

Non-Terrestrial Networks (NTN)

1st Berkay GÖZÜBÜYÜK

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
YTÜ

İstanbul, Türkiye

berkay.gozubuyuk@std.yildiz.edu.tr

2nd Rubar GÜNDÜZ

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
YTÜ

İstanbul, Türkiye

rubar.gunduz@std.yildiz.edu.tr

3rd Yasin AKTAŞ

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
YTÜ

İstanbul, Türkiye

yasin.aktas1@std.yildiz.edu.tr

4th Fatih ÖZTÜRK

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
YTÜ

İstanbul, Türkiye

fatih.ozturk2@std.yildiz.edu.tr

Abstract—Küresel iletişimin kesintisiz ve erişilebilir hale gelmesi, çağımız dijital dünyasında temel bir gerksinim halini almıştır. Bu ihtiyacı karşılamaya yönelik geliştirilen Non-Terrestrial Networks, kara altyapılarının ötesindedir. NTN'ler uydular ve hava yolu platformları aracılığıyla iletişim hizmeti sunmayı hedefleyen yenilikçi bir yaklaşımdır. Bu bildiride, NTN kavramı detaylı biçimde incelenmektedir. NTN'lerin mimarisi, bileşenleri ve teknolojik altyapısı açıklanmakta; güncel kullanım alanları ve gelecek potansiyeli değerlendirilmektedir. Ayrıca NTN sistemleri ile karşılaşılan teknik zorluklara ve çözüm önerilerine de değinilmektedir. Bu çalışma, ayrıca NTN'nin 6G vizyonundaki konumu ve küresel kapsama hedefi bağlamında önemini vurgulamayı amaçlamaktadır.

Index Terms—Non-Terrestrial Networks (NTN), Uydur Haberleşmesi, LEO, HAPS, 3GPP Release 17, Handover, Beamforming, Soft Actor-Critic (SAC), Access Class Barring (ACB), 5G/6G Entegrasyonu, Rastgele Erişim (Random Access), Uydur İnterneti, Takviyeli Öğrenme (Reinforcement Learning)

I. GİRİŞ

Çağımızda haberleşme teknolojileri, yalnızca bireyler arası iletişimin değil; aynı zamanda küresel ticaretin, bilimsel iş birliklerinin, afet yönetiminin ve savunma sistemlerinin temeli haline gelmiştir. Ancak dünya nüfusunun yaklaşık %35'inin hâlâ internete erişemediğini düşündüğümüzde, mevcut karasal ağların kapsama alanı ve erişilebilirlik bakımından sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu eksiği kapatmak üzere geliştirilen Non-Terrestrial Networks, haberleşme sistemlerini karasal sınırların ötesine taşıyarak, yeryüzünde tamamlayıcı ve kapsamlı bir iletişim altyapısı sunmayı hedeflemektedir.

NTN sistemleri, öncelikle düşük yoğunluklu nüfus bölgeleri, okyanus ötesi alanlar, afet bölgeleri ve kara ağ altyapısının kurulmasının zor olduğu alanlarda kritik bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, 6G teknolojilerinin şekillenmekte olduğu bu dönemde, NTN sistemlerinin mobil haberleşmedeki rolü giderek artmaktadır.

Bu raporun amacı; Non-Terrestrial Networks kavramını kapsamlı şekilde ele alarak, mimarisini, bileşenlerini, güncel uygulama alanlarını ve vad ettiği geleceği incelemektir. Aynı zamanda mevcut teknolojik zorluklar ve çözüm yolları tartışılarak, konuyla ilgili akademik ve endüstriyel gelişmelere ışık tutulması amaçlanmaktadır.

II. LİTERATÜR ÖZETİ

Non-Terrestrial Networks (NTNs), özellikle 5G ve 6G haberleşme sistemleri alanında, küresel bağlantının sağlanması ve dijital eşitsizliğin azaltılması için temel bir bileşen haline gelmiştir. NTN'lerin sunduğu geniş kapsama, hızlı konuşlandırma ve coğrafi bağımsızlık gibi avantajları, onu karasal ağların ulaşamadığı kırsal, okaynus ötesi veya afet bölgeleri gibi zorlayıcı alanlarda etkili kılmaktadır. Bu bağlamda yapılan son araştırmalar, NTNs'in mimari yapısından el değiştirme mekanizmalarına, standardizasyon süreçlerinden entegrasyon tekniklerine kadar birçok boyutunu incelemektedir.

