ile LPLD-MPL'nin kullandığı güç seviyeleri birbirlerine yaklaşmakta olduğu için bu iki strateji

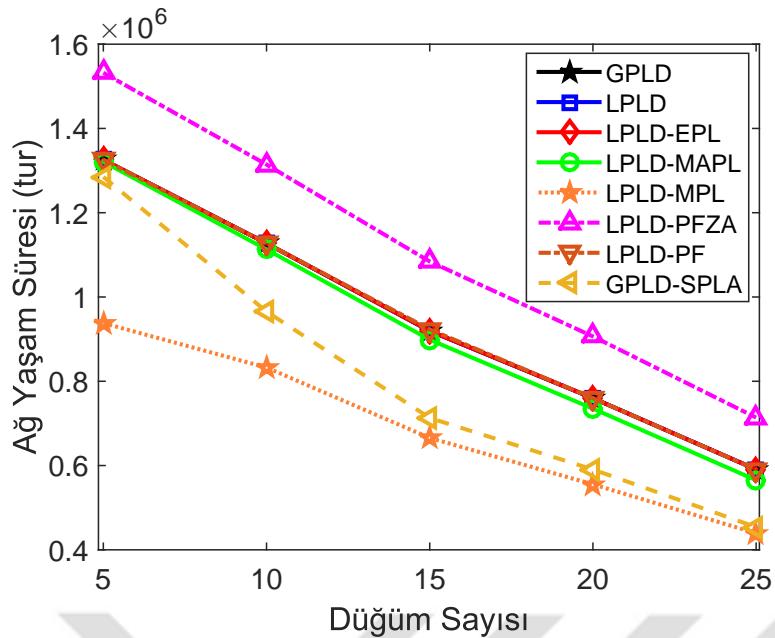


Şekil 5.17: $M_P = 256$ bayt ve $N_N = 20$ iken tüm stratejiler için ağ yaşam süresi değerleri

arasındaki ağ yaşam süresi farkı da azalmaktadır. Son olarak $N_N = 5$ için LPLD-MPL ağ yaşam süresi GPLD'den %59 (bkz. Şekil 5.14) ilâ %80 (bkz. Şekil 5.20) daha düşüktür.

GPLD-SPLA stratejisi LPLD-MPL gibi ağ seviyesinde sabit iletim güç seviye atama stratejisidir. Ancak GPLD-SPLA stratejisinde en yüksek güç seviyesi yerine en iyi güç seviyesi belirlenerek ağ seviyesinde kullanılmaktadır. GPLD-SPLA stratejisi ile elde edilen ağ yaşam süresi değerleri genel olarak LPLD-MPL stratejisi ile elde edilen ağ yaşam süresi değerlerinden daha yüksektir. Örneğin, GPLD-SPLA stratejisinde $ApN = 100 \text{ m}^2$ iken bulunan ortalama en iyi güç seviyeleri $N_N = 10$, $N_N = 15$ ve $N_N = 20$ için 23.14, 24.93 ve 25.48 olarak not edilmiştir. Aynı ApN değerinde GPLD-SPLA ile elde edilen ağ yaşam süreleri LPLD-MPL ile elde edilen ağ yaşam sürelerinden $N_N = 10$, $N_N = 15$ ve $N_N = 20$ için %5.99, %7.06 ve %6.49 daha büyütür. GPLD-SPLA ile LPLD-MPL arasındaki ağ yaşam süresi farkı Şekil 5.14'te $N_N = 5$ için en fazla %61 olarak gözlenmiştir. Fakat GPLD-SPLA stratejisi ile elde edilen ağ yaşam süresi değerleri LPLD-EPL'den ve LPLD-MAPL'den daha düşüktür. Çünkü LPLD-EPL ve LPLD-MAPL stratejilerinde her linkte bağımsız güç seviyeleri belirlenirken GPLD-SPLA'da tek bir güç seviyesi tüm ağa uygulanmakta ve gereksiz enerji harcamasına neden olmaktadır.

KAAs'ta kayıpsız geri besleme kanalının ağ yaşam süresine olan etkilerini incelemek adına LPLD-PF ve LPLD-PFZA stratejileri kurulmuştur. Kayıpsız kanalın modellenmesi için ACK paketlerinde hata alınma olasılığı ihmal edilmiş böylece tokalaşmanın başarısız olması sadece veri paketinin başarısız olmasına bağlanmıştır. LPLD-PF stratejisinde ACK paket uzunluğu diğer stratejilerdeki gibi $M_A = 20$ bayt olarak alınmıştır. Bu durumda ACK paketleri için iletim ve alma enerji harcamaları halen geçerlidir. Ancak LPLD-PFZA stratejisinde ACK paket uzunluğu sıfır olarak alındığı için ACK paketlerinde herhangi bir şekilde iletim veya alma için enerji harcanmamaktadır.



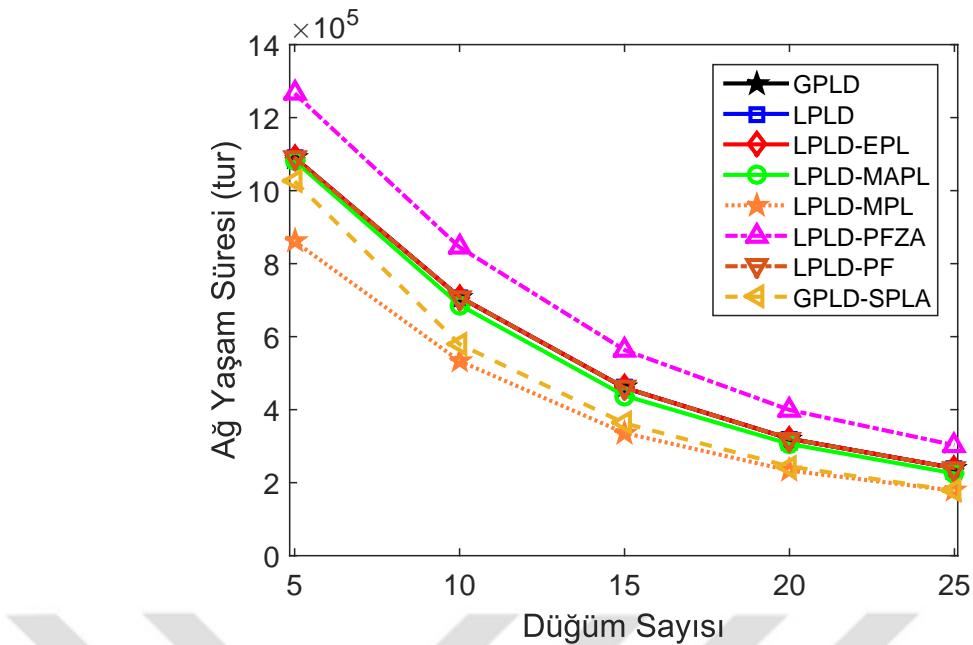
Şekil 5.18: $M_P = 64$ bayt ve $ApN = 100 \text{ m}^2$ iken tüm stratejiler için ağ yaşam süresi değerleri

LPLD-PF ve LPLD-PFZA stratejileri LPLD-EPL stratejisini baz alarak kurulduğu için her linkte veri ve ACK paketleri aynı güç seviyesini kullanmaktadır. Bu stratejiler ile elde edilen ağ yaşam süreleri hem GPLD'den hem de LPLD'den daha yüksektir. Bu stratejiler GPLD veya LPLD stratejileri üzerine kurulsaydı ACK paketleri için en düşük güç seviyeleri atanacağı için adil olmayan bir model kurulmuş olacaktı. İşte bu yüzden LPLD-PF ve LPLD-PFZA modelleri LPLD-EPL stratejisi üzerine kurulmuştur.

LPLD-PF ile LPLD-PFZA stratejileri ile elde edilen ağ yaşam süreleri LPLD-EPL ile elde edilen ağ yaşam sürelerinden daha büyütür. Aslında bu tez çalışmasında kayıpsız geri besleme kanalı varsayıminın ağ yaşam süresine olan etkilerinin nümerik biçimde incelenmesi de hedeflenmiştir. LPLD-EPL ile LPLD-PF stratejileri arasındaki fark, LPLD-PF stratejisinde ACK paketlerinin başarılı bir şekilde iletilmesinin garantielenmesidir. LPLD-PF ile LPLD-PFZA arasında ağ yaşam süresi değişikliklerinin sebebi ise LPLD-PFZA stratejisinde ACK paketlerinin uzunlıklarının ihmâl edilmesinden kaynaklanmaktadır.

LPLD-PF ile elde edilen ağ yaşam süreleri GPLD'den %1 (bkz. Şekil 5.20, $M_P = 64$ bayt ve $N_N = 25$) ilâ %5 (bkz. $M_P = 256$ bayt, Şekil 5.16, $N_N = 25$) daha büyütür. LPLD-PFZA incelemişinde bu farkın $M_P = 256$ bayt için %5-9 ve $M_P = 64$ bayt için %16-26 olduğu tespit edilmiştir.

Ortalama link uzaklığı arttıkça LPLD-PF, LPLD-PFZA ve GPLD stratejileri arasındaki ağ yaşam süreleri farkı da artmaktadır. Örneğin, $ApN = 300 \text{ m}^2$, $M_P = 256$ bayt ve $N_N = 5$ için (bkz. Şekil 5.16), ortalama link uzaklığı 14.26 m olup LPLD-PFZA ve LPLD-PF stratejilerinin ağ yaşam süreleri GPLD'den %5.65 ve %0.01 daha büyütür. $N_N = 25$ için ortalama link uzaklığı 41.69 metre olup ağ yaşam süreleri farkı %8.53 ve %4.27 olarak gözlenmiştir. Bu durumun sebebi yol kayıp değeri arttığı zaman hem veri hem de ACK paketi için kullanılan güç seviyelerinin artmasından kaynaklanmaktadır. Örneğin, $ApN = 100 \text{ m}^2$, $M_P = 256$ bayt ve $N_N = 10$ için (bkz. Şekil 5.14) ortalama



Şekil 5.19: $M_P = 64$ bayt ve $ApN = 200 \text{ m}^2$ iken tüm stratejiler için ağ yaşam süresi değerleri

link uzaklığı 13.80 metre iken GPLD stratejisinde ortalama veri ve ACK paket güç seviyeleri 14.34 ve 17.01 olarak ölçülmüştür. Ancak $ApN = 300 \text{ m}^2$, $M_P = 256$ bayt ve $N_N = 10$ için (bkz. Şekil 5.16), ortalama link uzaklığı 23.91 metre iken GPLD stratejisinde ortalama veri ve ACK paket güç seviyeleri 17.87 ve 19.61 olarak ölçülmüştür.

LPLD-PFZA ve GPLD stratejileri için ağ yaşam süresi arasındaki fark verilen parametre setinde $M_P = 64$ bayt için $M_P = 256$ bayta göre daha fazladır. Örneğin, $ApN = 300 \text{ m}^2$, $M_P = 256$ bayt ve $N_N = 25$ iken (bkz. Şekil 5.16), LPLD-PFZA stratejisi ile GPLD'ye göre %8 daha fazla ağ yaşam süresi alınmaktadır. Ancak $ApN = 300 \text{ m}^2$, $M_P = 64$ bayt ve $N_N = 25$ iken (bkz. Şekil 5.20), LPLD-PFZA stratejisi ile elde edilen ağ yaşam süresi GPLD'ye göre %26 daha fazladır.

Bu durumun sebebi $M_P = 64$ bayt iken ACK paketin veri paketine göre oranının $M_P = 256$ bayt durumuna göre daha fazla olmasındandır. Örneğin, $M_P = 64$ bayt için $M_A/M_P = 0.31$ iken $M_P = 256$ bayt için $M_A/M_P = 0.08$ 'dır. Diğer bir deyişle ACK paketinin iletimi ve alınması için harcanan enerji oransal olarak veri paket boyutu düşükken daha fazladır. Bu yüzden veri paket boyutu düşürüldüğünde ACK paketinin enerji harcamasındaki etkisi artmaktadır.

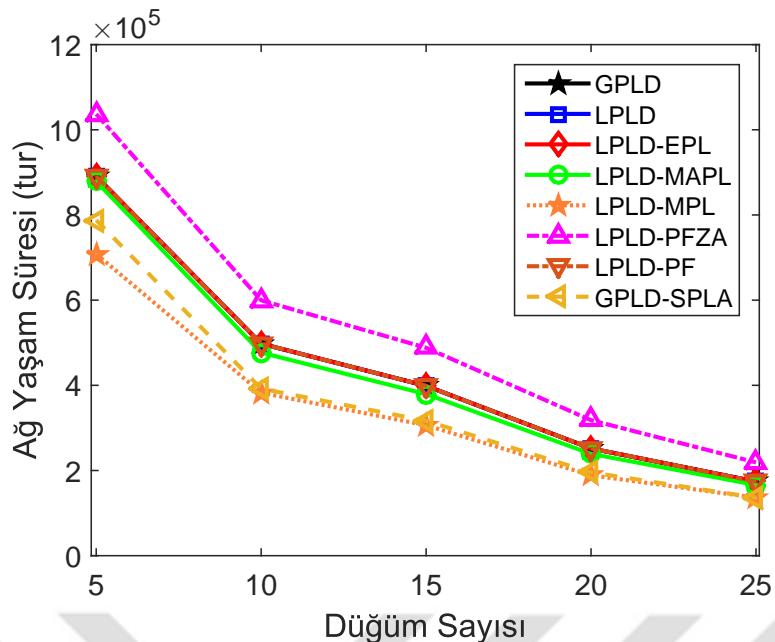
Çizelge 5.7'de ve Çizelge 5.8'de $M_P = 256$ bayt ile $M_P = 64$ bayt için tüm parametre uzayı taranarak ağ yaşam süreleri yıl cinsinden %95 güven aralığı ile sunulmuştur. $M_P = 256$ bayt iken elde edilen olası en büyük yaşam süresi 8.79 yıl ($ApN = 100 \text{ m}^2$ ve $N_N = 5$ için), olası en küçük yaşam süresi değeri 0.61 yıl olarak gözlenmiştir ($ApN = 300 \text{ m}^2$ ve $N_N = 25$ için). $M_P = 64$ bayt iken elde edilen olası en büyük yaşam süresi 20.82 yıl ($ApN = 100 \text{ m}^2$ ve $N_N = 5$ için), olası en küçük yaşam süresi değeri 1.81 yıl olarak gözlenmiştir ($ApN = 300 \text{ m}^2$ ve $N_N = 25$ için).

Cizelge 5.7: $M_P = 256$ bayt için %95 güven aralıklı ağ yaşam süreleri (yıl cinsinden).

