

T.C.  
İSTANBUL SABAHATTİN ZAİM ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
BİLGİSAYAR BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

KENTSEL 5G KABLOSUZ İLETİŞİM SİSTEMLERİNDE  
ENERJİ VERİMLİLİĞİ

DOKTORA TEZİ

Bünyamin HATİPOĞLU

İstanbul

Mayıs, 2025

T.C.

İSTANBUL SABAHATTİN ZAİM ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BİLGİSAYAR BİLİMLERİ VE MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

KENTSEL 5G KABLOSUZ İLETİŞİM SİSTEMLERİNDE  
ENERJİ VERİMLİLİĞİ

DOKTORA TEZİ

Bünyamin HATİPOĞLU

Danışman

Doç. Dr. Tayfun ACARER

İstanbul

Mayıs, 2025

## TEZ ONAYI

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğüne,

Bu çalışma, jürimiz tarafından Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman Doç. Dr. Tayfun ACARER

Üye Prof. Dr. Tarık ÖZKUL

Üye Dr. Öğr. Üyesi Şengül BAYRAK HAYTA

Üye Dr. Öğr. Üyesi Erdal ALİMOVSKI

Üye Dr. Öğr. Üyesi Buket İŞLER

Onay

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Erhan İÇENER  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

## **BİLİMSEL ETİK BİLDİRİMİ**

Doktora tezi olarak hazırladığım “Kentsel 5G Kablosuz İletişim Sistemlerinde Enerji Verimliliği” başlıklı çalışmanın öneri aşamasından sonuçlandığı aşamaya kadar geçen süreçte bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle uyduğumu, tez içindeki tüm bilgileri bilimsel ahlak ve gelenek çerçevesinde elde ettiğimi, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığımı, bu çalışmamda doğrudan veya dolaylı olarak yaptığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu beyan ederim.

Bünyamin HATİPOĞLU

## ÖN SÖZ

Son yıllarda oldukça popüler hale gelen yüksek hızlı, düşük gecikmeli, büyük ölçekli veri transferi ihtiyacı, giderek artan ekosistem düşüncesi, çok sayıda kullanıcının aynı anda çevrimiçi olma potansiyeli, çok sayıda makine ve cihazın birbirleriyle etkileşime girme ihtiyacı ve tüm bunlarla birlikte enerji verimliliği ihtiyacı gibi konulardan yola çıkarak, ülkemizde bu konuda öncü olma fikriyle beni cesaretlendiren ve yönlendiren Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu Başkanı olan danışmanım Doç. Dr. Tayfun ACARER'e teşekkür etmek istiyorum.

Özellikle sordukları sorularla ve çalışmalarım boyunca bana gösterdikleri rehberlikle eksiklerimi tamamlamam konusunda beni cesaretlendiren Dr. Ali HAMİTOĞLU, Dr. Akhtar JAMİL, Dr. Şengül BAYRAK HAYTA, Dr. Buket İŞLER ve Dr. Muhammed DAVUD'a teşekkür etmek istiyorum.

Bu çalışmalarda son noktaya gelene kadar aldığım eğitimlerde bana büyük katkı sağlayan Sabahattin Zaim Üniversitesi'ne ve değerli hocalarıma teşekkür etmek isterim.

Bünyamin HATİPOĞLU

## ÖZET

# KENTSEL 5G KABLOSUZ İLETİŞİM SİSTEMLERİNDE ENERJİ VERİMLİLİĞİ

**Bünyamin HATİPOĞLU**

**Doktora Tezi, Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği**

**Danışman: Doç. Dr. Tayfun ACARER**

**Mayıs - 2025, 137 + xxi Sayfa**

Bu çalışmanın konusunu kentsel 5G ağlarının enerji verimliliğini optimize etmek ve ışın oluşturma teknolojisi (beamforming) ile gelişmiş anten yapılandırmalarının rolünü araştırmak oluşturmaktadır. Milyarlarca cihazın birbirleri ile iletişim kurma ihtiyacı, hızlı, düşük gecikmeli büyük verilerin güvenli transferi ile birlikte büyük bir 5G IOT (Nesnelerin İnterneti) ekosisteminin ortaya çıkması beklenmektedir.

Bu çalışma ile birlikte 5G’de bağımlı / bağımsız çalışma şekillerinin üzerinde durulması gerektiği, mevcut iletişim sistemleri ile beraber çalışma ihtiyacının da göz ardı edilmemesi gerektiği, iletişimde uygulanan “Beamforming” gibi yöntemlerle daha az enerji harcanması ve kaliteli bir iletişimin mümkün olduğu görülmektedir.

Mevcut durumda literatür taraması, içerik analizi, niteliksel araştırma ve önerilerle güncel durum analiz edilmiş ve 5G’nin özellikleri ve avantajları üzerinde durularak hayatımıza ne gibi kolaylıklar katabileceği araştırılmıştır.

Ayrıca simülasyon çalışmaları ile elde edilen somut veriler değerlendirilerek gerçekçi sonuçlar ortaya konulmuş, yapılan analiz çalışmaları ve yorumlar ile literatüre önemli katkılar yapılacağı ve bu alanda yapılacak çalışmalara önemli katkılar sunacağı, öncü olacağı düşünülmektedir.

5G’nin sağlık, ulaşım, eğlence, savunma sanayisi, üretim gibi alanlarda kullanılması bu alanlarda birçok fayda sağlayacaktır. Zenginleştirilmiş mobil geniş bant teknolojisi

ile 5G bize daha hızlı bağlantı, daha çok kapasite sağlar. Ultra güvenilir düşük gecikmeli iletişim ile günümüzde 50 ms'lik gecikmeler normal kabul edilirken bu gecikme süreleri oldukça kısılacak, 1 ms'ye kadar inecektir. 5G tüm dünya çapında çok sayıda sektörde kullanım alanına sahiptir ve sektörler de gelişim açısından 5G'ye oldukça ihtiyaç duymaktadır.

Bu çalışma, kentsel 5G ağlarında enerji verimliliğini optimize etmeye yönelik stratejileri araştırıyor ve ışın oluşturma teknolojisinin ve gelişmiş anten yapılandırmalarının kullanımını vurguluyor. Verici güç seviyeleri, taşıyıcı frekansları, anten yükseklikleri ve yapı malzemeleri gibi sistem parametrelerinin enerji tüketimi ve sinyal yayılımı üzerindeki etkisi, kapsamlı sayısal sonuçlar ve senaryo tabanlı simülasyonlar aracılığıyla araştırılıyor.

Bulgular, farklı frekanslar, anten yükseklikleri ve malzemeler arasında önemli sinyal zayıflaması ve yol kaybı değişimlerini ortaya koymaktadır. Dahası, yönlendirilmiş iletimler yoluyla sinyal yayılımını geliştirmede ve enerji tüketimini azaltmada ışın oluşturma tekniklerinin benimsenmesi yalnızca paraziti en aza indirmekle kalmaz, aynı zamanda daha yüksek veri hızları sağlayarak ağ verimliliğini artırır. Araştırma, uygun anten parametrelerini seçme ve ışın oluşturma teknolojilerini entegre etme dahil üzere optimum dağıtım stratejilerini belirler. Bu stratejiler, kentsel ortamlarda çalışan 5G ağları içinde enerji verimliliğinde önemli iyileştirmelere yol açarak ağ tasarımı ve dağıtım çabaları için pratik çözümler sunar. Bu araştırma, 5G teknolojisinin kentsel altyapılara sorunsuz bir şekilde entegre edilmesinin önünü açmaktadır. Bu araştırma, kentsel ortamlarda 5G kablosuz iletişim sistemlerinin optimize edilmesine ilişkin mevcut bilgiye önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Enerji verimliliğine öncelik vererek ve ışın oluşturma gibi gelişmiş teknolojilerden yararlanarak, alandaki paydaşlar 5G'nin dönüştürücü potansiyelinden faydalanmaya teşvik edilmektedir. Bu araştırma, günümüz dünyasında önemli bir husus olan çevresel etkiyi en aza indirirken kentsel nüfusların gelişen iletişim ihtiyaçlarını karşılamaya yardımcı olmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Anten Konfigürasyonu, Düşük Gecikmeli İletişim, Enerji Verimliliği, Hızlı İletişim, Işın Yönlendirme.

## **ABSTRACT**

# **ENERGY EFFICIENCY IN URBAN 5G WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS**

**Bünyamin HATİPOĞLU**

**Ph.D. Dissertation, Computer Science and Engineering**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Tayfun ACARER**

**May - 2025, 137 + xxi Pages**

The subject of this study is to optimize the energy efficiency of urban 5G networks and to investigate the role of advanced antenna configurations with beamforming technology. The need for billions of devices to communicate with each other, along with the secure transfer of fast, low-latency big data, is expected to create a large 5G IOT (Internet of Things) ecosystem.

With this study, it is seen that dependent / independent working methods in 5G should be emphasized, the need to work together with existing communication systems should not be ignored, less energy consumption and high quality communication are possible with methods such as "Beamforming" applied in communication.

The current situation has been analyzed with literature review, content analysis, qualitative research and recommendations, and it has been researched what conveniences 5G can add to our lives by emphasizing its features and advantages.

In addition, realistic results have been revealed by evaluating the concrete data obtained through simulation studies, and it is thought that significant contributions will be made to the literature with the analysis studies and comments made, and it will provide important contributions to the studies to be made in this field and will be a pioneer. The use of 5G in areas such as health, transportation, entertainment, defense industry and production will provide many benefits in these areas.

With enriched mobile broadband technology, 5G provides us with faster connection and more capacity. With ultra-reliable low-latency communication, while delays of 50ms are considered normal today, these delay times will be considerably shorter, down to 1ms.

The deployment of 5G technology in urban environments is recognised as a significant opportunity to revolutionise wireless communication across various sectors.

This study investigates strategies for optimizing energy efficiency within urban 5G networks, emphasising the utilisation of beamforming technology and advanced antenna configurations. The impact of system parameters such as transmitter power levels, carrier frequencies, antenna heights, and construction materials on energy consumption and signal propagation is explored through comprehensive numerical results and scenario-based simulations.

The findings reveal substantial signal attenuation and path loss variations across different frequencies, antenna heights, and materials. Moreover, they demonstrate the critical role of beamforming in enhancing signal propagation and reducing energy consumption through directed transmissions. The adoption of beamforming techniques not only minimises interference but also enables higher data rates, thereby improving network efficiency. The research identifies optimal deployment strategies, including selecting appropriate antenna parameters and integrating beamforming technologies. These strategies lead to significant improvements in energy efficiency within 5G networks operating in urban environments, offering practical solutions for network design and deployment efforts. This research paves the way for the seamless integration of 5G technology into urban infrastructures. This research significantly contributes to the growing knowledge of optimising 5G wireless communication systems in urban settings. By prioritising energy efficiency and leveraging advanced technologies such as beamforming, stakeholders in the field are empowered to harness the transformative potential of 5G. This research helps meet the evolving communication needs of urban populations while minimising environmental impact, a crucial consideration in today's world.

**Key Words:** Antenna Configuration, Beam Steering, Energy Efficiency, Fast communication, Low latency communication.

# İÇİNDEKİLER

<b>TEZ ONAYI</b> .....	<b>i</b>
<b>BİLİMSEL ETİK BİLDİRİMİ</b> .....	<b>ii</b>
<b>ÖN SÖZ</b> .....	<b>iii</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>viii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>xvi</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>xvii</b>
<b>BİRİNCİ BÖLÜM</b> .....	<b>1</b>
<b>GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Mobil Nesillerin Gelişim Süreçleri .....	2
1.1.1 1G (1. Nesil) Mobil İletişim Sistemleri.....	3
1.1.2 2G (2. Nesil) Mobil İletişim Sistemleri.....	4
1.1.3 3G (3. Nesil) Mobil İletişim Sistemleri.....	5
1.1.4 4G (4. Nesil) Mobil İletişim Sistemleri.....	6
1.1.5 4.5G (LTE-Advanced) .....	6
1.1.6 5G Teknolojisi.....	7
1.1.7 5G ve 4G Teknolojilerinin Karşılaştırılması.....	9
1.2 5G'nin özellikleri .....	11
1.3 5G'nin Avantajları .....	15

1.3.1	Düşük Gecikme .....	16
1.3.2	Gelişmiş Kapasite.....	16
1.3.3	Gelişmiş Bant Genişliği .....	17
1.4	5G Kullanım Alanları .....	18
1.4.1	Medya ve Eğlence .....	18
1.4.2	Üretim .....	18
1.4.3	Perakende .....	19
1.4.4	Sağlık hizmetleri .....	19
1.4.5	Otonom Sistemler .....	20
1.5	5G'nin Kullanılmaya Başlandığı Ülkeler .....	20
1.6	5G'nin Yaygınlaştırılması Pahalı Mı? .....	21
1.7	5G'de Hız.....	21
1.8	5G Ağ Gecikmesi .....	21
1.9	5G Momentumu .....	22
1.10	5G Teknolojisinde Güvenlik .....	22
1.11	Optimizasyonun Önemi.....	23
1.12	5G'ye Geçişin Önemi.....	24
1.13	Frekansları Ölçme ve Karşılaştırma .....	24
1.14	Türkiye'de 5G Alanında Yapılan Çalışmalar .....	25
1.15	Küresel Mobil Abone Trendi .....	26
1.16	Edge Computing'in Gelişmeleri ve Uygulamaları.....	27
1.17	5G'de Kapsama Alanı .....	28
1.18	5G ve 4G'nin Birlikte Çalışması .....	29
1.19	5G Spektrumu.....	29
1.20	Milimetre Dalgası.....	30
1.21	Büyük MIMO Teknolojisinin Etkisini Keşfetmek .....	31



1.40	Gecikmenin Otonom Araçlar Üzerindeki Etkisi .....	68
1.41	Literatür Taraması .....	70
<b>İKİNCİ BÖLÜM .....</b>		<b>81</b>
<b>MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>		<b>81</b>
2.1	Kentsel Çevre Kapsama Analizi.....	81
2.2	Konfigürasyon .....	81
2.3	Genel Alıcı Gücü (Received Power) Formülü .....	84
2.4	Optimizasyon Amacı .....	85
2.5	Optimizasyon Stratejisi .....	85
2.6	Kablosuz İletişimde Alınan Gücün Maksimize Edilmesi .....	88
2.6.1	Yol Kaybı (Path Loss) Hesaplaması .....	89
2.6.2	Alınan Güç (Received Power) Hesaplaması .....	90
2.7	Optimizasyon Amacı (Optimization Logic).....	91
2.8	Pseudo Code .....	93
<b>ÜÇÜNCÜ BÖLÜM .....</b>		<b>95</b>
<b>DENEYSEL SONUÇLAR.....</b>		<b>95</b>
3.1	Konfigürasyon Bulguları .....	99
3.2	Sinyal Gücünün ve Malzemelerin Etkisinin Analizi .....	100
3.3	Frekans Seçimi ve İletim Kararlılığı .....	103
3.4	Enerji Verimliliği ve Sürdürülebilirlik Perspektifi.....	104
3.5	İletişim Altyapısında Malzeme Seçiminin Rolü .....	104
3.6	Metal Malzemelerin RF Performansına Etkisi .....	105
3.7	Cam Malzemelerin RF Performansına Etkisi.....	105
3.8	Camın Kullanım Alanları ve Gelecek Perspektifi .....	106
3.9	Beton ve Tuğla Malzemelerinin RF Performansına Etkisi .....	107
3.10	Ahşap Malzemesinin RF İletişim Sistemlerindeki Etkisi.....	108

3.11	Sinyal Gücünün ve Malzemelerin Kombinasyonu.....	108
3.12	Yayıma Yolu Etkilerinin Sinyal Gücü Üzerindeki Analizi.....	109
3.13	Beam Steering Teknolojisinin Sinyal Gücü Üzerindeki Etkisi.....	110
3.14	Optimizasyon.....	112
3.14.1	Frekansın Minimize Edilmesi .....	113
3.14.2	Verici Gücünün Maksimize Edilmesi .....	114
3.14.3	Anten Yüksekliğinin Optimize Edilmesi .....	114
3.14.4	Düşük Zayıflama Faktörlü Malzemelerin Kullanımı.....	114
3.14.5	Yansıma Kaybının Optimize Edilmesi.....	114
3.14.6	Işın Yönlendirme Kazancı (Beam Steering) Kullanımı.....	115
3.14.7	Optimizasyon Algoritması .....	115
<b>SONUÇLAR .....</b>		<b>116</b>
<b>EKLER A.....</b>		<b>120</b>
<b>REFERANSLAR.....</b>		<b>129</b>
<b>CV .....</b>		<b>137</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1: Birinci Nesil Mobil Telefonlardan Motorola DynaTAC 8000X.....	4
Şekil 1.2: Mobil Ağların Evrimi.....	7
Şekil 1.3: 4G ve 5G Baz İstasyonları ve Menziller .....	10
Şekil 1.4: 4G ve 5G Bağımsız Olmayan Dağıtım (NSA) .....	11
Şekil 1.5: 5G Teknolojisinin Sunduğu Fırsatlar .....	14
Şekil 1.6: Çeşitli Doğal Kaynaklardan Yayılan Radyasyon Emisyon Oranları.	25
Şekil 1.7: Küresel Mobil Abone Trendi .....	27
Şekil 1.8: Geniş Alan Kapsama Alanı için Makrohücreler .....	28
Şekil 1.9: 5G ve 4G'nin Birlikte Çalışması .....	29
Şekil 1.10: Yeni 5G Spektrumu ile 30-100 GHz Radyo Frekans Aralığını Gösteren Mobil Spektrum. ....	30
Şekil 1.11: 5G Hücreyel Ağlar .....	31
Şekil 1.12: Hücre Başına 10 Anten Kullanımı .....	32
Şekil 1.13: Hücre Başına 100 Anten Kullanımı .....	32
Şekil 1.14: 5G Hücreyel Ağlarında Küçük Hücreler Olmadan Bağlantı Zorlukları .....	33
Şekil 1.15: Küçük Hücrelerle 5G Hücreyel Ağlarında Bağlantının Sağlanması	34
Şekil 1.16: Hüzmelenmesiz Standart Anten ile İletim.....	35
Şekil 1.17: Hüzmelenme ile 5G Hücreyel Ağlar.....	35
Şekil 1.18: Büyük MIMO'da Işın Yönlendirme: Sinyal Verimliliğini İyileştirme ve Paraziti Azaltma .....	36
Şekil 1.19: Hüzmelenme Anten Dizisi.....	37

<b>Şekil 1.20: Bir Antenden Gelen Radyo Dalgaları: Kuş Bakışı Görünüm</b> .....	37
<b>Şekil 1.21: Anten Kullanılarak Geliştirilmiş Yönlü İletim: Dalga Güçlendirme Etkisi</b> .....	38
<b>Şekil 1.22: Büyük Anten Dizilerinde Işın Daraltma ve Yan Lob Azaltma</b> .....	38
<b>Şekil 1.23: Anten Dizilerinde Faz Değişimi</b> .....	39
<b>Şekil 1.24: Bağımsız Olmayan Dağıtım</b> .....	41
<b>Şekil 1.25: Bağımsız Dağıtım</b> .....	41
<b>Şekil 1.26: 5G’de Güvenlik: Genel Bakış</b> .....	43
<b>Şekil 1.27: 5G’de Güvenlik Şifreleme ve Bütünlük Kontrolü</b> .....	44
<b>Şekil 1.28: 5G’de Hizmet Tabanlı Arayüzleri Koruma</b> .....	45
<b>Şekil 1.29: OAuth 2.0 ile Token Tabanlı Kimlik Doğrulama</b> .....	45
<b>Şekil 1.30: Abonelik Gizli Kimlik Sistemi</b> .....	47
<b>Şekil 1.31: Yerel Sunucular ile Erişim Süresini Azaltma</b> .....	48
<b>Şekil 1.32: Yerel Sunuculara Daha Yakından Bir Bakış</b> .....	49
<b>Şekil 1.33: 5G Ağ Dilimleme</b> .....	50
<b>Şekil 1.34: 4G Çekirdek Ağının Ana Unsurları</b> .....	53
<b>Şekil 1.35: 5G Çekirdek Ağının Temel Unsurları</b> .....	54
<b>Şekil 1.36: 5G Çekirdek Ağ Mimarisi</b> .....	56
<b>Şekil 1.37: 5G QoS Flow (QoS Akışı)</b> .....	57
<b>Şekil 1.38: 5G PDU Oturum ve QoS Akışları</b> .....	58
<b>Şekil 1.39: Çekirdek Erişim ve Hareketlilik Yönetimi Fonksiyonu</b> .....	58
<b>Şekil 1.40: Oturum Yönetim Fonksiyonu</b> .....	59
<b>Şekil 1.41: Kullanıcı Düzlemi İşlevi</b> .....	60
<b>Şekil 1.42: Birleşik Veri Yönetimi</b> .....	61
<b>Şekil 1.43: Yetki Kontrol Fonksiyonu</b> .....	62
<b>Şekil 1.44: Bulut Tabanlı Oyun Mimarisi</b> .....	63

<b>Şekil 1.45: Otonom Araçlar ve 5G</b> .....	66
<b>Şekil 1.46: Bağlantılı (Connected) Araçlar ve v2X</b> .....	67
<b>Şekil 1.47: 5G ile Tepki Sürelerinin Karşılaştırılması: 17 ms Gecikme Süresi..</b>	69
<b>Şekil 1.48: 5G ile Tepki Sürelerinin Karşılaştırılması: 1 ms Gecikme Süresi....</b>	69
<b>Şekil 2.1: Maksimum Yansıma Sayısını 0 Kabul Eden Kapsama Haritası</b> .....	83
<b>Şekil 2.2: İstanbul Beyazıt Meydanı (41.00920 enlem ve 28.96668 boylam)</b> .....	84
<b>Şekil 3.1: Tek Yansımali Yol İçeren Kapsama Haritası</b> .....	99
<b>Şekil 3.2: Beam Steering ile İletim Yolu</b> .....	102



## TABLO LİSTESİ

<b>Tablo 1.1: Mobil Nesillerin Gelişim Süreçleri .....</b>	<b>3</b>
<b>Tablo 1.2: 5G'de Hücrel Teknolojinin Evrimi .....</b>	<b>42</b>
<b>Tablo A.1: 2m Anten Yüksekliği ve 5W Güçle Materyal, Frekans, Yansıma Yolları ve Işın Yönlendirmesinin Alınan Güç (dBm) Üzerindeki Etkisi .....</b>	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
<b>Tablo A.2: 2m Anten Yüksekliği ve 10W Güçle Materyal, Frekans, Yansıma Yolları ve Işın Yönlendirmesinin Alınan Güç (dBm) Üzerindeki Etkisi .....</b>	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
<b>Tablo A.3: 2m Anten Yüksekliği ve 20W Güçle Materyal, Frekans, Yansıma Yolları ve Işın Yönlendirmesinin Alınan Güç (dBm) Üzerindeki Etkisi .....</b>	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
<b>Tablo A.4: 5m Anten Yüksekliği ve 5W Güçle Materyal, Frekans, Yansıma Yolları ve Işın Yönlendirmesinin Alınan Güç (dBm) Üzerindeki Etkisi .....</b>	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
<b>Tablo A.5: 5m Anten Yüksekliği ve 10W Güçle Materyal, Frekans, Yansıma Yolları ve Işın Yönlendirmesinin Alınan Güç (dBm) Üzerindeki Etkisi .....</b>	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
<b>Tablo A.6: 5m Anten Yüksekliği ve 20W Güçle Materyal, Frekans, Yansıma Yolları ve Işın Yönlendirmesinin Alınan Güç (dBm) Üzerindeki Etkisi .....</b>	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	
<b>Tablo A.7: 10m Anten Yüksekliği ve 5W Güçle Materyal, Frekans, Yansıma Yolları ve Işın Yönlendirmesinin Alınan Güç (dBm) Üzerindeki Etkisi .....</b>	<b>Error!</b>
<b>Bookmark not defined.</b>	

**Tablo A.8: 10m Anten Yüksekliği ve 10W Güçle Materyal, Frekans, Yansımaya Yolları ve Işın Yönlendirmesinin Alınan Güç (dBm) Üzerindeki Etkisi .....Error! Bookmark not defined.**

**Tablo A.9: 10m Anten Yüksekliği ve 20W Güçle Materyal, Frekans, Yansımaya Yolları ve Işın Yönlendirmesinin Alınan Güç (dBm) Üzerindeki Etkisi .....Error! Bookmark not defined.**

## KISALTMALAR

- IOT : Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)
- WRC : Dünya Radyokomünikasyon Konferansı (World Radiocommunication Conference)
- Kbps : Saniye Başına Kilobit (Kilobits Per Second)
- Mbps : Saniye Başına Megabit (Megabits Per Second)
- Gbps : Saniye Başına Gigabit (Gigabits Per Second)
- GSM : Mobil İletişimler İçin Küresel Sistem (Global System for Mobile Communications)
- CDMA : Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Code Division Multiple Access)
- LTE : 4G Standardı (Long Term Evolution)
- eMBB : Gelişmiş Mobil Geniş Bant (Enhanced Mobile Broadband)
- URLLC : Ultra Güvenilir Düşük Gecikmeli İletişim (Ultra Reliable Low Latency Communication)
- mMTC : Büyük Ölçekli Makine Tabanlı İletişim (Massive Machine Type Communications)

NMT	: Kuzey Mobil Telefon Sistemi (Nordic Mobile Telephone)
MHz	: Megahertz
SMS	: Kısa Mesaj Servisi (Short Message Service)
MMS	: Multimedya Mesajlaşma Servisi (Multimedia Messaging Service)
GPRS	: Genel Paket Radyo Servisi (General Packet Radio Service)
EDGE	: GSM İçin Gelişmiş Veri Hızları (Enhanced Data rates for GSM Evolution)
W-CDMA	: Geniş Bantlı Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Wideband Code Division Multiple Access)
IP	: İnternet Protokolü (Internet Protocol)
VoIP	: İnternet Protokolü Üzerinden Ses (Voice over Internet Protocol)
LTE-A	: Gelişmiş 4G Standardı (Long Term Evolution Advanced)
CENGN	: Yeni Nesil Ağlar Mükemmeliyet Merkezi (Centre of Excellence in Next Generation Networks)
mmWave	: Milimetre Dalgası (Millimeter Wave)
VR	: Sanal Gerçeklik (Virtual Reality)
AR	: Artırılmış Gerçeklik (Augmented Reality)
ISED	: Kanada İnovasyon, Bilim ve Ekonomik Kalkınma Bakanlığı (Innovation, Science and Economic Development Canada)
NB-IoT	: Dar Bant Nesnelerin İnterneti (Narrowband Internet of Things)
V2X	: Araçtan Her Şeye (Vehicle-to-Everything)
GSMA	: Küresel Mobil İletişim Ekosistemi (Global Mobile Communications Ecosystem)
SA	: Bağımsız (Standalone)
NSA	: Bağımsız Olmayan (Non Standalone)
USIM	: Evrensel Abone Kimlik Modülü (Universal Subscriber Identity Module)

SIM	: Abone Kimlik Modülü (Subscriber Identity Module)
UICC	: Evrensel Entegre Devre Kartı (Universal Integrated Circuit Card)
AI	: Yapay Zekâ (Artificial Intelligence)
ML	: Makine Öğrenimi (Machine Learning)
NGMN	: Yeni Nesil Mobil İletişim Ağları (Next Generation Mobile Networks)
UE	: Kullanıcı Ekipmanı (User Equipment)
MIMO	: Çoklu Giriş, Çoklu Çıkış (Multiple Input, Multiple Output)
MEC	: Mobil Uç Hesaplama (Mobile Edge Computing)
NG-RAN	: Yeni Nesil Radyo Erişim Ağı (Next Generation Radio Access Network)
NR	: Yeni Nesil Radyo İletişim (New Radio)
gNB	: Yeni Nesil Radyo Erişim Noktası (Next Generation NodeB)
eNB	: Geliştirilmiş Radyo Erişim Noktası (Evolved NodeB)
UMTS	: Evrensel Mobil Telekomünikasyon Sistemi (Universal Mobile Telecommunications System)
BTS	: Baz İletişim İstasyonu (Base Transceiver Station)
AMF	: Erişim ve Hareketlilik Yönetimi Fonksiyonu (Access and Mobility Management Function)
AUSF	: Kimlik Doğrulama Sunucu Fonksiyonu (Authentication Server Function)
UDM	: Birleşik Veri Yönetimi (Unified Data Management)
UPF	: Kullanıcı Düzlemi Fonksiyonu (User plane Function)
SMF	: Oturum Yönetimi Fonksiyonu (Session Management Function)
NSSF	: Ağ Dilimi Seçim Fonksiyonu (Network Slice Selection Function)
NEF	: Ağ Servislerini Dışarı Açma İşlevi (Network Exposure Function)
NRF	: Ağ Depolama Fonksiyonu (Network Repository Function)
PCF	: Yetki Kontrol Fonksiyonu (Policy Control function)

AF	: Uygulama Fonksiyonu (Application Function)
DN	: Veri İletim Ağı (Data Network)
HTTP	: Metin Transfer Protokolü (Hypertext Transfer Protocol)
TLS	: Veri Taşıma Katmanı Güvenliği (Transport Layer Security)
TCP	: Veri İletim Kontrol Protokolü (Transmission Control Protocol)
OAuth	: Açık Yetkilendirme (Open Authorization)
SUCI	: Abonelik Gizli Kimlik Tanımlayıcısı (Subscription Concealed Identifier)
IMSI	: Uluslararası Mobil Abone Kimliği (International Mobile Subscriber Identity)
MCC	: Mobil Ülke Kodu (Mobile Country Code)
MNC	: Mobil Ağ Kodu (Mobile Network Code)
MSIN	: Mobil Abone Tanımlayıcı Numarası (Mobile Subscriber Identification Number)
RAN	: Radyo Erişim Ağı (Radio Access Network)
NFV	: Ağ Fonksiyonlarının Sanallaştırılması (Network Functions Virtualization)
vFW	: Sanal Güvenlik Duvarı (Virtual Firewall)
vRouter	: Sanal Yönlendirici (Virtual Router)
vLB	: Sanal Yük Dengeleyici (Virtual Load Balancer)
5GS	: 5G Sistemi (5G System)
5G-AN	: 5G Erişim Ağı (5G Access Network)
SBA	: Hizmet Tabanlı Mimari (Service Based Architecture)
EPC	: Gelişmiş Paket Çekirdeği (Evolved Packet Core)
E-UTRAN	: Gelişmiş Evrensel Karasal Radyo Erişim Ağı (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network)
PDU	: Protokol Veri Birimi (Protocol Data Unit)

QoS	: Servis Hizmetleri (Quality of Services)
RF	: Radyo Frekansı (Radio Frequency)
dBm	: Desibel Milivat (Decibels Milliwatt)
LOS	: Görüş Hattı (Line of Sight)
FSPL	: Serbest Alan Yol Kaybı (Free-Space Path Loss)



# BİRİNCİ BÖLÜM

## GİRİŞ

Çalışmalarımıza benzersiz bir değer katan ve bu alanda önemli kılan şey, 5G'nin dünya çapında çok çeşitli sektörlerle sahip olması ve sektörlerin gelişim açısından 5G'ye ihtiyaç duymasıdır. Son yıllarda otonom sistemlerden IOT sistemlerine kadar birçok alanda farkındalık oluşmuştur. Ancak 5G gibi yüksek hızlı veri iletişimine de ihtiyaç duyulduğu açıktır. Çünkü entegre çalışmaya ihtiyaç duyan cihazların aynı zamanda çok hızlı ve güvenli iletişime de ihtiyacı vardır ve bu ihtiyaç IOT sistemlerinin artmasıyla birlikte daha belirgin hale gelmiştir.