Mevcut çalışmaların genel odak noktası, NTN'lerin mimarisidir. Low Earth Orbit uyduların dinamik yapılarından dolayı, sabit altyapı gerektirmeden hızlı ve geniş kapsamlı iletişim sağlanabilmektedir. Bu bağlamda, Qi ve arkadaşları tarafından önerilen yeni nesil NTN mimarisi, 6G'ye geçiş sürecinde operatörlerin maliyet efektif esnek sistemler kurmasına olanak tanımaktadır [1]. Bu mimaride, hem sabit hem de mobil kullanıcılar için optimize edilmiş farklı türde entegrasyon yapıları önerilmiş ve senaryoya göre uydu platformlarının hem transparan hem de rejeneratif modlarda çalışabileceği ifade edilmiştir. Ayrıca Guidotti ve arkadaşları, 3GPP Release 17 ile başlayan NTN standardizasyon sürecinin Release 20'ye kadar olan gelişimini kapsamlı şekilde incelemiştir. 6G'nin temel taşlarından biri olarak NTN'lerin rolünü vurgulamıştır [2]. Bu çalışmalar, uydu sistemlerinin 5G çekirdek ağ (core network) ile doğrudan entegre edilmesini sağlayan çeşitli mimari düzenlemeleri ve ağ protokollerini detaylandırmaktadır.

Hareketli uydu platformlarının kullanıldığı NTN yapılarında el değiştirme süreçleri çeşitli teknik zorluklar ile karşılaşmaktadır. Karasal ağlardan farklı olarak, NTN ortamında hem kullanıcılar hem de baz istasyonu görevini üstlenen uydular hareket halindedir. Bu nedenle, geleneksel sinyal gücü temelli handover kararları yetersiz kalabilmekte ve bağlantı sürekliliği sekteye uğrayabilmektedir. Demir ve arkadaşları, bu noktada farklı handover tetikleme metotlarını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Bu uygun

parametre ayarlamalarıyla ölçüm tabanlı yöntemlerin üstünlük sağlayabileceğini göstermiştir [3]. Ayrıca, Kim ve Ryu tarafından geliştirilen konum tabanlı tetikleyici koşul algoritması, özellikle LEO uydusu senaryolarında sinyal dalgalanmalarını azaltarak daha kararlı el değiştirme süreçleri sağlamayı hedeflemektedir [4]. Söz konusu araştırmalar, NTN ortamında meydana gelen ping-pong handover, bağlantı kopmaları ve artan gecikmeler gibi temel problemler üzerine çözüm önerileri sunmaktadır.

NTN'lerin ağ altyapılarıyla bütünleşik hale gelmesinde standardizasyon büyük önem arz etmektedir. 3GPP'nin 15. sürümünden itibaren başlayan NTN odaklı çalışmalar, 17. sürümle birlikte standardizasyon adımları atmıştır. Kyung ve arkadaşları, 3GPP'nin NTN'leri başlangıçta yalnızca veri aktarımı yapan röleler olarak konumlandırdığını ortaya koymuştur. Ancak zamanla bu sistemlerin kullanıcı düzlemi (UPF) ve kontrol düzlemi (NFs) fonksiyonlarını da destekleyecek şekilde gelişmiştir [5]. Bu gelişmeler, uyduların sadece iletim aracı olmaktan çıkıp aktif birer ağ düğümü haline gelmesini sağlamaktadır. Ayrıca, Lin tarafından yapılan analizde, 3GPP dışında ITU ve CCSA gibi uluslararası kuruluşların da FMSC (Fixed-Mobile-Satellite Convergence) çatısı altında sabit, mobil ve uydusu iletişimini bir araya getirecek standartları geliştirdiği görülmektedir [6]. Bu standartlar, sadece bağlantı kalitesini artırmakla kalmamakta, aynı zamanda farklı coğrafi koşullarda hizmet sunumunun sürekliliğini garanti altına almayı hedeflemektedir.