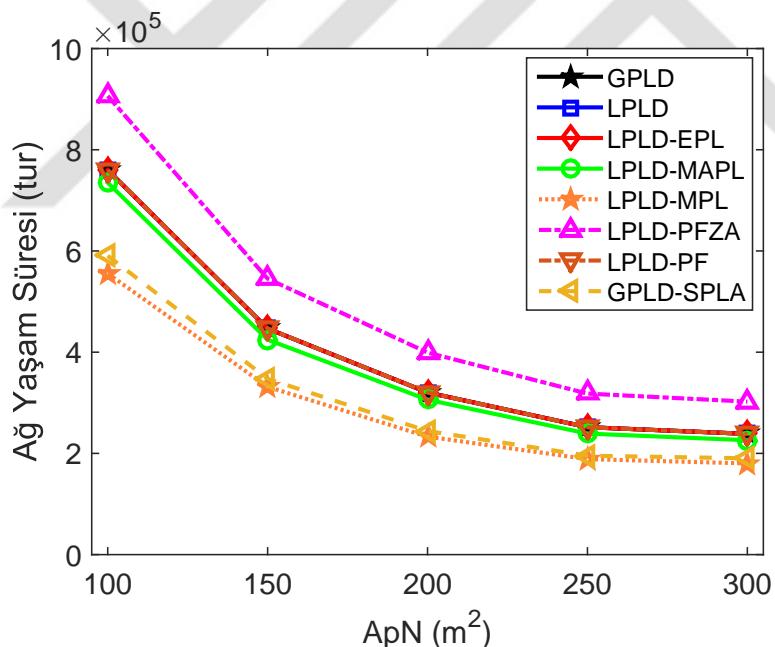
		Ağ yaşam süresi (yıl) – %95 güven aralığı							
ApN (m^2)	N_N	GPLD	LPLD	LPLD-EPL	LPLD-MPL	LPLD-PF	LPLD-PFZA	GPLD-SPLA	
100	5	8.57±0.22	8.57±0.22	8.57±0.22	8.55±0.22	5.04±0.09	9.09±0.23	8.57±0.21	8.14±0.30
	10	6.94±0.19	6.94±0.19	6.94±0.19	6.94±0.19	6.91±0.20	4.44±0.16	7.36±0.20	6.94±0.19
	15	5.43±0.22	5.43±0.22	5.43±0.22	5.38±0.22	5.38±0.14	5.77±0.23	5.43±0.20	3.89±0.18
	20	4.38±0.23	4.38±0.23	4.38±0.23	4.32±0.23	2.89±0.13	4.66±0.24	4.43±0.23	3.15±0.14
	25	3.29±0.18	3.29±0.18	3.29±0.18	3.24±0.18	2.26±0.12	3.52±0.19	3.35±0.18	2.37±0.13
200	5	6.53±0.26	6.53±0.26	6.53±0.26	6.51±0.26	4.61±0.21	6.93±0.27	6.53±0.26	5.94±0.32
	10	4.05±0.28	4.05±0.28	4.05±0.28	4.00±0.28	2.78±0.18	4.30±0.3	4.05±0.28	3.10±0.24
	15	2.52±0.17	2.52±0.17	2.52±0.17	2.48±0.17	1.72±0.11	2.70±0.19	2.54±0.17	1.89±0.13
	20	1.74±0.17	1.74±0.17	1.74±0.17	1.70±0.17	1.18±0.12	1.85±0.18	1.78±0.17	1.25±0.12
	25	1.25±0.11	1.25±0.11	1.25±0.11	1.23±0.11	0.90±0.08	1.34±0.12	1.29±0.11	0.90±0.09
300	5	5.18±0.33	5.18±0.33	5.18±0.33	5.16±0.33	3.76±0.28	5.48±0.34	5.18±0.33	4.37±0.37
	10	2.71±0.21	2.71±0.21	2.71±0.21	2.67±0.21	1.99±0.15	2.89±0.22	2.74±0.21	2.03±0.15
	15	2.15±0.16	2.15±0.16	2.15±0.16	2.11±0.16	1.56±0.10	2.29±0.17	2.18±0.16	1.60±0.11
	20	1.34±0.17	1.34±0.08	1.34±0.08	1.31±0.08	1.00±0.06	1.44±0.08	1.38±0.08	1.00±0.06
	25	0.90±0.09	0.90±0.09	0.90±0.09	0.87±0.09	0.68±0.07	0.98±0.10	0.94±0.09	0.68±0.07

Çizelge 5.8: $M_P = 64$ bayt için %95 güven aralıklı ağ yaşam süreleri (yıl cinsinden).

		Ağ yaşam süresi (yıl) – %95 güven aralığı							
ApN (m^2)	N_N	GPLD	LPLD	LPLD-EPL	LPLD-MPL	LPLD-MAPL	LPLD-PF	LPLD-PFZA	GPLD-SPLA
100	5	20.46±0.36	20.46±0.36	20.46±0.36	20.38±0.38	14.47±0.24	23.64±0.41	20.46±0.36	19.83±0.53
	10	17.40±0.42	17.40±0.42	17.40±0.42	17.17±0.44	12.85±0.43	20.28±0.43	17.40±0.42	14.90±0.71
	15	14.19±0.50	14.19±0.50	14.19±0.50	13.87±0.52	10.27±0.37	16.73±0.54	14.25±0.50	11.00±0.43
	20	11.73±0.54	11.73±0.54	11.73±0.54	11.34±0.55	8.57±0.37	13.99±0.64	11.73±0.54	9.11±0.39
	25	9.12±0.46	9.12±0.46	9.12±0.46	8.72±0.46	6.78±0.36	11.02±0.52	9.12±0.46	7.00±0.40
	5	16.83±0.58	16.83±0.58	16.83±0.58	16.69±0.62	13.29±0.57	19.54±0.63	16.83±0.58	15.82±0.73
200	10	10.93±0.69	10.93±0.69	10.93±0.69	10.6±0.68	8.23±0.52	13.04±0.78	10.93±0.69	8.94±0.62
	15	7.10±0.46	7.10±0.46	7.10±0.46	6.76±0.45	5.19±0.33	8.70±0.54	7.10±0.46	5.60±0.36
	20	4.94±0.48	4.94±0.48	4.94±0.48	4.72±0.47	3.60±0.37	6.16±0.58	4.94±0.48	3.77±0.37
	25	3.70±0.32	3.70±0.32	3.70±0.32	3.48±0.31	2.75±0.23	4.67±0.40	3.70±0.32	2.75±0.25
	5	13.75±0.83	13.75±0.83	13.75±0.83	13.56±0.85	10.93±0.78	16.00±0.87	13.75±0.83	12.16±0.93
	10	7.68±0.55	7.68±0.55	7.68±0.55	7.36±0.56	5.91±0.44	9.25±0.64	7.68±0.55	6.05±0.43
300	15	6.15±0.42	6.15±0.42	6.15±0.42	5.86±0.40	4.73±0.29	7.53±0.51	6.15±0.42	4.89±0.32
	20	3.89±0.21	3.89±0.21	3.89±0.21	3.69±0.22	2.91±0.18	4.91±0.96	3.89±0.21	3.02±0.18
	25	2.68±0.25	2.68±0.25	2.68±0.25	2.56±0.24	2.10±0.20	3.38±0.32	2.68±0.25	2.10±0.21



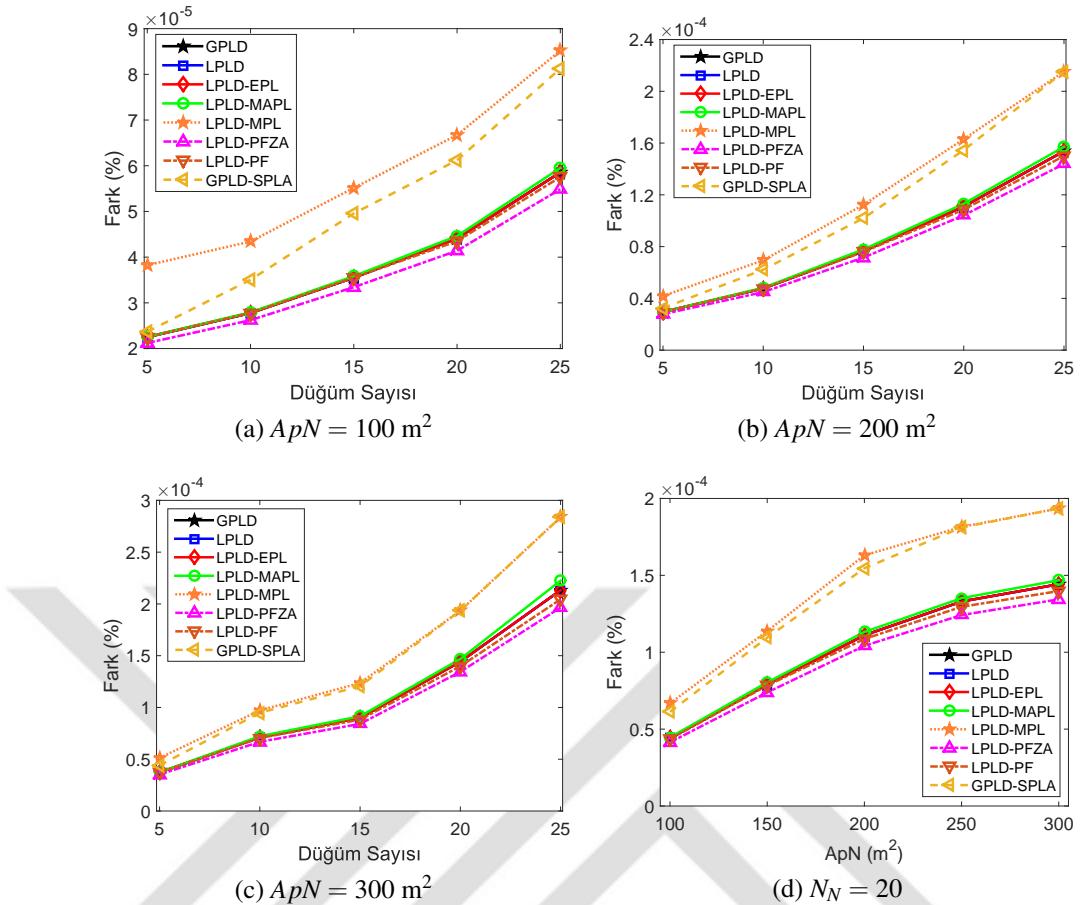
Şekil 5.20: $M_P = 64$ bayt ve $ApN = 300 \text{ m}^2$ iken tüm stratejiler için ağ yaşam süresi değerleri



Şekil 5.21: $M_P = 64$ bayt ve $N_N = 20$ iken tüm stratejiler için ağ yaşam süresi değerleri

5.3.1.1 Sınırlı - sınırsız yeniden iletim yöntemlerinin karşılaştırması

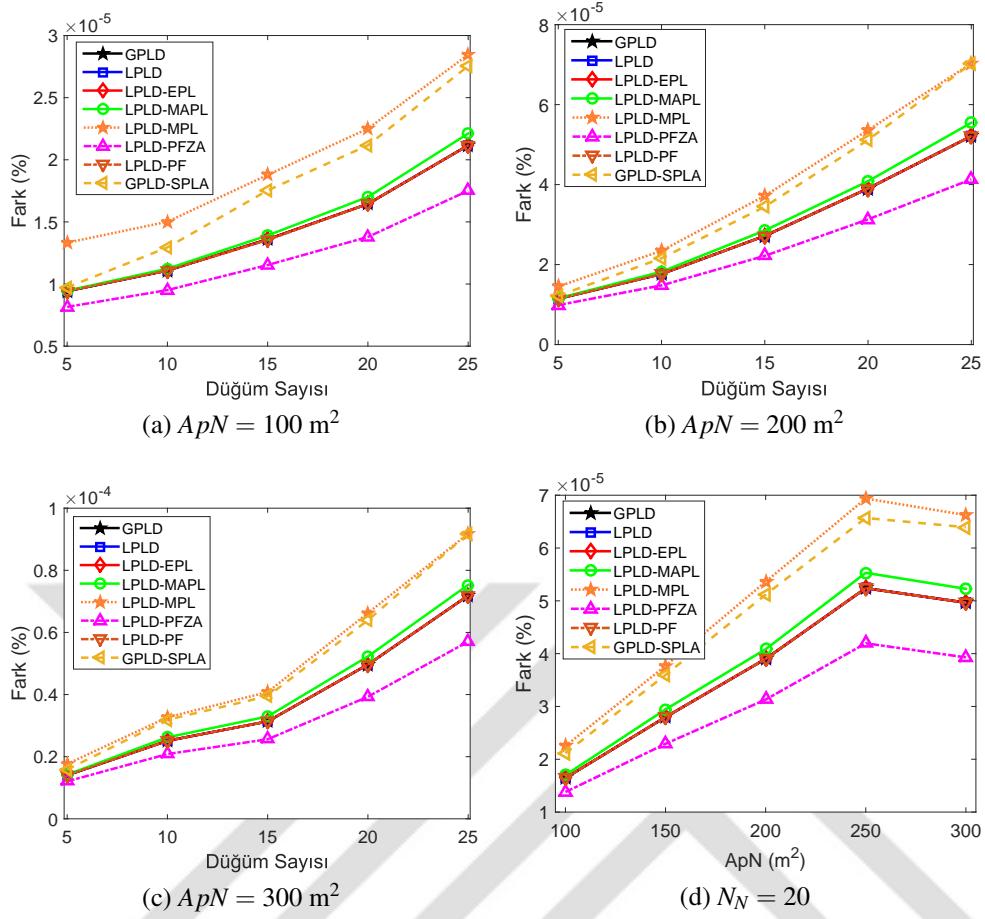
Bir önceki bölümde sınırsız yeniden iletim mekanizmasının ($N_{rtr} \rightarrow \infty$) aktif olduğu varsayılmıştır. Ancak pratik KAA uygulamalarında kullanılan IEEE 802.15.4 protokolüne göre maksimum yeniden iletim sayısı standart olarak 3 olarak alınmaktadır ($N_{rtr} = 3$) [35]. Bu yüzden bir önceki bölümde gerçekleştirilen analizlerin $N_{rtr} = 3$ için de tekrarlanması büyük önem arz etmektedir. Bu bölümde $N_{rtr} = 3$ alınarak KTDP modelleri çözüldürmüştür ve bir önceki bölümde elde edilen sonuçlarla karşılaştırması sunulmuştur.



Şekil 5.22: $M_P = 256$ bayt iken KTDP modellerin $N_{rtr} \rightarrow \infty$ ve $N_{rtr} = 3$ için çözülmesiyle elde edilen ağ yaşam süreleri arasındaki fark (%)

Şekil 5.22'de ve Şekil 5.23'te sırasıyla $M_P = 256$ bayt ve $M_P = 64$ bayt iken KTDP modellerin $N_{rtr} \rightarrow \infty$ ve $N_{rtr} = 3$ için çözülmesiyle elde edilen ağ yaşam süreleri arasındaki fark yüzde cinsinden sunulmuştur. Her iki şekilde sabit bir ApN değeri için N_N 'nin artmasıyla ağ yaşam süreleri arasındaki fark artmıştır. Örneğin, GPLD stratejisi için $ApN = 100 \text{ m}^2$ ve $N_N = 5$ iken (bkz. Şekil 5.22a) ağ yaşam süreleri arasındaki fark $\%0.000023$ olarak gözlenmekte, $N_N = 25$ için bu değer $\%0.000059$ olarak hesaplanmıştır. Benzer gözlemler diğer stratejiler için de geçerlidir. Sabit bir N_N değeri için ApN 'nin artmasıyla farkın arttığı gözlenmiştir (bu durum $M_P = 64$ bayt için $ApN \leq 250 \text{ m}^2$ ye kadar geçerlidir). Örneğin, GPLD stratejisi için $N_N = 20$ ve $ApN = 100 \text{ m}^2$ iken (bkz. Şekil 5.22d) fark $\%0.000044$ olarak ölçülmüş, bu değer $ApN = 300 \text{ m}^2$ için $\%0.000144$ olarak kaydedilmiştir. $M_P = 64$ bayt için farkın $M_P = 256$ bayta göre daha düşük olduğu gözlenmiştir.

Örneğin, LPLD-EPL stratejisi için $M_P = 256$ bayt, $N_N = 25$ ve $ApN = 100 \text{ m}^2$ iken (bkz. Şekil 5.22a) fark $\%0.000059$ olarak not edilmiş, bu değer $M_P = 64$ bayt için $\%0.000021$ olarak gözlenmiştir (bkz. Şekil 5.23a). Ağ seviyesinde güç ataması yapılan stratejilerde (LPLD-MPL ve GPLD-SPLA) ağ yaşam süreleri arasındaki fark diğer stratejilere göre daha yüksek çıkmıştır. Bununla birlikte LPLD-MPL ile elde edilen fark GPLD-SPLA'dan bir miktar daha fazladır. Bu durumun sebebi ağ seviye stratejilerinden kaynaklanan gereksiz enerji harcamasıdır.