2019 yılında Mısır'ın Şarm El-Şeyh kentinde düzenlenen WRC-19 (Dünya Radyokomünikasyon Konferansı), gelecekteki dijital ekonomiyi önemli ölçüde şekillendirecek temel teknolojik gelişmelerin yanı sıra hizmet, sistem ve teknolojilerin geliştirilmesine odaklandı [1]. Gelecek için gerekli olan istikrarlı ve öngörülebilir bir düzenleyici ortamın sağlanması için yatırım yapılması gerektiği konusunda mutabakata varıldı. Bu şekilde, ortak kuruluşlarla standartlar belirlenerek ve bu düzeyde çalışmalar yürütülerek, daha uygun ve ekonomik cihazlar geliştirmek ve özellikle aynı cihazla dünyanın her yerinde istenen hizmete erişim mümkün olacaktır. Bu aynı zamanda her ülkenin ayrı ayrı yatırımlar yapmasının önüne geçecektir. Ayrıca ülkelerin dünyayla bütünleşmesini sağlayacak ve kalkınmalarına katkı sağlayacaktır. Çalışma sonucunda elde edilen bulgulara göre 5G, IOT, otonom sistemler gibi kavramlar güncel ve gelişmeye açık olduğundan elde edilecek bulgular aydınlatıcı, öğretici, yol gösterici ve yeni çalışmalar ortaya koyacaktır. Sadece teknik ve teknolojik açıdan değil aynı zamanda ekonomik değer açısından da aydınlatıcı olacağı düşünülmektedir.

Enerji verimliliğinin, 5G ve ötesi teknolojilerde önceliklendirilmesi, inovasyon ile sürdürülebilirlik arasında bir denge kurarak, artan iletişim ihtiyaçlarının çevresel etkilerden ödün verilmeden karşılanmasını mümkün kılmaktadır. Özellikle kentsel nüfusun hızla artmaya devam ettiği günümüzde, enerji verimliliği, dayanıklı ve

sürdürülebilir şehirlerin inşasında temel bir unsur olarak öne çıkmaktadır. Bu bağlamda, enerji verimliliğini artırmaya yönelik çalışmalara verilen önem, yalnızca çevresel faydalar sağlamakla kalmayacak, aynı zamanda literatürde de önemli bir boşluğu dolduracaktır. Yapılan çalışmanın, bu doğrultuda literatüre ve uygulamaya anlamlı katkılar sunması beklenmektedir.

## 1.1 Mobil Nesillerin Gelişim Süreçleri

Kablosuz hücresel teknolojinin ilk kez kullanılmasından bu yana geçen 40 yılı aşkın süre içinde, 1G'den 5G'ye uzanan süreçte önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Tablo 1.1'de ayrıntılı olarak gösterildiği gibi, bu gelişmeler iletişim ve bağlantı teknolojilerinde çığır açıcı dönüşümlere yol açmıştır:

- **İndirme Hızları:** İlk nesillerdeki Kbps hızlarından 5G ile Gbps hızlarına kadar büyük bir artış sağlanmıştır.
- **İletişim Türleri:** Metin ve sesli mesajlaşmadan yüksek kaliteli video iletişimine geçiş, multimedya kapasitesindeki ilerlemeyi yansıtmaktadır.
- **Mobil İnternet Erişimi:** Akıllı telefonlarda internet kullanımının yaygınlaşmasıyla, günlük yaşamın bir parçası haline gelmiştir.
- **Sosyal Medya Paylaşımları:** Sosyal medya kullanımındaki artış, bireyler arası etkileşimi daha da artırmıştır.
- **Makineler Arası İletişim:** Cihazların birbiriyle iletişim kurma kapasitesi gelişmiştir.
- **Güvenli ve Hızlı Veri Aktarımı:** Düşük gecikme süreleriyle büyük miktarda veri aktarımını mümkün kılan güvenli iletişim sağlanmıştır.

Bu dönüşümler, kablosuz teknolojinin yalnızca bireylerin yaşamlarını değil, aynı zamanda endüstriyel ve toplumsal süreçleri de şekillendirdiğini göstermektedir.

**Tablo 1.1: Mobil Nesillerin Gelişim Süreçleri**

	Nesil	Dönem		Özellikler	Data Hızı
<b>1G</b>	1. Nesil Kablosuz Ağ	1980 - 1990	Ses Hizmeti	Analog Tabanlı Protokol	2.4 Kbps
<b>2G</b>	2. Nesil Kablosuz Ağ	1990 - 2000	Ses ve Mesajlaşma	İlk Dijital Protokoller (GSM)	64 Kbps
<b>3G</b>	3. Nesil Kablosuz Ağ	2000 - 2010	Ses ve Data (Multimedya, İnternet)	İlk Mobil Geniş Bant (CDMA)	2 Mbps
<b>4G</b>	4. Nesil Kablosuz Ağ	2010 - 2020	Data	IP-Tabanlı Protokoller (LTE)	100 Mbps
<b>5G</b>	5. Nesil Kablosuz Ağ	> 2020	Data, AR, VR	eMBB, URLLC ve mMTC	> 1 Gbps

**Kaynak:** RF Page

### 1.1.1 1G (1. Nesil) Mobil İletişim Sistemleri

Birinci nesil ağ teknolojisi (1G), 1980'li yılların başında ticari olarak kullanıma sunulmuş ve mobil iletişim alanında önemli bir dönüm noktası oluşturmuştur. Analog tabanlı radyo dalgaları ile çalışan 1G, dijital olmayan bir yapı sunmuş olup düşük frekanslı ve düşük veri kapasiteli bir sistemdir. Bu teknoloji yalnızca sesli aramalar yapılmasına olanak tanımış, veri iletişimi veya multimedya özelliklerini içermemiştir.

1G'nin önde gelen teknolojilerinden biri Nordic Mobile Telephone (NMT) sistemi olmuştur. İlk kez 1981 yılında tanıtılan bu sistem, 450 MHz frekans bandında çalışmış ve İskandinav ülkelerinde yaygın olarak kullanılmıştır. NMT, mobil iletişimde önemli bir başlangıç noktası olarak kabul edilmiştir.

Bu özellikleriyle 1G, mobil iletişimin temelini oluşturarak, sonraki nesil ağ teknolojilerinin gelişimine zemin hazırlamıştır. Şekil 1.1'de birinci nesil mobil telefonlardan bir örnek verilmiştir.



**Şekil 1.1: Birinci Nesil Mobil Telefonlardan Motorola DynaTAC 8000X**

**Kaynak:** Researchgate

### **1.1.2 2G (2. Nesil) Mobil İletişim Sistemleri**

1G teknolojisinin geliştirilmesinin ardından, ilk dijital mobil iletişim standardı olan GSM (Global System for Mobile Communications), 1991 yılında Finlandiya'da tanıtılmıştır. GSM, mobil iletişimde dijitalleşmenin başlangıcını temsil eden ikinci nesil (2G) teknolojisinin temelini oluşturmuştur.

Bu yeni nesil teknoloji, birinci nesil sistemlerin sınırlamalarını aşarak şifreli sesli aramalar ve gelişmiş ses kalitesi sunmuş, özellikle statik gürültü gibi yaygın sorunların azaltılmasını sağlamıştır. Böylece 2G, kullanıcı deneyimini önemli ölçüde iyileştirerek mobil iletişimde bir sıçrama yaratmıştır.

Ayrıca, 2G teknolojisi veri iletimi açısından da kayda değer bir gelişme sunmuştur. Bu sistemdeki indirme hızları yaklaşık 0.2 Mbps'ye ulaşmış olup, 1G teknolojisindeki hızlarla kıyaslandığında oldukça yüksek bir performans sergilemiştir. Bu özellikler, GSM tabanlı 2G'nin, modern mobil iletişim altyapısının temel taşlarından biri olmasını sağlamıştır.

2G şebekesi, mobil cihazlar arasında temel veri aktarımını mümkün kılarak, mobil iletişimde önemli yeniliklere kapı aralamıştır. Bu teknoloji, kullanıcıların zil sesi indirme gibi basit veri hizmetlerine ve erken dönem akıllı telefon işlevlerine erişimini sağlamıştır. Ayrıca, 2G, kısa mesajlaşma (SMS) ve multimedya mesajlaşma (MMS) gibi veri tabanlı hizmetleri sunarak, iletişim yöntemlerini köklü bir şekilde dönüştürmüştür. SMS ve MMS üzerinden iletilen mesajlar, veri paketlerine dönüştürülerek gönderici telefonda bir baz istasyonuna, oradan da alıcı telefona aktarılmıştır. Bu yenilik, mesajlaşmayı daha hızlı, verimli ve kullanıcı dostu bir hale getirmiştir.

2G'nin sunduğu veri aktarım hızları, GPRS (General Packet Radio Service) teknolojisinin tanıtılmasıyla daha da geliştirilmiştir. GPRS, yaklaşık 114 Kbps (0,1 Mbps) hızlarına ulaşarak, mobil veri iletişimde önemli bir ilerleme sağlamıştır. Ardından gelen EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) teknolojisi ile bu hızlar yaklaşık 237 Kbps (0,2 Mbps) seviyesine çıkarılmıştır. Bu gelişmeler, 2G'nin yalnızca bir ses iletişim platformu olmaktan öteye geçerek, veri aktarımını ve multimedya özelliklerini destekleyen kapsamlı bir iletişim altyapısına dönüşmesini sağlamıştır [2, 3].

### **1.1.3 3G (3. Nesil) Mobil İletişim Sistemleri**

3G teknolojisi, 2001 yılında Japonya'da NTT DoCoMo tarafından halka tanıtılarak mobil iletişimde yeni bir dönemin başlamasını sağlamıştır. 2 Mbps'ye kadar ulaşabilen veri aktarım hızları ile 3G, video akışı, video konferans ve canlı video sohbet gibi uygulamaları mümkün kılmış ve 2G teknolojisine kıyasla önemli bir ilerleme sunmuştur. 3G'nin temel radyo iletişim teknolojileri olan W-CDMA (Wideband Code Division Multiple Access) ve CDMA2000, CDMA (Code Division Multiple Access) teknolojilerine dayanmaktadır. Bu teknolojiler, artan bant genişliği ve daha hızlı veri aktarım hızları sayesinde mobil cihazların multimedya hizmetlerini daha etkin bir şekilde kullanmasına olanak tanımıştır.

3G'nin getirdiği bu yenilikler, mobil iletişimde ses ve mesajlaşmayı açan bir deneyim sunmuş, video görüşmeleri ve multimedya hizmetlerinin yaygın olarak benimsenmesini kolaylaştırmıştır [4].

#### **1.1.4 4G (4. Nesil) Mobil İletişim Sistemleri**

4G teknolojisi, 2000'lerin sonlarında LTE (Long Term Evolution) teknolojisi ile ticari kullanıma sunulmuş ve daha sonra LTE-Advanced teknolojisi ile daha yüksek hızlar ve geliştirilmiş performans sunmuştur. 4G, saniyede 100 Mbps'ye kadar veri aktarım hızları sağlayarak, mobil iletişimde önemli bir hız artışı sağlamıştır. Ayrıca, IP (İnternet Protokolü) tabanlı bir protokole sahip olması, internet üzerinden veri iletimini daha verimli hale getirmiştir. Bu zellik, VoIP (Voice over IP) teknolojisini kullanarak IP tabanlı sesli iletişimi de mümkün kılmıştır.

4G'nin en belirgin özellikleri, önceki nesil 3G'ye kıyasla çok daha yüksek veri hızları ve daha düşük gecikme süreleri sunmasıdır. Bu gelişmeler, video akışları, yüksek kaliteli video konferanslar ve online oyunlar gibi veri yoğun uygulamaların daha etkin ve kesintisiz bir Şekilde kullanılabilmesini sağlamıştır [5].

#### **1.1.5 4.5G (LTE-Advanced)**

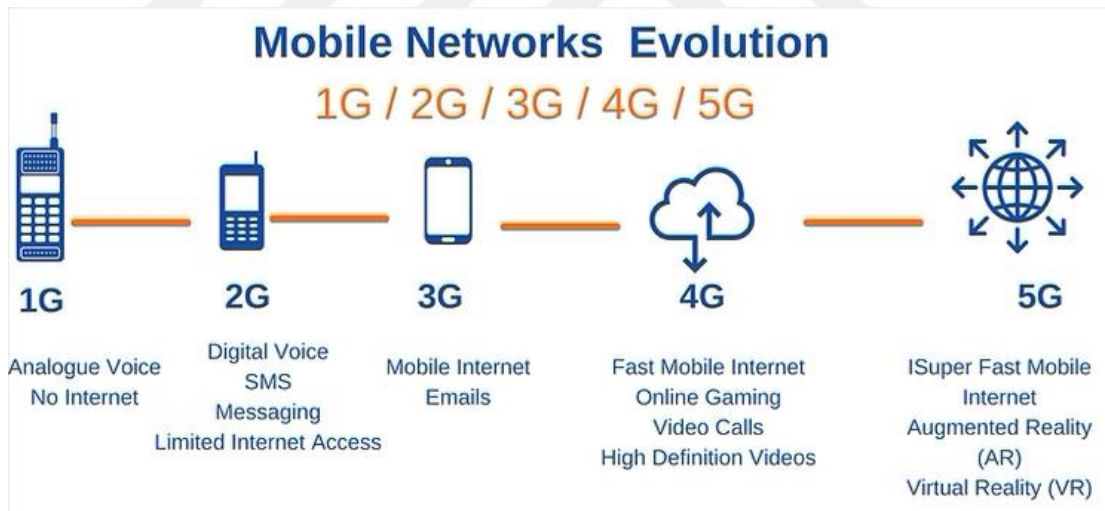
4.5G, aynı zamanda LTE-Advanced Mobile Communication Systems olarak da bilinen, dördüncü nesil telekomünikasyon hizmetlerinin bir uzantısıdır ve daha yüksek mobil internet hızı, artan veri kapasitesi ve daha düşük gecikme süresi sunmaktadır. Diğer bir adıyla LTE-Advanced veya LTE-A olarak da anılmaktadır. 4G'ye kıyasla, 4.5G, mobil internet hızlarını önemli ölçüde artırarak teorik olarak 1 Gbps'ye kadar veri iletimi sağlayabilmektedir.

Bu gelişmiş teknoloji, özellikle "Taşıyıcı Toplama" (Carrier Aggregation) tekniğini kullanarak farklı frekans bantlarını birleştirir, böylece daha geniş bir veri yolu sunar ve daha yüksek hızda veri iletimi gerçekleştirir. Bu zellik, özellikle görüntülü görüşmeler veya anlık veri iletimi gibi uygulamalarda, düşük gecikme süreleri ile daha hızlı ve akıcı iletişim olanağı sağlar. 4.5G'nin sunduğu bu avantajlar, hem bireysel kullanıcı deneyimini hem de endüstriyel uygulamaları önemli ölçüde iyileştirmiştir [6].

### 1.1.6 5G Teknolojisi

5G teknolojisi, sadece hızda önemli bir artış sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda gelecekteki telekom ağlarının evriminde kritik bir rol oynamaktadır. Bu yeni nesil telekomünikasyon altyapısının, kapsamlı bir 5G IoT (Nesnelerin İnterneti) ekosistemi oluşturması beklenmektedir. Bu ekosistem, milyarlarca birbirine bağlı cihazın iletişim gereksinimlerini karşılamak amacıyla hızları artırarak, gecikmeyi azaltarak ve maliyetleri düşürerek, endüstriyel ve bireysel uygulamalarda devrim yaratacaktır.

Teorik olarak, 5G'nin veri iletim hızı 10 Gbps'ye kadar ulaşabilir, bu da onu 4G LTE'den yaklaşık 10 ila 100 kat daha hızlı hale getirmektedir. Bu önemli hız artışı, özellikle büyük veri akışlarını ve yüksek çözünürlüklü medya iletimini kolaylaştırırken, aynı zamanda endüstriyel otomasyon, akıllı şehirler ve bağlı cihazların verimli bir şekilde çalışmasını mümkün kılacaktır. 5G'nin bu potansiyeli, hem mobil iletişimdeki mevcut sınırları aşacak hem de dijital dönüşüm süreçlerine hız kazandıracaktır. Şekil 1.2 5G'ye gelinceye kadar gerçekleşen evrimi göstermektedir.



**Şekil 1.2: Mobil Ağların Evrimi**

**Kaynak:** Mobile Network Evolution from 1G to 5G, Susie S, 2023, Visermark

4G ile 5G arasındaki temel farklar, gecikme, bant genişliği kapasitesi ve genel ağ kapasitesi gibi unsurlarda belirginleşmektedir. 5G teknolojisi, gecikmeyi önemli ölçüde azaltarak daha hızlı indirme ve yükleme hızları sunmaktadır.

Örneğin, 4G ağları ortalama olarak yaklaşık 50 milisaniye gecikme süresine sahipken, 5G'nin gecikme süresi 1 milisaniyeye kadar düşebilir. Bu azalma, özellikle gerçek zamanlı uygulamalar, video konferanslar ve oyunlar gibi düşük gecikme gerektiren hizmetlerin performansını önemli ölçüde iyileştirecektir.

Ayrıca, 5G'nin bant genişliği kapasitesi çok daha geniştir; 30 GHz ile 100 GHz arasında değişen frekans aralıklarında çalışabilen 5G, daha fazla cihazın bağlanmasını ve daha geniş bir teknoloji yelpazesinde verimli bir şekilde hizmet verilmesini mümkün kılmaktadır. Bu geniş bant genişliği, yalnızca daha hızlı veri iletimi sağlamakla kalmaz, aynı zamanda Nesnelerin İnterneti (IoT) gibi yoğun cihaz bağlantılarına dayalı uygulamaların da başarılı bir şekilde hayata geçirilmesini destekler. Bu özellikler, 5G'yi daha yüksek performanslı ve ölçeklenebilir bir ağ çözümü haline getirmektedir. 5G'nin sunduğu gelişmiş kapasite, özellikle akıllı şehirler ve çeşitli endüstriyel uygulamalar için kritik bir öneme sahiptir.

5G teknolojisinin, sağlık, ulaşım, eğlence, savunma sanayi, üretim ve imalat gibi birçok sektörde önemli faydalar sağlaması beklenmektedir. Bu teknoloji, Ultra Güvenilir ve Düşük Gecikmeli İletişimler (URLLC) sayesinde, otonom araçların yaygın olarak benimsenmesini mümkün kılacaktır. Düşük gecikme süreleri, görev açısından kritik sistemlerde büyük önem taşır ve bu da 5G'nin en belirgin avantajlarından biridir.

Örneğin, bir acil durum senaryosunda, güvenlik güçleri düşük gecikmeli video iletimini gerçekleştirebilir veya canlı yayın yaparak anında bilgi paylaşımı yapabilir. Bu, hem operasyonel verimliliği artırır hem de müdahale süresini kısaltarak, güvenlik ve sağlık hizmetlerinde önemli iyileştirmeler sağlar.

5G teknolojisi, veri gönderme ve alma arasındaki gecikmeyi önemli ölçüde azaltarak, iletişimdeki hız ve doğruluğu artırmaktadır. 4G ağlarının gecikmesi genellikle 50 milisaniye civarındayken, 5G bu süreyi 1 milisaniye (1 ms) gibi çok daha düşük bir seviyeye çekmektedir. Bağlamı daha iyi anlayabilmek için, bir milisaniyenin saniyenin binde biri olduğu ve ortalama bir insanın tepki süresinin yaklaşık 250 milisaniye (veya çeyrek saniye) olduğu belirtilmelidir. İnsanlar, eğitimle bu tepki süresini 190-200 milisaniye seviyelerine kadar indirebilirler.

Buna karşılık, 5G özellikli bir aracın tepki süresi, bir insanın tepki süresinin yaklaşık 250 katı kadar hızlıdır. Örneğin, 100 km/s hızla ilerleyen bir araçta 250 ms'lik bir

gecikme durumunda, tepki mesafesi yaklaşık 20,8 metre olurken, 1 ms'lik bir gecikme ile bu mesafe yalnızca yaklaşık 3 santimetre olur. Bu fark, özellikle otonom araçlar gibi yüksek hızda tepki vermesi gereken sistemlerde 5G'nin sağladığı gecikme avantajının ne kadar kritik olduğunu göstermektedir. Bu özellik, güvenlik, performans ve verimlilik açısından önemli bir gelişme sağlar [7]. 5G teknolojisi, otonom araçların çevresel verileri daha hızlı işlemelerini ve bu verileri gerçek zamanlı olarak yanıtlamalarını mümkün kılmaktadır. Bu, araçların yüzlerce sinyali hızla işleyip yanıt verirken, aynı zamanda bu eylemleri milisaniyeler içinde diğer araçlara ve yol altyapısına iletmelerini sağlar. Bu hız ve düşük gecikme süresi, otonom araçların daha güvenli ve verimli bir şekilde hareket etmelerini, trafikle daha iyi uyum sağlamalarını ve potansiyel tehlikelere anında tepki vermelerini sağlar. 5G'nin sunduğu bu avantaj, özellikle yoğun trafikteki otonom araçların koordinesini artırarak, akıllı şehirlerin ve bağlantılı ulaşım sistemlerinin temel bileşenlerinden biri haline gelmektedir.

5G teknolojisinin daha yaygın bir şekilde benimsenmesiyle birlikte, sağlık profesyonelleri ve acil müdahale ekipleri, büyük görüntüleme dosyalarının daha hızlı bir şekilde aktarılmasını mümkün kılacaklardır. Bu, telemedikal uygulamaları, gerçek zamanlı izlemeyi ve diğer kritik sağlık hizmetlerini etkin bir şekilde destekleyerek, hasta bakımını iyileştirecektir. 5G'nin sunduğu düşük gecikme süreleri ve yüksek veri iletim hızları, sağlık hizmetlerinin daha hızlı, doğru ve verimli bir şekilde sunulmasını sağlayarak, özellikle acil durumlar ve uzaktan izleme gereksinimlerinde büyük avantajlar sunmaktadır. Bu gelişmeler, sağlık sektöründe dijital dönüşümü hızlandırarak, daha kaliteli ve erişilebilir sağlık hizmetlerinin sağlanmasına katkıda bulunacaktır.

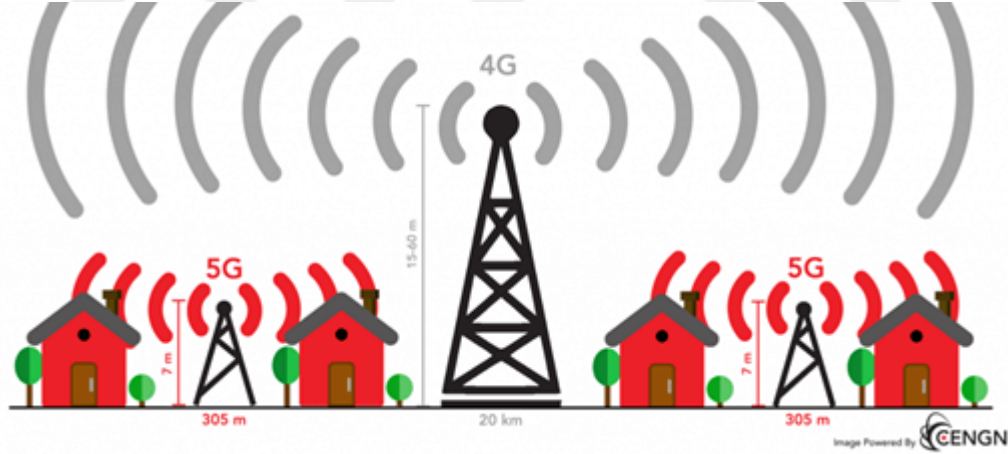
### **1.1.7 5G ve 4G Teknolojilerinin Karşılaştırılması**

5G indirme hızları, 5G'nin daha geniş frekans aralıkları kullanması sayesinde, 4G'ye kıyasla daha hızlıdır. 5G, 4G'ye göre daha yüksek frekanslarda çalışarak, daha fazla sayıda eş zamanlı bağlantıyı ve daha hızlı veri transferlerini destekleyebilir. Ayrıca, 5G teknolojisi, daha geniş bant genişliği ve daha düşük gecikme süresi sağlayarak, yüksek veri iletimi ve daha verimli bağlantılar sunmaktadır.

Bununla birlikte, 5G baz istasyonları, daha kısa mesafelerde yüksek frekansta veri iletimi gerçekleştirir, bu da hız artışını mümkün kılarken, kapsama alanını sürdürmek için küçük hücreler gibi ek altyapı gereksinimlerini ortaya çıkarır. Bu ağ tasarımı, 5G ağlarında önemli bir hız artışı sağlarken, aynı zamanda veri iletiminde daha yüksek verimlilik ve daha etkili işleme kapasitesi sunar.

5G teknolojisinin, daha yüksek frekanslarda çalışmasının bir sonucu olarak, 5G baz istasyonlarından gelen radyo dalgalarının menzili ve geçirgenliği önemli ölçüde azalır. Bu nedenle, 5G baz istasyonları, 4G baz istasyonlarına kıyasla çok daha küçüktür. Şekil 1.3, 5G ve 4G baz istasyonlarının menzil bilgilerini görsel olarak sunmaktadır.

Veri hızı açısından, 4G ağları, 1 Gbps'ye kadar hızlar sunabilirken, 5G, 10 Gbps'ye kadar hızları artırarak önemli bir performans iyileştirmesi sağlamaktadır. Gecikme süresi ise, 4G'deki 50 ms'den 5G'deki 1 ms'ye kadar düşebilir. Ayrıca, 4G'nin dar bir spektrum aralığına sahip olmasına karşın, 5G çok daha geniş bir spektruma sahip olup, mmWave gibi yüksek frekansları kullanarak veri iletiminde önemli bir hız artışı ve kapasite iyileştirmesi sunmaktadır.



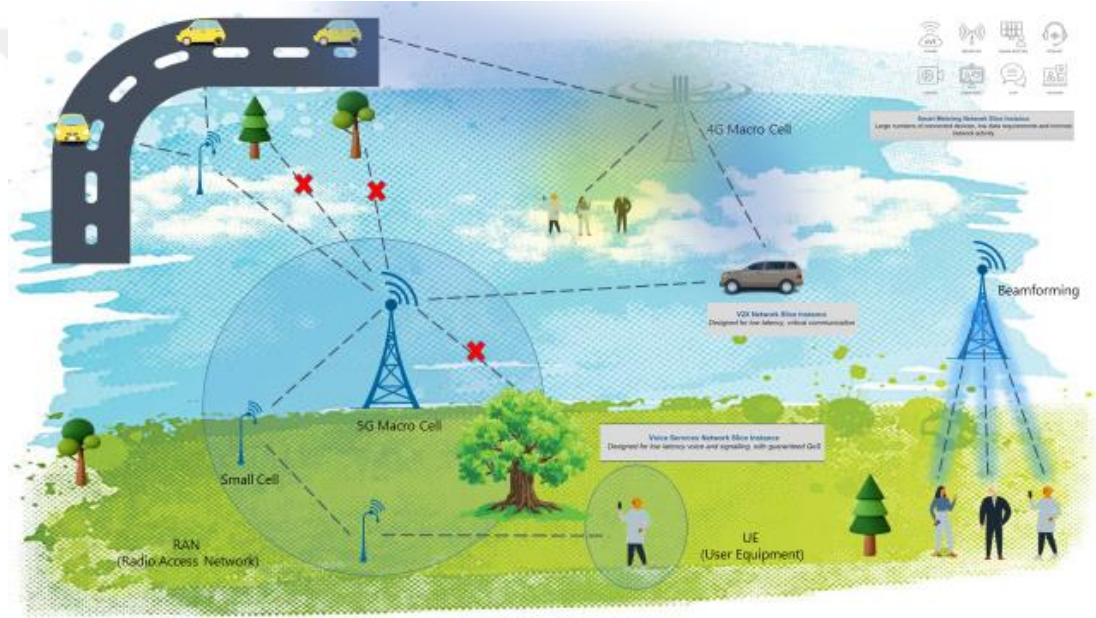
**Şekil 1.3: 4G ve 5G Baz İstasyonları ve Menziller**

**Kaynak:** CENGN

5G teknolojisi, 4G'ye kıyasla çok daha yüksek bir cihaz bağlantı kapasitesine sahiptir. Kilometrekare başına 1 milyon bağlantı işleyebilme kapasitesiyle, 5G, 4G'nin 10.000 cihazına kıyasla çok daha fazla cihaz bağlantısını destekleyerek bağlantı yönetiminde

önemli bir iyileştirme sağlamaktadır. Bu gelişme, Nesnelerin İnterneti (IoT) cihazları, akıllı şehirler ve bağlı altyapı gibi artan talepleri karşılayabilmek için kritik bir öneme sahiptir. Ayrıca, 5G'nin ağ performansından ödün vermeden daha fazla kullanıcıyı ve veri yoğun uygulamaları aynı anda yönetebilme kapasitesi, teknolojinin verimliliğini artıran önemli bir faktördür.

Şekil 1.4, 4G ve 5G NSA dağıtımındaki farkları görsel olarak sunarak, 5G'nin artırılmış cihaz kapasitesinin, yoğun nüfuslu alanlarda genel bağlantı kalitesini geliştiren temel bir avantaj olduğunu göstermektedir. Bu özellik, 5G'nin özellikle yüksek yoğunluklu alanlarda daha verimli çalışmasını sağlayarak, bağlantı güvenilirliği ve ağın genel verimliliğini artırmaktadır [8, 9].



**Şekil 1.4: 4G ve 5G Bağımsız Olmayan Dağıtım (NSA)**

## 1.2 5G'nin özellikleri

5G teknolojisi, önceki dört nesil mobil ağdan farklı olarak, uzun mesafelerde iletim sağlamak için büyük ölçüde makro hücrelere ve yüksek güç tüketimine dayanmak yerine, daha verimli bir yapı kullanmaktadır. Ağ verimliliğini artırmak ve performansı optimize etmek amacıyla, birden fazla bant genişliği üzerinden veri iletimi gerçekleştirir.

5G, 1 GHz altı bantlardan başlayarak, milimetre dalgaları (mmWave) olarak bilinen son derece yüksek frekans bantlarına kadar geniş bir radyo frekansı aralığında çalışmak üzere tasarlanmıştır. Daha düşük frekans bantları, büyük yayılma mesafeleri sağlarken, daha yüksek frekans bantları ise veri aktarım kapasitesini artırarak, 5G ağlarının daha yüksek hızlarla veri iletilmesini mümkün kılar. Bu, 5G'nin daha geniş alanlarda etkin veri transferi sağlarken, yüksek veri yoğunluklu uygulamaların da daha verimli bir şekilde çalışmasına olanak tanır.