Kanal modelleme, link bütçesi ve kapsama planlaması da NTN's'in fiziksel katman performansını etkileyen önemli alanlardır. Özellikle LEO uyduların konumlandırılması, yer bağlantı noktalarıyla olan haberleşmenin kalitesi açısından kritik rol oynar. Bu kapsamda yapılan analizler, farklı yörünge ve dizilim senaryoları için sinyal zayıflaması, gecikme ve sinyal-gürültü oranı gibi parametrelerin performansa etkilerini detaylandırmaktadır [7]. Benzer şekilde Sattarzadeh vd. tarafından sunulan değerlendirmede, NTN'lerin IoT ve yayın hizmetlerinde kapasite artırımı ve düşük gecikme sağlayabileceği vurgulanmaktadır [8].

NTN'lerin sadece haberleşme için değil, algılama amacıyla da kullanılabileceği üzerine çeşitli fikirler ortaya atılıyor. Özellikle yüksek frekanslı taşıyıcıların, elektromanyetik dalga davranışlarını analiz ederek çevreyi algılayabileceği söyleniyor. Matera ve ekibinin geliştirdiği ISAC altyapısı da bu durumu destekler nitelikte. Bu altyapıyla sadece haberleşme değil, aynı zamanda konumlama, nesne tanıma ve çevre modelleme gibi görevler de yerine getirilebiliyor [9]. Üstelik bu durum, uzay sistemlerinin sürdürülebilirliği açısından da önemli. Tek bir altyapının birden çok amaca hizmet etmesi sayesinde, hem uydusu sayısında azalma sağlanıyor hem de maliyetle birlikte çevresel etkiler de düşürülmüş oluyor.

Sonuç olarak, NTN'ler üzerine yapılan mevcut literatür, bu teknolojinin yalnızca ulaşılması zor karasal alanlara bağlantı sağlamanın ötesindedir. Literatür ayrıca ağ mimarisi, mobilite yönetimi, standartlara uygunluk, performans optimizasyonu ve çoklu görev yetenekleriyle geleceğin 6G sistemlerinin ayrılmaz bir parçası olacağını göstermektedir. Ancak

bu entegrasyonun başarıyla sonuçlanabilmesi için için kanal modelleme, el değiştirme algoritmaları ve standardizasyon sürecine yönelik araştırmaların çok disiplinli yaklaşımlar ile sürdürülmesi gerekmektedir.

III. NON-TERRESTRIAL NETWORKS TANIMI VE SINIFLANDIRMASI

Non-Terrestrial Networks, geleneksel kara iletişim altyapılarından farklı olarak, yer yüzünün ötesinde — atmosferin üst katmanlarında ve uzayda — konumlanan platformlar aracılığıyla haberleşme hizmeti sunan sistemlerdir. Bu sistemler; düşük yoğunluklu nüfus bölgeleri, okyanus ötesi alanlar, dağlık bölgeler ve afet sonrası iletişim altyapısının hasar aldığı durumlarda kritik öneme sahiptir. NTN'ler, sadece alternatif bir iletişim yolu değil, aynı zamanda karasal ağları destekleyici küresel bir haberleşme altyapısı olarak değerlendirilmektedir.

Bu kapsamda, uluslararası haberleşme standartlarını belirleyen 3rd Generation Partnership Project (3GPP), mobil ağların geleceğini şekillendiren teknik özellikler yayımlar. 3GPP'nin Release 17 sürümünde, NTN sistemleri resmi olarak 5G mimarisine entegre edilmiş ve bu sistemlerin mobil haberleşmedeki rolü tanımlanmıştır. Bu sayede, uydusu ve hava tabanlı ağlar da tıpkı baz istasyonları gibi ağı bir elemanı olarak çalışabilir duruma gelmiştir. Aynı sürümle birlikte, NTN ortamlarında kullanıcı cihazlarının farklı uydular arasında geçiş yapabilmesini sağlayan konum tabanlı ve zaman tabanlı handover (el değiştirme) tetikleyicileri de standardize edilmiştir [4].