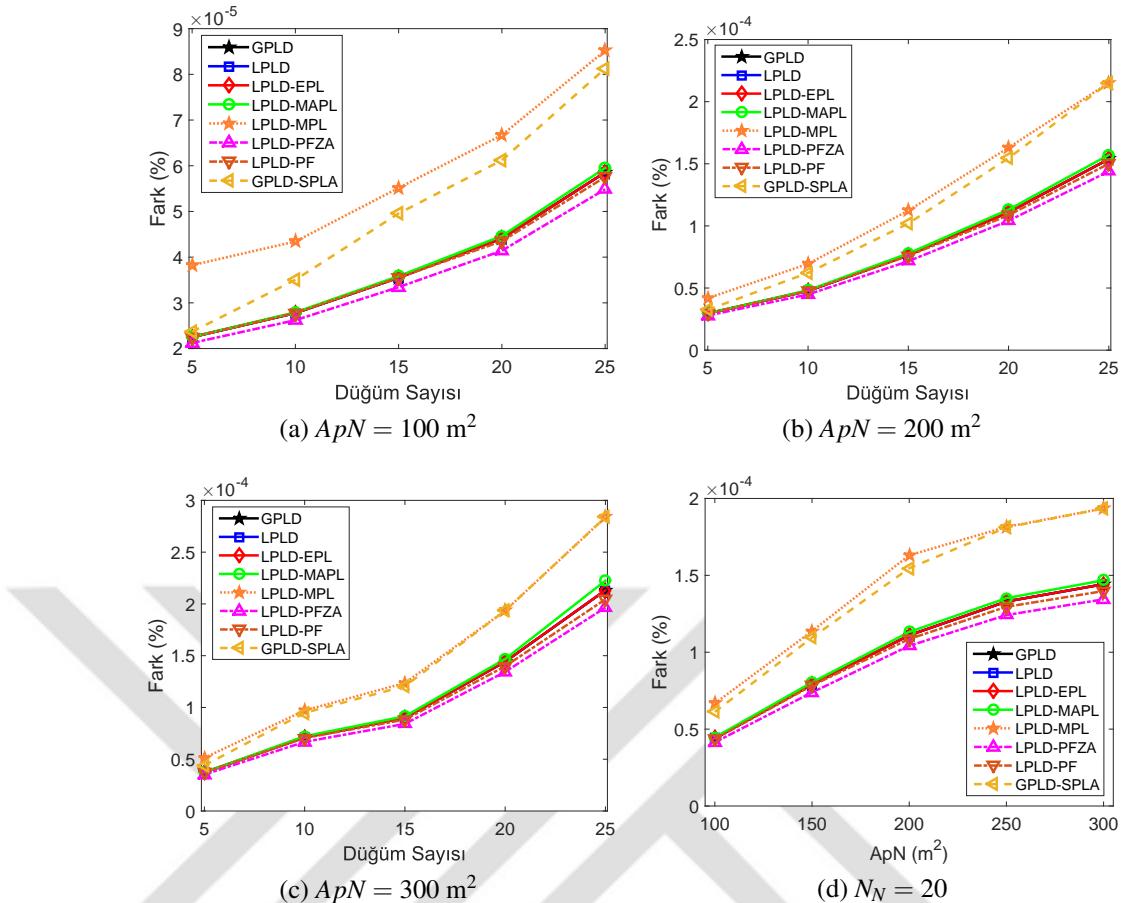
Şekil 5.23: $M_P = 64$ bayt iken KTDP modellerin $N_{rtr} \rightarrow \infty$ ve $N_{rtr} = 3$ için çözülmeyeyle elde edilen ağ yaşam süreleri arasındaki fark (%)

Örneğin, LPLD-MPL stratejisinde $ApN = 200 \text{ m}^2$ ve $N_N = 20$ için (bkz. Şekil 5.22b) ağ yaşam süresi farkı $\%0.000163$ iken GPLD-SPLA için bu değer $\%0.000155$ olarak kaydedilmiştir. LPLD-PFZA stratejisi için farkın en düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun sebebi ise LPLD-PFZA stratejisinde ACK paketlerinin iletimi ve alınması için harcanan enerjinin ihmâl edilmesidir. Özellikle $M_P = 64$ bayt için bu durum daha belirgindir (bkz. Şekil 5.23). Bu analiz sonucunda ağ yaşam süreleri arasındaki farkın üst sınırı $\%0.0003$ olarak tespit edilmiştir (bkz. Şekil 5.22c).

5.3.1.2 KTDP - DP gevşetme yöntemlerinin karşılaştırması

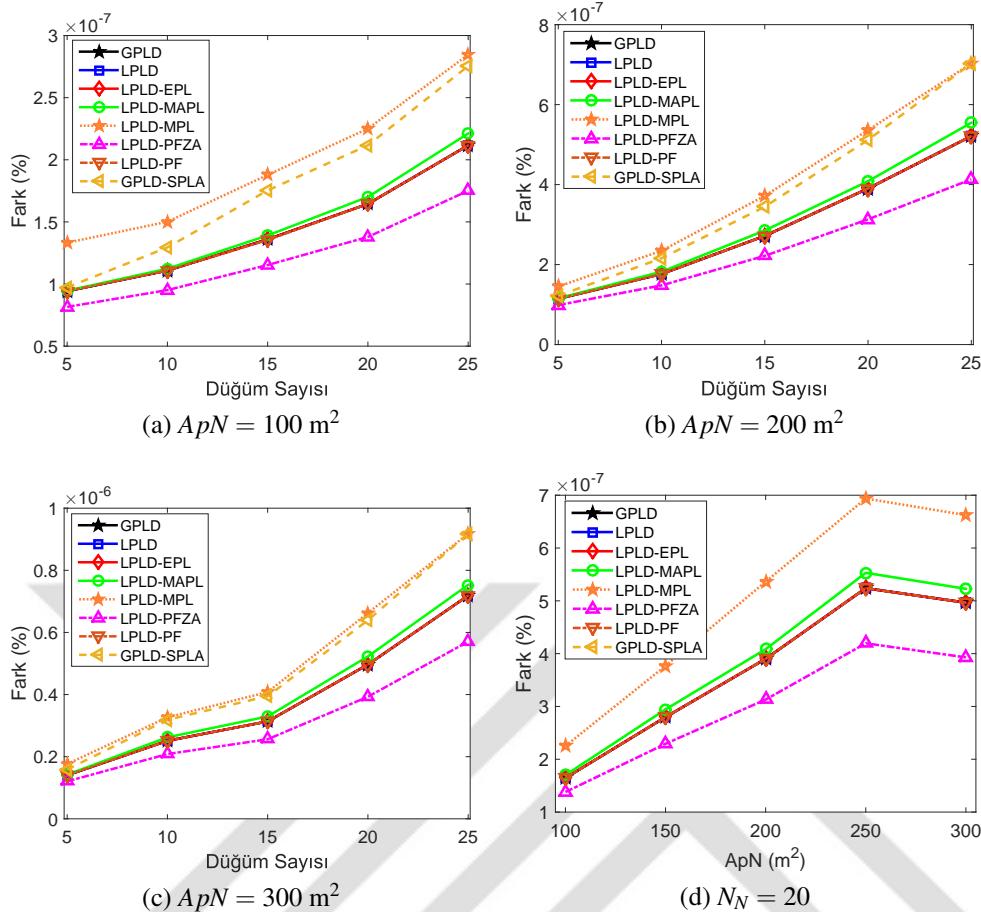
Bu bölüme kadar KTDP çözüm teknikleri yardımı ile kesin sonuçlar alınmaya çalışılmışken bu bölümde bu modeller DP gevşetilmesi yardımı ile çözüldürmüştür. Bu kapsamında modellerdeki tamsayılı akış değişkenleri (f_{ij}^{lk} ve g_{ij}), sürekli değişkenler olarak kabul edilmiştir. Bu şekilde KTDP modeller DP varsayımlı altında gevşetilerek polinom zamanda çözülebilir duruma gelmiştir [159].

Ek 2'de GPLD ve LPLD stratejilerinin DP gevşetilmiş çözümleri ile elde edilen ağ yaşam sürelerinin üst sınırının sırasıyla $l_{max}^2(N_N - 1)$ ve $(N_N - 1)$ olduğu ispat edil-



Şekil 5.24: $M_P = 256$ bayt iken $N_{rtr} \rightarrow \infty$ için KTDP ve DP gevşetilmiş modeller ile elde edilen ağ yaşam süreleri arasındaki fark (%)

miştir. Bu kısımda Bölüm 5.3.1'de elde edilen ağ yaşam süreleri DP gevşetmesi ile çözüldürümüş ve aradaki yaşam süresi farkının Ek 2'de verilen sınırlar içinde olduğu gösterilmiştir. Şekil 5.24'te ve Şekil 5.25'te $M_P = 256$ bayt ve $M_P = 64$ bayt iken $N_{rtr} \rightarrow \infty$ için KTDP ve DP gevşetilmiş modeller ile elde edilen ağ yaşam süreleri arasındaki fark yüzde olarak sunulmuştur. Her iki şekilde de sabit bir ApN değeri için N_N 'nin artmasıyla KTDP ve DP gevşetme çözümleri arasındaki ağ yaşam süreleri farkı artmıştır. Örneğin, GPLD stratejisi için $ApN = 200 \text{ m}^2$ ve $N_N = 5$ iken (bkz. Şekil 5.24b) ağ yaşam süreleri arasındaki fark %0.000030 olarak gözlenmiş $N_N = 25$ için bu değer %0.000154 olarak hesaplanmıştır. Sabit bir N_N değeri için ApN 'nin artmasıyla farkın arttığı tespit edilmiştir ($ApN \leq 250 \text{ m}^2$ 'ye kadar bu gözlem geçerlidir). LPLD-MPL ve GPLD-SPLA stratejileri için ağ yaşam süreleri arasındaki fark diğer stratejilere göre daha yüksek çıkmıştır. Bununla birlikte LPLD-MPL ile elde edilen fark GPLD-SPLA'dan nispeten daha fazladır. Bu analiz sonucunda ağ yaşam süreleri arasındaki farkın üst sınırı %0.00025 olarak tespit edilmiş ve bulunan bu üst sınır Ek 2'de sunulan hatanın üst sınırı ispatına uymaktadır. Örneğin, LPLD'de $ApN = 300 \text{ m}^2$, $M_P = 256$ bayt ve $N_N = 25$ için KTDP ile elde edilen yaşam süresi 469068 tur iken DP gevşetmesi ile elde edilen yaşam süresi 469069.04 tur olarak bulunmuştur. Yani iki çözüm arasındaki fark 1.04 tur olup Ek 2 Sonuç-2'ye göre çözüm hatasının üst sınırı $(N_N - 1) = 24$ tur olduğu için $1.04 \leq 24$ sağlanarak geçerli bir sonuç elde edilmiştir.

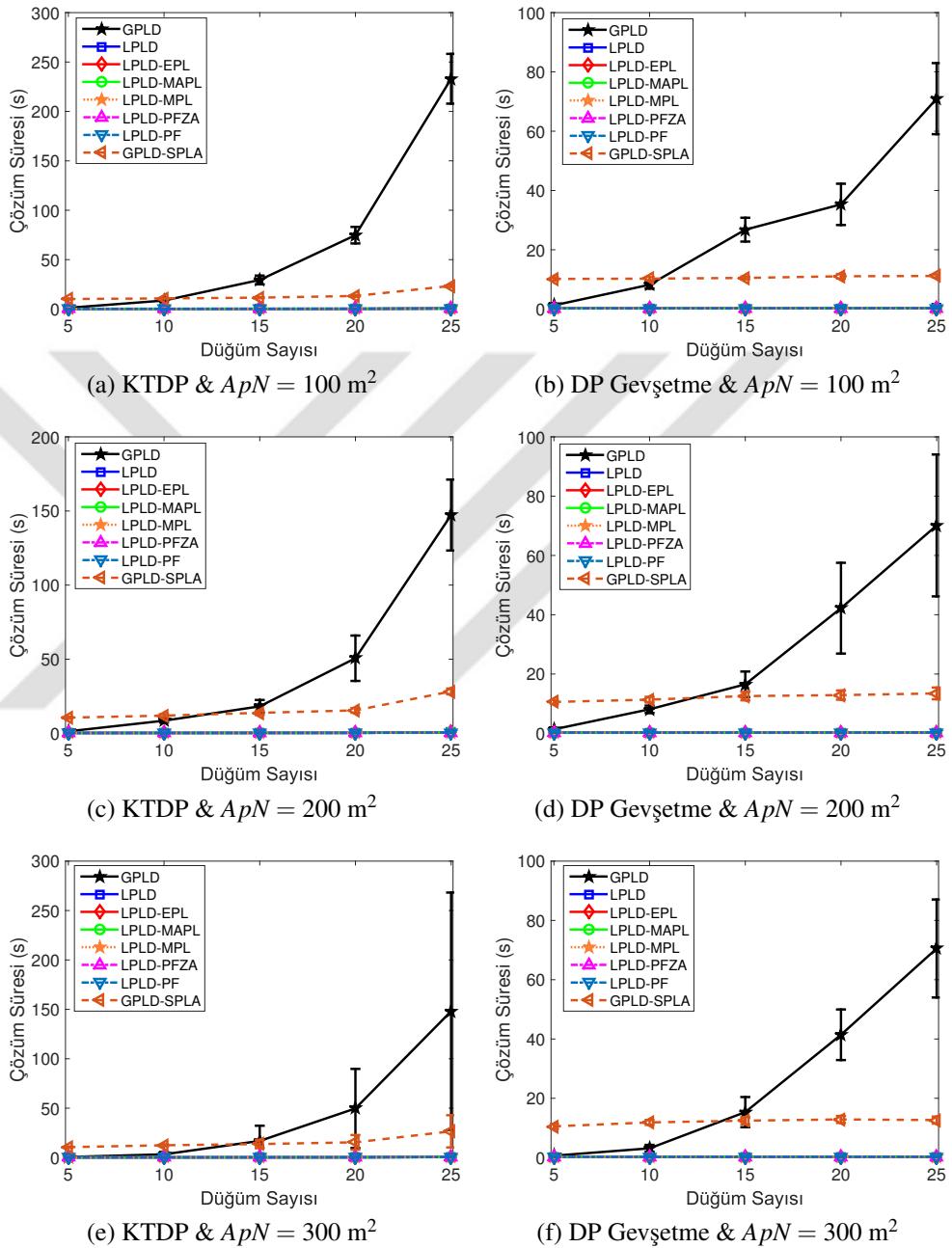


Şekil 5.25: $M_P = 64$ bayt iken $N_{rtr} \rightarrow \infty$ için KTDP ve DP gevşetilmiş modeller ile elde edilen ağ yaşam süreleri arasındaki fark (%)

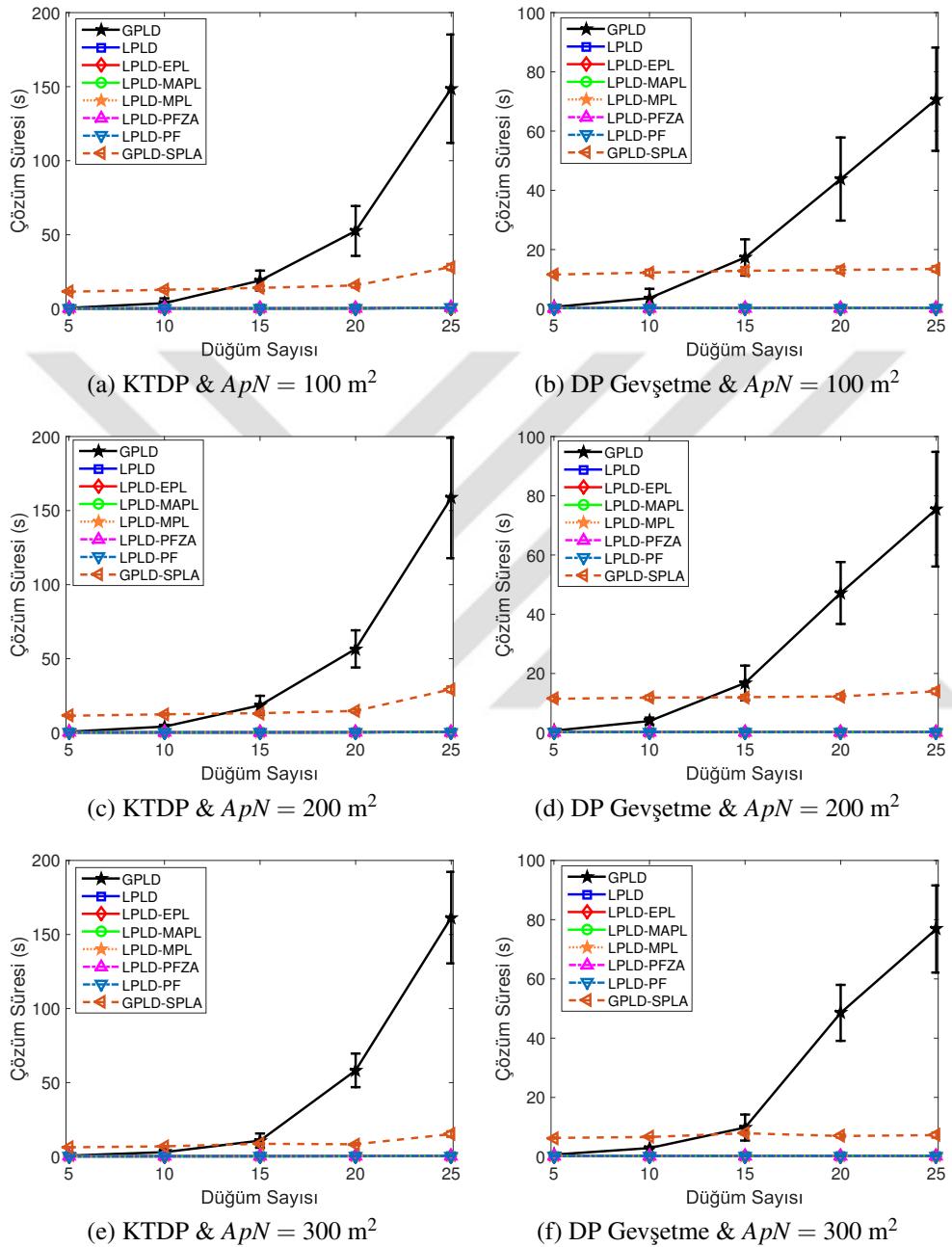
5.3.2 Çözüm süresi analizi

Bu tez çalışmasında kurulan link seviye güç atama stratejilerinin temel amacı global güç seviye atama stratejisindeki hesaplama zorluğunun ağ yaşam süresinden tâviz vermeden kolaylaştırmasıdır. GPLD, LPLD, LPLD-EPL, LPLD-MPL, LPLD-MAPL, LPLD-PF, LPLD-PFZA ve GPLD-SPLA stratejilerinin problem boyutları sırasıyla; $N_N^2 \times l_{mak}^2$, $N_N^2 + l_{mak}^2$, $N_N^2 + l_{mak}$, N_N^2 , $N_N^2 + l_{mak}$, $N_N^2 + l_{mak}$, $N_N^2 + l_{mak}$ ve $N_N^2 \times l_{mak}$ 'tir.