5G ağlarının temelini oluşturan üç ana frekans bandı bulunmaktadır:

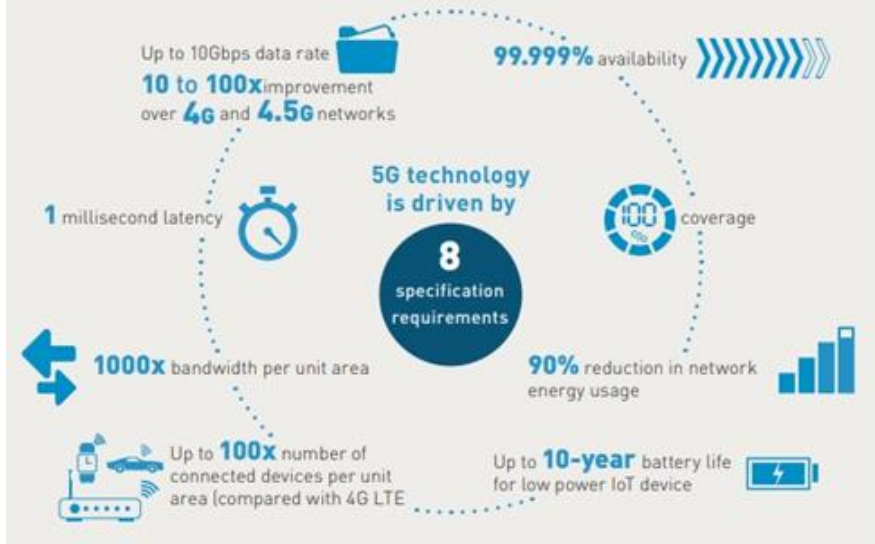
- **5G Düşük Bant (1 GHz altı):** Bu bant, 1 GHz'in altında çalışır ve geniş kapsama alanı sağlamakla birlikte, binalardan geçerken sinyal kaybını azaltma avantajı sunar. Kırsal alanlar ve geniş bölgeler için iyi kapsama sağlar. Şu anda 4G LTE için kullanılan spektrumu temel alır ve mevcut 5G cihazları için LTE 5G mimarisi sunar. Bu nedenle, düşük bant 5G'nin performansı, 4G LTE'ye benzer olup, piyasada bulunan 5G cihazlarının etkin kullanımını destekler.
- **5G Orta Bant (1 GHz ile yaklaşık 6 GHz):** 1 GHz ile 6 GHz aralığında çalışır ve daha hızlı veri hızları sunar. Şehirlerdeki yoğun nüfuslu alanlar gibi yerlerde yaygın olarak kullanılır. Bu bant, düşük banttan daha yüksek veri hızları sağlarken, kapsama alanı daha sınırlıdır.
- **5G Yüksek Bant (mmWave, 24 GHz ve üzeri):** 24 GHz ile 100 GHz aralığına kadar uzanan bu bant, 5G teknolojisinde kullanılan en yüksek frekansları temsil eder. Yüksek frekanslı sinyallerin engellerden geçmesi zorluğu nedeniyle, kısa mesafelerde etkin çalışır. Kapsama alanı sınırlıdır ve güvenilir bağlantılar sağlamak için yoğun bir hücresel altyapı gerektirir. Son derece yüksek veri hızları sunduğu halde, duvarlar gibi fiziksel engeller tarafından bozulabilir. Bu frekans bandı, genellikle stadyumlar ve yoğun kent merkezleri gibi yüksek nüfus yoğunluğuna sahip alanlarda kullanılmaktadır.

5G teknolojisinin üç temel özelliği olan eMBB, uRLLC ve mMTC aşağıda açıklanmaktadır. Bu özelliklerin her biri, 5G'nin sunduğu yüksek hız, düşük gecikme ve geniş cihaz bağlantı kapasitesinin temel taşlarını oluşturur.

## 5G Teknolojisinin Temel Özellikleri:

- eMBB (Enhanced Mobile Broadband): Geliştirilmiş mobil geniş bant teknolojisi, 5G'nin temel özelliklerinden biridir ve kullanıcılara daha hızlı bağlantılar ve artırılmış kapasite sağlar. Bu teknoloji, veri hızlarının Gbps seviyelerine ulaşmasına imkan tanır, böylece yüksek çözünürlüklü video akışı, sanal gerçeklik ve artırılmış gerçeklik gibi veri yoğun uygulamalar için daha uygun bir altyapı sunar.
- uRLLC (Ultra Reliable Low Latency Communications): Ultra güvenilir düşük gecikmeli iletişim, 5G'nin diğer önemli özelliklerinden biridir. Bugün 50-100 ms aralığındaki gecikmeler normal kabul edilirken, 5G teknolojisi bu gecikmeleri 1 ms'ye kadar düşürmeyi amaçlar. Bu özellik, otomatik sürüş gibi görev açısından kritik uygulamaların güvenli ve etkin bir şekilde çalışmasını sağlar.
- mMTC (Massive Machine-Type Communications): Çok makine tipi iletişim, 5G'nin bir başka önemli özelliğidir ve Nesnelerin İnterneti (IoT) cihazlarının büyük ölçekli bağlanabilirliğini sağlar. mMTC, milyarlarca cihazın aynı anda verimli bir şekilde birbirleriyle iletişim kurmasına olanak tanır, bu da akıllı şehirler, endüstriyel otomasyon ve diğer IoT uygulamaları için temel bir bileşendir.

Geleneksel makro hücrelerin yanı sıra, 5G teknolojisi, milimetre dalga (mmWave) spektrum bantlarını desteklemek için çok sayıda küçük mikro hücreyi içeren bir ağ yapısına sahiptir. Bu yapılar, ultra yüksek hızlı ağ kapsamı sağlamak için kritik rol oynar. 5G'nin artırılmış mobil ağ kapasitesi ve azaltılmış gecikmesi, 5G destekli akıllı fabrikalar, akıllı şehirler ve kesintisiz bağlantılı cihazlar gibi yeni nesil uygulamaların geliştirilmesine olanak tanır. Şekil 1.5, 5G teknolojisinin sunduğu fırsatları ve potansiyelini özetlemektedir.



**Şekil 1.5: 5G Teknolojisinin Sunduğu Fırsatlar**

**Kaynak:** Gemalto

Şekil 1.5’te yer alan bilgiler, 5G teknolojisinin mobil iletişimde sunduğu yenilikleri ve iyileştirmeleri kapsamaktadır. 5G teknolojisi, mobil iletişim alanında önemli iyileştirmeler ve yenilikler sunmaktadır. Bu yenilikler arasında şunlar öne çıkmaktadır:

- Veri hızlarında önemli artış: 5G, 4G ve 4.5G ağlarına kıyasla 10 Gbps'ye kadar veri hızları sunarak, mevcut ağ teknolojilerinden 10 ila 100 kat daha yüksek hızlar sağlar.
- Düşük gecikme: 1 milisaniye kadar düşük gecikme, görev açısından kritik uygulamalar için uygun bir altyapı sunar.
- Bant genişliği kapasitesinde artış: Bir unit alanda 1000 kat daha fazla bant genişliği sağlayarak, veri iletimi kapasitesini büyük ölçüde artırır.
- Bağlı cihaz sayısındaki artış: 4G LTE'ye kıyasla birim alan başına 100 kat daha fazla bağlı cihaz desteği sunar, bu da özellikle IoT uygulamaları için büyük bir avantajdır.
- Yüksek ağ güvenilirliği: %99.999 kullanılabilirlik ile ağı kesintisiz ve güvenilir çalışmasını sağlar.

- Kapsama alanı: % 100 kapsama ile her yerde ve her zaman bağlantı sağlanması mümkün olur.
- Daha düşük enerji tüketimi: Ağ enerji tüketiminde %90 azalma sağlayarak, sürdürülebilirlik açısından önemli bir avantaj sunar.
- Uzun pil ömrü: Düşük güç tüketen IoT cihazları için 10 yıla kadar pil ömrü sağlar, bu da cihazların daha uzun süre verimli bir şekilde çalışmasına olanak tanır.

5G teknolojisinin önceki ağ teknolojileriyle paralel olarak varlık göstermesi gereklidir; bunun iki temel nedeni bulunmaktadır:

- 1) Yeni ağ teknolojilerinin geliştirilmesi ve uygulanması: Bu süreç, büyük ölçekli işletmeler ve taşıyıcılar arasında önemli ölçüde zaman, yatırım ve iş birliği gerektiren bir aşamadır. Dolayısıyla, 5G'nin geniş çapta benimsenmesi ve uygulanabilmesi, mevcut ağ altyapılarıyla uyumlu bir geçiş süreci gerektirir.
- 2) Mevcut ağ teknolojilerine yapılan önemli yatırımlar: 2G, 3G ve 4G LTE gibi ağ teknolojilerine yapılan yatırımlar, söz konusu ağların kullanıcılar tarafından uzun bir süre boyunca aktif olarak kullanılması gerektiği anlamına gelir. Kuruluşlar, bu ağlardan elde edilen gelirleri optimize etmeyi hedeflerken, aynı zamanda yeni teknolojilerin entegrasyonunu da izler ve gerçekleştirirler. Bu sayede, eski sistemlerin kullanım süresi ile teknolojik ilerlemeler arasındaki denge sağlanmış olur.

### **1.3 5G'nin Avantajları**

Ortaya çıkan 5G ağları, 4G'ye kıyasla daha düşük gecikme süreleri, artan kapasite ve genişletilmiş bant genişliği sunarak, küresel ölçekte bireylerin yaşam biçimlerini, çalışma şekillerini ve iletişim süreçlerini önemli ölçüde dönüştürecek potansiyel bir değişimi simgelemektedir.

### 1.3.1 Düşük Gecikme

Gecikme, bir sinyalin kaynaktan alıcıya ulaşarak geri dönmesi için gereken süreyi ifade eder ve bu süreyi en aza indirmek, ardışık kablosuz teknoloji nesillerinin temel hedeflerinden biri olmuştur. 5G ağlarının, 4G LTE teknolojisine kıyasla önemli ölçüde daha düşük gecikme süreleri sunarak veri iletiminde gidiş-dönüş süresini yaklaşık 1 milisaniyeye düşürmesi beklenmektedir.

5G teknolojisinin sunduğu düşük gecikme süreleri, insan görsel işleme hızından daha üstün performans göstererek cihazların neredeyse gerçek zamanlı olarak uzaktan kontrol edilmesine olanak tanıyacaktır. 5G ve IoT teknolojilerinin entegrasyonu ile geliştirilen uygulamalarda, insan tepki süresi sistemlerin etkinliği üzerinde sınırlayıcı bir faktör haline gelecektir. Bu durum, özellikle insan müdahalesine ihtiyaç duymayan ve makineden makineye iletişimi temel alan yeni nesil uygulamaların geliştirilmesi için önemli fırsatlar yaratacaktır.

Tarım, imalat ve lojistik gibi sektörler, 5G teknolojisinin sağladığı düşük gecikme sürelerinden ve yüksek bağlantı hızlarından önemli ölçüde fayda sağlayacaktır. Bununla birlikte, bu avantajlar yalnızca endüstriyel alanlarla sınırlı kalmamakta, aynı zamanda sanal gerçeklik (VR) ve artırılmış gerçeklik (AR) gibi uygulamalar için de heyecan verici fırsatlar sunmaktadır. 5G'nin sağladığı yüksek veri aktarım hızları ve düşük gecikmeli bağlantılar, VR ve AR teknolojilerine yönelik artan kullanıcı talebini karşılayarak daha akıcı, gerçekçi ve sürükleyici deneyimler sunmayı mümkün kılmaktadır. Bu teknolojilerin gelişimi, eğitimden eğlenceye ve ticarete kadar geniş bir yelpazede uygulama potansiyeline sahiptir.

### 1.3.2 Gelişmiş Kapasite

5G teknolojisi, 4G'ye kıyasla 1.000 kata kadar daha yüksek kapasite sunarak Nesnelerin İnterneti (IoT) alanında önemli yeniliklere olanak tanıyacaktır. 5G ve IoT'nin birleşimi, kablosuz ağların ve internetin kullanım biçimlerinde köklü bir dönüşüm sağlayacak büyük bir potansiyele sahiptir. Bu teknoloji, yüzlerce hatta binlerce cihaz arasında kesintisiz iletişimi mümkün kılarak şehirlerden fabrikalara, çiftliklerden okullara ve evlere kadar geniş bir yelpazede yenilikçi uygulamaların geliştirilmesini destekleyecektir.

5G'nin sunduğu olanaklar, çok sayıda sensörün makineler üzerinde konuşlandırılması ve tedarik zinciri yönetimi gibi karmaşık süreçlerin otomasyonunu içeren çeşitli kullanım senaryolarını kapsamaktadır. Bu yetenekler, yalnızca üretkenliği artırmakla kalmayacak, aynı zamanda enerji tüketimi ve maliyet optimizasyonu gibi konularda da ilerlemeler sağlayacaktır. Dolayısıyla, 5G'nin IoT ile entegrasyonu, endüstriler arasında dijital dönüşümü hızlandırmada kritik bir rol oynayacaktır.

Akıllı evler ve akıllı şehirler, 5G teknolojisinin gelecekteki uygulamaları arasında merkezi bir öneme sahip olacaktır. Bağlı cihazların sayısındaki artışla birlikte, yapay zeka (AI), uç bilişim aracılığıyla daha önce erişilemeyen alanlarda etkisini artıracaktır. Örneğin, çevresel etkiyi en aza indirmek için kişiselleştirilmiş enerji tasarrufu önerileri sunan akıllı evler, 5G'nin yüksek bağlantı kapasitesinden yararlanarak daha verimli ve sürdürülebilir yaşam alanları sunacaktır. Bununla birlikte, akıllı şehirler bağlamında, gerçek zamanlı trafik verilerine dayalı olarak trafik ışıklarının dinamik ayarlanması gibi uygulamalar, şehir içi ulaşımı daha verimli hale getirecektir. Bu tür 5G tabanlı çözümler, yalnızca enerji ve zaman tasarrufunu artırmakla kalmayacak, aynı zamanda karbon ayak izini azaltarak çevresel sürdürülebilirliği destekleyecektir.

5G'nin sunduğu gelişmiş ağ kapasitesi, günlük yaşamın hemen her yönünde önemli bir dönüşüme zemin hazırlayarak bireyler ve toplumlar üzerinde geniş kapsamlı bir etki yaratacaktır.

### **1.3.3 Gelişmiş Bant Genişliği**

5G ağlarının sunduğu daha yüksek veri hızları ve artırılmış ağ kapasitesi, 4G LTE ağları ile karşılaştırıldığında çok daha büyük veri hacimlerinin iletimine olanak tanımaktadır. Bu gelişim, 5G teknolojisinin yalnızca hız açısından değil, aynı zamanda veri yönetimi ve trafik optimizasyonu açısından da önemli avantajlar sunduğunu göstermektedir.

5G, geleneksel 4G'den farklı bir mimariyle tasarlanmış olup, özellikle yoğun kullanıcı talepleri sırasında daha etkili trafik yönetimi ve ağ performansı sunmaktadır. Bu yenilikçi mimari, kalabalık stadyumlar veya geniş mekanlar gibi yüksek kullanıcı yoğunluğuna sahip alanlarda bile güvenilir bağlantı sağlamayı mümkün kılmaktadır.

Örneğin, 5G'nin sağladığı genişletilmiş bant genişliği sayesinde, spor etkinliklerini takip eden kullanıcılar, herhangi bir koltuktan yüksek kaliteli canlı yayınlara erişim sağlayabilir. Bunun ötesinde, işletmeler de 5G'nin sunduğu gelişmiş bağlantı imkanlarından ve büyük veri analitiği araçlarından yararlanarak büyük ölçekli veri kümelerini değerli içgörülere dönüştürebilir. Bu, daha bilinçli karar alma süreçlerine ve inovasyona katkıda bulunarak iş dünyasına yeni fırsatlar sunmaktadır.

#### **1.4 5G Kullanım Alanları**

5G teknolojisinin dönüştürücü özelliklerinin, hemen hemen her sektörde köklü değişimlere yol açması beklenmektedir. Sağlık, tarım, perakende, ulaşım, lojistik, imalat, medya ve eğlence gibi çeşitli endüstriler, 5G'nin sunduğu yenilikçi imkânlardan faydalanmak için bu teknolojinin yaygın şekilde devreye alınmasını sabırsızlıkla beklemektedir. Bu sektörlerde 5G, daha hızlı ve güvenilir bağlantılar, düşük gecikme süresi ve genişletilmiş ağ kapasitesi gibi avantajlar sağlayarak operasyonel verimliliği artırma ve yeni uygulama alanları yaratma potansiyeli sunmaktadır. Bu durum, endüstrilerin dijitalleşme süreçlerini hızlandırmalarına ve daha yenilikçi iş modelleri benimsemelerine olanak tanıyacaktır.

##### **1.4.1 Medya ve Eğlence**

Geniş bant teknolojisinin yaygınlaşması, medya ve eğlence sektöründe önemli bir dönüşümü tetikleyerek film, televizyon ve oyun içeriklerinin bulut tabanlı platformlara taşınmasını mümkün kılmıştır. 5G teknolojisinin sunduğu yüksek hız, düşük gecikme süresi ve artırılmış ağ kapasitesi ile birlikte, farklı cihazlar ve mekânlarda üstün medya deneyimleri sunmak artık daha erişilebilir hale gelmektedir.

Kullanıcılar, 5G özellikli cihazlar aracılığıyla sorunsuz bir şekilde 4K çözünürlüklü video akışı gerçekleştirebilir, sürükleyici sanal gerçeklik (VR) uygulamalarını deneyimleyebilir ve son derece duyarlı oyun hizmetlerinden yararlanabilir. Bu yenilikler, içerik oluşturucular, bulut hizmeti sağlayıcıları ve telekomünikasyon operatörleri için yeni gelir fırsatları sunmakta ve sektör genelinde daha geniş bir ekonomik büyümeyi teşvik etmektedir.

##### **1.4.2 Üretim**

5G teknolojisinin yapay zeka (AI) ve akıllı uç bilişimle entegrasyonu, üretim sektöründe en büyük dönüşümü gerçekleştirme potansiyeline sahiptir. Bu teknolojiler,

Nesnelerin İnterneti (IoT) ve uç bilişimle desteklenen tedarik zinciri yönetimi, envanter kontrolü ve kalite güvence süreçlerini optimize ederek daha yüksek otomasyon seviyelerine ulaşılmasını sağlayacaktır. Bu entegrasyon, üretim süreçlerinde verimliliği artırırken maliyetlerin önemli ölçüde düşürülmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, gerçek zamanlı veri analitiği ve otonom sistemlerin katkısıyla, endüstriyel operasyonlarda daha hızlı karar verme süreçleri desteklenmekte, böylece üretim kalitesi ve operasyonel sürdürülebilirlik güçlenmektedir.

### **1.4.3 Perakende**

Geleneksel fiziksel mağazalar, artan çevrimiçi perakende rekabeti karşısında müşteri sadakatini sürdürmekte giderek daha fazla zorlukla karşılaşmaktadır. Ancak, 5G teknolojisinin sunduğu olanaklar, perakende sektöründe çok kanallı müşteri deneyimlerinin iyileştirilmesi için yeni fırsatlar yaratmaktadır.

5G'nin düşük gecikme süreleri ve yapay zeka destekli uygulamaları sayesinde, perakendeciler daha yenilikçi ve kullanıcı dostu çözümler geliştirebilecektir.

Örneğin, düşük gecikmeli ve yapay zeka destekli kameraların entegrasyonu, sorunsuz self-checkout sistemlerinin uygulanmasını mümkün kılacaktır. Bu sistemler, müşterilerin alışveriş sepetleriyle doğrudan mağazadan çıkmalarına olanak tanırken ödeme işlemlerinin arka planda otomatik olarak gerçekleştirilmesini sağlayacaktır. Bu tür yenilikler, hem müşteri memnuniyetini artıracak hem de perakendecilere operasyonel verimlilik kazandıracaktır.

### **1.4.4 Sağlık hizmetleri**

5G teknolojisi, hem sağlık hizmeti sağlayıcıları hem de hastalar için tıbbi bakımda devrim niteliğinde bir dönemi başlatmaktadır.

Örneğin, yapay zeka ile entegre edilmiş giyilebilir insülin pompaları, hastaların kişisel sağlık verilerini sürekli izleyerek anlık ve özelleştirilmiş diyabet yönetimi önerileri sunabilir. Benzer şekilde, akıllı implante defibrilatörler, hastaların kardiyolojik durumlarını gerçek zamanlı olarak izlerken, aynı anda kardiyologları olaydan derhal haberdar edebilir. Bu tür ileri düzey teknolojiler, 5G'nin sunduğu düşük gecikme ve yüksek veri iletim kapasitesinin sağlık hizmetlerinde daha verimli ve güvenli bir bakım sağlamak için nasıl kullanılabileceğini gözler önüne sermektedir.

#### **1.4.5 Otonom Sistemler**

Otonom sistemler, büyük sayıda IoT cihazını barındırmakta olup, bu cihazların birbirleriyle entegre bir şekilde çalışması gerekliliği, yüksek hızlı, düşük gecikmeli ve güvenli iletişim gereksinimlerini beraberinde getirmektedir. Bu bağlamda, otonom sistemlerin verimli bir şekilde işlem yapabilmesi için büyük veri akışlarının hızlı bir şekilde iletilmesi ve analiz edilmesi önemlidir. Bu tür veri işleme ihtiyaçları, 5G teknolojisinin sunduğu avantajlar ile daha etkin bir şekilde karşılanabilir. Özellikle savunma sanayisinde kullanılan otonom sistemlerin stratejik önemi, bu alandaki teknoloji geliştirmelerini hızlandırmıştır.

Otonom sistemlerin gelecekteki evrimi, 5G'nin düşük gecikme, yüksek hız ve güvenli iletişim özelliklerinden yararlanarak önemli bir ivme kazanacaktır. Bu nedenle, 5G teknolojisinin gelişimi, otonom sistemlerin etkinliğini artıracak ve bu alandaki yenilikçi uygulamalara önemli katkılar sağlayacaktır.

#### **1.5 5G'nin Kullanılmaya Başlandığı Ülkeler**

Kanada Yenilik, Bilim ve Ekonomik Kalkınma Bakanlığı (ISED) tarafından 3,5 GHz ve 3,8 GHz frekans bantları, 5G teknolojisi için temel spektrumlar olarak belirlenmiştir. Orta bant spektrumu, özellikle yüksek talebin yoğun olduğu kentsel alanlar için ideal bir çözüm sunmaktadır. Bu bantlar, 5G'nin gereksinim duyduğu yüksek veri hızı ve düşük gecikme performansını sağlamak için önemli bir altyapı oluşturmaktadır.

Kanada'daki telekomünikasyon sağlayıcılarının büyük çoğunluğu, 5G hizmetleri için 1,7/2,1 GHz ve 3,5 GHz frekans bantlarını kullanmaktadır. Kanada Yenilik, Bilim ve Ekonomik Kalkınma Bakanlığı (ISED), önümüzdeki yıllarda orta bant spektrumunun kullanılabilirliğini artırmayı hedeflemektedir [10].

ABD mobil endüstrisi, diğer ülkelerin 5G hizmetleri için daha geniş orta bant spektrumu tahsisi yapmasıyla birlikte artan bir endişeyle bu durumu izlemektedir. 5G orta bant tahsisleri bakımından ABD'nin gerisinde kalan Çin, 5G geleceğine odaklanarak, 6 GHz bandının büyük bir kısmını lisanslı mobil kullanıma sunmaktadır. Bu stratejik adım, Çin'in dünya çapında 5G ağlarında lider konumunu pekiştirmeyi ve yüksek performanslı bağlantılara dayalı yeni teknolojilerin geliştirilmesindeki rekabet avantajını sergilemektedir [11].

## 1.6 5G'nin Yaygınlaştırılması Pahalı Mı?

Yeni bir mobil ağın kurulumu, telekomünikasyon Őirketlerinin 5G altyapısına milyarlarca dolar yatırım yapmasını gerektirdiği için önemli finansal kaynaklar talep etmektedir. 5G dağıtımı sürecinde, bir mobil ağ operatörünün, ağın müşteriler tarafından kullanılabilir hale gelmeden önce, tüm gerekli bileşenler ve altyapıyı kapsayan çeşitli maliyetleri karŐılaması gerekmektedir. Bu maliyetler arasında Şunlar yer almaktadır:

- Spektrum lisanslaması
- Ağ dağıtımı için gerekli olan antenler, baz istasyonları gibi fiziksel altyapı elemanları
- Gerekli donanımın kurulumu için iş gücünün eğitimi
- Ağın test edilmesi
- Düzenleyici kurumlar tarafından belirlenen dağıtım ücretleri

## 1.7 5G'de Hız

İletişim teorisinde, daha kısa frekans dalga boylarının daha geniş bant geniŐlikleriyle iliŐkilendirildiđi bilinmektedir. 5G ağlarında kullanılan daha kısa dalga boyu frekansları, bu teknolojinin gelişmiş hızlarının temel itici gücü olarak öne çıkmaktadır. Bu yüksek bant genişliği spektrumu, yalnızca veri iletim hızlarını artırmakla kalmaz, aynı zamanda ağ kapasitesini iyileştirir, gecikmeyi azaltır ve genel performans kalitesini artırır.

## 1.8 5G Ağ Gecikmesi

5G teknolojisi genellikle yüksek veri iletim hızları ile iliŐkilendirilse de, dikkate alınması gereken bir diğer önemli faktör, ađ gecikmesinin azaltılmasının mümkün olup olmadığıdır. Gecikme, veri iletiminin baŐlatılması ile alınan yanıt arasındaki zaman aralığı olarak tanımlanır ve uçtan uca iletiŐimde meydana gelen gecikmeyi ifade eder. Örneđin, gecikme, bir fren sinyalinin gönderilmesi ile fren sisteminin gerček zamanlı aktivasyonu arasındaki zaman farkında gözlemlenebilir.

Mevcut hücresel ağlar, LTE Cat-M ve Dar Bant Nesnelere İnterneti (NB-IoT) gibi düşük güç tüketen sensör iletişim teknolojileri kullanarak otonom araçları desteklemeye odaklanmaktadır. Ancak, otonom araçların karmaşık manevralarını gerçekleştirebilmesi için, hızlanma, yavaşlama ve şerit değiştirme gibi işlemlerle birlikte gerçek zamanlı, düşük gecikmeli ve hızlı bilgi paylaşımı gerekmektedir. Bu bağlamda, düşük gecikmeli 5G sistem mimarisi, araçtan her şeye (V2X) bağlantıyı sağlama kapasitesine sahip olup, otonom araçların etkinliğini artıran kritik bir rol oynamaktadır.

## **1.9 5G Momentumu**

GSMA Intelligence verilerine göre, küresel 5G bağlantı sayısı 1,6 milyara ulaşmış olup, 2030 yılına kadar bu sayının 5,5 milyara çıkması beklenmektedir. Ocak 2024 itibarıyla 101 ülkede 261 operatörün ticari 5G hizmeti sunduğu bildirilmekte ve 47 operatörün 5G Standalone (SA) ağlarını devreye aldığı, 89 operatörün ise bu ağları devreye alması beklendiği ifade edilmektedir. Bu ağ genişlemesi, 2030 yılına kadar 38,5 milyar bağlantıyı aşarak, tüketici IoT'sini geride bırakması öngörülen kurumsal IoT'nin ölçeklenmesi için kritik bir öneme sahiptir. Ayrıca, 5G teknolojisinin, 2029 yılına kadar artan veri trafiğiyle yönlendirilen küresel mobil bağlantıların %51'inden fazlasını oluşturması ve 2030 yılı itibarıyla Generative AI uygulamaları ve diğer gelişmiş kullanım senaryolarıyla desteklenen bağlantı başına ortalama 47,9 GB/ay'a ulaşması beklenmektedir [12].

## **1.10 5G Teknolojisinde Güvenlik**

Evrensel Abone Kimlik Modülü (USIM), 3G, 4G LTE ve 5G ağları için özel olarak tasarlanmış bir bileşendir ve çağdaş mobil iletişim sistemlerinde güvenli erişim ve kullanıcı kimlik doğrulaması için kritik bir rol oynamaktadır. USIM, kullanıcı verilerini korumak ve mobil ağlar üzerinden güvenli iletişimi sağlamak amacıyla gelişmiş şifreleme tekniklerini kullanarak abone kimlik yönetiminin güvenliğini artırmakta ve bu sürecin verimliliğini optimize etmektedir. Bu özellik, mobil ağların güvenliğini sağlamada ve kullanıcı bilgilerini korumada önemli bir katkı sunmaktadır.

Evrensel Abone Kimlik Modülü (USIM), çıkarılabilir bir SIM kart veya gömülü bir Evrensel Entegre Devre Kartı (UICC) çipi üzerinde barındırılmaktadır. Bu yapılandırma, mobil iletişimlerde güvenilir hizmetlerin sağlanabilmesi için gerekli olan karşılıklı kimlik doğrulama işlemlerinin etkinleştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. USIM'in kullanımı, hem abonenin hem de ağın karşılıklı olarak birbirlerinin kimliklerini doğrulamasına olanak tanır, bu sayede güvenlik çerçevesi güçlendirilir ve güvenli bağlantılar ile veri iletimi daha verimli bir şekilde gerçekleştirilir.

Nesnelerin İnterneti (IoT), cihazlar arası iletişim sağlayarak giderek yaygınlaşmakta ve kablosuz sensör ağlarına dayalı bir teknoloji olarak Bilgi Güvenliği alanında yeni zorluklar ortaya koymaktadır. IoT'nin temel amacı, nesnelerin insan müdahalesi olmaksızın kendi aralarında bilgi alışverişi yapabilmesidir. Bu teknolojinin farklı uygulama alanlarında üreticiler tarafından kullanılan çeşitli sistemler, bazı güvenlik açıklarına sahip olup, bu durum IoT sistemlerinde uçtan uca güvenli iletişimin sağlanmasında engeller oluşturabilmektedir. Uçtan uca güvenli iletişimin sağlanabilmesi için bu güvenlik açıklarının tespit edilmesi ve uygun önlemlerin alınması gereklidir. Aksi takdirde, bu tür sistemler siber saldırılara daha açık hale gelmekte ve bu saldırıların etkisi daha kontrolsüz bir biçimde yayılabilmektedir. Ayrıca, akıllı nesnelerin yaygın kullanımı ve bu nesnelerin İnternet üzerinden birbirleriyle iletişim kurabilmesi, onları çeşitli siber tehditlere karşı savunmasız bırakmaktadır [13].

### **1.11 Optimizasyonun Önemi**

Optimizasyona yatırım yapan, 5G teknolojisine geçiş yapan ve altyapısını buna göre geliştiren şirketler ve ülkeler, gelecekteki küresel rekabette öne çıkacaktır. Özellikle Çin'de gerçekleştirilen öncü çalışmalar, Çinli şirketlerin teknoloji alanında hızla lider konumuna gelme potansiyeline sahiptir. Türkiye ve Türkiye'de faaliyet gösteren şirketlerin, küresel teknoloji devleriyle rekabet edebilmesi için bu alanda stratejik çalışmalar yapması ve 5G entegrasyonlu IoT sistemlerini geliştirmesi gerekmektedir. Bugünün gereksinimlerine değil, yarının dünyasına odaklanmalı, gelecekteki ihtiyaçları doğru bir şekilde öngörmeli ve stratejimizi buna göre şekillendirmeliyiz. 5G'nin sunduğu özellikler ve fırsatlar dikkate alındığında, bu teknolojinin gelecekteki dünyada vazgeçilmez bir unsuru oluşturacağı öngörülebilir.