NTN sistemleri, platformlarının bulunduğu yüksekliğe ve işlevselliğine göre üç temel grupta sınıflandırılabilir:

A. Uydusu Tabanlı Sistemler

Uydular ile haberleşme, en yaygın NTN biçimidir. Uydular, yörüngelerine göre şu şekilde sınıflandırılır:

- **LEO (Low Earth Orbit):** Yaklaşık 200 – 2.000 km yükseklikte yer alır. Gecikme süresi düşüktür (30–50 ms) ve yüksek veri iletimi sağlar. Starlink, OneWeb ve Amazon Kuiper gibi modern projeler bu sınıfa dahildir.
- **MEO (Medium Earth Orbit):** Yaklaşık 2.000 – 35.000 km arasında konumlanır. GPS ve benzeri navigasyon sistemleri MEO uydularıyla çalışır. Gecikme süresi LEO'ya kıyasla daha fazladır (100 ms civarı).
- **GEO (Geostationary Earth Orbit):** 35.786 km yükseklikte sabit bir konumda kalırlar. Genel olarak TV yayıncılığı ve hava durumu gözlemleri için kullanılır. Ancak yüksek gecikme (500–600 ms) nedeniyle düşük gecikme gerektiren uygulama alanlarında kullanımı sınırlıdır.

B. Yüksek İrtifa Platform Sistemleri (HAPS)

HAPS sistemleri, atmosferin stratosfer katmanında sabit bir konumda bulunan insansız hava araçları (UAV), balonlar ve güneş enerjili hava araçları gibi araçları içerir. Uydulara kıyasla daha düşük maliyetli sahip olup, belirli bölgelere hedefe yönelik hizmet sunabilirler. Facebook'un Aquila projesi ve Alphabet'in Loon balonları bu kategoride yer almaktadır.

C. Diğer Platformlar

NTN tanımına dahil diğer platformlar arasında:

- **Uçak Tabanlı İletişim Sistemleri:** Ticari uçaklarda kullanılan Wi-Fi hizmetleri için geçici NTN altyapısı sağlanır.
- **İHA Tabanlı Ağlar (Drone Networks):** Belirli görevler için kısa süreli lokal iletişim sağlar.

Bu çeşitlilik, NTN'leri yalnızca alternatif bir iletişim yolu olmaktan çıkarıp, karasal ağlarla bütünleşik çalışan hibrit sistemlerin bir parçası haline getirmektedir.

IV. NTN MIMARISI VE BİLEŞENLERİ

NTN'ler, iletişimin hem uzay hem de yer bileşenleri üzerinden yürütülmesini sağlayan çok katmanlı bir mimariye sahiptir. Bu yapı, karasal ağlarla birlikte çalışarak kapsama alanı açısından sorunsuz olacak şekilde tasarlanmıştır. NTN mimarisi temel olarak üç ana bileşenden oluşmaktadır: uzay segmenti, yer segmenti ve kullanıcı segmenti.

A. Uzay Segmenti

Uzay segmenti, uydular ve yüksek irtifa platformlarını kapsar. Bu segmentin temel görevi, yer ile yer arasında veya yer ile uydular arasında veri aktarımı gerçekleştirmektir. Uzay segmentinin bileşenleri:

- **LEO/MEO/GEO Uyduları:** Farklı görevler için farklı yörüngelerde çalışırlar. LEO uyduları, düşük gecikme süresi ile mobil servisler için idealdir.
- **HAPS Platformları:** Uzay segmentinin bir parçası olarak kabul edilir ve yüksek irtifadan sabit kapsama sağlar.
- **Uydular Arası Bağlantılar:** Özellikle LEO konumlanmalarında, uyduların kendi aralarında veri aktarımı yapımlarını sağlar. Bu, yer istasyonuna bağımlılığı azaltır.

Geleneksel NTN uyduları genellikle yalnızca sinyal ileten "transparan modda" çalışır. Ancak 3GPP'nin son standartlarında, uyduların sinyalleri işleyebildiği "regeneratif mod" desteği de sunulmuştur. Bu sayede uydular veri yönlendirme ve oturma yönetimi gibi işlemleri de gerçekleştiren aktif bir ağ bileşeni hâline gelmektedir. Kullanıcı verilerinin uyduda yönlendirilmesi ve bazı kontrol işlevlerinin de uydulara taşınması (örneğin AMF, SMF), NTN sistemlerini daha esnek ve gecikmeye dayanıklı hâle getirmektedir [5].