Şekil 5.26'da ve Şekil 5.27'de $N_{rtr} \rightarrow \infty$ varsayıımı altında $M_P = 256$ bayt ve $M_P = 64$ bayt için KTDP modelleri ile DP gevşetilmiş problemlerin ortalama çözüm süreleri standart sapmaları ile (hata çubukları ile) birlikte sunulmuştur. Bu şekillerde LPLD stratejisinin ortalama çözüm zamanının GPLD ve GPLD-SPLA'dan daha düşük olduğu gözlenmiştir. Küçük ölçekli problemlerde ($N_N = 5$) GPLDA-SPLA probleminin çözümü GPLD'den daha uzun sürmektedir. Ancak problem boyutu arttığı zaman GPLD'nin çözüm süresi de artmaktadır. Verilen bir strateji için $N_N = 25$ iken KTDP modellerinin çözüm süresi DP gevşetilmiş problemlerin çözüm süresinin en fazla 2-3 katıdır. $N_N > 25$ için GPLD stratejisi çözümdürmemiştir. Son olarak Çizelge 5.9'da ve Çizelge 5.10'da $M_P = 256$ bayt ve $N_{rtr} \rightarrow \infty$ iken DP gevşetilmiş problemler ile KTDP problemleri için %95 güven aralıklı ortalama çözüm süreleri ilgili okuyucuların bilgisine sunulmuştur.



Şekil 5.26: $M_P = 256$ bayt iken $N_{rtr} \rightarrow \infty$ için KTDP ve DP gevsetilmiş modellerin çözüm süreleri (s)



Şekil 5.27: $M_P = 64$ bayt iken $N_{rtr} \rightarrow \infty$ için KTDP ve DP geversetilmiş modellerin çözüm süreleri (s)

Çizelge 5.9: $M_P = 256$ bayt ve $N_{nr} \rightarrow \infty$ iken DP gevşetilmiş problemler için ortalama çözüm süreleri (s) – %95 güven aralığı.

		Ortalama Çözüm Süresi (s) – %95 güven aralığı							
ApN (m^2)	N_N	GPLD	LPLD	LPLD-EPL	LPLD-MPL	LPLD-MAPL	LPLD-PF	LPLD-PFZA	GPLD-SPLA
100	5	1.25±0.02	0.26±0.01	0.22±0.01	0.22±0.00	0.21±0.00	0.21±0.01	0.20±0.00	10.16±0.10
	10	8.20±0.26	0.26±0.01	0.22±0.01	0.23±0.01	0.21±0.00	0.21±0.01	0.21±0.00	10.26±0.11
	15	26.78±0.79	0.26±0.01	0.23±0.01	0.25±0.01	0.24±0.01	0.21±0.00	0.21±0.00	10.50±0.09
	20	35.31±1.37	0.26±0.01	0.25±0.01	0.25±0.01	0.24±0.01	0.23±0.01	0.26±0.01	11.06±0.15
	25	70.98±2.35	0.31±0.01	0.28±0.01	0.27±0.01	0.24±0.01	0.25±0.01	0.26±0.01	11.16±0.10
200	5	1.34±0.02	0.26±0.00	0.22±0.00	0.23±0.00	0.21±0.00	0.21±0.00	0.22±0.01	10.58±0.13
	10	8.11±0.24	0.26±0.00	0.22±0.00	0.23±0.00	0.21±0.00	0.21±0.01	0.22±0.01	11.36±0.18
	15	16.52±0.85	0.26±0.01	0.23±0.01	0.24±0.01	0.22±0.01	0.22±0.01	0.23±0.01	12.56±0.28
	20	42.21±3.00	0.26±0.01	0.25±0.01	0.25±0.01	0.24±0.01	0.23±0.01	0.25±0.01	12.89±0.30
	25	70.12±4.69	0.30±0.01	0.29±0.01	0.29±0.01	0.26±0.01	0.25±0.01	0.25±0.01	13.46±0.39
300	5	0.63±0.01	0.22±0.00	0.20±0.00	0.21±0.00	0.20±0.00	0.21±0.00	0.22±0.00	10.53±0.16
	10	3.12±0.23	0.23±0.01	0.20±0.01	0.22±0.01	0.20±0.01	0.23±0.01	0.22±0.01	11.86±0.16
	15	15.33±1.00	0.23±0.01	0.20±0.01	0.23±0.01	0.20±0.01	0.23±0.01	0.23±0.01	12.45±0.24
	20	41.43±1.67	0.24±0.01	0.22±0.01	0.23±0.01	0.22±0.01	0.24±0.01	0.24±0.01	12.65±0.23
	25	70.53±3.24	0.25±0.01	0.22±0.01	0.24±0.00	0.22±0.01	0.25±0.01	0.25±0.01	12.87±0.23

Çizelge 5.10: $M_P = 256$ bayt ve $N_{nr} \rightarrow \infty$ iken KTDP problemleri için ortalama çözüm süreleri (s) – %95 güven aralığı.

ApN (m ²)	N_N	Ortalama Çözüm Süresi (s) – %95 güven aralığı							
		GPLD	LPLD	LPLD-EPL	LPLD-MPL	LPLD-PF	LPLD-PFZA	GPLD-SPLA	
100	5	1.25 ± 0.02	0.26 ± 0.01	0.22 ± 0.01	0.22 ± 0.00	0.21 ± 0.00	0.21 ± 0.01	0.20 ± 0.00	10.16 ± 0.10
	10	8.61 ± 0.27	0.27 ± 0.01	0.23 ± 0.01	0.24 ± 0.01	0.22 ± 0.00	0.22 ± 0.01	0.22 ± 0.00	10.77 ± 0.12
	15	29.46 ± 0.87	0.29 ± 0.02	0.25 ± 0.01	0.28 ± 0.01	0.26 ± 0.01	0.23 ± 0.00	0.23 ± 0.00	11.55 ± 0.09
	20	74.77 ± 1.64	0.31 ± 0.01	0.30 ± 0.01	0.30 ± 0.01	0.29 ± 0.01	0.28 ± 0.01	0.31 ± 0.01	13.27 ± 0.18
200	25	233.06 ± 4.93	0.65 ± 0.02	0.59 ± 0.02	0.57 ± 0.01	0.50 ± 0.01	0.53 ± 0.02	0.55 ± 0.02	23.44 ± 0.21
	5	1.34 ± 0.02	0.26 ± 0.00	0.22 ± 0.00	0.23 ± 0.00	0.21 ± 0.00	0.21 ± 0.00	0.22 ± 0.01	10.58 ± 0.13
	10	8.52 ± 0.24	0.27 ± 0.00	0.23 ± 0.00	0.24 ± 0.00	0.22 ± 0.00	0.22 ± 0.01	0.23 ± 0.01	11.93 ± 0.18
	15	18.17 ± 0.85	0.29 ± 0.01	0.25 ± 0.01	0.26 ± 0.01	0.24 ± 0.01	0.24 ± 0.01	0.25 ± 0.01	13.82 ± 0.28
300	20	50.65 ± 3.00	0.31 ± 0.01	0.30 ± 0.01	0.30 ± 0.01	0.29 ± 0.01	0.28 ± 0.01	0.30 ± 0.01	15.47 ± 0.30
	25	147.25 ± 4.69	0.63 ± 0.01	0.61 ± 0.01	0.61 ± 0.01	0.55 ± 0.01	0.53 ± 0.01	0.53 ± 0.01	28.27 ± 0.39
	5	0.63 ± 0.04	0.22 ± 0.02	0.20 ± 0.00	0.21 ± 0.01	0.20 ± 0.01	0.21 ± 0.01	0.22 ± 0.01	10.53 ± 0.13
	10	3.28 ± 0.48	0.24 ± 0.03	0.21 ± 0.01	0.23 ± 0.01	0.21 ± 0.01	0.24 ± 0.01	0.23 ± 0.01	12.45 ± 0.19
300	15	16.86 ± 3.01	0.25 ± 0.03	0.22 ± 0.01	0.25 ± 0.02	0.22 ± 0.01	0.25 ± 0.02	0.25 ± 0.01	13.70 ± 0.83
	20	49.72 ± 7.84	0.29 ± 0.03	0.26 ± 0.02	0.28 ± 0.02	0.26 ± 0.02	0.29 ± 0.02	0.29 ± 0.02	15.44 ± 1.44
	25	148.11 ± 23.53	0.53 ± 0.07	0.46 ± 0.06	0.50 ± 0.05	0.46 ± 0.04	0.53 ± 0.04	0.53 ± 0.03	26.57 ± 3.19

6. TARTIŞMA

Bu çalışmada link seviyesinde tokalaşma için optimum güç seviyesi ataması yaparak KAA yaşam süresini maksimize etmeyi hedefleyen yeni bir ağ protokolü tasarlanmıştır. Bunun yerine literatürde hali hazırda bulunan link seviyesinde tokalaşma güç seviye atama stratejilerinin ağ yaşam süresi açısından performansları daha genel bir çerçeve kapsamında incelenmiştir. Bu genel çerçeve kapsamı ile ağdaki yönlendirme protokollerinin veya algoritmalarının detayları soyutlanmıştır. Gerçekte KAA'nın yaşam süresini eniyileyen KTDP tabanlı modeller ile optimum ağ akışları belirlenerek KAA yönlendirme protokollerinin ideal bir şekilde soyutlanabilmektedir. Bu şekilde incelenmek istenen konuda yönlendirme protokollerinin optimal altı davranışları elimine edilir.

GPLD stratejisinde yönlendirme katmanı kararları (örneğin, düğüm ile baz istasyonu arasındaki en kısa yolun belirlenmesi ve bu yollarda taşınan veri miktarı) ile link seviye kararları (örneğin, güç seviye atamaları) beraber incelenmiştir. Bu yüzden GPLD stratejisi monolitik link ve ağ seviye protokollerinin ideal bir soyutlaması olarak kabul edilebilir. Bu tip tasarımlar genellikle çapraz katman tasarımı (İng. cross layer design) kategorisine girmektedir. Diğer taraftan link seviye stratejilerinde güç seviye atamaları ağ seviye kararlarından bağımsız bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte link seviye stratejilerinde güç ataması yapılrken linkler üzerindeki iletim ve alma enerjileri dikkate alınmaktadır. Bu yüzden link seviye güç atama stratejileri dağıtık algoritma tasarım kılavuzu niteliğinde kullanılabilir.

Bu çalışmada kurulan link seviye katman modeli spesifik bir düğüm donanımı platformu için tasarlanmıştır. Bu tip donanım platformlarının özelliklerinin kullanılması detay seviyede gerçekçi sonuçların alınmasında oldukça etkilidir. Bölüm 1'de bu tez çalışmasının motivasyonundan bahsedilirken çoğu MP tabanlı çalışmalarında basitleştirilmiş varsayımlar altında link seviye katmanı analizi yapıldığı vurgulanmıştır. Bununla birlikte bu çalışmada sunulan model diğer KAA düğüm platformları için ilgili parametrelerin değiştirilmesi ile rahatlıkla modifiye edilebilir.

Bu tez çalışmasında linklerde zaman içinde yol kaybı değerlerinin değişmediği varsayılan stabil bir haberleşme kanalı kullanılmıştır. Bununla birlikte bu tez çalışmasında alınan tüm sonuçlar yüz farklı denemenin ortalaması şeklinde sunulmuştur. Her bir denemede yol kayıp değerleri ve topolojiler değişkenlik gösterse bile kablosuz kanalın değişimi Bölüm 5'te sunulan analizleri etkilememiştir. Çünkü Lin ve arkadaşlarının çalışmasında [32] belirttiği gibi KAA'larda kanalın durumu doğru bir şekilde az ek yük ile rahatlıkla kestirilmektedir. Bu çalışmada her düğüm verilen bir aralık süresi içinde sadece bir tane paketi iletebilmekte veya alabilmektedir. Ancak düğümlerde sadece bir tane aralık süresi bulunmamaktadır. Bölüm 4'te tanımlanan bant genişliği kişidi (bkz. Kısıt 4.33) sayesinde her düğümün ihtiyacı olan bant genişliği miktarı kanal bant genişliği ile sınırlanmıştır.

Bölüm 5'te gerçekleştirilen analizlerde bu eşitsizliğin sağ tarafının sol tarafından en az on kat daha düşük olduğu görülmüştür. Bu yüzden düğümler her turda birden fazla paket göndermek için yeterli zamana sahiptir. Sonuç olarak her düğüm aynı tur içinde aldığı tüm veriyi teslim edebildiği ve bir sonraki hedef düşüme göndermek adına veri üretebildiği için TDMA tabanlı bir zaman çizelgesi oluşturmak mümkündür.



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında link seviyesinde tokalaşma için iletim güç kontrol stratejilerinin KAA yaşam süresine olan etkileri sistematik biçimde incelenmiştir. Bu kapsamda çeşitli iletim güç atama stratejilerini modelleyebilmek adına veri link katmanında bazı soyutlamalar yapan özgün modeller geliştirilmiştir. Literatürde var olan veri paket iletim güç kontrolü üzerine odaklanan çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada hem veri paketleri hem de ACK paketleri beraber düşünülerek link katmanındaki tokalaşmanın MP yöntemleri ile modellenmesi hedeflenmiştir. Kurulan bu modeller yardımcı ile mevcut link seviye tokalaşma yaklaşımlarındaki bazı varsayımların doğruluğu geniş parametre uzayı taranarak nümerik analizler yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması Bölüm 1.2'de sorulan araştırma soruları ile motive edildiği için elde edilen sonuçlar bu sorulara verilen cevaplar şeklinde aşağıda sıralanmıştır:

1. Bu çalışmada Mica2 algılayıcı düğümlerin enerji harcama karakteristikleri ile deneysel olarak performansı kanıtlanmış log-normal gölgeleme yol kayıp modeli gözetilerek çeşitli MP modelleri tasarlanmıştır. Kurulan bu modeller veri link katmanında gerçekleşen mekanizmaları ideal bir şekilde soyutlamıştır. MP modelleri sayesinde veri ve ACK paketlerinin kablosuz kanalda başarısız alınma durumları da düşünülerek link seviyesinde tokalaşma için iletim güç kontrolünün etkileri araştırılmıştır.
2. Her ne kadar bu çalışmada kurulan link seviye katman modeli Mica2 düğüm platformu için tasarlansa da bu çalışmada sunulan modeller diğer KAA düğüm platformları için parametrelerin değiştirilmesi (örneğin, yol kayıp modeli, iletim/alma enerji değerleri vb.) ile rahatlıkla modifiye edilebilir.
3. GPLD ve LPLD stratejilerinin KTDP kesin çözümleri ile DP gevsetilmiş çözümleri arasındaki üst sınırının $l_{mak}^2(N_N - 1)$ ve $(N_N - 1)$ olduğu ispatlanmıştır. Ayrıca KTDP modellerinin DP gevsetmesi yardımcı ile ihmâl edilebilen hatalar (en fazla %0.00025 hata) ile çözüdürülebileceği gösterilmiştir.
4. Veri ve ACK paketleri için iletim güç seviye atamalarının yanında her linkte akan veri miktarının da beraber eniyilenmesi gerekmektedir. Gerçekte tüm bu kararlar ilintiliidir (İng. correlated), çünkü bir linkteki yol kaybı seçilen iletim gücünü etkileyerek o linkte akan veri miktarını da belirler. Maksimum ağ yaşam süresine ulaşmak için veri ve ACK paket iletim seviyelerinin global karar değişkenleri olarak tanımlanması gerekmektedir. Bu sonuç GPLD ile elde edilen ağ yaşam süresinin LPLD'den tüm parametre uzayında daha büyük olması ile de doğrulanmıştır.
5. Her ne kadar tokalaşma için iletim güç seviye atamalarının link seviyesinde yapılması optimal altı çözümler verse de ağ yaşam süresindeki düşüş çok da fazla değildir. Hatta LPLD ağ yaşam süreleri GPLD'den en fazla %1 daha düşüktür.