### **1.12 5G'ye Geçişin Önemi**

5G teknolojisi, küresel rekabet açısından önemli bir fırsat sunmakta olup, bu alanda hızlı ve sürdürülebilir ilerlemeler sağlanması gerekmektedir. Sensörler, akıllı cihazlar ve akıllı telefonlar gibi teknolojilerin günlük yaşamla sorunsuz bir şekilde entegrasyonunu mümkün kılacak teknik altyapının kurulması, bu potansiyelin gerçekleştirilebilmesi için kritik öneme sahiptir. Kuruluşlar, yalnızca bu tür entegrasyonları başarılı bir şekilde uygulayarak etkin bir rekabet stratejisi geliştirebilir, aynı zamanda rekabet avantajı elde etme noktasında da önemli bir konum kazanabilirler.

Çevremizdeki teknolojik cihazların yaygınlaşması, sürekli olarak analiz edilebilecek veriler üreterek müşterilere yönelik faydalı çözümler geliştirilmesini mümkün kılmaktadır. Şirketler, bu verileri kullanarak, müşterilerine özel çözümler sunan yeteneklerini geliştirebilirler. Ayrıca, yapay zekâ (AI) ve makine öğrenimi (ML) teknolojilerinin 5G ile entegrasyonu, veri toplama ve analiz süreçlerini hızlandırarak eyleme dönüştürülebilir içgörüler elde etme kapasitesini artırmaktadır.

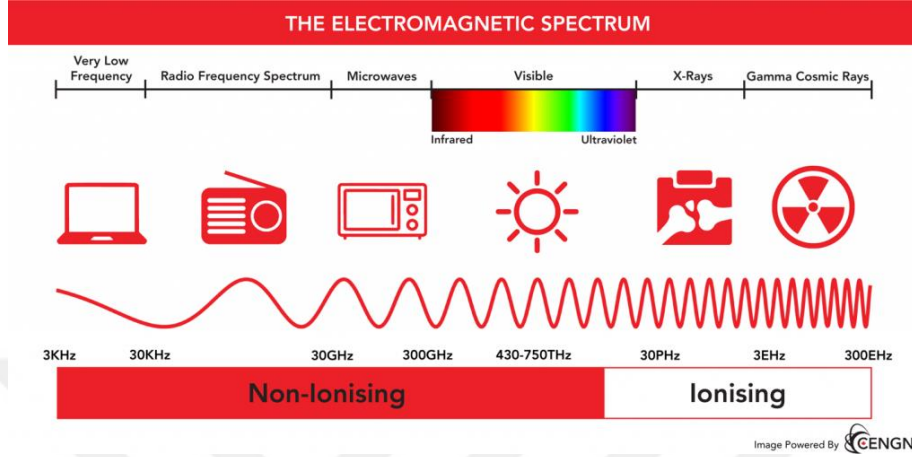
Özetle, 5G teknolojisine yapılan yatırımlar ve buna bağlı teknik altyapının güçlendirilmesi, rekabet avantajı elde etmek için kritik öneme sahiptir. Şirketler, bu teknolojileri etkili bir şekilde kullanarak operasyonel maliyetleri düşürebilir ve aynı zamanda müşteri memnuniyetini ve katılımını artırma potansiyeline sahiptir.

### **1.13 Frekansları Ölçme ve Karşılaştırma**

Radyo frekanslarının potansiyel tehlikesi, bu frekansların iyonlaştırıcı olup olmamasına bağlıdır. İyonlaştırıcı radyasyon, atomların iyonlaşmasına yol açarak canlı dokuya zarar verebilir ve bu da hücre hasarı, yanıklar, hastalıklar, kanser ve hatta ölüm gibi sonuçlar doğurabilir. Ancak, 5G teknolojisi iyonlaştırıcı olmayan frekans aralıklarında çalıştığı için bu tür riskleri taşımamaktadır ve bu nedenle sağlık açısından bir endişe oluşturmaz.

5G, 30 GHz ile 300 GHz arasında bir frekans aralığında radyo dalgalarını kullanabilmekle birlikte, yalnızca 100 GHz'e kadar olan dalgaları kullanmaktadır. Elektromanyetik spektrumda, 5G'nin kullandığı enerji iyonlaştırıcı olmayan bir yapıya sahiptir.

Ayrıca, 5G tarafından kullanılan radyo dalgalarının frekansları, güneşten aldığımız radyasyondan 2.567 ila 14.333 kat daha düşüktür. Şekil 1.6, farklı elementler ve nesnelere tarafından yayılan radyasyon miktarlarını göstermektedir.



**Şekil 1.6: Çeşitli Doğal Kaynaklardan Yayılan Radyasyon Emisyon Oranları**

**Kaynak:** CENGN

#### 1.14 Türkiye'de 5G Alanında Yapılan Çalışmalar

Turkcell, Avrupa Birliği'nin Araştırma ve Yenilik Programı Horizon2020 kapsamında, araç iletişimi alanındaki 5G çalışmalarına yönelik yaptığı başvuru ile hibe kazandı. Bu proje, Türkiye'nin otonom teknolojiler ve sürücüsüz araçlar konusundaki küresel rekabetteki rolünü güçlendirecek önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Horizon2020 programının kabul oranlarının genellikle düşük olduğu göz önünde bulundurulduğunda, Turkcell'in bu projesi, 5G tabanlı araç iletişimi alanında Türkiye'de desteklenen ilk ve en kapsamlı çalışma olma özelliğine sahiptir. Bu gelişme, Türkiye'nin teknoloji ve inovasyon alanındaki stratejik hedeflerine ulaşmasında önemli bir kilometre taşı olarak öne çıkmaktadır [14].

Türkiye, uluslararası standartlara uygun ilk canlı 5G bağlantı testini İstanbul'da başarıyla gerçekleştirmiştir. Bu test, 4.5G şebekesinin 5G'ye hazır şekilde kurulmuş olmasının bir sonucu olarak, 3GPP standartlarına uygun 5G aramasının gerçekleştirildiği dünya çapındaki ilk çalışmalardan biri olarak kaydedilmiştir. Bu

başarı, Türkiye'nin 5G teknolojisine geçiş sürecindeki önemli bir adımı ve küresel alanda teknoloji liderliği hedefine yönelik önemli bir ilerlemeyi temsil etmektedir [15].

Turkcell öncülüğünde, Next Generation Mobile Networks Association (NGMN) iş birliğiyle, Orange, T-Mobile ve China Mobile gibi küresel telekomünikasyon devlerinin katılımıyla yürütülen 5G denemeleri projesi başarıyla tamamlanmıştır. Bu proje, yeni nesil 5G Çekirdek Şebeke (Standalone-SA) mimarisine yönelik yapılan kapsamlı testlerin tamamlanmasıyla sonlanmıştır. Bu denemeler, 5G teknolojisinin gelişimine önemli katkılarda bulunmuş ve 5G altyapısının etkinliğini değerlendiren bir dizi önemli veriyi ortaya koymuştur.

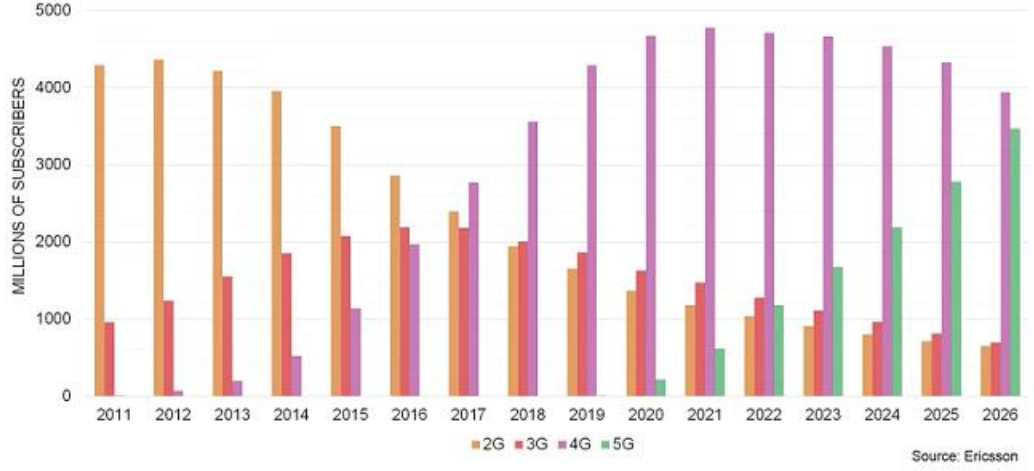
Turkcell, kullanıcılarına gelişmiş bir 5G deneyimi sunmayı hedefleyen yeni nesil Çekirdek Şebeke mimarisi üzerinde gerçekleştirdiği testler aracılığıyla, hem küresel 5G standartlarının belirlenmesine hem de yeni nesil teknolojilerin geliştirilmesine önemli katkılarda bulunmuştur. Bu testler, 5G teknolojisinin altyapısal temellerinin güçlendirilmesine ve küresel düzeyde 5G uygulamaları için uygun standartların oluşturulmasına olanak tanımıştır [16].

Türk Telekom, Huawei ile birlikte gerçekleştirdiği canlı 5G test şebekesi üzerinde, 5G Yeni Radyo Taşıyıcı Birleştirme Teknolojisi (NR Carrier Aggregation) kullanarak saniyede 2.9 Gbps hızla dünya rekoru kırdı. Bu denemede, Türk Telekom 5G teknolojisinin yüksek hız ve geniş kapsama alanı vaatlerini başarıyla yerine getirdi ve dünyada ilk defa ticari telefonlarla bu teknolojiyi uyguladı. Deneme, Ümraniye Teknopark Mobil Şebeke Test Merkezinde gerçekleştirildi ve Huawei Mate 20 X 5G akıllı telefonu ile en yüksek hızlara ulaşılmıştır [17].

### **1.15 Küresel Mobil Abone Trendi**

2G ve 3G abone sayılarının hızla azaldığı gözlemlenirken, 4G abone sayısında önemli bir düşüş beklenmemektedir. Buna karşın, 5G abone sayısında kayda değer bir artış öngörülmektedir. Bu artışın temel nedeni, 5G'nin uzun bir süre boyunca 4G ile entegrasyon içinde çalışacak olmasıdır. Şekil 1.7'te yer alan Küresel Mobil Abone Trendi, bu durumu destekleyen bir eğilim göstermektedir.

## Global Mobile Subscriptions (2010 > 2026)



**Şekil 1.7: Küresel Mobil Abone Trendi**

**Kaynak:** Ericsson

### 1.16 Edge Computing'in Gelişmeleri ve Uygulamaları

Bulut bilişim çağında, kişisel bilgisayarlar hâlâ yaygın bir şekilde kullanılmakta, ancak esas olarak merkezi hizmetlere erişim amacıyla kullanılmaktadır. Merkeziyetçi yapıya sahip pek çok hizmet, zaten bulut tabanlı sistemlere taşınmıştır. Edge bilişim ise, bilişim kaynaklarını ağın kenarına kaydırarak, merkeziyetçilik eğilimine karşı koymakta ve daha merkeziyetsiz bir yaklaşım benimsemektedir. Bu yaklaşım, geleneksel ağ mimarilerinin yapısını dönüştürerek, daha verimli ve esnek bilişim altyapılarının ortaya çıkmasını sağlamaktadır.

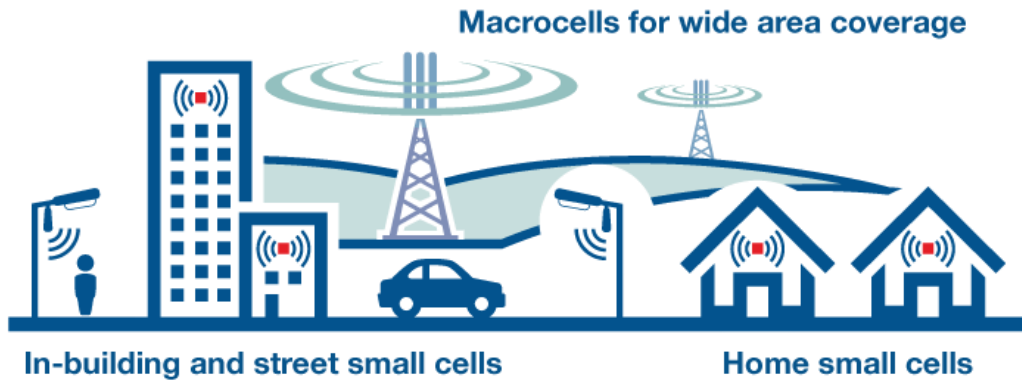
Veriler, uzak veri merkezlerine iletilmek yerine, kaynağına yakın bir konumda işlenir. Bu dönüşüm, bulut bilişimin geçerliliğini yitirdiği anlamına gelmez; aksine, belirli bulut tabanlı işlevlerin, son kullanıcıya daha yakın bir noktada gerçekleştirilmesini ifade eder. Bu yaklaşım, ağ üzerindeki yükü hafifleterek, veri işleme hızını artırır ve genel sistem verimliliğini geliştirir.

Uç bilişim, hesaplama kaynaklarını kullanıcıya yakın bir konumda sağlayarak, kritik durumlarda gecikmeyi azaltır. Özellikle otonom araçlar gibi uygulamalarda, milisaniyelik gecikmeler bile önemli farklar yaratabilir; örneğin, bir çarpışmayı önlemek ile çarpışmaya neden olmak arasında belirleyici olabilir. Otonom araçlar,

dinamik yol koşullarına anında tepki verebilmelidir ve bu nedenle uzak bir bulut sunucusundan gelen komutları veya verileri beklemek, araçların güvenliğini tehlikeye atabilir. Uç bilişim, hesaplama kaynaklarını, yoğun nüfuslu bölgeler ile bant genişliğinin sınırlı olduğu uzak alanlar gibi uç noktalara yerleştirerek, bu soruna çözüm sunar. Bu yerel veri işleme yaklaşımı, otonom araçların gerçek zamanlı verilere hızlı erişimini sağlayarak, minimum gecikmeyle etkin ve güvenli kararlar alabilmelerini mümkün kılar.

### 1.17 5G'de Kapsama Alanı

5G ağları, 4G ağlarıyla uyumlu bir şekilde çalışabilmek için makro hücreler, küçük hücreler ve bina içi sistemlerin bir kombinasyonunu kullanacak şekilde tasarlanmıştır. Küçük hücreler, genellikle 10 metreden birkaç yüz metreye kadar değişen kapsama alanları sağlayan kompakt baz istasyonları olup, daha geniş makro ağları desteklemekte önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle milimetre dalga (mmWave) frekanslarının sınırlı bir menzile sahip olması nedeniyle, küçük hücreler 5G ağlarında kritik bir işlev üstlenmektedir. Etkili ve kapsamlı bir kapsama alanı sağlamak için, küçük hücrelerin yüksek talep gören bölgelerde sinyal gücünü artırarak kapsama boşluklarını doldurmaya yardımcı olduğu yoğun altyapılar gereklidir. Geniş alan kapsama sağlamak amacıyla makro hücreler, Şekil 1.8'de gösterildiği şekilde yerleştirilmiştir.

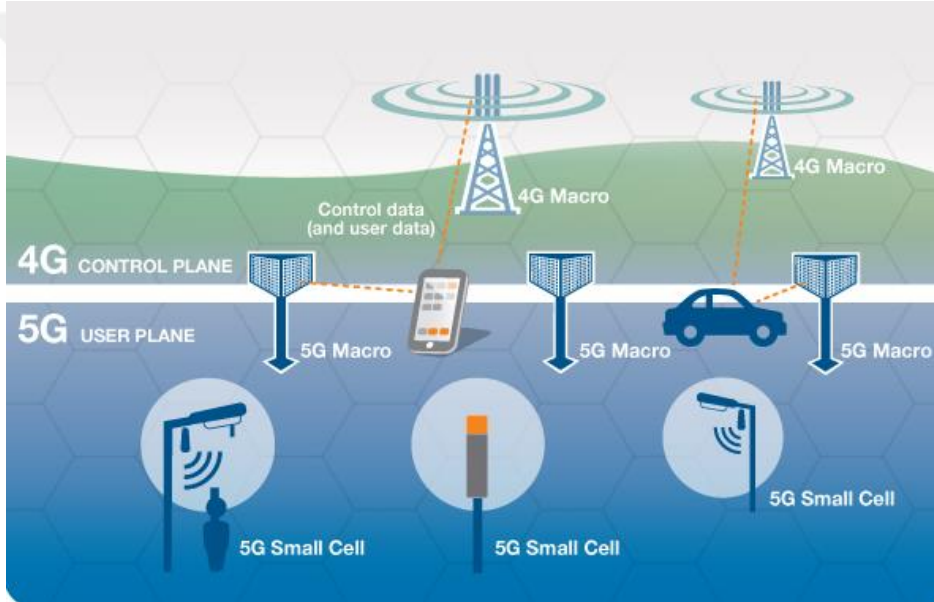


**Şekil 1.8: Geniş Alan Kapsama Alanı için Makrohücreler**

**Kaynak:** EMF Explained 2,0

### 1.18 5G ve 4G'nin Birlikte Çalışması

5G bağlantısı kurulduğunda, Kullanıcı Ekipmanı (UE) yüksek hızlı veri iletimine 5G şebekesi üzerinden erişirken, kontrol sinyalizasyonu için 4G şebekesine dayanır. Bu yapı, mevcut 4G altyapısının yeteneklerini etkin bir şekilde artırır. 5G'nin sınırlı kullanılabilirliğe sahip olduğu bölgelerde, kesintisiz bağlantının sürdürülmesi için veri iletimi, varsayılan olarak 4G şebekesi üzerinden sağlanır. Bu mimari, 5G şebekesinin mevcut 4G altyapısını tamamlamasına ve sorunsuz bir şekilde entegre olmasına olanak tanıyarak uyumlu bir şebeke deneyimi sunar. Şekil 1.9'da, 5G ve 4G'nin birlikte çalışmasını simüle eden bir örnek sunulmaktadır.



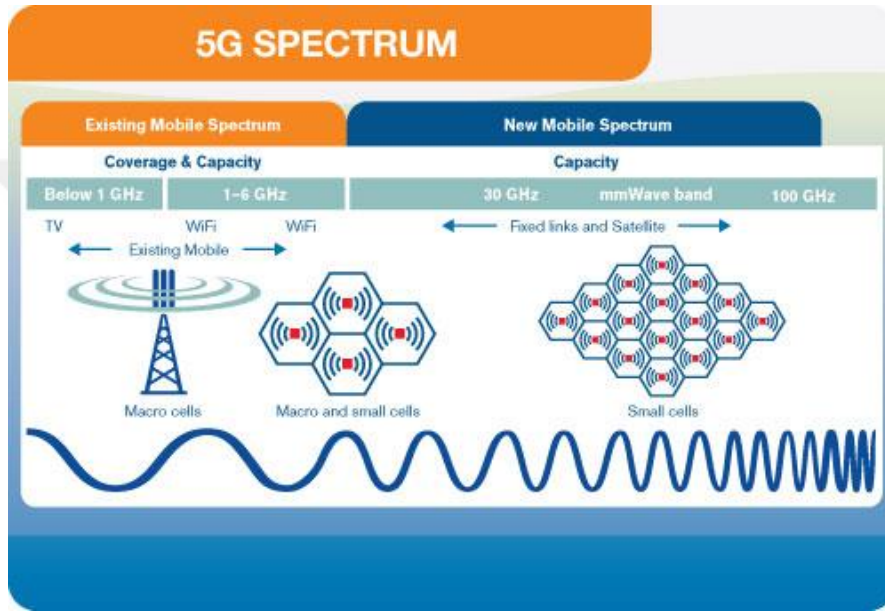
Şekil 1.9: 5G ve 4G'nin Birlikte Çalışması

Kaynak: EMF Explained 2,0

### 1.19 5G Spektrumu

Birçok ülkede, 5G için tahsis edilen ilk frekans bantları, mevcut mobil ve Wi-Fi ağlarının kullandığı frekanslarla benzer olup genellikle 6 GHz altındaki aralıklarda yer almaktadır. Ancak, 6 GHz'nin üzerindeki ek spektrumun, özellikle milimetre dalga (mmWave) bantları dâhilinde, mevcut mobil teknolojilere kıyasla önemli ölçüde daha yüksek kapasite, daha hızlı veri iletim hızları ve genişletilmiş bant genişliği sağlaması beklenmektedir.

Bu genişletilmiş spektrum, daha fazla sayıda kullanıcıyı, daha yüksek veri hacimlerini ve daha hızlı bağlantı hızlarını destekleyecek şekilde tasarlanmıştır. Eski ağlar kademeli olarak devre dışı bırakıldıkça, 5G'ye tahsis edilen mevcut düşük bant spektrumunun, gelecekteki uygulamalar için yeniden kullanılması beklenmektedir. Bununla birlikte, genişletilmiş mmWave spektrumu yalnızca kısa mesafelerde etkin bir şekilde çalışabilmektedir; bu nedenle, yerleştirilmiş kapsama alanı sunması beklenmektedir. Gelecekteki 5G dağıtımları, Şekil 1.10'da gösterildiği gibi, mmWave frekanslarını 100 GHz'ye kadar genişletebilme potansiyeline sahip olacaktır.



**Şekil 1.10: Yeni 5G Spektrumu ile 30-100 GHz Radyo Frekans Aralığını Gösteren Mobil Spektrum.**

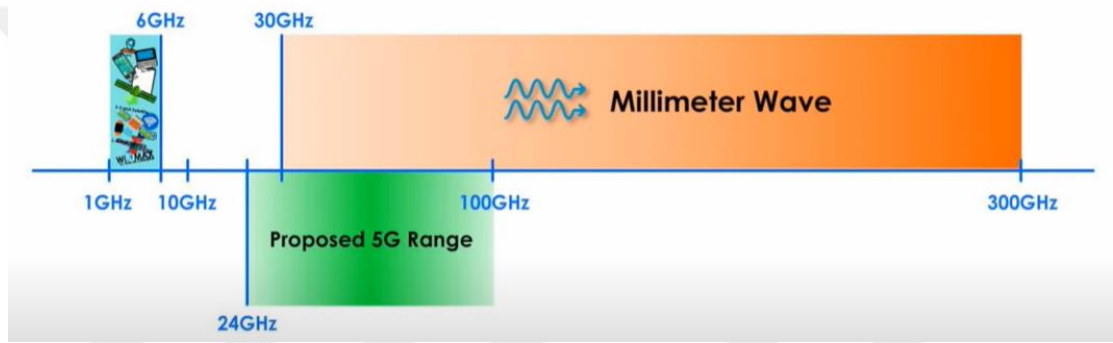
**Kaynak:** EMF Explained 2,0

## 1.20 Milimetre Dalgası

5G teknolojisi, milimetre dalgası olarak bilinen yeni bir radyo frekansı spektrumunu kullanacak. Mevcut radyo frekans spektrumu, özellikle 1 GHz ile 6 GHz arasındaki bandın yoğun kullanımı nedeniyle oldukça kalabalıktır; GPS, Wi-Fi, 4G ve 3G gibi birçok teknoloji bu aralıkta faaliyet göstermektedir. Öte yandan, 30 GHz ile 300 GHz arasındaki milimetre dalgası spektrumu daha az kullanıma sahiptir. Bu sebeple, 5G için 24 GHz ile 100 GHz arasındaki frekans aralığı, Şekil 1.11'de gösterildiği gibi, önerilen spektrum olarak belirlenmiştir.

Milimetre dalgasının üç temel avantajı bulunmaktadır:

- Bu frekans bandı, yeni ve nispeten az kullanılan bir spektrum aralığına aittir.
- Yüksek frekanslı dalgalar, daha geniş bant genişliklerini ve daha hızlı veri aktarım hızlarını destekleyerek, düşük frekanslı dalgalara kıyasla önemli ölçüde daha büyük veri iletim kapasitesi sunar.
- Milimetre dalgası frekansları, ağ kapasitesinin ve performansının artırılmasına olanak tanır. Bu, büyük MIMO (Çoklu Giriş, Çoklu Çıkış) antenlerinin kullanımıyla birden fazla veri akışının eşzamanlı olarak iletilmesini ve alınmasını kolaylaştırır.



Şekil 1.11: 5G Hüresel Ağlar

**Kaynak:** Sunny Classroom

### 1.21 Büyük MIMO Teknolojisinin Etkisini Keşfetmek

Dalga frekansı ile anten boyutu arasında ters bir ilişki bulunmaktadır. Daha düşük frekanslı sinyaller, etkili bir iletim ve alım için daha büyük antenler gerektirirken, yüksek frekanslı sinyaller daha küçük antenlerle verimli bir şekilde işlenebilir. Bu özellik, milimetre dalgalarının daha kompakt hücreler veya paneller içerisinde daha yüksek yoğunlukta verici ve alıcı entegrasyonuna olanak tanır. Örneğin, eski teknolojilerde hücre başına yalnızca 10 anten kullanılabilirken, 5G teknolojisi aynı alanda 100'e kadar anteni destekleyebilmektedir. Bu durum, küçük hücrelerin çok daha fazla eşzamanlı kullanıcıyı barındırmasına olanak sağlar. Bu süreç, Şekil 1.12 ve Şekil 1.13'te gösterilen örneklerle daha net bir şekilde görülebilir.



**Şekil 1.12: Hücre Başına 10 Anten Kullanımı**

**Kaynak:** Sunny Classroom



**Şekil 1.13: Hücre Başına 100 Anten Kullanımı**

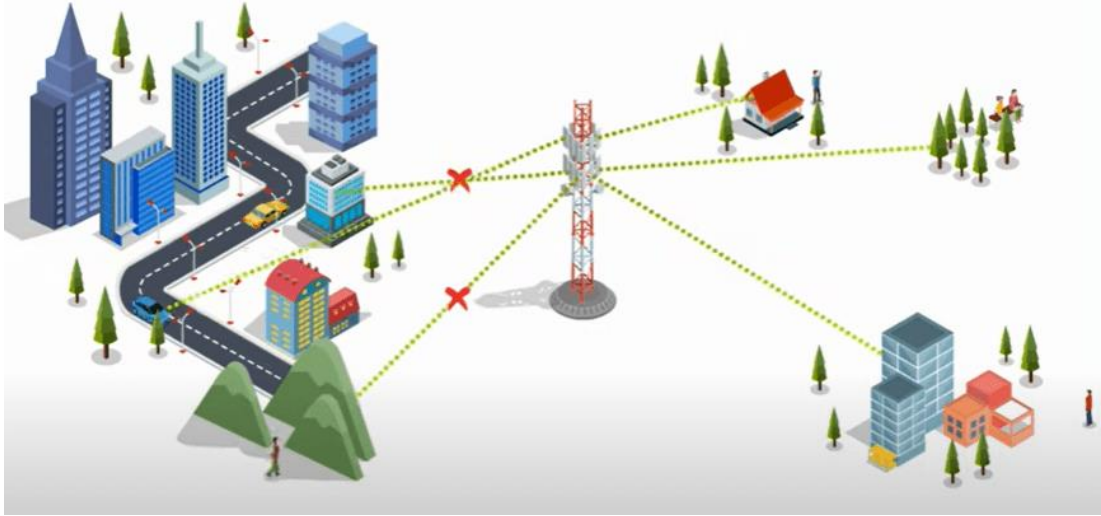
**Kaynak:** Sunny Classroom

5G ağları, büyük MIMO (Çoklu Giriş, Çoklu Çıkış) teknolojisini benimseyerek, aynı anda daha fazla veri iletimi ve alımını mümkün kılmak için çok sayıda anten elemanı veya bağlantısı kullanacaktır. Bu teknoloji, ağ kapasitesini artırarak daha fazla kullanıcının eşzamanlı bağlantı kurmasına ve yüksek veri iletim hızlarını sürdürebilmesine olanak tanıyacaktır.

5G teknolojisinin devasa MIMO antenlerinin fiziksel boyutu, 4G ile karşılaştırılabilir düzeyde kalmakla birlikte, daha yüksek frekanslar, daha küçük bireysel anten elemanlarının kullanılmasına olanak tanır. Bu sayede, aynı fiziksel muhafaza içerisinde 100'den fazla anten elemanının entegrasyonu kolaylaştırılmaktadır. Ayrıca, 5G kullanıcı ekipmanları, mmWave frekanslarını desteklemek amacıyla MIMO anten teknolojisi ile donatılacaktır.

## 1.22 Küçük Hücreler

Milimetre dalgaları, birçok avantaj sunmakla birlikte bazı dezavantajlara da sahiptir. Daha yüksek frekanslı sinyaller, havadaki engellerle çarpışma olasılığı daha yüksek olduğundan, enerji kaybı daha hızlı gerçekleşir. Bu durum, milimetre dalga sinyallerinin menzilini sınırlayarak, binalar ve ağaçlar gibi engeller nedeniyle zayıflamaya daha yatkın hale getirir. Şekil 1.14, küçük hücreler kullanılmadan 5G hücreli ağlarında bağlantı zorluklarını göstermektedir.



**Şekil 1.14: 5G Hücreli Ağlarında Küçük Hücreler Olmadan Bağlantı Zorlukları**

**Kaynak:** Sunny Classroom

Bu zorlukların üstesinden gelebilmek için, baz istasyonları ile son kullanıcılar arasındaki kapsama boşluklarını doldurmak amacıyla küçük hücre istasyonlarının kullanımı gereklidir. Her bir küçük hücre istasyonu, bölgenin nüfus yoğunluğuna göre

belirlenen yerel bir alana hizmet verir. Özellikle yüksek yoğunluklu kentsel alanlarda, bitişik küçük hücreler arasındaki mesafe genellikle 10 ila 100 metre arasında değişmektedir. Yakın gelecekte, kentsel ortamlarda, özellikle mahalleler ve sokaklar gibi alanlarda küçük hücrelerin dağıtımında önemli bir artış beklenmektedir. Şekil 1.15, küçük hücreler kullanılarak 5G hücresel ağlarında bağlantının nasıl sağlandığını göstermektedir.