B. Yer Segmenti

Yer segmenti, uyduların yer istasyonları ve ağ geçitlerinden oluşur. Bu birimler, uzaydaki platformlarla çift yönlü iletişim sağlar. Görevleri:

- **Yer İstasyonları:** Uydularla iletişime geçerek veri gönderimi ve alımı yapar. Ayrıca yörünge kontrolü ve yönlendirme işlemlerini üstlenir.
- **Ağ Geçitleri:** NTN sistemini karasal ağlarla entegre eder. Böylece internet, 5G/6G altyapılarıyla bağlantı kurulabilir.
- **Ağ Kontrol Merkezleri:** Trafik yönetimi, frekans koordinasyonu ve kaynak planlamasını gerçekleştirir.

C. Kullanıcı Segmenti

Bu segment, doğrudan haberleşme hizmetinden yararlanan kullanıcı ekipmanları içerir. Örneğin:

- Uydular Telefonları ve Modemleri
- Uydudan İnternet Alan Ev Antenleri (VSAT)
- 5G/6G Uyumluluğu Olan Mobil Cihazlar
- Uçak, gemi, tren gibi hareketli platformlardaki terminal cihazlar

NTN'ler bu segmentleri koordine bir şekilde çalıştırarak geniş kapsama, düşük gecikme ve yüksek veri iletim kapasitesi sunmayı hedefler. Ayrıca yazılım tanımlı ağlar (SDN), network dilimleme (network slicing) ve beamforming gibi yeni nesil teknolojiler de bu mimariye entegre edilmektedir.

V. NTN'NİN MEVCUT UYGULAMALARI VE KULLANIM ALANLARI

NTN'ler, karasal iletişim altyapısının bulunmadığı veya zayıf olduğu yerlerde iletişimi sağlayan ve daha önce mümkün olmayan bir dizi sektöre hizmet verilmesini sağlayan "Karasal Olmayan Ağlar" anlamına gelir. Sistem sadece kişisel iletişim gereksinimlerini değil, aynı zamanda endüstriyel, askeri ve insani yardım faaliyetlerini de karşılamaktadır.

A. Kırsal ve Uzak Bölgelerde İnternet Erişimi

NTN, altyapı kurulumu maliyetli olan kırsal veya dağlık bölgelerde yüksek hızlı internet erişimi sağlayarak dijital eşitsizliği azaltmada kritik rol oynamaktadır. Starlink, OneWeb ve Amazon'un Kuiper projesi gibi mega uydularla, bu tür bölgelerde karasal altyapıya ihtiyaç duymadan internet hizmeti sunmaktadır.

B. Afet ve Acil Durum Haberleşmesi

Deprem, sel, kasırga gibi doğal afetler sonrası karasal iletişim altyapısı sıklıkla zarar görür. Bu gibi durumlarda HAPS veya uydular tabanlı sistemler devreye girerek acil servis ekipleri, devlet birimleri ve halk arasında hayatı iletişim bağlantıları sürdürebilir. Örneğin, Japonya'da 2011 Tōhoku depremi sonrası HAPS sistemleriyle geçici haberleşme sağlanmıştır.

C. Denizcilik ve Havacılık

Geniş okyanusal bölgelerde veya yüksek irtifalarda seyahat eden uçaklar, NTN sistemleri aracılığıyla sürekli bağlantıda sağlayabilir. Bu hem yolcu konforunu artırır (uçak içi Wi-Fi internet erişimi gibi hizmetler) hem de operasyonel veri iletimini mümkün kılar. Uluslararası deniz taşımacılığında da gemi-uydular iletişimi ile rota takibi, acil durum iletişimi ve uzaktan bakım sağlanmaktadır.

D. Savunma ve Askeri Uygulamalar

NTN sistemleri, ordular için kesintisiz, güvenli ve küresel haberleşme olanağı sağlar. Uydular üzerinden şifreli iletişim, düşman tespiti ve koordinasyon görevlerinde kullanılır. Ayrıca askeri İHA kontrolleri ve veri aktarımı da NTN altyapısı üzerinden sağlanabilmektedir.