6. Yapılan analizler sonucu GPLD modelinin LPLD modellerinden en az 2-3 kat daha uzun sürede çözürüldüğü gözlenmiştir. Bu yüzden GPLD stratejisindeki hesaplama zorluğunu azaltmak adına link seviye sezgisel yöntemleri KAA araştırmalarında rahatlıkla kullanılabilir.
7. Sınırlı ve sınırsız yeniden iletim mekanizmalarının ağ yaşam süresine olan etkilerinin incelenmesi bu tez çalışması kapsamında değerlendirilen önemli bir konudur. Bu kapsamda öncelikli olarak sınırsız iletim mekanizması ile sonuçlar alınmış daha sonra IEEE 802.15.4 protokolündeki gibi maksimum yeniden iletim sayısı 3 alınarak ($N_{rtr} = 3$) sonuçlar elde edilmiştir. Bu iki yaklaşımla elde edilen ağ yaşam süreleri arasındaki farkın üst sınırı %0.0003 olarak tespit edilmiştir.
8. Link seviye stratejilerinde hesaplama zorluğunu daha da düşürülmesi adına güç atamalarının tek boyutta yapılması uygun bir yöntemdir. Bu yöntemde veri ve ACK paketleri aynı güç seviyesi ile iletilmektedir. Her ne kadar bu durum nispeten daha hızlı çözümler sunsa da ağ yaşam süresinde az miktarda düşme gözlenmiştir. LPLD-EPL ile elde edilen ağ yaşam süreleri GPLD'den en fazla %1 daha düşüktür.
9. ACK paketlerinin tüm linklerde olası en yüksek güç seviyesi ile iletilmesi ACK paket boyutunun veri paket boyutuna göre çok düşük olması durumunda mantıklı bir yaklaşımdır. $M_P = 256$ bayt iken LPLD-MAPL ile elde edilen ağ yaşam süreleri LPLD'ye göre en fazla %1 daha düşüktür. Ancak ACK paket uzunluğunun veri paket uzunluğuna oranı arttığı zaman ACK paketleri için en yüksek güç seviyesinin kullanılması performans kaybına neden olmaktadır. $M_P = 64$ bayt iken LPLD-MAPL ile elde edilen ağ yaşam süreleri GPLD'ye göre en fazla %6 daha düşüktür. Veri ve ACK paketlerinin sabit iletim gücü ile iletilmesi tercih edilen bir yöntem değildir. LPLD-MPL ve GPLD-SPLA stratejileri ile elde edilen ağ yaşam süreleri GPLD'den sırasıyla %59 ve %71 daha düşük olabilmektedir.
10. Tokalaşmanın başarısız olma olasılığının düşük olduğu ve ACK paketlerinin enerji harcamaları ihmâl edilmediği zaman kayıpsız geri besleme kanal varsayımı KAA'larda uygulanabilmektedir. Ancak daha yüksek başarısız tokalaşma olasılık değerleri için ACK paketlerinin enerji harcamaları sisteme dahil edilse bile ağ yaşam süresi %5 artmakta ve yaniltıcı sonuçlar doğurmaktadır. Bununla birlikte ACK paketlerinin tamamen ihmâl edildiği durumda kayıpsız geri besleme kanalı yüzünden ağ yaşam süresi değerleri %26 daha fazla gözlenebilmektedir.

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen analizler ve sonrasında elde edilen sonuçlardan faydalananlarak KAA'larda iletim güç kontrolü üzerine çalışan araştırmacılar için aşağıda bazı öneriler ile araştırmaya açık konular sunulmuştur:

1. Mica2 düğüm platformları her ne kadar KAA araştırmalarında sıkça kullanıslar da yaklaşık on yıldır piyasada olan bu platform artan veri miktarını karşılayamayacak düzeye gelmek üzeredir. Bu yüzden son zamanlarda KAA çalışmalarında yüksek veri hızını destekleyen Tmote Sky, IRIS vb. platformlar Mica2 düğümlerin yerini almaya başlamıştır. Bu modelde sunulan esneklik yardımı

ile Tmote Sky, IRIS vb. platformlarının uygun parametrelerinin (örneğin, iletim/alma, uyku enerjisi, alıcı hassasiyeti seviyesi, modülasyon tekniği vb.) bu modele yedirilmesi sayesinde yeni analizlerin az bir gayret gerçekleştirilmesi mümkündür.

2. Bu çalışmada KAA'nın kurulduğu ortam toprağa yakın bir seviye olup deneylerle ispat edilen log-normal gölgeleme kanal modeli kullanılmıştır. Ancak daha farklı ortamlar için bu tez çalışmasındaki analizlerin tekrar edilmesi önerilmektedir. Bu şekilde çevresel faktörlerin link seviyesinde tokalaşma için iletim güç kontrolü üzerine olan etkilerinin incelenmesi gerçekleştirilebilir. Bu kapsamda bazı potansiyel çevre önerileri şu şekilde sıralanmıştır; su altı akustik ortam, yeraltı ortamı ve akıllı şebekelerdeki (İng. smart grid) ağır haberleşme ortamı.
3. Her ne kadar kablosuz ortamda haberleşme yapılrken çakışmalar sıkça meydana gelse de bu çalışmada çakışmanın olmadığı TDMA tabanlı bir veri link katmanı tercih edilmiştir. Ancak IEEE 802.15.4 protokolü Taşıyıcı Sezmeli Çoklu Erişim ile Çarpışmadan Kaçınma (İng. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance – CSMA/CA) link seviye katmanı protokolünü kullanarak çarpışmalardan kaçınmayı hedeflemiştir. Bu çalışmada kullanılan TDMA tabanlı bir modelinin yerine CSMA/CA modelinin kullanması gelecek bir çalışma olarak düşünülebilir.
4. Bu çalışmada akışlar her turda aynı rotayı takip ederek baz istasyonuna ulaşmayı hedefler. Ancak bir düğümde meydana gelebilecek bir hata tüm ağın çalışma mekanizmasını bozmaktadır. Bu durumu önlemek adına her turda düğümlerin konumlarını ve durumlarını baz istasyonuna bildirilerek veri akış rotasının bu bilgiler ışığında değiştirilmesi araştırmaya açık bir konudur. Ancak bu tip bir problemin MP yöntemleri ile tasarlanması çözüm süresini ciddi boyutlarda artıracığı öngörmektedir.
5. Bu çalışmada sabit veri uzunlıklarının ($M_P = 256$ bayt ve $M_P = 64$ bayt) kullanıldığı varsayılmıştır. Ancak linkerdeki kanal kalitesine bağlı olarak veri paket uzunluğunun dinamik bir şekilde değiştirilmesi tokalaşmanın başarılı olma olasılığını artıtabilir. Örneğin, kanalın kalitesinin iyi olduğu durumlarda büyük paketler tercih edilirken, kötü kanal kalitesinde düşük paket boyutları tercih edilebilir. Böylece veri paket boyutunun eniyilemesi ile ağ yaşam süresinde iyileştirmeler gerçekleştirilebilir.
6. Askeri uygulamalar için kullanılan mobil KAA'larda iletim güç kontrolünün ve link seviyesinde tokalaşmanın etkilerinin incelenmesi araştırmaya açık başka bir konudur. Mobil KAA'larda topoloji her an değişimleceği için yol kaybı değerleri ve buna bağlı olarak tokalaşmanın başarılı olma olasılığı da değişecektir. Ayrıca mobiliteden kaynaklı sönükleme etkileri de fiziksel katmanda karşılaşılan büyük sorunlardan birisidir. Bu anlık değişimlerin olumsuz etkilerini minimize etmek adına güç seviyelerinin dinamik şekilde değişmesi ve buna bağlı olarak linklerden akan veri miktarının eniyilemesi için MP formülatasyonları geliştirilebilir.
7. KAA'da toplam harcanan enerjinin minimize edilmesini amaçlayan MP formülatasyonları geliştirilerek link seviyesinde tokalaşma için iletim güç kontrol stratejilerinin performanslarının değerlendirilmesi önerilmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] **Gandham, S. R., Dawande, M., Prakash, R., and Venkatesan, S.** Energy efficient schemes for wireless sensor networks with multiple mobile base stations. In *Proc. IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM)*, volume 1, pages 377–381, 2003.
- [2] **Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E.** A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 40(8):102–114, 2002.
- [3] **Ergen, S. C. and Varaiya, P.** On multi-hop routing for energy efficiency. *IEEE Communications Letters*, 9:880–881, 2005.
- [4] **Rahimi, M., Baer, R., Iroezi, O. I., Garcia, J. C., Warrior, J., Estrin, D., and Srivastava, M.** Cyclops: in situ image sensing and interpretation in wireless sensor networks. In *Proc. ACM Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pages 192–204, 2005.
- [5] **Gao, T., Greenspan, D., Welsh, M., Juang, R., and Alm, A.** Vital signs monitoring and patient tracking over a wireless network. In *Proc. Int. Conf. Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE-EMBS)*, pages 102–105, 2005.
- [6] **Zhang, R., Yuan, D., and Wang, Y.** A health monitoring system for wireless sensor networks. In *Proc. IEEE Conf. Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pages 1648–1652, 2007.
- [7] **Zhang, Z. and Hu, X.** Zigbee based wireless sensor networks and their use in medical and health care domain. In *Proc. Int. Conf. Sensing Technology (ICST)*, pages 756–761, 2013.
- [8] **Zhu, Y., Song, J., and Dong, F.** Applications of wireless sensor network in the agriculture environment monitoring. *Procedia Engineering (Elsevier)*, 16:608–614, 2011.
- [9] **Verma, S., Chug, N., and Gadre, D. V.** Wireless sensor network for crop field monitoring. In *Proc. Int. Conf. Recent Trends in Information, Telecommunication, and Computing (ITC)*, pages 207–211, 2010.
- [10] **Sakthipriya, N.** An effective method for crop monitoring using wireless sensor network. *Middle-East Journal of Scientific Research*, 20(9):1127–1132, 2014.
- [11] **Simon, G., Maróti, M., Lédeczi, A., Balogh, G., Kusy, B., Nádas, A., Pap, G., Sallai, J., and Frampton, K.** Sensor network-based countersniper system. In *Proc. Int. Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pages 1–12, 2004.

- [12] **Yick, J., Mukherjee, B., and Ghosal, D.** Analysis of a prediction-based mobility adaptive tracking algorithm. In *Proc. Int. Conf. Broadband Networks (BroadNets)*, volume 1, pages 753–760, 2005.
- [13] **Durisic, M. P., Tafa, Z., Dimic, G., and Milutinovic, V.** A survey of military applications of wireless sensor networks. In *Proc. Mediterranean Conf. Embedded Computing (MECO)*, pages 196–199, 2012.
- [14] **Zhong, D., Ji, W., Liu, Y., Han, J., and Li, S.** An improved routing algorithm of zigbee wireless sensor network for smart home system. In *Proc. Int. Conf. Automation, Robotics, and Applications (ICARA)*, pages 346–350, 2011.
- [15] **Yifeng, W.** The design of smart home system based on wireless sensor network. In *Proc. Int. Conf. Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC)*, pages 106–108, 2013.
- [16] **Li, M. and Lin, H.** Design and implementation of smart home control systems based on wireless sensor networks and power line communications. *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 62(7):4430–4442, 2015.
- [17] **Christin, D., Reinhardt, A., Mogre, P. S., and Steinmetz, R.** Wireless sensor networks and the internet of things: selected challenges. In *Proc. GI/ITG KuVS Fachgespräch 'Drahtlose Sensornetze'*, pages 31–34, 2009.
- [18] **Kortuem, G., Kawsar, F., Fitton, D., and Sundramoorthy, V.** Smart objects as building blocks for the internet of things. *IEEE Internet Computing*, 14(1):44–51, 2010.
- [19] **Bellavista, P., Cardone, G., Corradi, A., and Foschini, L.** Convergence of MANET and WSN in IoT urban scenarios. *IEEE Sensors Journal*, 13(10):3558–3567, 2013.
- [20] **Zorzi, M., Gluhak, A., Lange, S., and Bassi, A.** From today’s intranet of things to a future internet of things: a wireless- and mobility-related view. *IEEE Wireless Communications*, 17(6):44–51, 2010.
- [21] **Heinzelman, W., Chandrakasan, A., and Balakrishnan, H.** An application specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Trans. Wireless Communications*, 1(4):660–670, 2002.
- [22] **Akkaya, K. and Younis, M.** A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad Hoc Networks (Elsevier)*, 3(3):325–349, 2005.
- [23] **Cheng, Z., Perillo, M., and Heinzelman, W.** General network lifetime and cost models for evaluating sensor network deployment strategies. *IEEE Trans. Mobile Computing*, 7(4):484–497, 2008.
- [24] **Ma, M., Yang, Y., and Zhao, M.** Tour planning for mobile data-gathering mechanisms in wireless sensor networks. *IEEE Trans. Vehicular Technology*, 62(4):1472–1483, 2013.

- [25] **Xiang, L., Luo, J., and Rosenberg, C.** Compressed data aggregation: energy-efficient and high-fidelity data collection. *IEEE/ACM Trans. Networking*, 21(6):1722–1735, 2013.
- [26] **Iren, S., Amer, P. D., and Conrad, P. T.** The transport layer: tutorial and survey. *ACM Computing Surveys*, 31(4):360–404, 1999.
- [27] **Afanasyev, A., Tilley, N., Reiher, P., and Kleinrock, L.** Host-to-host congestion control for TCP. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 12(3):304–342, 2010.
- [28] **Hans, S. and Nayyar, A.** A review of de-facto MAC standard: IEEE 802.11 DCF. In *Proc. Int. Conf. Advanced Computing Communication Technologies (ACCT)*, pages 372–376, 2014.
- [29] **Khanafer, M., Guennoun, M., and Mouftah, H. T.** A survey of beacon-enabled IEEE 802.15.4 MAC protocols in wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(2):856–876, 2014.
- [30] **Kumar Somappa, A. A., Ovsthus, K., and Kristensen, L. M.** An industrial perspective on wireless sensor networks: A survey of requirements, protocols, and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(3):1391–1412, 2014.
- [31] **Peterson, L. L. and Davie, B. S.** *Computer Networks, Fifth Edition: A Systems Approach*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 5th edition, 2011.
- [32] **Lin, S., Zhang, J., Zhou, G., Gu, L., He, T., and Stankovic, J. A.** ATPC: Adaptive transmission power control for wireless sensor networks. In *Proc. ACM Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pages 223–236, 2006.
- [33] **Pantazis, N. A. and Vergados, D. D.** A survey on power control issues in wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 9(4):86–107, 2007.
- [34] **Khemapech, I., Miller, A., and Duncan, I.** A survey of transmission power control in wireless sensor networks. In *Proc. Post Graduate Symp. Convergence of Telecommunications, Networking, and Broadcasting (PGNet)*, pages 15–20, 2007.
- [35] **Meghji, M. and Habibi, D.** Investigating transmission power control for wireless sensor networks based on 802.15.4 specifications. *Telecommunication Systems*, 56(2):299–310, 2014.
- [36] **Santi, P. and Blough, D. M.** The critical transmitting range for connectivity in sparse wireless ad hoc networks. *IEEE Trans. Mobile Computing*, 2(1):25–39, 2003.
- [37] **Jeong, J., Culler, D., and Oh, J.** Empirical analysis of transmission power control algorithms for wireless sensor networks. In *Proc. Int. Conf. Networked Sensing Systems (INSS)*, pages 27–34, 2007.

- [38] **Wang, X., Wang, X., Xing, G., and Yao, Y.** Minimum transmission power configuration in real-time sensor networks with overlapping channels. *ACM Trans. Sensor Networks*, 9(2):10:1–10:28, 2013.
- [39] **Vales-Alonso, J., Egea-Lopez, E., Martinez-Sala, A., Pavon-Marino, P., Bueno-Delgado, M. V., and Garcia-Haro, J.** Performance evaluation of MAC transmission power control in wireless sensor networks. *Computer Networks (Elsevier)*, 51:1483–1498, 2007.
- [40] **Srivastava, R. and Koksal, C. E.** Energy optimal transmission scheduling in wireless sensor networks. *IEEE Trans. Wireless Communications*, 9(5):1550–1560, 2010.
- [41] **Barcelo, M., Correa, A., Vicario, J. L., and Morell, A.** Joint routing and transmission power control for collection tree protocol in WSN. In *Proc. IEEE Int. Symp. Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 1989–1993, 2013.
- [42] **Pöttner, W.-B. and Wolf, L.** Probe-based transmission power control for dependable wireless sensor networks. In *Proc. IEEE Int. Conf. Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, pages 44–51, 2013.
- [43] **Kim, Y. C., Choi, I. C., Yun, B., and Kim, H. D.** Enhancement of sensor network lifetime based on simple transmission power control technique. In *Proc. Int. Conf. Consumer Electronics (ICCE)*, pages 349–350, 2012.
- [44] **Zongkai, Y., Dasheng, Z., Wenqing, C., and Jianhua, H.** Prolong the lifetime of wireless sensor network with dichotomy power control. In *Proc. IEEE Region 10 Conf. TENCON*, volume B, pages 231–234 Vol. 2, 2004.
- [45] **Panigrahi, B., Sharma, A., and De, S.** Interference aware power controlled forwarding for lifetime maximisation of wireless ad hoc networks. *IET Wireless Sensor Systems*, 2(1):22–30, 2012.
- [46] **Xin, Y., Guven, T., and Shayman, M.** Relay deployment and power control for lifetime elongation in sensor networks. In *Proc. IEEE Int. Conf. Communications (ICC)*, volume 8, pages 3461–3466, 2006.
- [47] **Mitra, S. K. and Naskar, M. K.** Comparative study of radio models for data gathering in wireless sensor network. *Int. Journal of Computer Applications*, 27(4):49–57, 2011.
- [48] **Cotuk, H., Bicakci, K., Tavli, B., and Uzun, E.** The impact of transmission power control strategies on lifetime of wireless sensor networks. *IEEE Trans. Computers*, 63(11):2866–2879, 2014.
- [49] **Chen, Q., Kanhere, S. S., and Hassan, M.** Analysis of per-node traffic load in multi-hop wireless sensor networks. *IEEE Trans. Wireless Communications*, 8(2):958–967, 2009.
- [50] **Zuniga, M. and Krishnamachari, B.** Analyzing the transitional region in low power wireless links. In *Proc. IEEE Communications Society Conf. Sensor*,

Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON), pages 517–526, 2004.