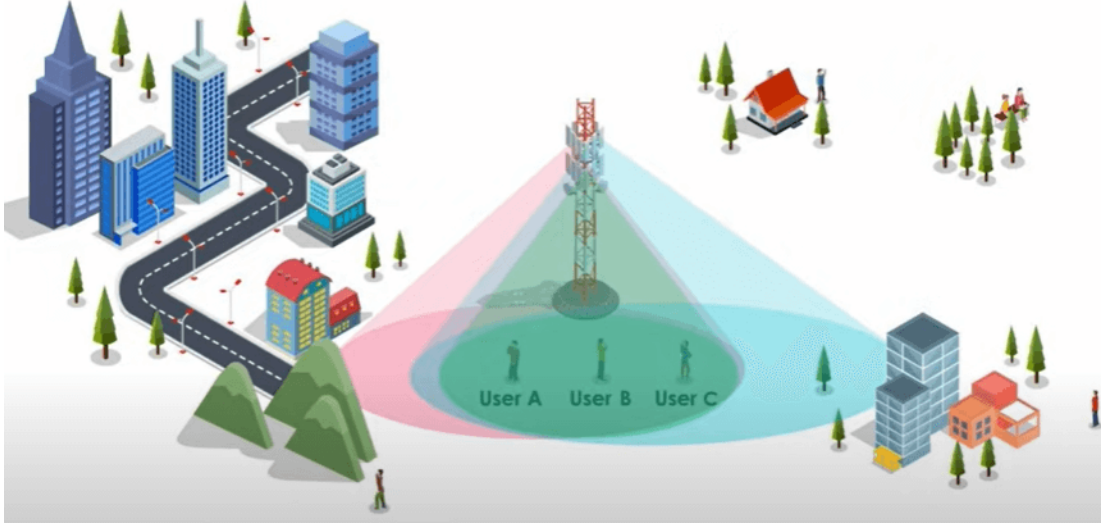


**Şekil 1.15: Küçük Hücrelerle 5G Hücresel Ağlarında Bağlantının Sağlanması**

**Kaynak:** Sunny Classroom

### 1.23 Beamforming

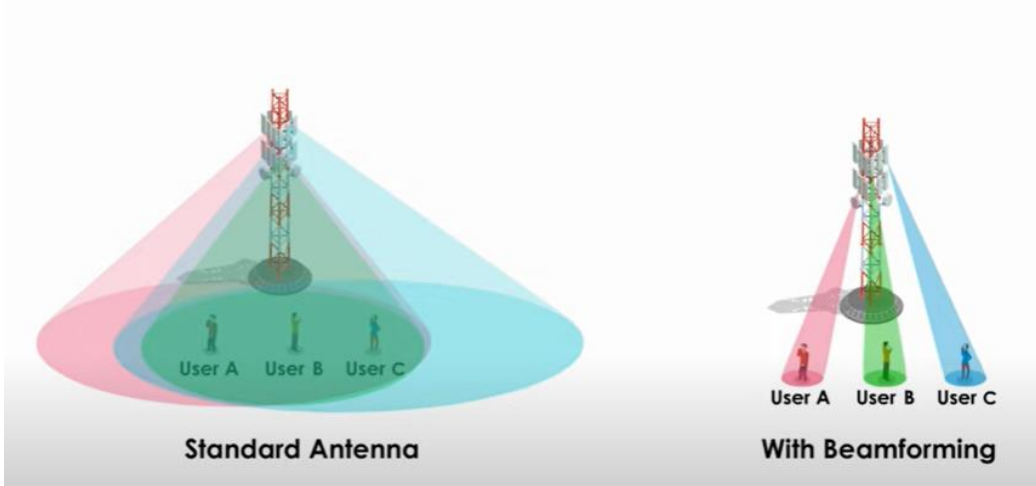
4G teknolojisinde, kablosuz sinyaller her ne kadar çok yönlü olmasa da hareket halindeyken geniş bir alana yayılarak hızlı bir şekilde enerji kaybeder. Hüzmeleme teknolojisi, sinyali her yöne yaymak yerine, belirli kullanıcılara doğru yönlendirerek, kullanıcılar ile baz istasyonları veya hücre istasyonları arasındaki iletimi geliştirir. Şekil 1.16, hüzmelemesiz standart antenle iletimin nasıl sağlandığını göstermektedir.



**Şekil 1.16: Hüzmelemesiz Standart Anten ile İletim**

**Kaynak:** Sunny Classroom

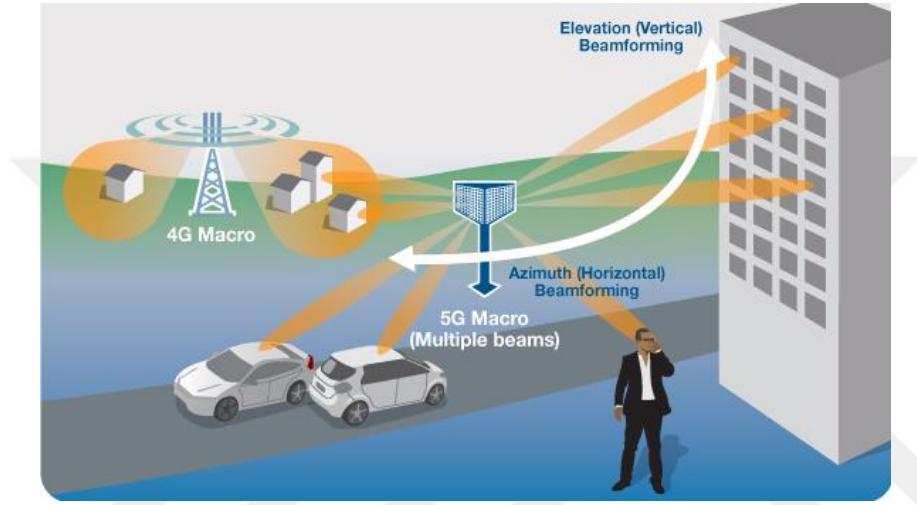
Sinyalin, görünmeyen bir kablo boyunca hareket eden lazer ışını olarak görselleştirilebileceği bir modelde, daha yüksek ışın oluşturma yoğunluğu, daha düşük girişim ve daha az enerji tüketimi sağlar. Bu durum, ışın oluşturma teknolojisi ile daha hızlı veri iletim oranlarına ulaşılmaya olanak tanır. Şekil 1.17, ışın oluşturma sürecini ve bunun sonuçlarını görsel olarak açıklamaktadır.



**Şekil 1.17: Hüzmeleme ile 5G Hücresel Ağlar**

**Kaynak:** Sunny Classroom

Işın yönlendirme, büyük MIMO (Çoklu Giriş, Çoklu Çıkış) baz istasyonu antenlerinin radyo sinyallerini tüm yönlere yayınlamak yerine, belirli kullanıcılara ve cihazlara odaklamasını sağlayan bir teknolojidir. Gelişmiş sinyal işleme algoritmalarından yararlanarak, ışın yönlendirme sinyalin en verimli yolunu belirler ve sinyalin hedef kullanıcıya daha etkili bir şekilde ulaşmasını sağlar. Bu teknoloji, istenmeyen sinyallerden kaynaklanan parazitleri minimuma indirerek ağ verimliliğini artırır. Şekil 1.18, ışın yönlendirme sürecinin etkinliğini ve parazitlerin azaltılmasını görsel olarak açıklamaktadır.

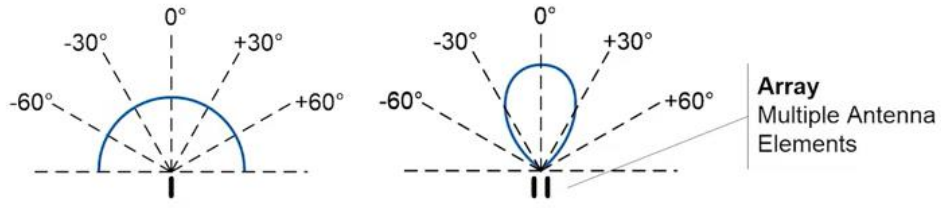


**Şekil 1.18: Büyük MIMO'da Işın Yönlendirme: Sinyal Verimliliğini İyileştirme ve Paraziti Azaltma**

**Kaynak:** EMF Explained 2,0

Tek bir antenin yayılan enerjisi, genellikle 360 derece boyunca her yöne dağılacak şekilde geniş bir alana yayılır. Ancak, hedef, bu enerjiyi dar bir alan içinde yoğunlaştırmaktır. Şekil 1.19'da gösterildiği gibi, daha fazla anten ekleyerek bu enerji yoğunlaştırma etkisi sağlanabilir. Bu, enerjiyi belirli bir yönde odaklayarak, sinyal verimliliğini artırmak ve daha verimli veri iletimi sağlamak için kullanılan bir yöntemdir.

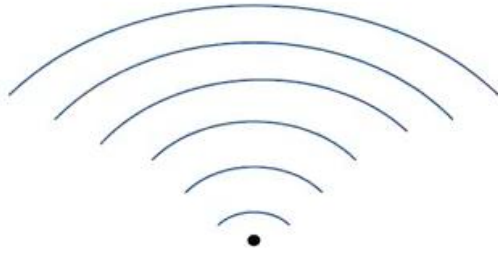
## Beamforming - Antenna Array



**Şekil 1.19: Hüzmeleme Anten Dizisi**

**Kaynak:** Keysight Technologies

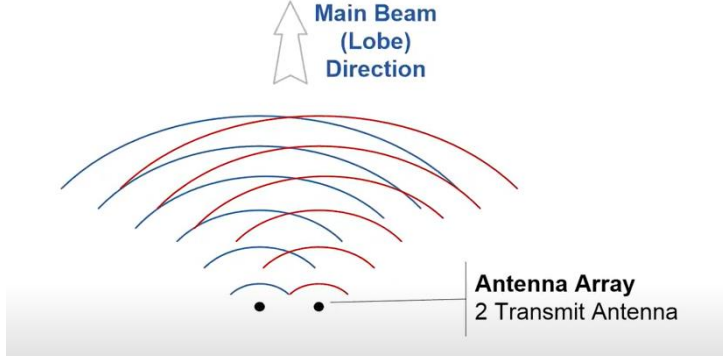
Şekil 1.20'de gösterildiği gibi bir antenden yayılan radyo dalgalarına kuşbakışı bakarsak, bunların belirli bir yönde yayıldığını görürüz.



**Şekil 1.20: Bir Antenden Gelen Radyo Dalgaları: Kuş Bakışı Görünüm**

**Kaynak:** Keysight Technologies

Şekil 1.21'de gösterildiği gibi, ikinci bir anten elemanı ekleyerek her iki antenin de dalgalarını aynı yönde iletildiği gözlemlenebilir. Burada önemli olan nokta, dalgaları belirli bir yönde güçlendirme imkânıdır; bu sayede sinyal daha yüksek güçle aynı yönde iletilebilir. Bu durumu, suya iki taş atmaya benzetebiliriz; her iki taşın oluşturduğu dalgalar, belirli bir yönde daha güçlü bir şekilde ilerleyecektir.



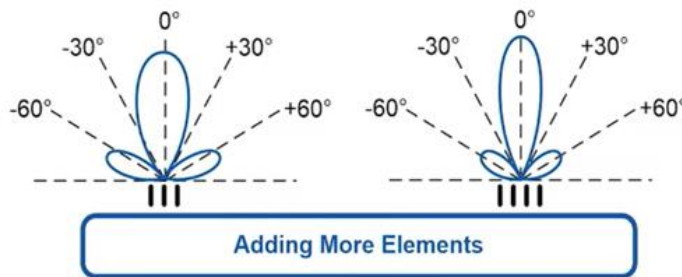
**Şekil 1.21: Anten Kullanılarak Geliştirilmiş Yönlü İletim: Dalga Güçlendirme Etkisi**

**Kaynak:** Keysight Technologies

Şekil 1.22'de gösterildiği gibi, daha fazla anten elemanı ekledikçe, belirli bir yönde daha dar bir ışın elde edilebilir. Ancak, yan loblar da dikkate alınmalıdır. Dört anten elemanı eklediğinizde, ana ışının daraldığı gözlemlenirken, yan lobların da daraldığı görülmektedir. Bu durum, enerjinin daha fazla kısmının ana ışına yönlendirilmesiyle açıklanabilir ve büyük anten dizilerinin en önemli özelliklerinden biridir.

Massive MIMO teknolojisinde, enerjiyi odaklamak için birbirine istiflenmiş birçok anten elemanı kullanılır. Bu elemanlar yatay ve dikey olarak düzenlendiğinde, lazer işaretçisi gibi belirli bir yöne odaklanmış bir ışın elde edilebilir.

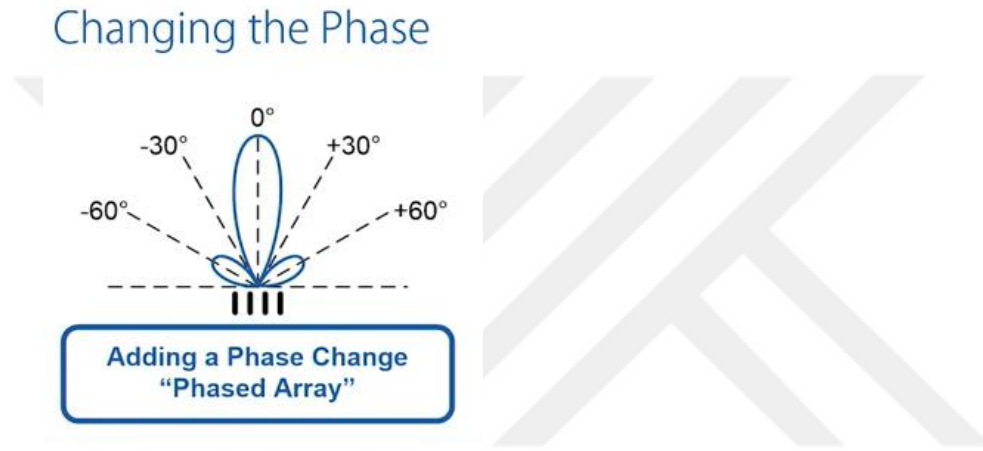
### Beamforming - Additional Antenna Elements



**Şekil 1.22: Büyük Anten Dizilerinde Işın Daraltma ve Yan Lob Azaltma**

**Kaynak:** Keysight Technologies

Önemli olan, cihazın hedefe doğru doğru bir şekilde yönlendirilmesidir. Bu amaçla, Şekil 1.23'te gösterildiği gibi bir faz kayması eklemek ve bunun sonucunda bir faz dizisi oluşturmak etkili bir yönlendirme sağlamak için kullanılır. Bu, küçük bir zaman farkıyla gölete atılan iki çakıl taşı örneğine benzetilebilir. Faz kaymaları, sinyalin belirli bir yönde güçlenmesini sağlar ve bu şekilde sinyal, hedeflenen yön doğrultusunda daha etkili bir şekilde odaklanır. Bu yönlendirme, antenlerin fazını değiştirmek yoluyla yapılabilir; örneğin, her bir antenin arasına doksan derecelik bir faz kayması ekleyerek, istenilen yön doğrultusunda sinyal gücü artırılabilir.



Şekil 1.23: Anten Dizilerinde Faz Değişimi

**Kaynak:** Keysight Technologies

#### 1.24 MEC (Mobile Edge Computing / Mobil Uç Bilişim)

Mobil Uç Bilişim (MEC), geleneksel bulut bilişiminin kullanıcıya daha yakın hale getirilmesini sağlayarak önemli avantajlar sunar. Geleneksel bulut bilişim ortamlarında, birkaç dezavantaj ortaya çıkmaktadır.

- Bulut hizmetleri kullanıcıdan fiziksel olarak uzak olabilir. Bu mesafe, her zaman gecikmelere yol açabilir.
- Çeşitli veri ve uygulamaların kullanıcının cihazına indirilmesi gerekebilir. Bu, özellikle sınırlı işlem gücü ve belleğe sahip cihazlarda kullanıcı cihazına fazla yük bindirebilir.

Mobil Uç Bilişim (MEC), bilgi işlem kaynaklarını ağı kenarına yerleştirerek bulut bilişim hizmetlerini kullanıcılara daha yakın hale getirir, bu da gecikmeyi azaltır. Bu yakınlık, artırılmış gerçeklik ve video konferans gibi gecikmeye duyarlı uygulamaların yerel olarak işlenmesini mümkün kılar. Ayrıca, MEC uygulama bölmesini destekler ve görevlerin daha verimli bir şekilde işlenebilmesi için kullanıcı cihazı ve Uç sunucular arasında dağıtılmasını sağlar.

### **1.25 5G Deployment / Dağıtım Yaklaşımı**

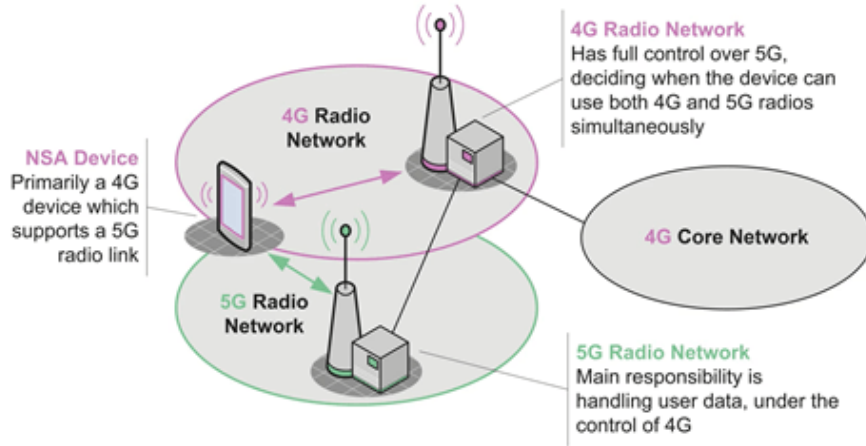
5G teknolojisinin ilk dağıtımı, mevcut 4G LTE altyapısı ile birlikte çalışan bağımsız olmayan (NSA) bir yapılandırma ile gerçekleştirilecektir. NSA modunda, cihazlar öncelikle sinyalizasyon ve kontrol işlemleri için 4G LTE ağına bağlanır. Ancak, 5G kapsama alanı mevcut olduğunda, cihazlar daha yüksek veri çıkışı sağlamak amacıyla 5G ağına erişim sağlayabilir. Bu yapılandırma, 5G'nin etkinleştirilmesinde geçiş aşamasında önemli bir rol oynayacak ve mevcut 4G altyapısının 5G ile entegrasyonunu kolaylaştıracaktır.

Örneğin, 5G NSA modundaki bir cihaz, 4G LTE ağı üzerinden 200 Mbps hız elde ederken, 5G ağı üzerinden ek olarak 600 Mbps hız alabilir; bu da toplamda 800 Mbps veri iletim hızına ulaşılmasına olanak tanır. Önümüzdeki yıllarda, 5G altyapısının daha geniş bir şekilde dağıtılmasıyla birlikte, ağ bağımsız (SA) moda geçiş gerçekleştirilecek ve bu durum, 5G teknolojisinin temel avantajları olan düşük gecikme süresi ve gelişmiş bağlantı hızlarının tam anlamıyla kullanılmasını sağlayacaktır [18].

#### **1.25.1 5G Bağımsız Olmayan Dağıtım**

Bağımsız olmayan (NSA) yapılandırma, hibrit bir 4G/5G çözümü olarak tanımlanır ve yaygın olarak NSA olarak adlandırılır. Bu yapılandırma, 5G telefon desteği sağlayan bir 4G RAN ağını destekler. Mevcut 4G altyapısına sahip mobil operatörler için, 4G yatırımlarını en üst düzeye çıkarırken 5G desteği sunmaya başlamak için bir ilk adımdır. Şekil 1.24'te gösterildiği gibi, bağımsız olmayan 5G (NSA) gelişmiş mobil geniş bant hizmetlerini desteklerken, IoT, ultra güvenilir ve düşük gecikmeli iletişim gibi 5G'nin diğer özelliklerini sunmamaktadır.

## Non Standalone 5G Deployment

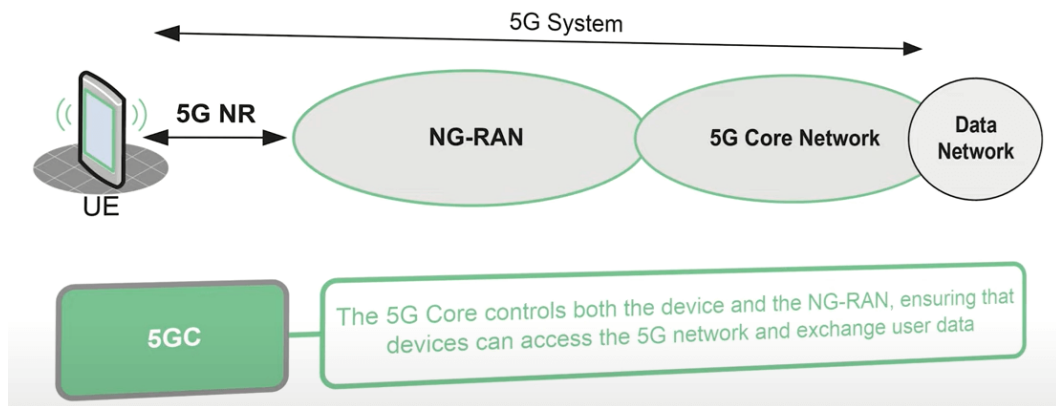


Şekil 1.24: Bağımsız Olmayan Dağıtım

Kaynak: Mpirical

### 1.25.2 5G Bağımsız Dağıtım

5G Core, cihazları ve NG-RAN'ı (Yeni Nesil - Radyo Erişim Ağı) kontrol ederek cihazların 5G ağına erişimini sağlar ve kullanıcı verilerinin iletilmesini mümkün kılar. Bağımsız 5G yapısı, genellikle SA (Stand-Alone) olarak adlandırılır ve bu yapı, 5G RAN ile uyumlu bir şekilde 5G telefonları ve 5G Core ağıyla entegre olur. Şekil 1.25'te gösterildiği gibi, bağımsız 5G, tam entegrasyon sağlayarak ağda yüksek verimlilik ve düşük gecikme sunar.



Şekil 1.25: Bağımsız Dağıtım

Kaynak: Mpirical

Bağımsız 5G, tüm yeni 5G özelliklerini destekler: gelişmiş mobil geniş bant, geniş IoT ağları ve ultra güvenilir, düşük gecikmeli iletişimler. Ayrıca, bağımsız 5G, ağ kaynaklarının optimizasyonu açısından operatörlere büyük esneklik sağlar, böylece farklı görev gereksinimlerine yönelik daha verimli ağ yönetimi mümkün olur. Mobil ağ operatörleri 5G yeteneklerini duyurduğunda, genellikle önceki 4G LTE altyapısına dayanan bağımsız olmayan 5G ağlarına atıfta bulunurlar. Bu ağlar, 5G'nin sunduğu potansiyel avantajları kademeli olarak kullanıma sunar, ancak bağımsız 5G, tüm özelliklerin tam anlamıyla kullanılmasını sağlayacak altyapıyı sunar.

### 1.26 gNodeB ve 5G'de Hücrel Teknolojinin Evrimi

5G için yeni radyo erişim teknolojisi, "NR" (New Radio) olarak adlandırılmakta olup, LTE'nin yerine geçmektedir. Yeni baz istasyonları ise "gNB" (gNodeB) olarak isimlendirilir ve bu, LTE'nin baz istasyonları olan "eNB" (evolved NodeB) veya "eNodeB" (Advanced NodeB) cihazlarının yerini alır. Bu değişim, 5G'nin radyo erişim ağının evrimini ve yeni nesil mobil iletişim teknolojilerinin entegrasyonunu simgeler [19]. Tablo 1.2'de hücrel teknoloji evrimi nesillere göre gösterilmiştir.

**Tablo 1.2: 5G'de Hücrel Teknolojinin Evrimi**

Nesil	Radio Teknolojisi	Baz İstasyonu Adı
2G	GSM	BTS (Base Transceiver Station)
3G	UMTS	NodeB
4G	LTE	eNB, Evolved NodeB
5G	NR	gNB, gNodeB

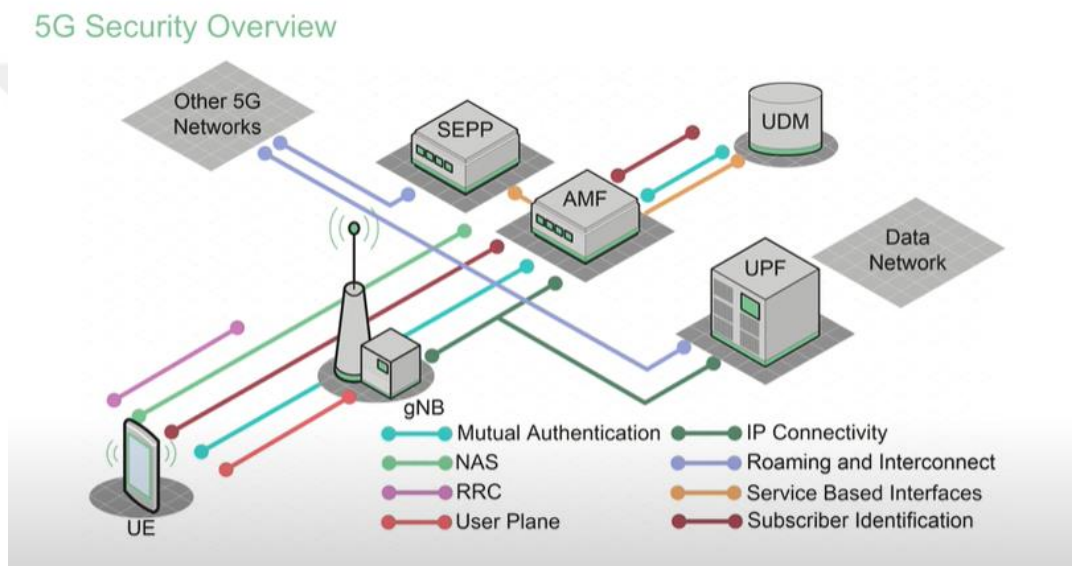
**Kaynak:** 5G gNodeB Base Station: gNodeB and the Evolution of Cellular Technology, 5G Radio, 2023.

### 1.27 5G'de Güvenlik

Cihaz, çekirdek ağın 5G'ye uygunluğunu doğrulamasını sağlamak amacıyla bir kimlik doğrulama zorluğuna yanıt verir. Bu doğrulama işlemi, çekirdek ağdaki Erişim ve Hareketlilik Yönetimi İşlevi (AMF) tarafından gerçekleştirilir.

Buna ek olarak, cihaz ile Erişim ve Hareketlilik Yönetimi İşlevi (AMF) arasında karşılıklı kimlik doğrulaması yapılırken, cihazın kimlik bilgileri, abone veritabanına göre kontrol edilerek doğrulanır.

Bu işlemde, Kimlik Doğrulama Sunucusu İşlevi (AUSF) gibi ek ağ işlevlerinin dahil edilmesi önemlidir. Bunun yanı sıra, kimlik doğrulama parametreleri ve abone bilgileri gibi kritik verilerin sağlanması, 5G çekirdek ağında güvenli ve verimli kimlik doğrulama ve yetkilendirme süreçlerini kolaylaştıran Birleşik Veri Yönetimi (UDM) tarafından gerçekleştirilir. Şekil 1.26, 5G güvenliği ile ilgili genel bir bakış sunmaktadır.



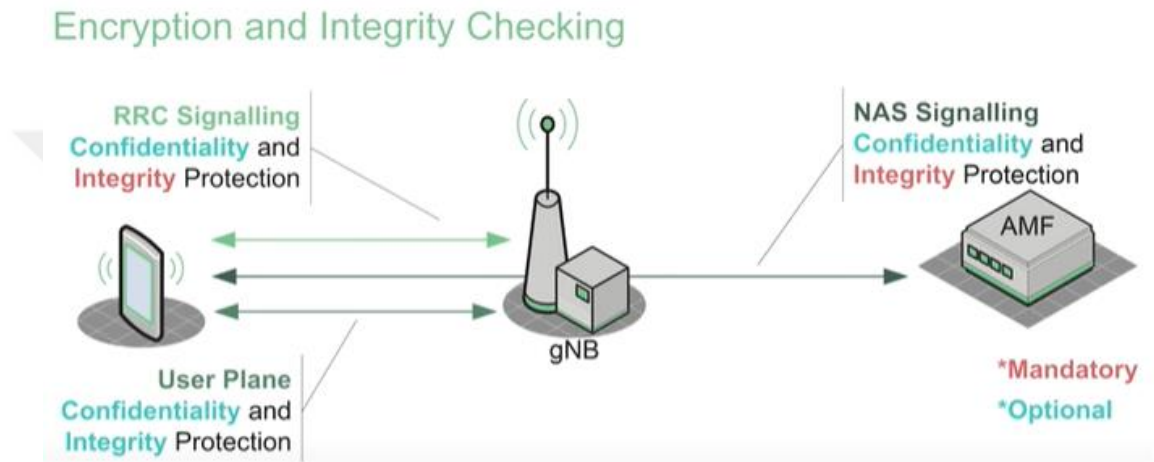
**Şekil 1.26: 5G’de Güvenlik: Genel Bakış**

**Kaynak:** Mpirical

Kimlik doğrulama sunucusu işlevi (AUSF), aslında Erişim ve Hareketlilik Yönetimi İşlevi (AMF) ile Birleşik Veri Yönetimi (UDM) arasında bir bağlantı işlevi görür. Güvenlik bilgileri doğrudan UDM'den alınamaz; bu bilgilerin AUSF üzerinden geçmesi gerekmektedir. AUSF, 5G kimlik doğrulama ve anahtar anlaşması sürecinde kritik bir rol oynamaktadır. Son olarak, UDM, kimlik doğrulama vektörünü oluşturan işlevdir. Bu vektör, güvenliğin sağlanabilmesi için gerekli olan başlangıç noktasıdır. Kimlik doğrulama vektörü oluşturulurken, cihazdaki gizli anahtar kullanılır. Bu gizli anahtar, UDM içinde saklanır ve güvenlik sürecinin temel unsurlarından birini oluşturur.

### 1.27.1 Şifreleme ve Bütünlük Kontrolü

Şifreleme, aktarılan verilerin gizliliğini koruma amacı güder. Eğer bir kişi radyo bağlantısını izleyip verileri ele geçirirse, bu durum veri bütünlüğünü tehdit edebilir. Çünkü verilerde meydana gelen herhangi bir bozulma, anlamlı hale gelmesini engeller. Bütünlük kontrolü, verilerin aktarım sürecinde herhangi bir değişikliğe uğramadığından emin olunmasını sağlar. Şekil 1.27'de gösterildiği gibi, şifreleme ve bütünlük kontrolü süreçlerinde temel rol oynayan unsurlar, gNB ve AMF'dir. Bu bileşenler, güvenli veri iletimi ve doğruluğunun sağlanmasında kritik öneme sahiptir.



**Şekil 1.27: 5G’de Güvenlik Şifreleme ve Bütünlük Kontrolü**

**Kaynak:** Mpirical

### 1.27.2 Hizmet Tabanlı Arayüzleri (SBA) Koruma

Hizmet tabanlı mimarinin ve içindeki hizmet tabanlı arayüzlerin güvenliğini sağlamak için dikkate alınması gereken iki farklı seçenek bulunmaktadır. İlk seçenek, hizmet tabanlı arayüzler için kullanılan protokol yığınıdır ve HTTP/2 protokolünü benimser. Eğer HTTP trafiği korunması gereken bir ortamda iletiliyorsa, bu protokol yığına TLS (Taşıma Katmanı Güvenliği) eklenmesi gereklidir. Ancak, herhangi bir TLS sürümü yerine, Şekil 1.28’de gösterildiği gibi, hizmet tabanlı arayüzlerde TLS 1.2 veya daha sonraki sürümlerin kullanılması önerilmektedir. Bu, trafiğin TLS aracılığıyla güvenli bir şekilde korunmasını sağlayan bir yöntemdir.