E. IoT ve Tarımsal Uygulamalar

Tarım, enerji ve çevre izleme gibi alanlarda çok sayıda IoT cihazının kırsal alanlara dağıtımı gerekebilir. NTN, bu cihazların karasal ağlara ihtiyaç duymadan veri iletimi sağlamada büyük kolaylıklar sağlar. Örneğin; sulama sistemleri, toprak sensörleri ve hava durumu istasyonları uydu bağlantısıyla uzaktan kontrol edilebilir.

F. 5G ve 6G Entegrasyonu

NTN sistemleri, 5G'nin küresel kapsamaya ulaşması ve 6G'nin temel taşlarından biri olma potansiyeli taşır. 3GPP Release 17 ile birlikte NTN, 5G standartlarına entegre edilmiştir. Böylece kara ve uzay ağları birlikte çalışabilir hale gelmiştir.

VI. KARŞILAŞILAN ZORLUKLAR VE ARAŞTIRMA ALANLARI

NTN'ler, kapsama alanı ve erişilebilirlik konusunda önemli gelişmeler sunarken, uzay ortamının fiziki özelliklerinden dolayı sinyallerde gecikme, bozulmalar ve güvenlik gibi çeşitli zorlukları da beraberinde getirir. Bu nedenle uluslararası standart kuruluşlar olan 3GPP, ITU ve CCSA, NTN'yi mevcut 5G/6G sistemlerine entegre etmek için ortak bir mimari ve standartlar geliştirmektedir. Özellikle Fixed-Mobile-Satellite Convergence yaklaşımıyla, sabit, mobil ve uydu tabanlı ağların birlikte çalışabilirliğini sağlayan kapsayıcı çözümler geliştirilmektedir. Bu standartlar, uydu üzerinden geniş kapsama alanı sağlarken; veri yönlendirme ve çoklu bağlantı gibi önemli ağ işlevlerinin etkin şekilde yürütülmesini hedeflemektedir [6].

NTN'ler, iletişim altyapısına esneklik ve yüksek kapsama alanı sağlarken, çeşitli teknik ve operasyonel zorlukla yüzleşmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelinmesi, altyapı yatırımları ve akademik/teknolojik Ar-Ge faaliyetleri mümkünüdür.

A. Gecikme ve Handoff Problemleri

Özellikle GEO uydularında sinyallerin uzun mesafe katetmesi nedeniyle gecikme süresi (latency) artar. LEO uydularında ise düşük gecikme sağlansa da, çok sayıda uydu sürekli hareket ettiği için kullanıcılar bir uydudan diğerine sık sık geçmek zorunda kalır (handoff). Bu geçişlerde yaşanan kesintiler servis kalitesini olumsuz etkileyebilir.

Araştırma Alanı:

Uydu geçişleri sırasında kesintisiz bağlantı sağlayacak elverişli handover algoritmaları, beamforming teknikleri ve dinamik ağ yönetimi üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır.

B. Frekans Kullanımı ve Spektrum Yönetimi

Uydu sistemlerinin karasal ağlarla aynı spektrumu kullanması durumunda, özellikle yoğun bölgelerde frekans çakışmaları yaşanabilir. Spektrumun sınırlı olması, verimli yönetimi zorunlu kılar.

Araştırma Alanı:

Spektrum paylaşımı, dinamik frekans ataması, kognitif radyo teknolojileri ve interferans azaltıcı teknikler ön plandadır.

C. Enerji Verimliliği ve Güç Kısıtlamaları

Özellikle LEO uyduları ve HAPS sistemleri enerji kaynakları açısından çeşitli zorluklar ile karşılaşmaktadır. Güneş panelleri ve batarya teknolojilerinin gelişimi bu platformların sürdürülebilirliği için önem arz etmektedir.

Araştırma Alanı:

Daha verimli enerji yönetimi algoritmaları, enerji hasatı yapan sistemler ve düşük güç tüketimli haberleşme protokolleri geliştirilmektedir.