- [51] **Cerpa, A., Wong, J. L., Kuang, L., Potkonjak, M., and Estrin, D.** Statistical model of lossy links in wireless sensor networks. In *Proc. ACM/IEEE Int. Symp. Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, pages 81–88, 2005.
- [52] **Ganesan, D., Krishnamachari, B., Woo, A., Culler, D., Estrin, D., and Wicker, S.** Complex behavior at scale: An experimental study of low-power wireless sensor networks. Technical report, UCLA Computer Science Department, 2002.
- [53] **Woo, A., Tong, T., and Culler, D.** Taming the underlying challenges of reliable multihop routing in sensor networks. In *Proc. ACM Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pages 14–27, 2003.
- [54] **Zhou, G., He, T., Krishnamurthy, S., and Stankovic, J. A.** Impact of radio irregularity on wireless sensor networks. In *Proc. ACM Int. Conf. Mobile Systems, App., and Services (MobiSys)*, pages 125–138, 2004.
- [55] **Zhao, J. and Govindan, R.** Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks. In *Proc. ACM Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pages 1–13, 2003.
- [56] **Martinez-Sala, A., Molina-Garcia-Pardo, J., Egea-Lopez, E., Vales-Alonso, J., Juan-Llacer, L., and Garcia-Haro, J.** An accurate radio channel model for wireless sensor networks simulation. *Journal of Communications and Networks*, 7(6):401–407, 2005.
- [57] **Kurt, S. and Tavli, B.** Propagation model alternatives for outdoor wireless sensor networks. In *Proc. IFIP Wireless Days (WD)*, 2013.
- [58] **Ishmanov, F., Malik, A. S., and Kim, S. M.** Energy consumption balancing (ECB) issues and mechanisms in wireless sensor networks (WSNs): a comprehensive overview. *European Trans. Telecommunications*, 22(4):151–167, 2011.
- [59] **Gogu, A., Nace, D., Dilo, A., and Meratnia, N.** Review of optimization problems in wireless sensor networks. In Hamilton Ortiz, J., editor, *Telecommunications Networks - Current Status and Future Trends*, pages 153–180. InTech, 2012.
- [60] **Chang, J. H. and Tassiulas, L.** Maximum lifetime routing in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. Networking*, 12(4):609–619, 2004.
- [61] **Kapnidak, V. and Coyle, E. J.** Optimal non-uniform deployment of sensors for detection in single-hop wireless sensor networks. In *Proc. IEEE Communications Society Conf. on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON)*, pages 89–97, 2011.
- [62] **Leinonen, M., Codreanu, M., and Juntti, M.** Distributed joint resource and routing optimization in wireless sensor networks via alternating direction method of multipliers. *IEEE Trans. Wireless Communications*, 12(11):5454–5467, 2013.

- [63] **Kannan, R. and Wei, S.** Approximation algorithms for power-aware scheduling of wireless sensor networks with rate and duty-cycle constraints. *Distributed Computing in Sensor Systems*, 4026:463–479, 2006.
- [64] **Koulali, M., Kobbane, A., El Koutbi, M., Tembine, H., and Ben-Othman, J.** Dynamic power control for energy harvesting wireless multimedia sensor networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012(1):158:1–158:8, 2012.
- [65] **Mallinson, M., Drane, P., and Hussain, S.** Discrete radio power level consumption model in wireless sensor networks. In *Proc. IEEE Int. Conf. Mobile Ad-hoc and Sensor Systems (MASS)*, pages 1–6, 2007.
- [66] **USDN.** Sound Surveillance System. Erişim Adresi: http://www.navy.mil/navydata/cno/n87/usw/issue_25/sosus.htm, Erişim Tarihi: 20 Mart 2016.
- [67] **ZigBee Alliance.** Erişim Adresi: <http://www.zigbee.org/>, Erişim Tarihi: 20 Mart 2016.
- [68] **HART Communication Protocol and Foundation.** Erişim Adresi: <http://en.hartcomm.org/>, Erişim Tarihi: 20 Mart 2016.
- [69] **Bell, G.** A time and a place for standards. *Queue*, 2(6):66–74, 2004.
- [70] **Intel StrongARM SA-1100 Microprocessor.** Erişim Adresi: <http://www.lartmaker.nl/278088.pdf>, Erişim Tarihi: 20 Mart 2016.
- [71] **Texas Instruments MSP430x1xx Family, User's Guide.** Erişim Adresi: <http://www.ti.com/lit/ug/slau049f/slau049f.pdf>, Erişim Tarihi: 20 Mart 2016.
- [72] **ATmel 128L Microcontroller.** Erişim Adresi: <http://www.atmel.com/images/doc2467.pdf>, Erişim Tarihi: 20 Mart 2016.
- [73] **Pottie, G. J. and Kaiser, W. J.** Wireless integrated network sensors. *Communications of the ACM*, 43(5):51–58, 2000.
- [74] **RFM TR1001 868.35 MHz Hybrid Transceiver.** Erişim Adresi: <http://wireless.murata.com/RFM/data/tr1001.pdf>, Erişim Tarihi: 20 Mart 2016.
- [75] **CC1000 - Single Chip Very Low Power RF Transceiver.** Erişim Adresi: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1000.pdf>, Erişim Tarihi: 20 Mart 2016.
- [76] **CC2420 - 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver.** Erişim Adresi: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2420.pdf>, Erişim Tarihi: 20 Mart 2016.
- [77] **TDA525x Series ASK/FSK Transceiver Family.** Erişim Adresi: http://www.infineon.com/dgdl/TDA525x_PB.pdf?fileId=db3a3043191a246301192e80d9cd2c2e, Erişim Tarihi: 20 Mart 2016.

- [78] **Chen, H., Wei, B., and Ma, D.** Energy storage and management system with carbon nanotube supercapacitor and multidirectional power delivery capability for autonomous wireless sensor nodes. *IEEE Trans. Power Electronics*, 25(12):2897–2909, 2010.
- [79] **Dwivedi, A. K., Tiwari, M. K., and Vyas, O. P.** Operating systems for tiny networked sensors: a survey. *Int. Journal of Recent Trends in Engineering*, 1(2):152–157, 2009.
- [80] **Egea-Lopez, E., Vales-Alonso, J., Martinez-Sala, A. S., Pavon-Mariño, P., and Garcia-Haro, J.** Simulation tools for wireless sensor networks. In *Proc. Summer Simulation Multiconference (SPECTS)*, pages 2–9, 2005.
- [81] **Korkkalainen, M., Sallinen, M., Karkkainen, N., and Tukeva, P.** Survey of wireless sensor networks simulation tools for demanding applications. In *Proc. International Conference on Networking and Services (ICNS)*, pages 102–106, 2009.
- [82] **Yu, Y.** *Information Processing and Routing in Wireless Sensor Networks*. World Scientific Publishing Co., Inc., River Edge, NJ, USA, 2007.
- [83] **Asada, G., Dong, M., Lin, T. S., Newberg, F., Pottie, G., Kaiser, W. J., and Marcy, H. O.** Wireless integrated network sensors: low power systems on a chip. In *Proc. European Solid-State Circuits Conf. (ESSCIRC)*, pages 9–16, 1998.
- [84] **μ AMPS.** Erişim Adresi: <http://www-mtl.mit.edu/researchgroups/icsystems/uamps/>, Erişim Tarihi: 20 Mart 2016.
- [85] **MICA2 - Wireless Measurement System.** Erişim Adresi: <https://www.eol.ucar.edu/isf/facilities/isa/internal/CrossBow/DataSheets/mica2.pdf>, Erişim Tarihi: 20 Mart 2016.
- [86] **Tmote SKY Datasheet.** Erişim Adresi: <http://www.eecs.harvard.edu/~konrad/projects/shimmer/references/tmote-sky-datasheet.pdf>, Erişim Tarihi: 20 Mart 2016.
- [87] **IRIS Datasheet.** Erişim Adresi: http://www.memsic.com/userfiles/files/Datasheets/WSN/IRIS_Datasheet.pdf, Erişim Tarihi: 20 Mart 2016.
- [88] **Yick, J., Mukherjee, B., and Ghosal, D.** Wireless sensor network survey. *Computer Networks (Elsevier)*, 52(12):2292–2330, 2008.
- [89] **Buratti, C., Conti, A., Dardari, D., and Verdome, R.** An overview on wireless sensor networks technology and evolution. *Sensors (Basel)*, 9(9):6869–6896, 2009.
- [90] **Sharma, D., Verma, S., and Sharma, K.** Network topologies in wireless sensor networks: a review. *Int. Journal of Electronics & Communication Technology (IJECT)*, 4(3):152–157, 2013.

- [91] **Younis, O., Krunz, M., and Ramasubramanian, S.** Node clustering in wireless sensor networks: recent developments and deployment challenges. *IEEE Network*, 20(3):20–25, 2006.
- [92] **Li, X., Mao, Y., and Liang, Y.** A survey on topology control in wireless sensor networks. In *Proc. Int. Conf. Control, Automation, Robotics, and Vision (ICARCV)*, pages 251–255, 2008.
- [93] **Zhang, X., Ding, X., Lu, S., and Chen, G.** Principles for energy-efficient topology control in wireless sensor networks. In *Proc. Int. Conf. Wireless Communications, Networking, and Mobile Computing (WiCom)*, pages 1–3, 2009.
- [94] **Santi, P.** Topology control in wireless ad hoc and sensor networks. *ACM Computing Survey*, 37(2):164–194, 2005.
- [95] **Ye, W., Heidemann, J., and Estrin, D.** Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. Networking*, 12(3):493–506, 2004.
- [96] **van Dam, T. and Langendoen, K.** An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In *Proc. Int. Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pages 171–180, 2003.
- [97] **Demirkol, I., Ersoy, C., and Alagoz, F.** MAC protocols for wireless sensor networks: a survey. *IEEE Communications Magazine*, 44(4):115–121, 2006.
- [98] **Huang, P., Xiao, L., Soltani, S., Mutka, M. W., and Xi, N.** The evolution of MAC protocols in wireless sensor networks: a survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 15(1):101–120, 2013.
- [99] **Ye, W., Heidemann, J., and Estrin, D.** An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks. In *Proc. Joint Conf. IEEE Computer Communications Societies (INFOCOM)*, volume 3, pages 1567–1576, 2002.
- [100] **Al-Karaki, J. N. and Kamal, A. E.** Routing techniques in wireless sensor networks: a survey. *IEEE Wireless Communications*, 11(6):6–28, 2004.
- [101] **Zheng, J. and Jamalipour, A.** *Wireless Sensor Networks: A Networking Perspective*. Wiley-IEEE Press, 2009.
- [102] **Y., W., Attebury, G., and Ramamurthy, B.** A survey of security issues in wireless sensor networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 8(2):2–23, 2006.
- [103] **Chan, H. and Perrig, A.** Security and privacy in sensor networks. *IEEE Computer Magazine*, 36(10):103–105, 2003.
- [104] **Yildiz, H. U., Bicakci, K., Tavli, B., Gultekin, H., and Incebacak, D.** Maximizing wireless sensor network lifetime by communication/computation energy optimization of non-repudiation security service: Node level versus network level strategies. *Ad Hoc Networks (Elsevier)*, 37, Part 2:301–323, 2016.

- [105] **Perrig, A., Szewczyk, R., Tygar, J. D., Wen, V., and Culler, D.** SPINS: Security protocols for sensor networks. *Wireless Networks*, 8(5):521–534, 2002.
- [106] **Bradley, S. P., Hax, A. C., and Magnanti, T. L.** *Applied mathematical programming*. Addison-Wesley, 1977.
- [107] **Chinneck, J. W.** Practical optimization: a gentle introduction, 2011. Erişim Adresi: <http://www.sce.carleton.ca/faculty/chinneck/po.html>, Erişim Tarihi: 20 Mart 2016.
- [108] **Bunday, B. D.** *Basic Optimization Methods*. Edward Arnold Ltd., 1984.
- [109] **Kahaner, D., Moler, C., and Nash, S.** *Numerical Methods and Software*. Prentice-Hall, Inc., 1989.
- [110] **Gass, S. I. and Assad, A. A.** *An Annotated Timeline of Operations Research: An Informal History (International Series in Operations Research & Management Science)*. Springer-Verlag New York, Inc., 2006.
- [111] **Gottfried, B. S. and Weisman, J.** *Introduction to Optimization Theory*. Prentice-Hall Inc., 1973.
- [112] **Bazaraa, M. S., Jarvis, J. J., and Sherali, H. D.** *Linear Programming and Network Flows*. Wiley-Interscience, 2004.
- [113] **Dantzig, G.** *Linear Programming and Extensions*. Princeton University Press, 1963.
- [114] **Dantzig, G.** A history of scientific computing. chapter Origins of the Simplex Method, pages 141–151. ACM, 1990.
- [115] **Hillier, F. S. and Lieberman, G. J.** *Introduction to Mathematical Programming*. McGraw-Hill Inc., 1990.
- [116] **Karmarkar, N.** A new polynomial time algorithm for linear programming. *Combinatorica*, 4:373–395, 1984.
- [117] **Cavalier, T. M. and Soyster, A. L.** Some computational experience and a modification of the karmarkar algorithm, 1985.
- [118] **Hooker, J. N.** Karmarkar's linear programming algorithm. *Interfaces*, 16:75–90, 1986.
- [119] **Barnes, E. R.** A variation on Karmarkar's algorithm for solving linear programming problems. *Mathematical Programming*, 36:174–182, 1986.
- [120] **Vanderbei, R. J., Meketon, M. S., and Freedman, B. A.** A modification of Karmarkar's linear programming algorithm. *Algorithmica*, 1:395–407, 1986.
- [121] **Mizuno, S., Todd, M. J., and Ye, Y.** On adaptive step primal-dual interior-point algorithms for linear programming. *Mathematics of Operations Research*, 18:964–981, 1993.

- [122] **Smith, J. C. and Taskin, Z. C.** A tutorial guide to mixed-integer programming models and solution techniques, 2007.
- [123] **Karp, R. M.** Reducibility among combinatorial problems. In *Complexity of Computer Computations*, pages 85–103. Plenum Press, 1972.
- [124] **Land, B. H. and Doig, A. G.** An automatic method for solving discrete programming problems. *Econometrica*, 28(3):497–520, 1960.
- [125] **Balas, E.** An additive algorithm for solving linear programs with zero-one variables. *Operations Research*, 13(4):517–546, 1960.
- [126] **Dakin, R. J.** A tree search algorithm for mixed integer programming problems. *Computer Journal*, 8(3):250–255, 1965.
- [127] **Gomory, R. E.** Outline of an algorithm for integer solution to linear programs. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 64(5):275–278, 1958.
- [128] **Johnson, E. L., Nemhauser, G. L., and Savelsbergh, M. W. P.** Progress in linear programming based branch-and-bound algorithms: An exposition. *INFORMS Journal on Computing*, 12(1):2–23, 2000.
- [129] **Bazaraa, M. S., Sherali, H. D., and Shetty, C. M.** *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*. Wiley-Interscience, New York, 2006.
- [130] **Kuhn, H. W. and Tucker, A. W.** Nonlinear programming. In *Proc. Second Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, pages 481–492, Berkeley, Calif., 1951. University of California Press.
- [131] **Turkay, M. and Grossmann, I. E.** Logic-based MINLP algorithms for the optimal synthesis of process networks. *Computers & Chemical Engineering (Elsevier)*, 20:959–978, 1996.
- [132] **Gupta, O. K. and Ravindran, V.** Branch and bound experiments in convex nonlinear integer programming. *Management Science*, 31:1533–1546, 1985.
- [133] **Leyffer, S.** Integrating SQP and branch-and-bound for mixed integer nonlinear programming. *Computational Optimization and Applications*, 18:295–309, 2001.
- [134] **Stubbs, R. and S. Mehrotra, S.** A branch-and-cut method for 0-1 mixed convex programming. *Mathematical Programming*, 86:515–532, 1999.
- [135] **Benders, J. F.** Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems. *Numerische Mathematik*, 4:238–252, 1962.
- [136] **Turing, A. M.** On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem. *Proc. London Mathematical Society*, 2(42):230–265, 1936.
- [137] **General Algebraic Modeling System (GAMS).** Erişim Adresi: <http://www.gams.com/>, Erişim Tarihi: 20 Mart 2016.