## Protecting the HTTP Message

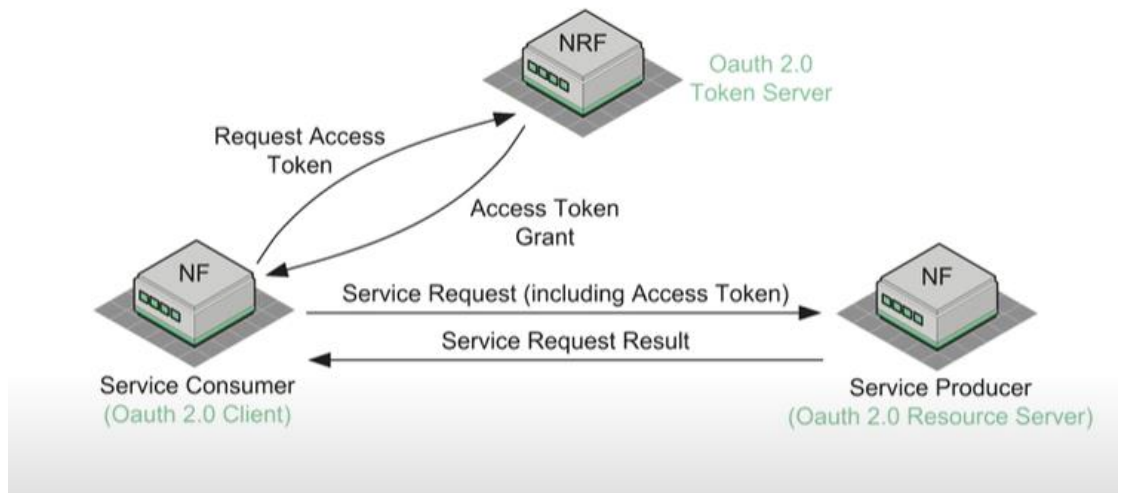


**Şekil 1.28: 5G’de Hizmet Tabanlı Arayüzleri Koruma**

**Kaynak:** Mpirical

Bununla birlikte, Şekil 1.29’da gösterildiği gibi, OAuth 2.0 gibi alternatif bir metodoloji de bulunmaktadır. Bu metodoloji, transit trafiğin korunmasından ziyade, hizmet sağlayıcısını güvence altına almakla ilgilidir. OAuth 2.0, kullanıcı kimlik bilgilerini paylaşmadan, kullanıcıların bir hizmete erişim yetkisi vermelerini sağlayan bir yetkilendirme protokolüdür ve hizmet sağlayıcılarının güvenliğini sağlamak için kullanılmaktadır.

## Token Based Authentication with OAuth 2.0



**Şekil 1.29: OAuth 2.0 ile Token Tabanlı Kimlik Doğrulama**

**Kaynak:** Mpirical

### **1.27.3 Dolaşım (Roaming) Koruması**

Dolaşım koruması, özellikle bir mobil cihazın bir kamusal kara mobil ağı ile başka bir kamusal kara mobil ağı arasında doğrudan bir bağlantının bulunmadığı durumlarda büyük önem taşır. Hizmet tabanlı bir mimari göz önünde bulundurulduğunda, ağ içindeki veri iletim yollarının güvence altına alınması amacıyla bir proxy sunucusu kullanılabilir. Bu yöntem, ağdaki veri trafiğini güvenli bir Şekilde yönlendirmek ve korumak için etkili bir czm sunar.

### **1.27.4 Abone Kimliğinin Korunması**

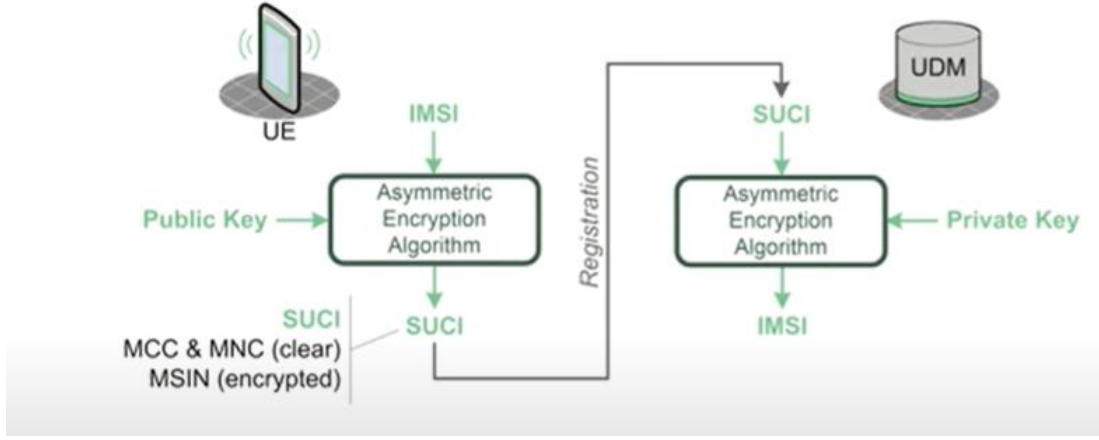
Cihaz, Uluslararası Mobil Abone Kimliği (IMSI) bilgisini güvenli ve gizli bir formata dnstrmek amacıyla abonelik gizli kimlik (SUCI) genel anahtarı ve asimetric bir algoritma kullanır.

IMSI'nin bileşenleri, Mobil lke Kodu (MCC), Mobil Şebeke Kodu (MNC) ve Mobil Abone Kimlik Numarası (MSIN) olmak üzere  ana bölümden oluşmaktadır. Bu 15 haneli numara, her SIM kartında bulunan ve mobil Őebekeler tarafından kullanıcı kimliğini tanımak için kullanılan bir değerini ifade eder.

Genellikle Şebeke üzerinde kimlik doğrulama amacıyla kullanılan IMSI, abonenin kimliğini gizlemek için Őifrelenir. Bu bağlamda, yalnızca IMSI'nin MSIN kısmının Őifrelenmesi yeterli olacaktır.

Abonenin zel anahtarının oluşturulduğu ve kullanıcının gerçek kimliğinin güvenli bir Şekilde iletilmesi için gereken işlem, Kullanıcı Veri Yönetimi (UDM) tarafından gerçekleştirilir ve Şekil 1.30'da gösterildiği gibi, özel anahtarla birlikte kimlik bilgileri karşı tarafa iletilir.

## Subscription Concealed Identifier



Şekil 1.30: Abonelik Gizli Kimlik Sistemi

**Kaynak:** Mpirical

### 1.28 5G Mobil Ağ Mimarisi

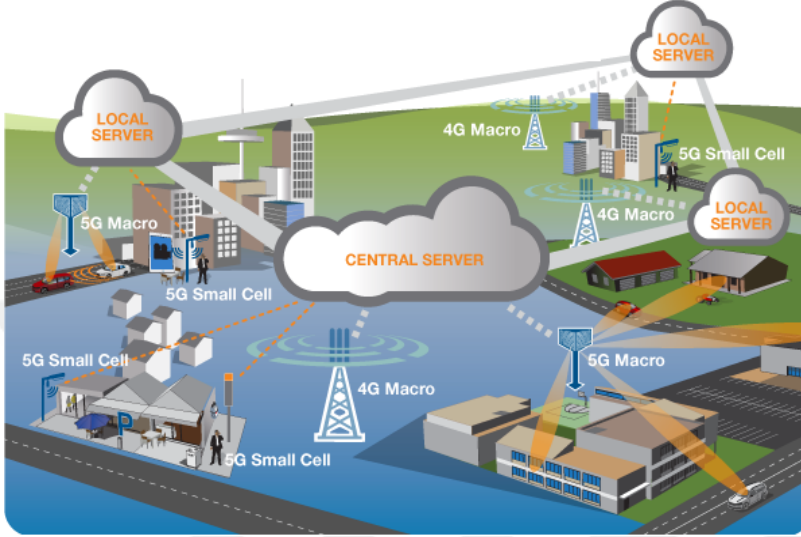
Mobil ağlar, temel olarak iki ana bileşenden oluşmaktadır: Radyo Erişim Ağı (RAN) ve Çekirdek Ağ. Gecikmeyi en aza indirmek amacıyla, her iki bileşende de altyapısal iyileştirmeler ve önemli değişiklikler gereklidir.

#### 1.28.1 Çekirdek Ağ

Çekirdek ağ, mobil ses, veri ve internet bağlantılarının yönetiminden sorumlu olan mobil santral ve veri altyapısını ifade eder. 5G için çekirdek ağ, yanıt sürelerini iyileştirmek ve ağ genelindeki gecikmeleri azaltmak amacıyla, internet ve bulut tabanlı hizmetlerle daha iyi entegrasyon sağlamak için yeniden yapılandırılmaktadır.

5G'nin temel bir özelliği, yeniden yapılandırılan çekirdek ağın, sinyal protokolleri ve içeriği son kullanıcılara daha yakın bir konumda yerleştiren dağıtılmış sunucular ile güçlendirilmesidir. Bu dağıtım yaklaşımı, cihazlar arasındaki fiziksel mesafeyi azaltarak, gecikmeye duyarlı uygulamalar için iyileştirilmiş yanıt süreleri ve optimize edilmiş performans sağlar.

Bu yaklaşımın bir örneği, isteğe bağlı video akışı hizmetleridir. Popüler içeriklerin yerel sunucularda depolanması veya "önbelleğe alınması" bu modelin tipik bir uygulamasıdır. Böylece, erişim süreleri kısaltılır ve içeriğin kullanıcılara daha hızlı iletilmesi sağlanır, bu da Şekil 1.31'de gösterildiği şekilde performansın artırılmasına olanak tanır.



**Şekil 1.31: Yerel Sunucular ile Erişim Süresini Azaltma**

**Kaynak:** EMF Explained 2,0

5G ağ mimarisi, düşük gecikmeli uygulamaların ve hızlı içerik dağıtımının sağlanabilmesi için merkezi ve yerel sunucuları entegre ederek 5G ile 4G teknolojilerinin birleşimini desteklemektedir.

Şekil 1.32'de, yerel bulut sunucularının içerik dağıtım hızını artırmadaki etkisi ve özellikle araç çarpışma önleme sistemleri gibi gerçek zamanlı uygulamaları destekleme kapasitesi ayrıntılı bir şekilde gösterilmektedir. Bu durum, 5G ağındaki yerel sunucuların bağlantı hızlarını optimize etme ve gecikmeyi minimize etme konusundaki kritik rolünü ortaya koymaktadır.



**Şekil 1.32: Yerel Sunuculara Daha Yakından Bir Bakış**

**Kaynak:** EMF Explained 2,0

5G teknolojisinin sunduğu gelişmiş işlevlerin önemli bir bölümü, ağ işlevi sanallaştırma (NFV) ve ağ dilimleme gibi çeşitli uygulama ve hizmetlerin sağlanmasını mümkün kılan mekanizmalarla doğrudan çekirdek ağ içerisinde yönetilmekte ve düzenlenmektedir. Bu yapı, ağ kaynaklarının dinamik olarak optimize edilmesini ve farklı hizmet gereksinimlerine uyarlanmasını sağlayarak 5G'nin esnekliğini ve etkinliğini artırmaktadır.

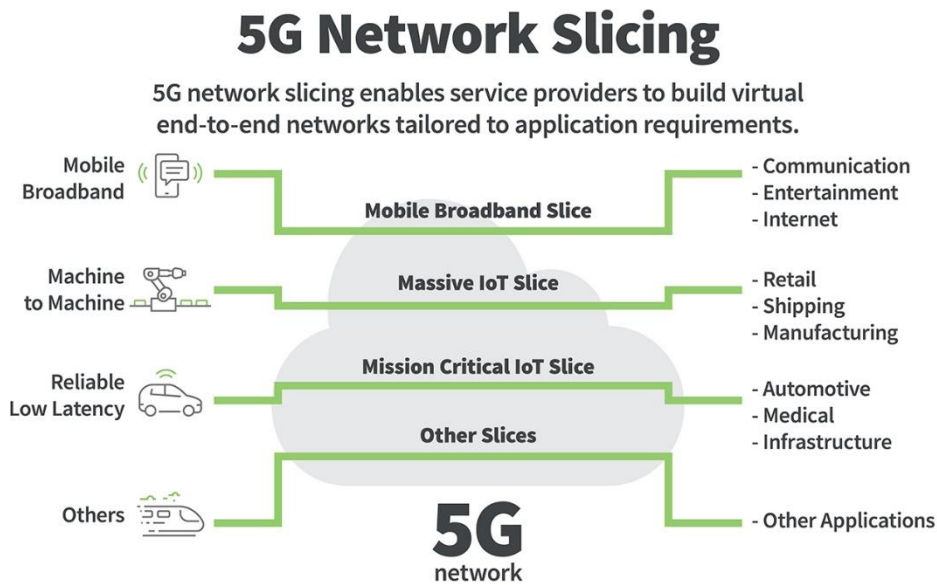
### **1.28.2 Radyo Erişim Ağı**

5G ağ altyapısı, mobil kullanıcıların ve kablosuz cihazların çekirdek ağa erişimini sağlayan çeşitli bileşenlerden oluşmaktadır. Bu bileşenler arasında küçük hücreler, baz istasyonları, direkler ve bina içi veya ev içi özel sistemler yer almaktadır. Özellikle, milimetre dalga (mmWave) frekanslarının sınırlı sinyal yayılım aralığı nedeniyle, küçük hücreler 5G ağlarında kritik bir rol oynamaktadır. Kesintisiz bağlantıyı sürdürebilmek adına, küçük hücreler kullanıcı talebine göre yoğun kümeler halinde konuşlandırılmakta ve geniş alan kapsama sağlayan makro hücre ağına tamamlayıcı bir yapı sunmaktadır. Bu yaklaşım, 5G ağlarının yüksek veri hızları ve düşük gecikme gereksinimlerini karşılamasına olanak tanımaktadır.

5G makro hücreleri, eş zamanlı veri iletimini ve alımını optimize etmek amacıyla birden fazla anten elemanı veya bağlantısından oluşan MIMO (Çoklu Giriş, Çoklu Çıkış) anten sistemleri ile donatılacaktır. Bu sistemler, yüksek veri iletim hızlarını sürdürebilirken aynı anda daha fazla kullanıcıyı destekleyerek ağ kapasitesini önemli ölçüde artırır. Anten elemanlarının sayısı arttığında, bu yapılandırma "büyük MIMO" olarak adlandırılmaktadır. Büyük MIMO sistemleri, genişletilmiş anten elemanı sayılarına rağmen fiziksel boyutlarını mevcut 4G baz istasyonu antenlerinin boyutlarına benzer şekilde koruyarak etkili bir tasarım sunmaktadır.

### 1.29 5G Network Slicing (Ağ Dilimleme)

Ağ dilimleme, bir hizmet sağlayıcının tek bir fiziksel altyapı üzerinde birden fazla sanal ağ oluşturmasına olanak tanıyarak, müşterilere özel hizmetler veya ortamlar sunmada önemli bir esneklik sağlar. Bu yöntem, belirli sektörler, işletmeler veya uygulamalar için ağ kaynaklarının verimli bir şekilde bölünmesini mümkün kılar. Şekil 1.33'te gösterildiği üzere, ağ dilimleme ile acil durum hizmetleri gibi kritik öneme sahip uygulamalar, diğer kullanıcılarla etkileşime girmeden kendi özel ağ dilimlerinde çalışabilir. Bu yaklaşım, hem kaynakların etkin yönetimini hem de farklı kullanım senaryolarına uyum sağlamayı destekler [20].



Şekil 1.33: 5G Ağ Dilimleme

**Kaynak:** SDX Central

### **1.30 Network Function Virtualization – NFV (Ağ Fonksiyonu Sanallaştırma)**

Operatörlerin bulut platformları içindeki herhangi bir konumda ağ işlevlerini gerçek zamanlı olarak dağıtabilme yeteneği, operasyonel esnekliği önemli ölçüde artırmaktadır. Geleneksel olarak güvenlik duvarları ve şifreleme gibi işlevler özel donanımlara dayanırken, bu işlevler artık sanal makinelerde yazılım tabanlı olarak gerçekleştirilebilmektedir. Bu dönüşüm, Ağ İşlevi Sanallaştırma (Network Function Virtualization - NFV) ile mümkün hale gelmiştir. NFV, ağ altyapısının hızını, verimliliğini ve çevikliğini artırarak, yeni iş uygulamalarının entegrasyonunu kolaylaştırmakta ve 5G'ye hazır bir çekirdek ağ oluşturulmasında kritik bir rol oynamaktadır.

Örnek olarak, Sanal Güvenlik Duvarı (Virtual Firewall - vFW), Sanal Yönlendirici (Virtual Router - vRouter) ve Sanal Yük Dengeleyici (Virtual Load Balancer - vLB) gibi sanal ağ işlevleri, ağ altyapısının dinamik gereksinimlere yanıt verebilmesini sağlamaktadır. Bu sanallaştırma, hem kaynak kullanımını optimize etmekte hem de inovasyonu hızlandırarak modern ağ mimarileri için bir temel oluşturmaktadır..

### **1.31 5G Çekirdek Ağı**

Bu bölüm, 5G çekirdek mimarisinin bileşenlerini ayrıntılı bir şekilde ele alarak mevcut 4G mimarisiyle karşılaştırmalı bir genel bakış sunmaktadır. 5G Çekirdek Ağı (5G Core), 5G sisteminin (5GS) temel yapı taşlarından biri olup, 5G Erişim Ağı (5G-AN) ve Kullanıcı Ekipmanı (User Equipment - UE) ile entegre çalışarak 5G'nin gelişmiş özelliklerini desteklemektedir.

5G çekirdeği, kimlik doğrulama, güvenlik, oturum yönetimi ve bağlı cihazlardan gelen veri trafiğinin toplanması gibi temel işlevleri yerine getirmek için bulut tabanlı ve hizmet tabanlı bir mimari (Service-Based Architecture - SBA) kullanmaktadır. Bu mimari yaklaşım, ağın esnekliğini artırırken ölçeklenebilir ve dinamik bir altyapı sunarak, 5G teknolojisinin düşük gecikme, yüksek bant genişliği ve artırılmış güvenlik gibi özelliklerini tam anlamıyla desteklemesini sağlamaktadır.

5G çekirdek ağı, mevcut 4G LTE altyapısına kıyasla, hem işlevsellik hem de mimari yapı açısından önemli yenilikler içermekte ve ağ performansını optimize etmek için tasarlanmış modern bir sistem sunmaktadır.

5G çekirdek mimarisi, aşağıdaki temel bileşenlerden oluşmaktadır [21]:

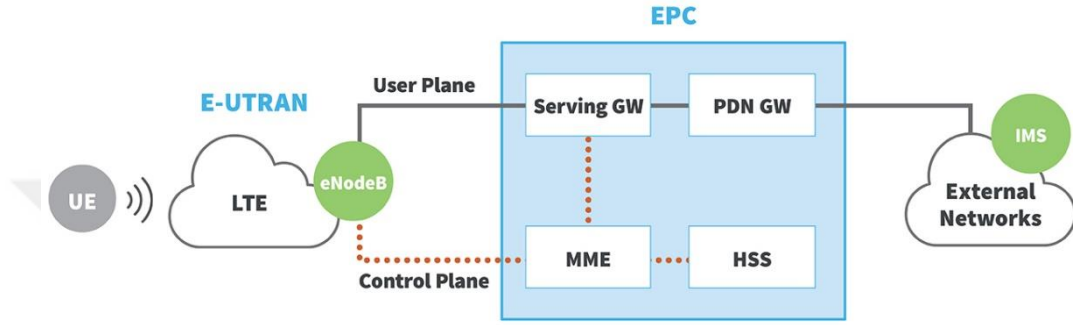
- Kullanıcı Düzlemi İşlevi (User Plane Function - UPF): Kullanıcı verilerinin yönlendirilmesi ve iletilmesinden sorumlu ağ elemanı.
- Veri Ağı (Data Network - DN): Operatör hizmetleri, internet bağlantısı veya üçüncü taraf hizmetler gibi veri kaynaklarını sağlayan ağ bileşeni.
- Erişim ve Hareketlilik Yönetim İşlevi (Access and Mobility Management Function - AMF): Kullanıcı cihazlarının erişim kontrolü ve hareketlilik yönetiminden sorumlu çekirdek işlev.
- Kimlik Doğrulama Sunucusu İşlevi (Authentication Server Function - AUSF): Kullanıcı kimlik doğrulama işlemlerini gerçekleştiren güvenlik bileşeni.
- Oturum Yönetim İşlevi (Session Management Function - SMF): Oturumların kurulması, yönetilmesi ve sonlandırılmasından sorumlu ağ işlevi.
- Ağ Dilimi Seçim İşlevi (Network Slice Selection Function - NSSF): Ağ dilimlerinin seçimi ve yönetimini sağlayan işlev.
- Ağ Maruz Kalma İşlevi (Network Exposure Function - NEF): Harici uygulamalara ağ hizmetlerini ve işlevlerini açan bir arayüz.
- NF Deposu İşlevi (Network Repository Function - NRF): Ağ fonksiyonlarının keşfi ve yönetimi için merkezi bir depo işlevi.
- Yetki Kontrol İşlevi (Policy Control Function - PCF): Kullanıcılar ve uygulamalar için yetki kontrol mekanizmalarını uygulayan bileşen.
- Birleşik Veri Yönetimi (Unified Data Management - UDM): Kullanıcı abonelik bilgileri ve kimlik verilerinin merkezi yönetimini sağlayan işlev.
- Uygulama İşlevi (Application Function - AF): Ağ ile entegre çalışan uygulamalara yönelik işlevsellik sağlayan ağ bileşeni.

Bu bileşenler, 5G çekirdek mimarisinin esnek, ölçeklenebilir ve hizmet odaklı yapısını oluşturarak modern ağların ihtiyaçlarını karşılamaya olanak tanır.

### 1.32 4G Mimarisi Diyagramı

3G'den 4G'ye geçiş, ağ mimarisinde kademeli ancak önemli değişikliklerle gerçekleşmiştir. Şekil 1.34, 4G çekirdek ağının ana bileşenlerini ayrıntılı olarak göstermektedir.

4G ağ mimarisinde, Kullanıcı Ekipmanı (User Equipment - UE), örneğin akıllı telefonlar ve hücresel cihazlar, LTE Radyo Erişim Ağı (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network - E-UTRAN) üzerinden Gelişmiş Paket Çekirdeği (Evolved Packet Core - EPC) ile bir bağlantı kurar. Bu bağlantı, internet ve diğer harici ağlara erişimi kolaylaştırır. E-UTRAN, UE ile EPC arasındaki iletişim için yüksek hızlı veri aktarımı sağlayan bir radyo erişim ağıdır. EPC ise mobil veri ve ses trafiğinin yönetimi, yönlendirilmesi ve harici ağlara entegrasyonu için temel bir altyapıdır.



**Şekil 1.34: 4G Çekirdek Ağının Ana Unsurları**

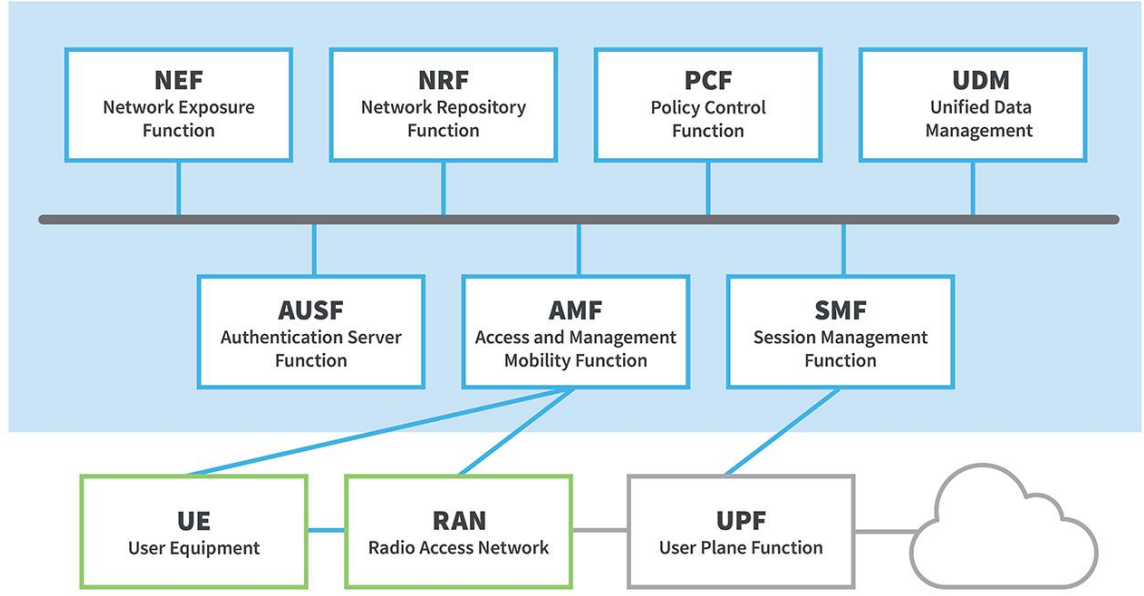
**Kaynak:** 3GPP Group

Gelişmiş NodeB (eNodeB), 4G ağ mimarisinde kritik bir bileşen olarak hem kullanıcı veri trafiğini hem de ağ yönetimi trafiğini bağımsız bir şekilde yönetme görevini üstlenir. Bu görev kapsamında eNodeB, her iki trafik türünü ayırt ederek, kullanıcı veri trafiğini ve kontrol trafiğini uygun şekilde Gelişmiş Paket Çekirdeği'ne (Evolved Packet Core - EPC) yönlendirir.

### 1.33 5G Mimarisi Diyagramı

5G, ağ işlevlerinin belirli hizmetlere göre yapılandırıldığı ve bunun sonucunda 5G Çekirdek Hizmet Tabanlı Mimarisi'nin (SBA) benimsenmesine yol açan temel bir tasarım anlayışıyla geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, 5G ağının daha esnek, ölçeklenebilir ve hizmet odaklı olmasını sağlar.

Şekil 1.35'te yer alan diyagram, 5G çekirdek ağının temel bileşenlerini ve bu bileşenlerin birbirleriyle olan etkileşimlerini ayrıntılı bir şekilde göstermektedir. Bu yapı, ağın daha dinamik bir şekilde yönetilmesini ve farklı kullanıcı taleplerine hızlıca yanıt verilmesini mümkün kılar.



**Şekil 1.35: 5G Çekirdek Ağının Temel Unsurları**

**Kaynak:** Techplayon 5G NR

Nasıl çalışır:

- 5G akıllı telefonlar veya 5G hücresel cihazlar gibi Kullanıcı Ekipmanları (UE), 5G çekirdek ağına ve 5G Yeni Radyo Erişim Ağı (NR-RA) aracılığıyla Veri Ağlarına (DN), örneğin İnternet'e bağlanır. Bu bağlantı, yüksek hızda veri iletimi ve düşük gecikmeli iletişim sağlamak için 5G altyapısının sunduğu gelişmiş teknolojileri kullanır.
- Erişim ve Hareketlilik Yönetimi İşlevi (AMF), Kullanıcı Ekipmanı (UE) bağlantıları için merkezi bir giriş noktası olarak işlev görür.
- Kullanıcı Ekipmanı (UE) tarafından talep edilen hizmete göre, Erişim ve Hareketlilik Yönetimi İşlevi (AMF), kullanıcının oturumunu işlemek için uygun Oturum Yönetim İşlevi (SMF) belirler ve bu işlevi atar. AMF, UE ile ağ arasındaki bağlantıyı yönetirken, hizmetin türüne bağlı olarak oturum yönetimini gerçekleştirecek SMF'yi seçerek, veri akışının ve oturumunun düzgün bir şekilde yönetilmesini sağlar.
- Kullanıcı Düzlemi İşlevi (UPF), IP veri trafiğinin Kullanıcı Ekipmanı (UE) ile harici ağlar arasında iletilmesini sağlayan bir ağ bileşenidir.

- Kimlik Doğrulama Sunucusu İşlevi (AUSF), Erişim ve Hareketlilik Yönetimi İşlevi (AMF) ile birlikte çalışarak, Kullanıcı Ekipmanının (UE) kimliğini doğrular ve 5G çekirdek ağının hizmetlerine erişimini mümkün kılar.
- Oturum Yönetimi İşlevi (SMF), Yetki Kontrol İşlevi (PCF), Uygulama İşlevi (AF) ve Birleşik Veri Yönetimi (UDM) gibi diğer ağ işlevleri, 5G ağında güvenlik önlemlerini uygulamak için kritik bir rol oynar. Bu işlevler, yetki kararlarını uygulamak ve abonelikle ilgili verileri almak suretiyle ağ güvenliğini sağlar.

Görüldüğü üzere, 5G ağ mimarisi arka planda daha karmaşık bir yapıya sahiptir; ancak bu karmaşıklık, farklı 5G kullanım senaryolarına yönelik özelleştirilebilen gelişmiş hizmetlerin sunulabilmesi için gereklidir.

### **1.34 5G Mimarisi ve Bulut ve Edge**

5G ağ mimarisi ile 4G ağ mimarisi arasındaki en belirgin farklardan biri, uç bilişim (edge computing) entegrasyonudur. Bu mimari, ağın uç noktalarına, özellikle baz istasyonlarına yakın bölgelerde küçük ölçekli veri merkezlerinin yerleştirilmesini öngörmektedir.

Bu tasarım, düşük gecikme ve yüksek bant genişliği gereksinimlerini karşılayan uygulamalar için kritik bir öneme sahiptir. Uç bilişim, veri işleme işlemlerini ağın merkezinden daha yakın bir noktada gerçekleştirerek, gecikmeleri önemli ölçüde azaltır. Böylece, içerik dağıtımını daha verimli hale getirir ve gerçek zamanlı hizmetler için genel sistem performansını iyileştirir. Bu özellik, 5G ağlarının, nesnelerin interneti (IoT), otonom araçlar ve video akış gibi uygulamalarda hızlı ve düşük gecikmeli bağlantı ihtiyaçlarını etkin bir şekilde karşılamasına olanak tanır.