D. Ağ Entegrasyonu ve Uyumluluk

NTN sistemlerinin 5G ve gelecekteki 6G sistemleriyle entegre çalışması, çok katmanlı ve heterojen bir ağ yapısını gerektirir. Farklı sistemlerin uyumlu çalışması karmaşık protokoller ve yönlendirme teknikleri gerektirir.

Araştırma Alanı:

Software-Defined Networking, ağ dilimleme (network slicing), uçtan uca QoS (hizmet kalitesi) yönetimi ve NTN'yi destekleyen 3GPP standartları bu kapsamda geliştirilmektedir.

E. Fiziksel Tehditler ve Uzay Enkazu

Uzayda bulunan çok sayıda uydu, çarpışma riski ve uzay enkazu (space debris) tehdidi altındadır. Bu da hem maliyet hem de sürdürülebilirlik açısından önemli bir problemdir.

Araştırma Alanı:

Uzay trafik yönetimi, çarpışma önleme algoritmaları ve enkaz izleme sistemleri bu alanın önemli konularıdır.

Uyduların yörüngeye fırlatılması ve gerçek ortamlarda test edilmesi, hem maliyeti yüksek hem de zaman alan bir süreçtir. Ayrıca, bu testlerde karşılaşılabilecek senaryolar sınırlı olduğu için kapsamlı performans değerlendirmesi yapmak zorlaşmaktadır. Bu nedenle, uydu sistemlerinin ve TN/NTN geçişlerinin (handover) sanal ortamda test edilmesine imkan sağlayan simülasyon ortamları, son yıllarda giderek önem kazanmıştır.

Özellikle Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI) tarafından geliştirilen bir platform, karasal baz istasyonları ile düşük yörüngedeki uydular arasında gerçekleşen handover işlemlerini simüle etmeye yönelik imkanlar sağlamaktadır. Bu simülasyon ortamında, birden fazla sanal baz istasyonu ve uydu modeli tanımlanarak, kullanıcı cihazlarının hareketiyle bağlantı geçişlerinin nasıl gerçekleştiği gözlemlenebilir. Simülasyonda kullanılan uydular "transparan uydu" modeliyle temsil edilir; yani sinyaller, yalnızca yer istasyonları aracılığıyla yönlendirilir [12].

Simülasyon ortamları ayrıca, sinyal kalitesi ölçümleri, el değiştirme tetikleyicileri, radyo kaynak denetimi ve yeni uyduya geçişin tamamlandığı onay mesajları gibi tüm süreci detaylı şekilde modellemektedir. Bu tür platformlar, NTN'nin gerçek hayattaki karşılıklarını test etmeden, geliştirilecek algoritmaların kullanılabilirliğini düşük maliyetler ile hızlı biçimde analiz etme imkânı sunar.

VII. GELECEK PERSPEKTİFİ VE SONUÇ

Non-Terrestrial Networks (NTN), haberleşme teknolojilerinde paradigma değişimine neden olan bir yapı

olarak, yalnızca altyapı sorunlarını çözmekle kalmamakta, aynı zamanda dijitalleşmenin kapsama alanını küresel ölçekte genişletmektedir. Özellikle 5G'nin yaygınlaşması ve 6G'nin geliştirme sürecinde, NTN sistemlerinin entegrasyonu kaçınılmaz hale gelmiştir. Uzay ve yer tabanlı ağların birleşimiyle ortaya çıkan bu yeni iletişim modeli, bireyler, endüstriler ve devletler için sayısız olanak sunmaktadır.