- [138] **Wright, S. J.** GAMS: A User's Guide. Erişim Adresi: <http://pages.cs.wisc.edu/swright/635/docs/GAMSUsersGuide.pdf>, Erişim Tarihi: 20 Mart 2016.
- [139] **MATLAB - The Language of Technical Computing.** Erişim Adresi: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>, Erişim Tarihi: 20 Mart 2016.
- [140] **Sundararaman, B., Buy, U., and Kshemkalyani, A. D.** Clock synchronization for wireless sensor networks: a survey. *Ad Hoc Networks (Elsevier)*, 3(3):7281–323, 2005.
- [141] **Bicakci, K., Gultekin, H., and Tavli, B.** The impact of one-time energy costs on network lifetime in wireless sensor networks. *IEEE Communications Letters*, 13(12):905–907, 2009.
- [142] **Cotuk, H., Tavli, B., Bicakci, K., and Akgun, M. B.** The impact of bandwidth constraints on the energy consumption of wireless sensor networks. In *Proc. IEEE Wireless Communication and Networking Conference (WCNC)*, pages 2787–2792, 2014.
- [143] **Anastasi, G., Conti, M., Falchi, A., Gregori, E., and Passarella, A.** Performance measurements of motes sensor networks. In *Proc. ACM Int. Conf. Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)*, pages 174–181, 2004.
- [144] **Schuts, M., Zhu, F., Heidarian, F., and Vaandrager, F. W.** Modelling clock synchronization in the Chess gMAC WSN protocol. In *Proc. W. Quantitative Formal Methods: Theory and Applications (QFM)*, volume 13, pages 41–54, 2009.
- [145] **Ganeriwal, S., Kumar, R., and Srivastava, M. B.** Timing-sync protocol for sensor networks. In *Proc. ACM Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*, pages 138–149, 2003.
- [146] **Gungor, V. C., Bin, L., and Hancke, G. P.** Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid. *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 57(10):3557–3564, 2010.
- [147] **Kilic, N. and Gungor, V. C.** Analysis of low power wireless links in smart grid environments. *Computer Networks (Elsevier)*, 57:1192–1203, 2013.
- [148] **Macnamara, T.** *Introduction to Antenna Placement and Installation.* Aerospace Series. Wiley, 2010.
- [149] **Cheng, M., Gong, X., and Cai, L.** Joint routing and link rate allocation under bandwidth and energy constraints in sensor networks. *IEEE Trans. Wireless Communications*, 8(7):3770–3779, 2009.
- [150] **Kim, T. and Kim, S.** Random power control in wireless ad hoc networks. *IEEE Communications Letters*, 9(12):1046–1048, 2005.

- [151] **Wang, Y., Vuran, M. C., and Goddard, S.** Cross-layer analysis of the end-to-end delay distribution in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. Networking*, 20(1):305–318, 2012.
- [152] **Shi, L. and Fapojuwo, A.** TDMA scheduling with optimized energy efficiency and minimum delay in clustered wireless sensor networks. *IEEE Trans. Mobile Computing*, 9(7):927–940, 2010.
- [153] **Ji, S., Beyah, R., and Cai, Z.** Snapshot and continuous data collection in probabilistic wireless sensor networks. *IEEE Trans. Mobile Computing*, 13(3):626–637, 2014.
- [154] **Liu, Y., Zhang, Q., and Ni, L. M.** Opportunity-based topology control in wireless sensor networks. *IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems*, 21(3):405–416, 2010.
- [155] **Hoá, T. D. and Kim, D.** Minimum latency and energy efficiency routing with lossy link awareness in wireless sensor networks. In *Proc. IEEE Int. W. Factory Communication Systems (WFCS)*, pages 75–78, 2012.
- [156] **Fu, Y., Sha, M., Hackmann, G., and Lu, C.** Practical control of transmission power for wireless sensor networks. In *Proc. IEEE Int. Conf. Network Protocols (ICNP)*, pages 1–10, 2012.
- [157] **Yun, Z., Bai, X., Xuan, D., Lai, T. H., and Jia, W.** Optimal deployment patterns for full coverage and k -connectivity ($k \leq 6$) wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. Networking*, 18(3):934–947, 2010.
- [158] **Sun, Y., Du, S., Gurewitz, O., and Johnson, D. B.** DW-MAC: A low latency, energy efficient demand-wakeup MAC protocol for wireless sensor networks. In *Proc. ACM Int. Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, pages 53–62, 2008.
- [159] **Wolsey, L.** *Integer Programming*. Wiley Interscience Publication, 1998.
- [160] **Ferris, M. C., Jain, R., and Dirkse, S.** GDXMRW: Interfacing GAMS and MATLAB, 2011. Erişim Adresi: <http://lyle.smu.edu/emis/docs/GAMS/GDX/gdxmrw.pdf>, Erişim Tarihi: 20 Mart 2016.

EKLER

- EK 1 :** MATLAB/GAMS Entegrasyonu
EK 2 : DP Gevsetmesinin Hata Sınırları





EK 1

Bu bölümde MATLAB ile GAMS’ın entegrasyonunun nasıl gerçekleştirildiği kısaca açıklanmıştır. MATLAB ile GAMS’ı beraber kullanmanın iki amacı vardır. Birincisi MATLAB kullanıcıları için MP problemlerini modelleyip çözürebilen bir aracın tanıtılması olup ikinci amaç ise MATLAB’ın hesaplama araçlarının gücünden faydalananarak GAMS parametrelerinin önceden hızlı bir şekilde hesaplanması ve önceden MATLAB ile hesaplanan bu değerlerin GAMS’e iletildikten sonra optimum şekilde çözürlerek MATLAB ortamında tekrardan yorumlanmasıdır. Her ne kadar bu bölümde açıklanan konu[160] numaralı çalışmada detaylandırılsa da buradaki amaç hızlı ve pratik bir şekilde MATLAB ile GAMS’ın nasıl entegre edileceği üzerinedir.

MATLAB ve GAMS’ın kurulması ile entegrasyonun en önemli aşaması tamamlanmış olur. GAMS’ın en azından 23.4 versiyonun yüklenmesi ile tüm MATLAB/GAMS araçları bu yükleme ile birlikte gelmektedir. Yükleme tamamlandıktan sonra MATLAB’da GAMS’ın yüklü olduğu klasör, File → Set Path → Add with Subfolders şeklinde tanıtılr. Bu aşamadan sonra MATLAB’dan GAMS’e; GAMS’den MATLAB’a veri transferi başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilir.

Veri transferinin gerçekleştirilmesi GAMS Veri Takas (Ing. GAMS Data EXchange – GDX) dosyaları aracılığıyla yapılmaktadır. GDX dosyaları içinde MATLAB’dan alınan veriler veya GAMS’den gelen sonuçlar bulunmaktadır. MATLAB/GAMS araçları içinde gelen üç tane önemli fonksiyon bulunmaktadır: (i) rgdx, (ii) wgdx ve (iii) gams.

rgdx dosyası GAMS’den gelen sonuçların MATLAB ortamında okunması için kullanılmakta, wgdx GAMS’e veri göndermek adına MATLAB ortamında veri yazma için kullanılmakta ve son olarak gams fonksiyonu ise GAMS modelinin çağrılmaması için kullanılmaktadır. Aşağıdaki örnek MATLAB kodu, MATLAB ile bazı hesaplamalar yapıldıktan sonra GDX dosyası içine konulacak verileri belirlemekte ve GAMS modelini çağrırmaktadır.

```
function [out] = myCode(ii,jj,alpha_val,Etx_val,Erx_val)
Is.name = 'i';
Is.val = linspace(1,ii,ii)';
Is.type = 'set';

Js.name = 'j';
Js.val = linspace(1,jj,jj)';
Js.type = 'set';

alphas.name = 'alpha';
alphas.type = 'parameter';
alphas.val = alpha_val;
```

```

alphas.form = 'full';
alpha.dim=0;

Etxs.name = 'Etx';
Etxs.type = 'parameter';
Etxs.val = Etx_val;
Etxs.form = 'full';
Etxs.dim=1;

Erxs.name = 'Erx';
Erxs.type = 'parameter';
Erxs.val = Erx_val;
Erxs.form = 'full';
Erxs.dim=2;

% GDX dosyasına verileri yazma:

wgdx ('myinputGDXfile', Is, Js, alphas, Etxs, Erxs);

% GAMS modelini çalıştırma:

%gams('myGAMSmodel');
system(['gams myGAMSmodel lo=2 --TRIP=']);

% GDX dosyasından sonuçları alma:

result1.name = 'lifetime';
result1.field = '1';
rs1 = rgdx ('myoutputGDXfile', result1);
out = rs1.val;

end

```

Yukarıdaki kodda görüleceği üzere daha önceden MATLAB ortamında değerleri elde edilen `ii`, `jj`, `alpha_val`, `Etx_val` ve `Erx_val` değişkenleri öncelikle GDX dosyasına aktarılmaktadır. GAMS'e bu verileri aktaran GDX dosyasının adı `myinputGDXfile.gdx`'dir. Bu örnek için `ii` ve `jj` GAMS modelinin setlerini, `alpha_val` sıfır boyutlu bir parametreyi (skalar değer), `Etx_val` tek boyutlu bir parametreyi (vektör) ve `Erx_val` ise iki boyutlu bir parametreyi (matris) temsil etmektedir. `wgdx` fonksiyonu sadece *set* ve *parametre* değerlerini yazdırabilmektedir. Bu parametre değerlerinin GAMS'deki isimleri `... .name = '...' .` şeklindedir. Son olarak `wgdx` fonksiyonunda her set veya parametre için ilgili objelerin yaratılıp (bu örnekte objeler: `Is`, `Js`, `alphas`, `Etxs` ve `Erxs`'dir) bu şekilde GDX dosyasına aktarılması gerekmektedir.

GAMS modelinin iki farklı çağrıılma biçimi bulunmaktadır. En bilinen yöntem `gams ('myGAMSmodel')` olup kimi zaman MATLAB döngüleri içinde hatalara sebep olmaktadır. Bu durumu önlemek için `system(['gams myGAMSmodel lo=2 --TRIP='])` kod parçasının kullanılmasının daha uygun olduğu gözlenmiştir.

Çağırılan GAMS modelinin ismi myGAMSmodel.gms olup aşağıda GAMS kodunun detayları paylaşılmıştır.

```
Set i, j;

Parameters alpha, Etx(i), Erx(i,j) ;

* GDX dosyasını okuma:

$gdxin myinputGDXfile
$load i j alpha Etx Erx
$gdxin

Variables lifetime;

Equations ...;

* Kısıtlar buraya yazılır:
...

Model lifetimeMaximization /ALL/;

Solve lifetimeMaximization using lp maximizing lifetime;

* GAMS ile elde edilen sonuçlar GDX dosyasına yazdırılır:

execute_unload 'myoutputGDXfile', lifetime
```

Bu GAMS modelinde setler ve parametreler tanımlandıktan sonra herhangi bir değer içlerine girilmez. Bu bilgilerin myinputGDXfile.gdx dosyasından gelmesi için GAMS kodunda \$gdxin myinputGDXfile ile yazıldıktan sonra yüklenilmek istenen setler ve parametreler \$load ile yüklenir. Daha sonra tekrar \$gdxin ile myinputGDXfile.gdx dosyası kapatılır.

GAMS ile kurulan model çözüldükten sonra lifetime değişkenin sonucunun MATLAB'a gönderilmesi istenirse execute_unload komutu ile myoutputGDXfile.gdx dosyası oluşturulur ve içine lifetime değeri atılır. MATLAB kodunda ise lifetime değişkeninin okunması için rgdx fonksiyonu kullanılır.

result1.name = 'lifetime' ile GAMS'deki lifetime değişkeni alınır ve seviyesi (alınan sonuç) olarak result1.field = '1' seçilir. Burada 1 yerine; m (marjinal), lo (alt sınır), up (üst sınır) ve s (ölçek) gibi farklı opsiyonlar da seçilebilir. Son olarak, elde edilen sonucun değeri out = rs1.val ile MATLAB ortamında gösterilir.



EK 2

Bu bölümde GPLD ve LPLD stratejilerinin KTDP kesin çözümleri ve DP gevşetilmiş çözümleri arasındaki farkın üst sınırının $l_{\max}^2(N_N - 1)$ ve $(N_N - 1)$ olduğu ispatlanmıştır.

Tanım 1. Bölüm 4.4.1'de sunulan ağ yaşam süresi eniyileme probleminin olurlu çözümleri tamsayılı olarak $\{[f_{ij}^{lk}]_{IP}, N_{rnd-IP}\}$ ve sürekli olarak $\{[f_{ij}^{lk}]_{LP}, N_{rnd-LP}\}$ şeklinde tanımlansın. Ayrıca $\{[f_{ij}^{lk}]_{LP \rightarrow IP}, N_{rnd-LP}\}$ KTDP çözümünün akış değişkenlerinin DP gevşetilmesi yardımıyla bir düşük tamsayıya yuvarlanması ile elde edilen, ağ yaşam süresini olduğu şekilde tutan ve büyük bir olasılıkla olmayan çözümü olsun. Kolaylık açısından $\theta_{ji}(l, k) = 1$ ($N_{rtr} \rightarrow \infty$) ve $s_i = 1$ olarak tanımlandığı varsayılsın.

Lemma 1. KTDP çözümü $\{[f_{ij}^{lk}]_{LP \rightarrow MIP}, N_{rnd-LP}\}$ akış dengeleme kısıtı dışındaki diğer tüm kısıtları sağlamaktadır.

Kanıt. GPLD stratejisini tanımlayan kısıtlar 4.28–4.34 arasında verilmiştir.

1. Akış değişkenlerinin negatif olmama kısıtı (bkz. Kısıt 4.28) DP gevşetilmiş çözüm için sağlanmaktadır. Yuvarlama işlemi ile negatif değerler alınamayacağı için $[f_{ij}^{lk}]_{LP \rightarrow IP} \geq 0$ 'dır.
2. Akış dengeleme kısıtı (bkz. Kısıt 4.29 ve 4.30) KTDP çözümü için sağlanmak zorunda değildir.
3. Modelde verilen enerji kısıtı (bkz. Kısıt 4.31 ve 4.32) KTDP çözümü için sağlanmaktadır. $[f_{ij}^{lk}]_{LP \rightarrow IP}$ değerleri $[f_{ij}^{lk}]_{LP}$ 'den daha küçük veya eşit olduğu için iletim ve alma enerji değerleri (bkz. Kısıt 4.32) KTDP çözüm için DP gevşetilmiş çözüme göre daha düşüktür. Veri toplama enerjisi (E_{DA}) iki çözüm için de değişimmemektedir. Uyku enerjisi ($P_{slp}(N_{rnd} \times T_{rnd} - T_{bsy,i})$) KTDP çözüm için DP gevşetilmiş çözüme göre daha büyük veya eşittir. Çünkü $[f_{ij}^{lk}]_{LP \rightarrow IP}$ değerleri $[f_{ij}^{lk}]_{LP}$ 'den küçük veya eşittir (bkz. Kısıt 4.32). DP gevşetilmiş çözüm ile karşılaştırıldığında KTDP çözümleri için iletim ve alma enerji değerlerinin daha düşük olduğu söylenebilir. Ancak KTDP çözümün uyku enerjisi DP gevşetilmiş çözüme göre daha büyük veya eşittir. Ağ yaşam süresi (N_{rnd}) KTDP ve DP gevşetilmiş çözüm için aynı olduğu için artan uyku zamanı iletim ve alma enerji terimlerinin daha fazla harcanmasına neden olur. Ancak uyku enerji terimi verilen bir durumdaki en düşük enerji harcaması olduğu için yüksek uyku zamanlı bir çözüm düşük uyku zamanlı bir çözüme göre daha az enerji harcamaktadır.

□

4. Bant genişliği kısıdı (bkz. Kısıt 4.33 ve 4.34) KTDP çözümü ile sağlanmaktadır. Çünkü $[f_{ij}^{lk}]_{LP \rightarrow IP}$ değerleri $[f_{ij}^{lk}]_{LP}$ değerlerinden daha düşük veya eşittir (bkz. Kısıt 4.33).