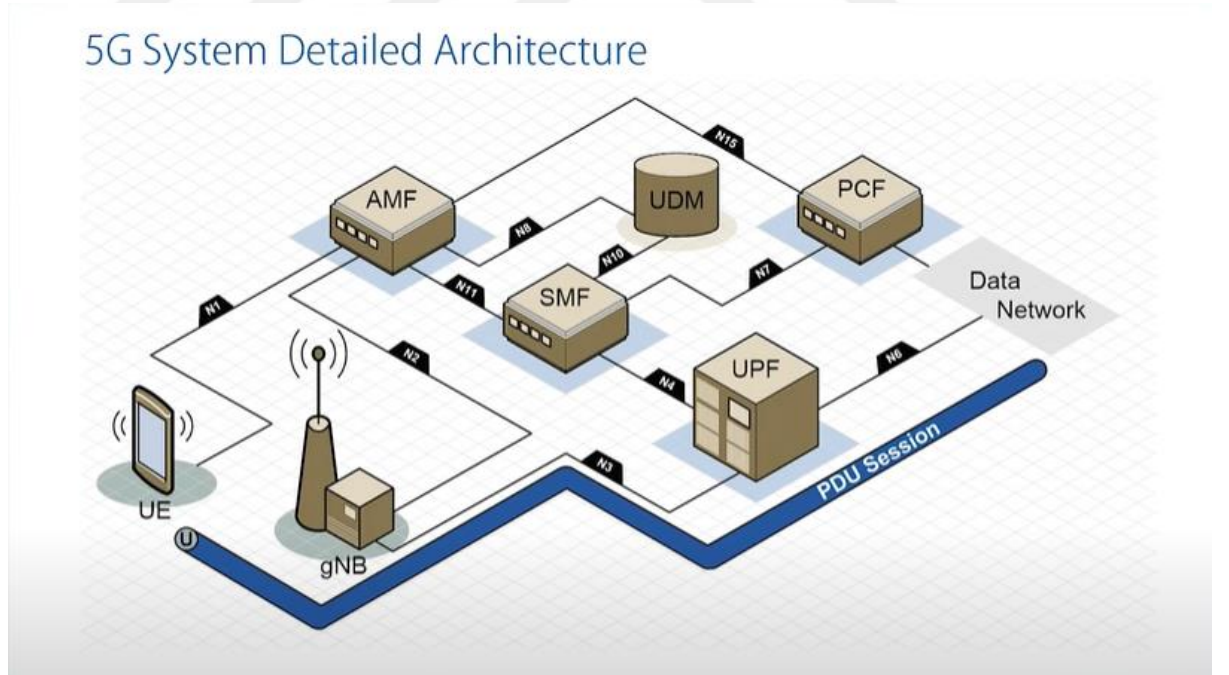
Yüksek bant genişliği kullanımının önemli bir örneği, video akışı hizmetleridir. Geleneksel olarak, içerik bulut sunucularında barındırılmakta ve kullanıcılar bu sunuculardan içerik talep etmektedir. Ancak, örneğin 100 kullanıcı bir baz istasyonuna bağlandığında ve aynı popüler içeriği talep ettiğinde, bu içeriği son kullanıcılara daha yakın bir noktada, ideal olarak baz istasyonunda depolamak ve iletmek daha verimli bir yaklaşım sunar. Bu yerleştirilmiş içerik dağıtımını, gecikmeyi minimize ederek veri iletimini optimize eder ve böylece genel kullanıcı deneyimini önemli ölçüde iyileştirir.

İçeriğin merkezi bir bulut sunucusundan her bir kullanıcıya ayrı ayrı iletilmesi yerine, içerik ağın kenarındaki bir depolama ortamına aktarılır. 5G teknolojisiyle, içerik bir kez baz istasyonuna iletdikten sonra, 100 kullanıcıya verimli bir şekilde dağıtılır.

Bu yaklaşım, aynı zamanda iki yönlü iletişim ve düşük gecikme gerektiren uygulamalarda da önemli avantajlar sağlar. Uygulamanın uç noktalarda işlenmesi, verilerin gidiş-dönüş süresini önemli ölçüde azaltır, çünkü verilerin tüm ağı geçmesine gerek kalmaz. Bu durum, özellikle gerçek zamanlı hizmetlerin etkin bir şekilde sunulması için kritik bir rol oynamaktadır.

### 1.35 5G Ayrıntılı Çekirdek Ağ Mimarisi

5G çekirdek şebekesi, radyo erişim şebekesiyle entegre olarak yeni bir mimari yapı sunmaktadır. Bu mimari, PDU oturumları, QoS (Hizmet Kalitesi) akışları, temel bileşenler, ağ işlevi sanallaştırma (NFV) ve ağ dilimleme gibi unsurları içerir ve Şekil 1.36'da gösterildiği gibi 5G sisteminin temel yapı taşlarını oluşturur.

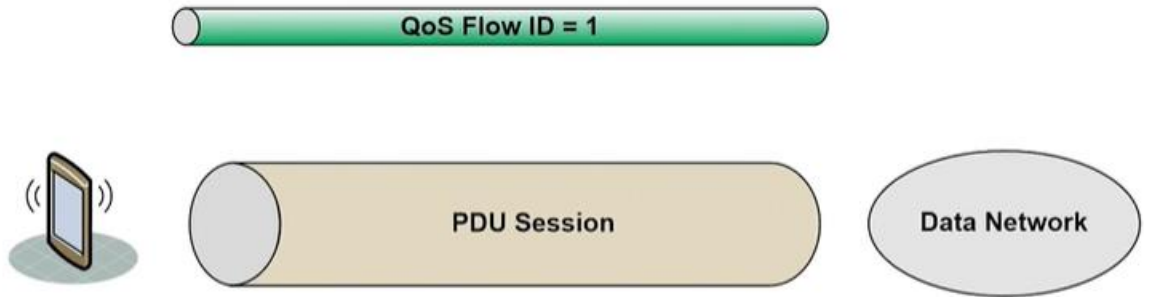


Şekil 1.36: 5G Çekirdek Ağ Mimarisi

Kaynak: Mpircial

5G ağında, Kullanıcı Düzlemi (UP) bağlantısı, Protokol Veri Birimi (PDU) Oturumu olarak adlandırılmaktadır. Kullanıcı verileri, mobil cihazdan veya kullanıcı ekipmanından gNB (gNodeB) üzerinden Kullanıcı Düzlemi İşlevi'ne (UPF) iletilir ve burada, veriler Veri Ağı'na (DN) yönlendirilir. Bu veri akışı, kullanıcı verilerinin 5G ağ mimarisi içerisinde etkin bir şekilde aktarılmasını sağlar.

PDU oturumları, her cihaz için benzersizdir ve bu nedenle her cihaz yalnızca kendi PDU oturumuna bağlı bağlantıyı kullanabilir. Her PDU oturumu, Hizmet Kalitesi (QoS) sağlamak amacıyla "QoS akışları" içerir. Bir QoS akışı, belirli bir hizmet kalitesi seviyesiyle tahsis edilen bir kullanıcı düzlemi trafiği akışıdır. Farklı trafik türleri, farklı QoS gereksinimlerine sahip olabileceğinden, bir PDU oturumunda birden fazla QoS akışı paralel olarak çalışabilir ve her biri farklı hizmet gereksinimlerini karşılamak için trafik işler. Bu akışları birbirinden ayırt etmek için, her QoS akışına, Şekil 1.37'de gösterildiği gibi, benzersiz bir QoS Kimliği atanır. Uygulamada, bir PDU oturumu, her biri öncelik, gecikme ve Hizmet Kalitesi ile ilgili diğer faktörler gibi belirli özelliklere sahip birden fazla QoS akışına sahip olabilir. Bu yapı, bir PDU oturumu içinde QoS'un, her biri benzersiz bir QoS Kimliği ile tanımlanan ayrı QoS akışları aracılığıyla sağlanmasını mümkün kılar.

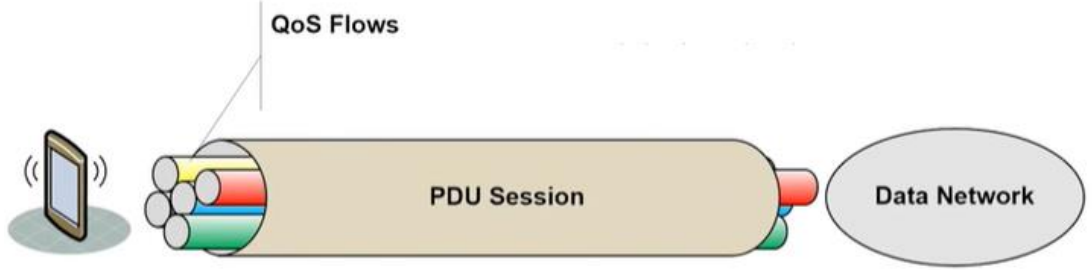


**Şekil 1.37: 5G QoS Flow (QoS Akışı)**

**Kaynak:** Mpircial

Aboneye ait tüm trafik için varsayılan bir QoS profiliyle ilişkilendirilen bir QoS akışı bulunur. QoS akışları, Şekil 1.38'de gösterildiği gibi, gecikme, öncelik ve veri hızı (garantili veya garantisiz) gibi farklı QoS özelliklerine dayalı olarak yapılandırılabilir. Bu akışlar, abonenin ihtiyaçlarına uygun hizmet seviyelerini sağlamak için kullanılır.

Birincil amaç, abonenin PDU oturumunu sürdürmesini temin etmek ve ağda farklı alanlarda hareket ederken, bu oturumun sürekliliğini sağlayarak kullanıcıyı doğru şekilde takip etmektir. Bu süreç, kullanıcı deneyimini optimize etmek ve sürekli bağlantıyı garantilemek için kritik öneme sahiptir.

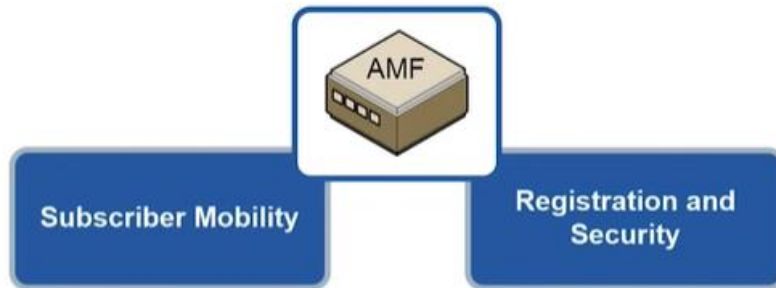


**Şekil 1.38: 5G PDU Oturum ve QoS Akışları**

**Kaynak:** Mpircial

Çekirdek ağda dikkate alınması gereken ilk bileşen, Erişim ve Hareketlilik Yönetim Fonksiyonu (AMF)'dur. LTE'deki Hareketlilik Yönetim Varlığı (MME) ile benzer bir işlevi yerine getiren AMF, abonenin hareketliliğini izlemekten sorumludur. Bu fonksiyon, abonenin bulunduğu izleme alanını veya potansiyel hücreyi sürekli olarak takip eder ve abonenin aktif bir bağlantıya sahip olup olmadığını belirler. Şekil 1.39'da gösterildiği gibi, AMF'nin temel görevleri arasında, abonenin etkinliği ile ilgili bilgilerin doğru bir şekilde toplanması ve hareketliliğin yönetilmesi yer alır.

## Core Access and Mobility Management Function



**Şekil 1.39: Çekirdek Erişim ve Hareketlilik Yönetimi Fonksiyonu**

**Kaynak:** Mpircial

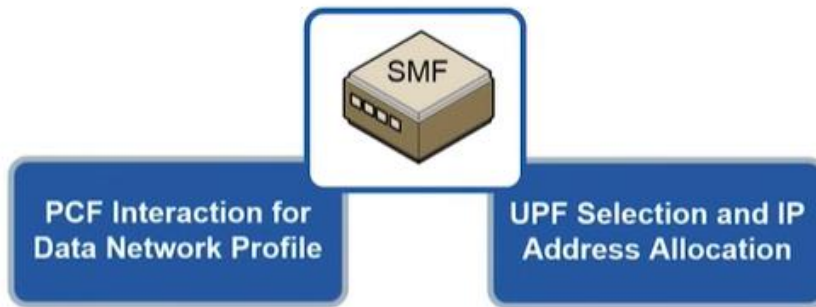
AMF, ayrıca kimlik doğrulama ve kayıt işlemlerinde de kritik bir rol üstlenir. Abonenin ağa erişim izni doğrulandıktan sonra, çeşitli abone veritabanlarıyla etkileşimde bulunarak bu doğrulama sürecini gerçekleştirir.

AMF, abonenin kimliğinin ağda doğrulanmasını sağlar ve cihaza, ağa sinyal gönderirken kullanılacak geçici bir kimlik atar. Bu bağlamda, AMF, temel erişim ve hareketlilik yönetimi işlevlerini sunarak ağın düzgün çalışmasını ve kullanıcı bağlantılarının kesintisiz bir şekilde yönetilmesini temin eder.

Oturum Yönetim İşlevi (SMF), 5G mimarisindeki bir diğer önemli bileşendir. LTE'deki Mobilite Yönetim Varlığı (MME), hem mobilite yönetimi hem de oturum yönetiminden sorumlu iken, 5G'de bu iki işlev birbirinden ayrılmıştır. Erişim ve Mobilite Yönetim İşlevi (AMF), mobilite yönetimini üstlenirken, SMF, oturum yönetimine odaklanır ve özellikle oturumların kurulması, yapılandırılması ve sonlandırılması süreçlerini denetler.

Oturum Yönetim İşlevi (SMF), Paket Veri Birimi (PDU) oturum bağlantısını başlatma, trafiği Kullanıcı Düzlemi İşlevi (UPF) üzerinden yönlendirme ve hangi UPF'nin kullanılacağını belirleme sorumluluğuna sahiptir. Ayrıca, veri oturumu IP tabanlı olduğunda, SMF, Şekil 1.40'da gösterildiği gibi aboneye bir IPv4 veya IPv6 adresi atamaktan da sorumludur.

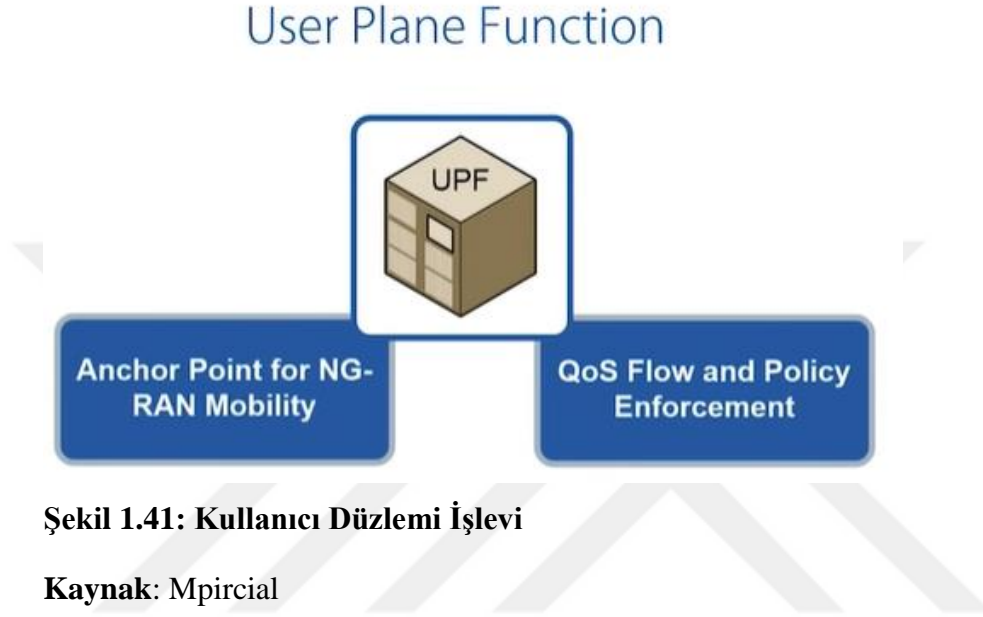
## Session Management Function



**Şekil 1.40: Oturum Yönetim Fonksiyonu**

**Kaynak:** Mpircial

5G mimarisinde, PDU oturumları Ethernet veya yapılandırılmamış veri akışları gibi farklı veri taşıma yöntemlerine dayanabilir ve bu, LTE'nin yalnızca IP tabanlı modelinin ötesine geçilmesine olanak tanır. Radyo Erişim Ağı içinde dolaşan kullanıcılar, bir gNB'den diğerine geçiş yapabilirken, UPF, Şekil 1.41'de gösterildiği gibi sabit bir bağlantı noktası olarak kalır ve bu durum, ağın verimli ve kesintisiz çalışmasını sağlar.



**Şekil 1.41: Kullanıcı Düzlemi İşlevi**

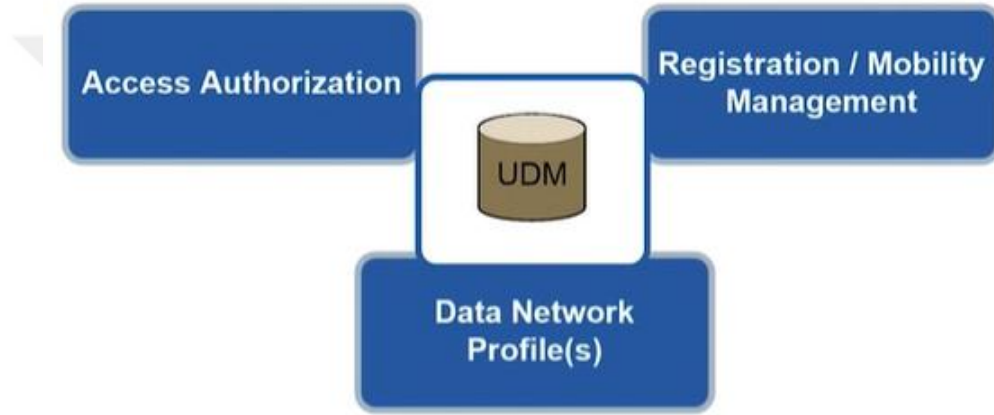
**Kaynak:** Mpircial

Sonuç olarak, kullanıcı düzlemi bağlantısı, her durumda gNB'den çekirdek ağına yönlendirilerek UPF'ye iletilir. UPF, kullanıcı düzleminin bir parçası olduğundan, verilerin doğru QoS akışına yönlendirilmesini ve ilgili yetkilerin etkin bir şekilde uygulanmasını sağlayarak Hizmet Kalitesi (QoS) gereksinimlerinin yerine getirilmesi için ideal bir noktadır.

Bir sonraki bileşen, abone bilgilerini merkezi bir şekilde depolayan Birleşik Veri Yönetimi (UDM) işlevidir. UDM, güvenlik anahtarlarını saklayarak ağ erişim yetkilendirmesinde kritik bir rol üstlenir. Ayrıca, her abonenin hangi Erişim ve Hareketlilik Yönetimi İşlevi'ne (AMF) atandığını izleyerek, kayıt ve hareketlilik yönetim süreçlerinde de önemli bir işlevi yerine getirir. Şekil 1.42'de gösterildiği gibi, UDM, bu bilgileri sürekli olarak güncel tutarak ağı güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlar.

Ayrıca, Birleşik Veri Yönetimi (UDM), abonenin özelliklerini, izinlerini ve kısıtlamalarını içeren abone veri ağını (profilini) barındırır. Bu profil, Erişim ve Hareketlilik Yönetimi İşlevi (AMF) ve Oturum Yönetimi İşlevi (SMF) gibi bileşenlere, abonenin gerçekleştirebileceği eylemleri, erişim sağlayabileceği veri ağlarını ve hangi Hizmet Kalitesi (QoS) profillerine hak sahipliği olduğunu belirten bilgileri sunar.

## Unified Data Management

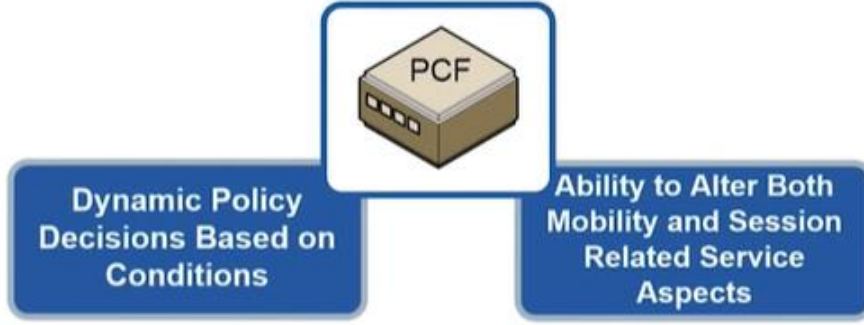


**Şekil 1.42: Birleşik Veri Yönetimi**

**Kaynak:** Mpircial

Son bileşen, ağ yetkilerinin denetlenmesinden sorumlu olan Yetki Denetim İşlevi (PCF) dir. PCF, şekil 1.43'ten anlaşılacağı üzere ağda mevcut olan koşullara göre dinamik yetki kararları alır, bu sayede ağ yönetimi daha esnek ve optimize bir şekilde gerçekleştirilebilir. Örneğin, bir PDU oturumu oluşturulmadan önce, Oturum Yönetim İşlevi (SMF), abonenin deneyimini etkileyebilecek herhangi bir ağ faktörünü değerlendirmek amacıyla PCF ile etkileşime geçer.

## Policy Control Function



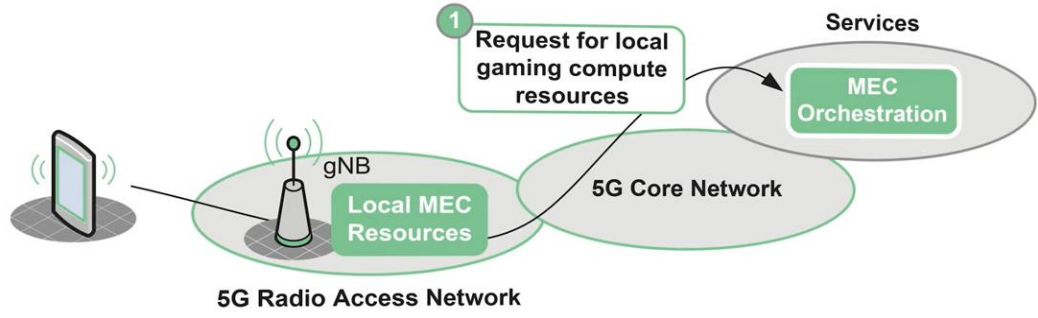
**Şekil 1.43: Yetki Kontrol Fonksiyonu**

**Kaynak:** Mpircial

Abonenin konumuna veya bağlı olduğu hücreye bağlı olarak, Yetki Denetim İşlevi (PCF), abonenin PDU oturumuna erişimini kısıtlama veya reddetme kararı alabilir. Bu işlem, ağdaki kaynakların verimli kullanımını ve hizmet kalitesinin korunmasını sağlamak amacıyla gerçekleştirilir. PCF, hem mobilite yönetimi hem de oturum yönetimi hizmetlerini dinamik olarak ayarlayarak, ağın genel işleyişini optimize etmede önemli bir rol üstlenir. Ayrıca, PCF, veri ağlarıyla etkileşime girerek, oturumla ilgili verileri toplar ve bu verileri, kaynakların doğru şekilde tahsis edilmesi için 5G çekirdek ağına iletir.

### 1.36 5G ve Bulut Tabanlı Oyunlar (Cloud Gaming)

Yüksek veri hızı, düşük gecikme ve veri aktarımının güvenilirliği, bulut tabanlı oyun mimarisinin temel unsurlarını oluşturur. Bu mimari, hizmet tabanlı bir yapı sunmakta olup, konsollar, oyun bilgisayarları ve akıllı telefonlar gibi çeşitli platformlarla esneklik sağlar. Bulut tabanlı oyun mimarisinin genel yapısı, Şekil 1.44'te sunulmaktadır.



**Şekil 1.44: Bulut Tabanlı Oyun Mimarisi**

**Kaynak:** Mpircial

Bulut tabanlı oyun hizmetlerine entegre edilen yerel MEC (Mobil Uç Bilişim) kaynakları, cihazda bir oyun başlatıldığında veri işleme için kritik bir rol oynar. Bu kaynaklarla iletişim kurarak, oyunla ilgili işlemlerin sonucunu hesaplamak ve işlenen verileri cihaza geri iletmek mümkün hale gelir. MEC servis orkestrası, bu işlemleri gerçekleştirebilmek için 5G bağlantısına ihtiyaç duyar. Orkestra, oyun için gerekli kaynakların tahsis edilmesini sağlamak amacıyla yerel MEC ortamlarının kurulmasını yönlendirir. İşlem verileri, son olarak video akışı aracılığıyla cihaza iletilir.

### 1.37 5G ve Otonom Sistemler

Yapay zeka, uç bilişim ve Nesnelerin İnterneti (IoT) gibi teknolojiler, yenilikçi ve devrim niteliğinde hizmetlerin etkinleştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Ancak, özellikle uzak veri merkezlerinden sağlanan düşük gecikmeli ve hesaplama açısından yoğun dijital hizmetler, bazı operasyonel zorluklarla karşılaşabilmektedir. Bu zorluklar, 5G teknolojisi ve uç bilişim altyapıları sayesinde aşılabılır. 5G, verilerin uça işlenmesini mümkün kılarak uygulama gecikmelerini azaltır, veri aktarım hızlarını artırır ve genel hizmet kalitesini iyileştirir. Ayrıca, 5G teknolojisi ve IoT, cihazlar arasında daha hızlı veri toplama, depolama ve aktarım süreçlerini kolaylaştırarak, daha hızlı ve doğru veri odaklı kararların alınmasını sağlar.

Otonom sistemler, entegre yapay zeka algoritmaları aracılığıyla veri kümeleri üzerinde analiz yaparak bağımsız kararlar alabilme yeteneğine sahiptir. Bu sistemler, en optimal sonucu elde etmek amacıyla hangi aksiyonları gerçekleştireceklerine dair kararlar verebilirler.

Otonom sistemlerin temel bileşenleri, çevresel algılama, konum belirleme, tahmin, planlama ve kontrol gibi alt sistemlerden oluşmaktadır. Bu bileşenler, sistemin çevreyi algılayıp, doğru konumda işlem yaparak, gelecekteki durumları tahmin edip, en uygun planı geliştirerek etkili bir şekilde yönetilmesini sağlar.

Algılama alt sistemi, otonom robotların çevresindeki hareket halindeki ve hareketsiz nesnelere algılayarak çevresel modelleme yapmalarını sağlar. Bu sistem, 2D/3D nesne algılama ve izleme, sahne algılama ve yol algılama gibi algoritmalarla donatılmıştır. Robot, çevresindeki nesnelere konumunu, hızını, yönünü, üç boyutlu şeklini ve nesne türünü gibi özelliklerini tespit edebilir. Ayrıca, bu alt sistem sinir ağları kullanarak çevreyi doğru bir şekilde tanıma ve analiz etme kapasitesine sahiptir, böylece algılama ve izleme süreçlerini iyileştirir ve karmaşık çevresel sorunları çözme yeteneği sağlar.

Konumlandırma alt sistemi, otonom robotun uzaydaki konumunu izleyerek, üzerinde çalıştığı platformu doğru bir şekilde kontrol etmek için gerekli olan konum, hız ve yönelim gibi temel değişkenleri sağlar. Temel bir konumlandırma sistemi, bir eylemsizlik ölçüm birimi (IMU) ve küresel konumlandırma sistemi (GPS) gibi bileşenlerden oluşur. Bu bileşenler, robotun hareketini ve pozisyonunu hassas bir şekilde belirleyerek, doğru yönlendirme ve navigasyon için gerekli verileri sağlar.

Küresel Konumlandırma Sistemi'nin (GPS) sinyal eksiklikleri veya karışıklıkları nedeniyle hassas konum belirleme yapılamadığında, konumlandırma süreci için alternatif kaynaklara başvurulması gerekmektedir. Bu bağlamda, atalet ölçüm ünitesinin yanı sıra, kamera ve/veya LIDAR odometreleri ve eşzamanlı haritalama ile konumlandırma algoritmaları kullanılarak aracın göreceli yer değiştirmesi belirlenir. Ayrıca, gelecekteki eylemlerin daha doğru bir şekilde planlanabilmesi için hareketli nesnelere gelecekteki hareketleri, özellikle 3-5 saniye aralığındaki tahminler doğrultusunda öngörülebilir. Bu tahminlerin yapılabilmesi için, zaman serisi verileri üzerinde eğitilmiş tekrarlayan yapay sinir ağları gibi yapay zeka modelleri kullanılarak veri işlenir. Bu süreç, planlama doğruluğunu artırmaya yönelik önemli bir adımdır.

Planlama alt sistemi, robotun mevcut durumuna dayalı olarak otonom navigasyonu gerçekleştirebilmesi için gerekli rotayı belirler. Bu alt sistemde, klasik robotik yöntemlerle takviyeli öğrenme tabanlı yapay zeka modellerinin bir arada kullanıldığı hibrit yaklaşımlar benimsenir. Bu sayede robot, yapay zeka algoritmaları aracılığıyla geleceğe yönelik stratejik planlama yapabilir ve optimal kararlar alabilir.

Bu tür bir entegrasyon, robotun çevresel koşullara uyum sağlayarak etkili ve verimli bir şekilde hareket etmesine olanak tanır.

Kontrol alt sistemi, planlama alt sistemi tarafından belirlenen rotayı izlemek amacıyla gerekli kontrol komutlarını üretir ve robotun bu rotayı doğru bir şekilde takip etmesini sağlar. Bu alt sistem, robotun hareketini yönlendirerek, planlanan yol boyunca stabil ve güvenli bir şekilde ilerlemesini temin etmek için dinamik ayarlamalar ve geri besleme mekanizmalarını uygular.

Otonom sistemlerin geleceği, 5G teknolojisinin entegrasyonunu gerektirmektedir. 5G'nin otonom sistemlerin gelişimine olan katkısı, özellikle düşük gecikme süreleri ve yüksek veri hızları gibi avantajlarının sağladığı fırsatlar üzerinden belirginleşecektir. Bu teknolojik gelişmeler, otonom sistemlerin daha verimli, güvenli ve dinamik bir şekilde çalışabilmesini mümkün kılacaktır.

İletişim teknolojilerindeki gelişmeler, özellikle hızlı veri iletimindeki ilerlemeler, büyük veri kümelerinin daha hızlı bir şekilde iletilmesini sağlamakta ve bu durum, çok sayıda IoT cihazının entegre bir biçimde ve eşzamanlı olarak çalışmasını mümkün kılmaktadır. Bu gelişmeler, günlük yaşam üzerinde önemli bir etki yaratmaktadır. Günümüzde, büyük veri toplama, bu verilerin analizi ve yapay zeka teknikleriyle işlenmesi, otonom sistemlerin daha verimli ve fonksiyonel bir şekilde çalışmasına olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, yapay zeka yöntemleri tek başına yeterli sonuçlar sağlayamamaktadır. Özellikle, çok sayıda IoT cihazının entegre bir şekilde çalışabilmesi için düşük gecikme süresi ve yüksek veri aktarım hızlarına sahip iletişim altyapılarına ihtiyaç duyulmaktadır.

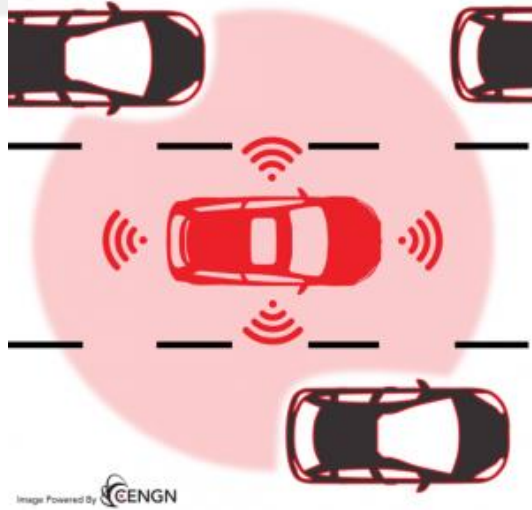
Otonom cihazlar, ağlarla ve diğer araçlarla sürekli bir iletişim halinde bulunmaktadır. Hızlı 5G teknolojisinin bu ihtiyaca bir çözüm olup olmayacağı konusunda kesin bir değerlendirme yapmak için henüz erken olsa da, 5G'nin sunduğu yüksek bağlantı kapasitesi, düşük gecikme (mevcut 4G'deki 50 ms'ye kıyasla 1 ms) ve yüksek verimlilik gibi özellikler, önemli potansiyeller sunmaktadır. Bu özellikler, otonom cihazların etkinliğini artırma açısından umut verici bir temel oluşturabilir.