A. Geleceğe Dair Beklentiler

- **6G ile Tam Entegrasyon:** 6G'nin vizyonu, NTN'nin yalnızca bir destekleyici sistem değil, temel bir bileşen olmasını öngörmektedir. LEO uydularından HAPS sistemlerine kadar birçok platform, gelecekteki kablosuz ağların ayrılmaz bir parçası olacaktır.
- **Yapay Zeka Destekli NTN:** Ağ optimizasyonu, yörünge planlaması ve trafik yönetimi gibi süreçlerde yapay zekâ ve makine öğrenmesi çözümleri kullanılacaktır. Bu sayede sistemlerin kendi kendini yöneten ve adapte olabilen hale gelmesi beklenmektedir.
- **Daha Geniş Kapsama ve Erişilebilirlik:** Yalnızca kırsal değil, okyanuslar, kutup bölgeleri ve hatta uzay görevleri için bile internet bağlantısı sağlanabilecek. Bu da eğitim, sağlık, ekonomi gibi çeşitli alanlarda küresel fırsat eşitliğine fayda sağlayacaktır.
- **Sürdürülebilirlik Odaklı Tasarımlar:** Enerji verimliliği yüksek ve uzay enkazına karşı önlemler içeren yeni nesil uyduların kullanılması, NTN teknolojilerinin çevresel sürdürülebilirliğini de ön plana çıkaracaktır.

B. Sonuç

NTN sistemleri, çağımız dünyasının küresel iletişim ihtiyaçlarına cevap verebilmek adına geliştirilmektedir. Karasal altyapının ulaşamadığı alanlara hizmet sağlama vizyonu ile dijital kapsama alanlarını artırmakta, afetler gibi zor durumlarda da kritik iletişim çözümleri sunmaktadır. Ayrıca geleceğin 6G vizyonunu da inşa etmektedir.

Frekans yönetimi, enerji verimliliği, güvenlik ve entegrasyon gibi alanlarda karşılaşılan zorlukların aşılması bu teknolojinin başarılı olabilmesi için hala önemli bir noktadır.

Özetle, NTN yalnızca sıradan bir teknoloji değil, aynı zamanda dijitalleşmenin gerçek anlamda küreselleşebilmesi adına stratejik bir adımdır. Bu nedenle hem akademik hem endüstriyel dünyada üzerinde ilerleme kat edilmesi gereken önemli bir AR-GE alanıdır.

REFERENCES

- [1] W. Qi, H. Wang, X. Xia, C. Mei, Y. Liu, and Y. Xing, "Research on Novel Type of Non Terrestrial Network Architecture for 6G," Proc. IEEE IWCMC, 2023.
- [2] A. Guidotti, A. Vanelli-Coralli, M. El Jaafari, N. Chuberre, J. Puttonen, V. Schena, G. Rinelli, and S. Cioni, "Role and Evolution of Non-Terrestrial Networks Toward 6G Systems," IEEE Access, vol. 12, pp. 55945–55965, Apr. 2024.
- [3] S. Demir and O. Gurek, "On the Performance of Handover Mechanisms for Non-Terrestrial Networks," IEEE Access, vol. 10, pp. 31245–31257, 2022.
- [4] H. Kim and J. Ryu, "Location-based Trigger Conditions for Handover in Non-Terrestrial Network," Proc. IEEE ICC, 2023.
- [5] Y. Kyung et al., "Standardization Review on Non-Terrestrial Networks," Proc. IEEE ICOIN, 2025.
- [6] P. Lin, "Technical Analysis of Non-terrestrial Networks," Proc. IEEE IWCMC, 2024.
- [7] J. Zhang, Z. Wu, and L. Hu, "LEO Constellation Design and Link Analysis for Non-Terrestrial Networks," Proc. IEEE VTC, 2023.
- [8] A. Sattarzadeh et al., "Satellite-Based Non-Terrestrial Networks in 5G: Insights and Challenges," IEEE Access, vol. 10, pp. 11274–11295, Jan. 2022.
- [9] F. Matera et al., "Terrestrial and Non-Terrestrial Networks for Integrated Sensing and Communication," Proc. IEEE ISSE, 2024.
- [10] A. Gupta and M. Khan, "Handover Challenges and Solutions in Non-Terrestrial Networks," IEEE Comm. Surveys and Tutorials, 2021.
- [11] Y. Li and S. Park, "Conditional Handover for Non-Terrestrial Networks," Proc. IEEE Globecom, 2023.
- [12] L. Wei and K. Nakamura, "Design of 5G Non-Terrestrial Network Handover using Transparent Satellite," Proc. IEEE WCNC, 2022.
- [13] R. Liu et al., "A Non-Terrestrial Network Congestion Control Scheme Based on the SAC Method," IEEE Access, vol. 10, pp. 101201–101211, 2022.