Tanım 2. Bölüm 4.4.1'de sunulan KTDP modelini modifiye ederek alternatif bir KTDP probleminin kurulduğu varsayılsın. Bu problemin adı yedek problem A1 olsun (İng. Auxillary 1 problem). A1 probleminde akış dengeleme kısıdının (bkz. Kısıt 4.29) şu şekilde modifiye edildiği varsayılsın:

$$\sum_{l \in S_L} \sum_{k \in S_L} \sum_{(i,j) \in A} f_{ij}^{lk} - \sum_{l \in S_L} \sum_{k \in S_L} \sum_{(j,i) \in A} \theta_{ji}(l,k) f_{ji}^{lk} = N_{rnd}^1 s_i + s_i^2, \forall i \in W. \quad (7.1)$$

Bu kısıtta N_{rnd}^1 'in negatif olmayan bir sürekli değişken ve s_i^2 'nin ise işaretini belli olmayan sürekli bir değişken olduğu varsayılsın. Bundan sonraki denklemlerde orijinal problemin ağ yaşam süresi N_{rnd} ; N_{rnd}^1 ile değiştirilmiştir.

Lemma 2. $[f_{ij}^{lk}]_{LP \rightarrow MIP}, N_{rnd-LP}$ KTDP çözümü ve uygun şekilde seçilen s_i^2 değerinin toplamı A1 problemi için olurlu bir çözümüdür.

Kanıt. Orijinal ve modifiye edilmiş eniyileme problemleri arasındaki tek fark akış dengeleme kısıdı olup modifiye edilmiş problemin diğer tüm kısıtları Lemma 1'in ispatına göre KTDP çözümü tarafından sağlanmaktadır. A1 probleminin akış dengeleme kısıdı s_i^2 değişkenlerinin modele eklenmesi ile sağlanabilecek durumdadır. Bu değişkenler sayesinde yuvarlamadan kaynaklı sürekli akış değişkenlerinin boşlukları s_i^2 'lerin uygun bir şekilde belirlenmesi ile doldurularak akış dengeleme kısıdının sağlanması garantiler. \square

Yorum 1. $N_{rnd-LP} = N_{rnd}^1$.

Yorum 2. A1 probleminde ağ yaşam süresi N_{rnd}^1 olarak tanımlanmıştır. Her düğüm her turda s_i tane paket üretmektedir. Akışlar negatif olmayan tamsayılı değişkenler şeklinde ifade edilmiştir. i düğümün ağ yaşam süresi boyunca ürettiği veri miktarı $N_{rnd}^1 \times s_i$ paket olup s_i^2 tane veri paketini bu toplama eklemekte veya bu toplamdan çıkarmaktadır.

Lemma 3. $N_{rnd}^1 s_i \geq 2|l_{mak}^2(N_N - 1)|$ eşitsizliğini kullanarak $|s_i^2| \leq l_{mak}^2(N_N - 1)$ şartını sağlayan s_i^2 değişkenleri yardımıyla $N_{rnd}^1 s_i + s_i^2 = \widehat{N_{rnd}^1} s_i + \widehat{s_i^2}$ eşitliğini sağlayan negatif olmayan $\widehat{N_{rnd}^1}$ ve $\widehat{s_i^2}$ değerleri bulunabilir.

Kanıt. Herhangi bir algılayıcı düğüm en fazla l_{mak}^2 güç seviye kombinasyonu ile ($N_N - 1$) tane giren veya çıkan linke sahip olabilir. Bu yüzden bir düğüme giren veya bir düğümden çıkan linklerdeki yuvarlamadan kaynaklı akış tutarsızlığı en fazla $|l_{mak}^2(N_N - 1)|$ olur.

1)| tanedir. $N_{rnd}^1 s_i + s_i^2$ iki tane tamsayılı değişkenin farkı olduğu için tamsayılı bir değerdir. $|s_i^2| \leq l_{mak}^2(N_N - 1)$ ve $N_{rnd}^1 s_i \geq 0$ olduğu için $N_{rnd}^1 s_i \geq 2|l_{mak}^2(N_N - 1)|$ olduğu durumda $(N_{rnd}^1 s_i + s_i^2) \geq 0$ 'dır. \square

Lemma 4. $\frac{\widehat{N_{rnd}^1}}{N_{rnd-LP}} \geq \frac{\zeta(i)}{\widehat{N_{rnd}^1 T_{rnd}}}$, $\forall i \in V$ şartı sağlandığı için $\widehat{[f_{ij}^{lk}]_{LP \rightarrow MIP}}, \widehat{N_{rnd}^1}$ ve $\widehat{s_i^2} = 0$ negatif olmayan tamsayılı değişkenleri ile A1 problemi için olurlu bir çözüm oluşturabilir.

Kanıt. Aşağıda Lemma 4'ün ispatı sunulmuştur:

1. Problemlerin doğrusal olmasından dolayı akışların paket bazlı ayırtılması mümkündür. Ayrıca kaynak düğümde üretilen ve hedef düğüme gitmesi istenen her paket için yollar oluşturulabilir. Ancak her linkteki akışların toplamı modifiye edilmiş akış dengeleme kişisini sağlamak zorundadır. Doğrusallıktan dolayı kaynak düğümden $\widehat{N_{rnd}^1 s_i + s_i^2}$ 'den daha az olmak üzere istenilen adette paket silmek mümkündür. Bu yüzden bir i düğümünden $\widehat{s_i^2}$ sayıda paketin silinmesi halinde bile modifiye edilmiş akış dengeleme kişisi sağlanmış olur. Akışların negatif olmama şartı korunurken modifiye edilmiş akış dengeleme kişisinin korunmasıyla $\widehat{s_i^2} = 0$ elde edilebilir.
2. $\widehat{N_{rnd}^1}$ değerlerinin negatif olmadığı Lemma 3'te kanıtlanmıştır.
3. $\widehat{[f_{ij}^{lk}]_{LP \rightarrow MIP}}$ akışları $[f_{ij}^{lk}]_{LP \rightarrow MIP}$ akışlarından küçük veya eşit olduğu için enerji kişisi korunmuştur.
4. Bant genişliği kişidi $\{[f_{ij}^{lk}]_{LP \rightarrow MIP}, N_{rnd-LP}\}$ ile sağlanmaktadır. Bu kısıt ayrıca $\{\widehat{[f_{ij}^{lk}]_{LP \rightarrow MIP}}, \widehat{N_{rnd-LP}}\}$ ile de sağlanmaktadır. Bu yüzden $\frac{\widehat{N_{rnd}^1}}{N_{rnd-LP}} \geq \frac{\zeta(i)}{\widehat{N_{rnd}^1 T_{rnd}}}, \forall i \in V$ eşitsizliği sağlandığı için $\{\widehat{[f_{ij}^{lk}]_{LP \rightarrow MIP}}, \widehat{N_{rnd}^1}\}$ ile bant genişliği kişidi sağlanmaktadır.

\square

Sonuç 1. A1 probleminin olurlu çözümü $\{\widehat{[f_{ij}^{lk}]_{LP \rightarrow MIP}}, \widehat{N_{rnd}^1}\}$ ve $\widehat{s_i^2} = 0$ değişkenleri ile sağlanmakta olup bu çözüm ayrıca orijinal KTDP probleminin de olurlu çözümüdür.

Teorem 1. $(N_{rnd-LP} - N_{rnd-IP}) \leq l_{mak}^2(N_N - 1)$.

Kanıt. $\{\widehat{[f_{ij}^{lk}]_{LP \rightarrow MIP}}, \widehat{N_{rnd}^1}\}$ değişkeni KTDP problemi için olurlu bir çözüm olduğu için optimal tamsayılı çözüm ile optimal DP çözüm arasındaki fark $l_{mak}^2(N_N - 1)$ 'den büyük olamaz. \square

Sonuç 2. *GPLD dışındaki tüm stratejiler için her düğümden çıkan ve her düğüme giren link sayısı $(N_N - 1)$ ile sınırlandırıldığı için $(N_{rnd-LP} - N_{rnd-IP}) \leq (N_N - 1)$ eşitsizliği sağlanmaktadır.*

$\frac{\widehat{N_{rnd}^1}}{N_{rnd-LP}} \geq \frac{\zeta(i)}{\widehat{N_{rnd}^1 T_{rnd}}}$, $\forall i \in V$ kişidi $N_{rnd-LP} > 10^5$, $N_N \leq 25$, $\frac{\widehat{N_{rnd}^1}}{N_{rnd-LP}} \geq 0.8$ ve $\frac{\zeta(i)}{\widehat{N_{rnd}^1 T_{rnd}}} \leq 0.05$ olduğu için bu tez çalışmasındaki uygulamalar için sıkı bir kısıt değildir. Bu yüzden bu kişinin sağlanması için geniş bir aralık bulunmaktadır. Ayrıca LPLD stratejisi için $\frac{\widehat{N_{rnd}^1}}{N_{rnd-LP}} \geq 0.999$ 'dur.



ÖZGEÇMIŞ

Ad-Soyad : Hüseyin Uğur YILDIZ

Uyruğu : T.C.

Doğum Tarihi ve Yeri : 05.01.1988, Diyarbakır

E-posta : huyildiz@etu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2009, Bilkent Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2013, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Kablosuz Haberleşme
- **Doktora** : 2016, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi,
Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Kablosuz Haberleşme

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2015-Halen	TAI	Aviyonik Tasarım Mühendisi
2010-2015	Türk Telekom	Uzman Ağ Mühendisi
2008	Nortel Netaş	Stajyer
2007	Vodafone	Stajyer

YABANCI DİL: İngilizce

UZMANLIK ALANLARI:

Ağ Tasarımı	Ağ Yönetimi
Kablosuz Haberleşme Sistemleri	Kablosuz Algılayıcı Ağlar
Tasarsız Ağlar	Optimizasyon

YER ALDIĞI PROJELER:

Yıl	Proje Adı	Yer
2015-Halen	ANKA	TAI
2013-2015	TTNET Roket	Türk Telekom
2013-2015	Gezinti	Türk Telekom
2012-2015	Adil Kullanım Hizmeti	Türk Telekom
2011-2015	Güvenli İnternet Hizmeti	Türk Telekom

SEMİNERLER & KONUŞMALAR:

- **Yıldız, H. U.** (2014, Jan 22). *Transmission Power Control for Link-Level Handshaking in Wireless Sensor Networks*, Seminar presented at University of California, Irvine, CA, USA, Host: Prof. Ender Ayanoğlu.
- **Yıldız, H. U.** (2014, Jan 23). *Transmission Power Control for Link-Level Handshaking in Wireless Sensor Networks*, Seminar presented at University of Southern California, Los Angeles, CA, USA, Host: Prof. Bhaskar Krishnamachari.
- **Yıldız, H. U.** (2014, Feb 05). *A Seminar on Wireless Sensor Networks, Network Optimization, and Mathematical Programming*, Seminar presented at Carleton University, Ottawa, ON, Canada, Host: Prof. Halim Yanıkömeroğlu.
- **Yıldız, H. U.** (2014, Feb 07). *Transmission Power Control for Link-Level Handshaking in Wireless Sensor Networks*, Seminar presented at University at Buffalo, Buffalo, NY, USA, Host: Assoc. Prof. Tommaso Melodia.
- **Yıldız, H. U.** (2014, Feb 11). *Transmission Power Control for Link-Level Handshaking in Wireless Sensor Networks*, Seminar presented at University of Rochester, Rochester, NY, USA, Host: Prof. Wendi Heinzelman.
- **Yıldız, H. U.** (2014, Dec 03). *The Impact of Random Power Assignment in Handshaking on Wireless Sensor Network Lifetime*, Seminar presented at University of Texas at Dallas, Dallas, TX, USA, Host: Prof. Murat Torlak.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Yildiz, H. U.**, Tavli, B., and Yanikomeroglu, H., 2016. Transmission Power Control for Link-Level Handshaking in Wireless Sensor Networks, *IEEE Sensors Journal*, 16(2), 561–576.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Uluslararası hakemli dergilerde yayınlanan makaleler (SCI & SSCI & Arts and Humanities):

- **Yildiz, H. U.**, Ciftler, B. S., Tavli, B., Bicakci, K., and Incebacak D., 2016. The Impact of Incomplete Secure Connectivity on the Lifetime of Wireless Sensor Networks, *IEEE Systems Journal*, [Kabul Edildi].
- Akbas, A., **Yildiz, H. U.**, Tavli, B., and Uludag, S., 2016. Joint Optimization of Transmission Power Level and Packet Size for WSN Lifetime Maximization, *IEEE Sensors Journal*, [Kabul Edildi].
- **Yildiz, H. U.**, Bicakci, K., Tavli, B., Gultekin, H., and Incebacak, D., 2016. Maximizing Wireless Sensor Network Lifetime by Communication/Computation Energy Optimization: Node Level versus Network Level Strategies, *Ad Hoc Networks*, 37(2), 301–323.
- **Yildiz, H. U.**, Temiz, M., and Tavli, B., 2015. Impact of Limiting Hop Count on the Lifetime of Wireless Sensor Networks, *IEEE Communications Letters*, 19(4), 569–572.
- Batmaz, A. U., **Yildiz, H. U.**, and Tavli, B., 2014. Role of Unidirectionality and Reverse Path Length on Wireless Sensor Network Lifetime, *IEEE Sensors Journal*, 14(11), 3971–3982.

Uluslararası bilimsel toplantınlarda sunulan ve bildiri kitabında (Proceedings) basılan bildiriler:

- **Yildiz, H. U.** and Tavli, B., 2015. Prolonging Wireless Sensor Network Lifetime by Optimal Utilization of Compressive Sensing, *Proc. IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp. 1–6, Dec 6–10, San Diego, CA, USA.
- **Yildiz, H. U.** and Tavli, B., 2014. The Impact of Random Power Assignment in Handshaking on Wireless Sensor Network Lifetime, *Proc. IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp. 201–206, Dec 8–12, Austin, TX, USA.
- **Yildiz, H. U.**, Kurt, S., and Tavli, B., 2014. The Impact of Near-Ground Path Loss Modeling on Wireless Sensor Network Lifetime, *Proc. IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, pp. 1114–1119, Oct 6–8, Baltimore, MD, USA.

- Akbas, A., **Yıldız, H. U.**, and Tavli, B., 2014. Data Packet Length Optimization for Wireless Sensor Network Lifetime Maximization, *Proc. International Conference on Communications (COMM)*, pp. 1–6, May 29–31, Bucharest, Romania.
- **Yıldız, H. U.**, Bicakci, K., and Tavli, B., 2014. Communication/Computation Tradeoffs in Wireless Sensor Networks: Comparing Network-Level and Node-Level Strategies, *Proc. IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks (WiSNet)*, pp. 49–51, Jan 19–23, Newport Beach, CA, USA.

HİZMETLER:

Teknik Program Komite Üyesi: • International Conference on New Energy and Future Energy Systems (2016),

Hakem: • IEEE Sensors Applications Symposium (SAS 2016),
• IEEE International Conference on Communications (ICC 2016),
• Computer Networks (Elsevier),
• Ad Hoc Networks (Elsevier),
• IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob 2015),
• Wireless Personal Communications (Springer),
• Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering,
• International Journal of Distributed Sensor Networks (Hindawi),
• IEEE Communications Surveys and Tutorials,

Oturum Başkanı: • IEEE Global Communications Conference Workshop on Management of Emerging Networks (GLOBECOM-MENS 2014).

TEKNİK YETENEKLER:

Bilgisayar Ağları:	Kablosuz Algılayıcı Ağlar, Ağ Fonksiyonları için Sanallaştırma, Tasarsız Ağlar, Derin Paket Analizi, TCP/IP, Routing & Switching, Multicast, Cisco Teknolojileri, MAC Protokoller, Yazılım Tabanlı Ağlar, Nesnelerin İnterneti.
Telekomünikasyon:	IEEE 802.11, IEEE 802.15.4, 4G/LTE, Modülasyon, Radyo Yayılm Modelleri, Kanal Gürültüsü, Gölgeleme, Sönümleme, Kaynak Kodlaması, Kanal Kodlaması.
Bilgisayar Bilimleri:	Doğrusal Programlama, Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama, Hesaplama Karşılıklık Analizi, Kriptografi, Seçgisel Algoritmalar.
Programlama Dilleri:	Java, C, Assembly.
Paket Programlar:	MATLAB, Simulink, GAMS, CPLEX, Xpress, L ^A T _E X, SecureCRT, Wireshark, Eclipse, SoapUI, PSpice & ORCAD, Microsoft Office.
İsletim Sistemleri:	Microsoft Windows, Cisco IOS, Mac OS, iOS.

ÜYE OLUNAN TOPLULUKLAR:

- IEEE Öğrenci Üyesi (#92620886),
- IEEE Communications Society,
- TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Ankara Şubesi.