Otonom araçlar gibi gelişen teknolojilerin tam potansiyelinden yararlanabilmek için, tüm araçların birbirleriyle ve yol kenarındaki altyapılarla — trafik ışığı sistemleri, haritalama ve trafik yönetim platformları, acil durum hizmetleri ile yol bakım sistemleri gibi — sürekli ve güvenilir bir şekilde bağlantı kurması gerekmektedir. Bu

bağlantılar, ultra düşük gecikme ve yüksek güvenilirlik gereksinimlerini karşılayan gerçek zamanlı iletişimi mümkün kılmak için URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communications) teknolojisi tarafından ele alınan bir ihtiyaçtır.

URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communications), özellikle gecikmeye duyarlı uygulamalar için kritik olan yüksek hızlı ve ultra güvenilir kablosuz iletişimi sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. Bu teknoloji, otonom sürüş gibi uygulamalarda araçların gerçek zamanlı veri alışverişi yapabilmesini mümkün kılarak güvenli ve verimli bir operasyonu destekler.

Örneğin, tamamen otonom sürüş senaryolarında araçlar, otomatik sollama ve çarpışma önleme gibi işlevler için çevredeki altyapıdan ve diğer araçlardan alınan verileri kullanabilir. Benzer şekilde, akıllı kavşaklarda, araçlar trafik ışıkları ve diğer sistemlerle koordine olarak acil durum araçlarına öncelik tanıyabilir. Bu gelişmiş işlevsellik, yalnızca URLLC ağlarının sağladığı sağlam ve zaman duyarlı iletişim kapasitesine dayanarak mümkün olmaktadır. Otonom araçlar ve 5G'ye genel bir bakış Şekil 1.45'te sunulmuştur.



**Şekil 1.45: Otonom Araçlar ve 5G**

**Kaynak:** CENGN



Diğer bir önemli avantaj ise, veri merkezlerinin ulaşım rotalarına daha yakın bir şekilde, yani "uç" veri merkezleri olarak yerleştirilmesidir. Bu uç veri merkezleri, verilerin kat etmesi gereken mesafeyi azaltarak daha hızlı veri işlenmesini mümkün kılar ve otonom sürüş, akıllı şehir altyapıları gibi uygulamalar için gereken hızlı karar alma ve gerçek zamanlı yanıt süreçlerini destekler [22].

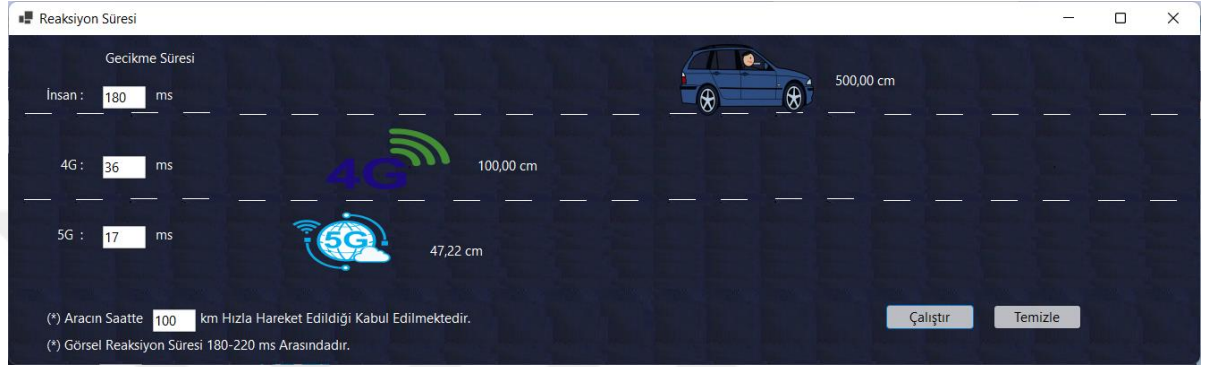
5G ağının bir diğer önemli avantajı, mobil teknolojilerin doğrudan araçlarla hızlı ve geniş bant veri iletişimi sağlayarak otonom hareketliliğin kapsamını genişletmesidir. Bu gelişme, araçların daha yüksek hızlarla seyahat etmesine olanak tanırken, gerektiğinde hızlarını düşürmelerini de mümkün kılarak trafik akışını iyileştirebilir [23].

#### **1.40 Gecikmenin Otonom Araçlar Üzerindeki Etkisi**

Yapılan araştırmalar, işitsel tepki süresinin görsel tepki süresinden daha kısa olduğunu ortaya koymuştur. İşitsel tepki süresi 140-160 ms arasında değişirken, görsel tepki süresi ortalama 180-220 ms civarındadır. Nisan 2020'de saha verileri, 4G teknolojisinin gecikmesinin 36-48 ms arasında olduğunu göstermektedir. 2019 yılına ait saha verilerine göre ise 5G'nin gecikmesi 21-26 ms seviyelerine ulaşmıştır. Ayrıca, 2020 yılında Londra'dan elde edilen saha verileri, 5G gecikmesinin 17 ms'ye düştüğünü ve bu iyileşmenin devam ettiğini göstermektedir. 5G için teorik hedef, gecikmeyi 1 ms'ye indirmek olmakla birlikte, pratikte henüz bu seviyeye ulaşılmamıştır.

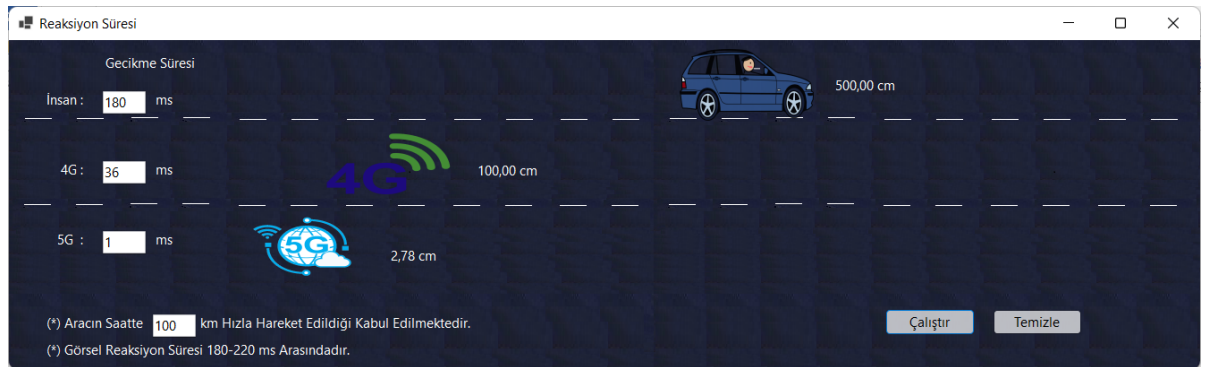
5G tabanlı mobil iletişim ağlarının sağladığı düşük gecikmeler, özellikle oyun, sanal gerçeklik, artırılmış gerçeklik ve otonom araçlar gibi birçok alanda önemli iyileştirmeler sağlayacaktır. Otonom cihazlar, ağlarla ve diğer araçlarla sürekli iletişim halinde olup, bu iletişim gereksinimleri ultra güvenilir ve düşük gecikmeli iletişim çözümleri ile karşılanmaktadır. Ultra Güvenilir ve Düşük Gecikmeli İletişim (URLLC), yalnızca 1 ms'lik bir gecikmeyi hedefleyen ve görev açısından kritik olan iletişim için tasarlanmış yeni bir 5G servis sınıfıdır. Bu ultra hızlı ve son derece güvenilir kablosuz iletişim, otonom sürüş gibi gecikmeye duyarlı uygulamalar için özel olarak uygundur, çünkü araçların birbirleriyle bağlantı kurmasını ve gerçek zamanlı veri alışverişinde bulunmalarını sağlar [24].

Ortalama 100 km/s hızla hareket eden bir araçta, sürücünün görsel tepki süresi 180 ms olarak kabul edildiğinde, aracın 500 cm hareket ettikten sonra durmaya başlayacağı hesaplanmaktadır. 4G ile sağlanan 36 ms'lik gecikme süresi ile otonom bir araç, 100 cm hareket ettikten sonra durmaya başlarken, 5G'nin 17 ms'lik gecikmesi ile aracın 47,22 cm hareket ettikten sonra durmaya başlayacağı belirlenmiştir. Bu hesaplamalar, 5G'nin otonom araçların güvenli ve etkili şekilde çalışabilmesi için kritik bir rol oynadığını göstermektedir (Şekil 1.47).



**Şekil 1.47: 5G ile Tepki Sürelerinin Karşılaştırılması: 17 ms Gecikme Süresi**

5G'de hedeflenen 1 ms gecikme süresine ulaşıldığında, Şekil 1.48'de gösterildiği gibi yalnızca 2,78 cm hareket ettikten sonra durmaya başlayacağı görülmektedir.



**Şekil 1.48: 5G ile Tepki Sürelerinin Karşılaştırılması: 1 ms Gecikme Süresi**

#### 1.41 Literatür Taraması

Otonom sistemler, yapay zeka algoritmalarından yararlanarak kendi kararlarını alma, veri kümelerine dayalı olarak ideal davranışları öğrenme ve zamanla yetkinliklerini artırma kapasitesine sahiptir. Bu sistemler, daha önce karşılaşılmamış bir senaryoda, o anki parametreleri göz önünde bulundurarak doğru kararı verebilir ve bu kararı uygulayabilirler. Yapay zeka, otonom sistemlerin temel bileşenlerini oluşturan çevresel algılama, konumlandırma, tahmin etme, planlama ve kontrol gibi alt sistemlerin geliştirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, robotik otonom sistemler, algılama, konumlandırma, tahmin etme, planlama ve kontrol süreçlerini içeren bir yapıya sahiptir. Otonom sistemler, kara, hava, deniz, siber güvenlik ve uzay gibi çeşitli alanlarda kullanılmakta olup, özellikle ulaşım sektöründe büyük bir dönüşüm potansiyeline sahiptir. Ayrıca, son yıllarda otonom sistemlerin hava ve deniz taşımacılığında da uygulamaya geçmeye başladığı gözlemlenmektedir [25].

5G teknolojisi, sağlık, eğlence ve ulaşım gibi birçok sektörde önemli kullanım potansiyeline sahip olup, bu alanlarda önemli faydalar sağlayacaktır. Özellikle Ultra Güvenilir ve Düşük Gecikmeli İletişim (URLLC) ile otonom araçların yaygınlaşması mümkün hale gelecek ve bu araçların gelişimi hızlanacaktır. Kritik görevlerde düşük gecikme, güvenlik ve verimlilik açısından büyük önem taşımaktadır. Örneğin, acil durumlarda güvenlik güçleri, düşük gecikmeli video iletimini gerçekleştirebilecek ve canlı yayınlar yapabilecektir. Ayrıca, giyilebilir IoT cihazlarının artan kullanımı sayesinde, hastalar dünya çapında doktorlar tarafından eş zamanlı olarak izlenebilecektir. Bu teknoloji, sanal gerçeklik (VR) uygulamalarının da yaygınlaşmasına olanak tanıyacaktır. Örneğin, spor müsabaka yayınları 360 derece 4K çözünürlükle VR gözlüklere aktarılacak ve izleyiciye stadyum ortamında bulunuyormuş hissi verecektir.

Eğitim alanında da 5G'nin etkisiyle birçok yenilik görülecektir; özellikle çevrimiçi eğitimde, 5G ile görselleştirmeye dayalı dersler daha kolay hazırlanabilir ve öğrencilere daha etkili bir öğrenme deneyimi sunulabilir. Ayrıca, bulut tabanlı oyunların yaygınlaşması ile kullanıcılar, düşük gecikmeli oyunları yüksek donanım maliyetleri olmadan oynayabilecektir. Bu gelişmeler, 5G'nin sunduğu düşük gecikme, yüksek hız ve geniş bant kapasitesinin farklı sektörlerdeki potansiyelini ortaya koymaktadır [26].

Yeni nesil mobil teknoloji olan 5G, 4G'nin sınırlamalarını aşarak iletişimde devrim yaratmayı amaçlamaktadır. 5G, özellikle yoğun nüfuslu ve dinamik alanlarda, her an erişilebilir ağ bağlantıları sağlayarak eş zamanlı bağlantıların yönetilmesini ve yüksek hızda veri transferini mümkün kılmaktadır. Bu özellikleri sayesinde, 5G, akıllı şehirler ve ulaşım sistemlerinin tam entegrasyonunu sağlayacak bir altyapı sunmaktadır. Ayrıca, Nesnelerin İnterneti (IoT) ve otonom araçlar gibi yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesi ve yaygınlaşmasında önemli bir dönüm noktası olacaktır. Henüz ticari olarak yaygın şekilde kullanılmasa da, 5G'nin şehirler ve ulaşım sistemleri üzerindeki teknik, ekonomik ve yasal etkileri, araştırmaların ve uygulamaların odak noktası olmuştur ve bu alanda büyük bir ilgi uyandırmaktadır [27].

İnternet ve kablosuz iletişim arasındaki simbiyotik ilişki, birçok cihazın otonom veya kullanıcı odaklı bir şekilde birbirleriyle etkileşime girmesini sağlamaktadır. Ancak, 4G teknolojisi ve mevcut ağ yapısı, hızla büyüyen bu sektöre uyum sağlamakta yetersiz kalmaktadır. 5G teknolojisi, yüksek hızda bağlantı, çok sayıda IoT cihazının entegre çalışabilmesi, düşük gecikme süreleri ve enerji verimliliği gibi avantajlar sunarak bu eksiklikleri gidermektedir. Ayrıca, 5G'nin sunduğu düşük gecikme süresi ve yüksek veri aktarım kapasitesi, artırılmış gerçeklik (AR), sanal gerçeklik (VR), akıllı ofisler, akıllı mağazalar ve akıllı evler gibi yeni nesil dijital deneyimlerin gelişimine olanak tanımaktadır. Bu teknolojik gelişmeler, 5G'nin potansiyelinin ve etkisinin geniş bir yelpazeye yayıldığını göstermektedir [28].

LTE ve 5G tabanlı araç iletişimi, akademik kurumlar ve standardizasyon kuruluşları tarafından büyük bir ilgiyle takip edilmektedir. Bu bağlamda, 3. Nesil Ortaklık Projesi (3GPP), LTE teknolojisi üzerine kurulu araçtan her şeye (V2X) hizmetleri için 5G tabanlı bir yol haritası geliştirmiştir.

5G destekli ağlarda çalışan birbirine bağlı otonom araçlar gibi gelişen uygulamalar, bir dizi çözülmemiş güvenlik ve gizlilik sorununu gündeme getirmektedir. Bu çalışma, öncelikle 3GPP tarafından tanımlanan 5G destekli araç ağlarının mimarisini incelemekte ve LTE tabanlı sistemlerde V2X'in temel güvenlik ve gizlilik yönlerini ele almaktadır. Ardından, 5G destekli otonom araçlarla ilişkilendirilen güvenlik ve gizlilik sorunlarına odaklanılmakta ve bu sorunlara yönelik çözümler sunulmaktadır. Önerilen çözümler arasında güvenli grup oluşturma mekanizmaları, dağıtılmış grup anahtar yönetimi ve işbirlikçi mesaj kimlik doğrulama çerçeveleri yer almaktadır.

Çalışma, son olarak, 5G destekli araç ağlarında karşılaşılan genel güvenlik ve gizlilik zorluklarını inceleyerek, bu sorunların azaltılmasına yönelik stratejilere dair önemli içgörüler sunmaktadır [29].

Üretim sektörü, el yapımı ürünlerden buhar gücüne, seri üretimden elektronik otomasyona doğru önemli bir evrim geçirmiştir. Endüstri 4.0, Nesnelerin İnterneti (IoT), veri analitiği, yapay zeka, robotik, katkı üretimi, gelişmiş malzemeler ve artırılmış gerçeklik gibi teknolojilerin entegrasyonu ile üretim sistemlerinin daha verimli, iletişimsel ve akıllı hale gelmesini sağlamaktadır. Bu makale, endüstriyel devrimlerin evrimini ve teknolojilerin üretim üzerindeki etkilerini incelemekte ve 5G'nin birleşik bir iletişim platformu sunarak, Endüstri 4.0 ve geleceğin fabrikalarının gelişimine nasıl katkı sağlayacağını vurgulamaktadır. 5G, özellikle düşük gecikme, yüksek hız ve geniş bağlantı kapasitesi gibi avantajlarıyla, üretim süreçlerinde daha akıllı eylemler gerçekleştirilmesine olanak tanıyacak, Endüstri 4.0 uygulamalarının etkinliğini artıracaktır [30].

Son on yılda, Bağlantılı ve Otomatik Araçlar (CAV) ve bu araçları destekleyen teknolojilerdeki (iletişim, otomasyon, bilgi işlem, algılama ve konumlandırma) önemli gelişmeler, ulaşım sistemlerinde dönüşüm, verimlilik artışı ve yaşam kalitesinin yükselmesi potansiyelini beraberinde getirmiştir. Bu dönüşümün temelinde, son teknoloji hava arayüzleri, çeşitli radyo erişim yöntemleri, gelişmiş ağ yazılımları ve uç/bulut bilişim çözümlerini entegre eden 5G teknolojisi yer almaktadır. 5G, ultra düşük gecikme süresi, yüksek güvenilirlik ve hızlı veri aktarımı sağlayarak, Araçtan Her Şeye (V2X) iletişimini sorunsuz hale getirir ve CAV uygulamalarının zorlu gereksinimlerini karşılar. Bu sayede, akıllı ulaşım ekosistemlerinin etkin bir şekilde gelişmesini ve bu sistemlerin başarılı bir şekilde benimsenmesini mümkün kılar [31].

Akıllı Ulaşım Sistemi (ITS) kapsamında, önümüzdeki yıllarda otonom ve manuel araçların bir arada bulunmaya devam etmesi beklenmektedir. Otonom araçlar tam anlamıyla yaygınlaşmadan önce, bu araçların ve manuel araçların karışımından kaynaklanabilecek güvenlik sorunlarının çözülmesi kritik bir öneme sahiptir. ITS'nin karmaşıklığının artmasıyla birlikte, otonom araçlar düşük niyet tanıma oranları ve yetersiz gerçek zamanlı performans gibi sorunlarla karşılaşabilir, bu da karmaşık trafik sistemlerinin güvenliği ve konforunu olumsuz yönde etkileyebilir. Bu bağlamda, otonom araçların çevresel trafik koşullarına göre gerçek zamanlı sürüş yönünü tahmin

etme yeteneğini geliştirmek büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, otonom ve manuel araçların 5G destekli bir ITS ortamında birlikte çalıştığı senaryolar için derin öğrenme tabanlı bir trafik güvenliği çözümü önerilmektedir [32].

Son yıllarda 5G teknolojisi, özellikle ultra güvenilir ve düşük gecikmeli iletişimler (URLLC) gibi yeni hizmet kategorileriyle, düşük gecikme ve yüksek güvenilirlik gereksinimlerini karşılayan uygulamalar için kritik bir altyapı sağlamaktadır. URLLC, otonom araçlar, drone tabanlı teslimatlar, akıllı şehirler, uzaktan tıbbi teşhis ve cerrahi, ve yapay zeka destekli kişiselleştirilmiş asistanlar gibi hizmetleri destekleyerek, bu uygulamaların verimli ve güvenilir bir şekilde çalışmasını mümkün kılmaktadır. 5G'nin yeni hava arayüzü olan 5G NR (Yeni Radyo), bu tür gelişen endüstri ihtiyaçlarına yanıt olarak evrimsel ve devrimsel değişiklikleri içermektedir. Dördüncü sanayi devrimi olarak tanımlanan bu teknoloji devrimi, yaşam, çalışma ve iletişim biçimlerini köklü bir şekilde değiştirmektedir. Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU), 5G'yi üç ana hizmet kategorisine ayırmaktadır: ultra güvenilir ve düşük gecikmeli iletişimler (URLLC), kitle makine tipi iletişimler (mMTC) ve gelişmiş mobil geniş bant (eMBB). Bu kategoriler, 5G'nin yüksek bağlantı kapasitesi, düşük gecikme süresi, yüksek güvenilirlik ve enerji verimliliği gibi performans gereksinimlerini karşılayarak, daha verimli ve güçlü bir ağ altyapısı sunmasını sağlamaktadır [33].

Otonom sürüş sistemleri, araçlar arasında sürekli ve güvenilir iletişimin kritik olduğu uygulamalardır. Bu uygulamalar, yol güvenliği, trafik verimliliği, çarpışma öncesi uyarılar ve araç koordinasyonu gibi çeşitli bileşenleri içerir. Bu sistemlerin başarısı, trafikte verimliliği sağlamak amacıyla gerekli verilerin hızlı ve güvenli bir şekilde iletilmesine dayanır.

Özellikle kentsel alanlarda trafik akışlarını iyileştirmek için trafik verimliliği hizmetlerinin önemi büyüktür. Bu hizmetler, trafik ışığı yönetimi ve araç hızı optimizasyonu gibi uygulamalar için yüksek güvenilirlik ve düşük gecikme gereksinimlerine sahiptir. Bu bağlamda, 5G'nin sunduğu esnek ve ölçeklenebilir altyapı, farklı kullanım senaryolarının gereksinimlerine uyum sağlamak adına büyük bir potansiyel taşımaktadır. Özellikle mobil uç bulut (MEC) teknolojileri, gecikmeye duyarlı IoT uygulamaları için yerel bilgi işlem gücü sağlayarak iletişim mesafelerini

kısaltır ve veri iletim verimliliğini artırır. Bu gelişmeler, otonom sürüş ve akıllı ulaşım sistemlerinin verimli bir şekilde çalışabilmesi için kritik bir rol oynamaktadır [34].

Düşük gecikmeli hizmetlerin sağlanması, ağ üzerinde önemli zorluklar ve talepler doğurur. Bu hizmetleri sunabilmek için ağ operatörlerinin altyapılarında değişiklik yapması gerekebilir. Belirli uygulamaları ve gereksinimleri açıkça tanımlamak ve operatörlerin potansiyel pazar avantajlarını anlamaları kritik öneme sahiptir. Analizler, operatörlerin 5G tarafından sunulan geniş hizmet yelpazesıyla değer yaratabileceğini ve güçlü bir şekilde konumlanmak için fırsatlara sahip olduğunu göstermektedir. Otomotiv endüstrisindeki güvenlik uygulamaları, daha düşük uçtan uca gecikme gerektirirken, robotik operasyonlar ve cerrahi gibi hassas uygulamalar, dokunsal geri bildirim için çok düşük gecikmelere ihtiyaç duyar. Ayrıca, artırılmış ve sanal gerçeklik uygulamaları, kullanıcıya sürükleyici deneyimler sunmak için düşük gidiş-dönüş gecikmeleri gerektirir. Bu gereksinimlere yanıt verebilmek için mevcut iletişim altyapıları, örneğin LTE Advanced, yeterli performans sunmamaktadır. Bu durum, 5G'nin düşük gecikme seviyelerine ulaşmasını sağlayan yenilikçi teknolojiler, ağ işlevleri sanallaştırma (NFV) ve mobil uç bulut (MEC) gibi çözümleri gerekli kılmaktadır [35].

Beşinci nesil (5G) ağların konumlandırma teknolojileri, ağ optimizasyonu ve kablosuz iletişimde önemli bir devrim yaratmaktadır. 5G ağları, cihazların hassas konum bilgisi elde etme yeteneğini, önceki teknolojilerin erişemediği doğruluk seviyelerine taşımaktadır. GPS ve yeni nesil küresel navigasyon uydu sistemlerinin birleşimi, açık alanlarda 1 metrelik doğruluk sağlamayı vaat ederken, yer destek sistemlerinin ve çok bantlı teknolojilerin entegrasyonu gerekmektedir. Ancak, GNSS'nin zayıf olduğu veya erişilemediği kentsel kanyonlar ve kapalı alanlar gibi ortamlarda, alternatif yerel radyo tabanlı teknolojiler (UWB, Bluetooth, ZigBee, RFID) devreye girmektedir.

Bu bağlamda, 5G ağları, esnek yapısıyla hem açık alanlarda hem de zorlu çevre koşullarında güvenilir ve hassas konumlandırma sağlama potansiyeline sahiptir. Bu yenilikçi yaklaşımlar, otonom araçlar, akıllı şehirler ve endüstriyel otomasyon gibi gelecekteki uygulamalarda büyük bir potansiyel taşımaktadır [36].

Beşinci nesil (5G) mobil iletişim sistemleri, önceki nesillerin ötesine geçerek geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. Özellikle endüstriyel otomasyon, akıllı güç şebekeleri ve uzaktan kritik süreç kontrolü gibi güvenlik ve güvenilirliğin ön planda

olduğu alanlarda ultra güvenilir düşük gecikmeli iletişim (URLLC) gereksinimleri büyük önem taşımaktadır. 5G'nin 1 ms'ye kadar düşük gecikmelerle veri iletimi, bu tür kritik uygulamaların başarısı için gereklidir. Ayrıca, makine tipi iletişim (mMTC) ve Nesnelerin İnterneti (IoT) gibi yeni kullanım durumları, cihazlar arasında verimli ve güvenilir iletişim altyapısı kurulmasını gerektirir. 5G'nin sunduğu ultra güvenilir bağlantılar, düşük arıza oranları ve düşük gecikme, endüstriyel süreçlerin dijitalleştirilmesi ve sosyal hizmetlerin geliştirilmesinde temel rol oynar. Bu özellikler, yalnızca mobil geniş bant (MBB) hizmetlerinin ötesine geçmekle kalmaz, aynı zamanda kritik altyapıların güvenli ve verimli çalışmasını sağlamada da kritik öneme sahiptir [37].

5G milimetre dalga (mmWave) ağlarında baz istasyonlarının (BS) yoğunluğu nedeniyle güç tüketiminin azaltılması önemli bir zorluk olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu bağlamda, [38] tarafından yürütülen çalışmada, kullanıcı Hizmet Kalitesini (QoS) koruyarak güç tüketimini en aza indirmek amacıyla BS'lerin açma/kapama stratejisini içeren bir kullanıcı ve güç tahsisi problemi ele alınmıştır. Çalışma kapsamında, problem başlangıçta Tamsayı Doğrusal Programlama (ILP) ile formüle edilmiştir. Ancak problemin NP-zorluğu nedeniyle Genetik Algoritma (GA) tabanlı bir sezgisel strateji önerilmiştir.

Yapılan simülasyonlar sonucunda, önerilen GA'nın, ağ güç tüketimi, enerji verimliliği (EE) ve kapatılan BS sayısı gibi metriklerde, diğer kıyaslama algoritmalarından daha iyi performans gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca, çalışma süresi bakımından da GA'nın, ILP'ye kıyasla önemli bir zaman avantajı sunduğu gözlemlenmiştir. Örneğin, konut ve ofis senaryolarında önerilen yöntem, sırasıyla %22,34 ve %33,12 enerji tasarrufu sağlamıştır. Bu sonuçlar, mmWave ağlarının enerji verimliliğini artırma açısından GA tabanlı yaklaşımın pratik bir çözüm sunabileceğini göstermektedir.

Massive çoklu giriş çoklu çıkış (mMIMO) baz istasyonlarında (BS) güç tüketimi ve ısı üretimi sorunlarını ele alan [39] çalışma, enerji verimliliğini artırmak ve termal etkileri azaltmak amacıyla dinamik, zamanla değişen kullanıcı Hizmet Kalitesi (QoS) gereksinimlerini dikkate alan stratejik bir güç kontrol şeması önermektedir. Hibrit ve tamamen dijital ön kodlama yöntemleri ile donanım bozulmalarını (HWI) dikkate alan modelde, enerji verimliliği optimizasyonu, dinamik Markov karar süreci (MDP) çerçevesinde ele alınmıştır. Hesaplama karmaşıklığını azaltmak için rastgele

birleştirilmiş çift Q öğrenme (REDQ) algoritması kullanılan bu çalışma, simülasyon sonuçlarıyla, değişen koşullar altında enerji verimliliğini etkili bir şekilde artırdığını ve mMIMO sistemlerinde uyarlanabilir kaynak tahsisi için güçlü bir çözüm sunduğunu göstermiştir.

Gelecek nesil kablosuz iletişim ağlarında yüksek veri hızları, spektrum verimliliği ve enerji verimliliği gibi gereksinimlerin karşılanması kritik bir öneme sahiptir. Geleneksel ortogonal çoklu erişim (OMA) teknikleri bu talepleri karşılamakta yetersiz kalmaktadır. [40] tarafından önerilen Endeks Modülasyonu temelli NOMA (IM-NOMA) sistemi, enerji verimliliğini artırmaya yönelik yenilikçi bir yaklaşım sunmaktadır. IM-NOMA sistemi, kullanıcıların hem takımyıldız hem de endeks sembollerini kullanmasına olanak tanıyarak kaynak paylaşımını optimize etmektedir.

Çalışmada, önerilen IM-NOMA'nın enerji verimliliği kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir. Çeşitli parametreler altında yapılan değerlendirmeler, önerilen şemanın mevcut modülasyon tekniklerine kıyasla enerji verimliliği açısından üstün performans sergilediğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, IM-NOMA sistemi, enerji verimliliği ve spektrum kullanımı bakımından yeni nesil kablosuz ağlar için umut verici bir çözüm sunmaktadır.

Nesnelere İnterneti (IoT) sistemleri, özellikle dar bant genişlikleri ve sıkı gereksinimleri nedeniyle, enerji verimliliği (EE) ve gecikme optimizasyonunu bir arada ele alma ihtiyacını doğurmaktadır. [41] tarafından gerçekleştirilen bu çalışma, IoT hücreli sistemlerinde enerji verimliliğini artırmaya yönelik kaynak tahsis stratejilerini araştırmıştır. Çalışmada, farklı kaynak birimi yapılandırmalarının (RUC) enerji verimliliği üzerindeki etkileri kapsamlı bir şekilde analiz edilmiş ve EE açısından en iyi ve en kötü RUC'ler arasında 80 kata kadar fark olduğu ortaya konmuştur.

Ayrıca, minimum gecikme tahsisi için en kısa işi önce (SJF) temelli bir zamanlayıcı ve EE ile gecikmeyi birlikte değerlendiren bir başka zamanlayıcı önerilmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen zamanlayıcıların, geleneksel tekniklere kıyasla, çok hücreli sistemlerde enerji verimliliği ve gecikme arasında daha iyi bir denge sağladığını göstermektedir. Bu bağlamda, çalışma, IoT sistemlerinde kaynak yönetimi açısından önemli katkılar sunmaktadır.

5G Yeni Radyo (NR) ağlarının enerji verimliliği optimizasyonu, sürdürülebilir ağ altyapısı tasarımı için kritik bir öneme sahiptir. [42] tarafından yapılan bu çalışmada, 5G ağlarının enerji verimliliğini artırmaya yönelik çeşitli teknikler incelenmiştir. Bu teknikler arasında baz istasyonları için uyku modu, dinamik güç kontrolü ve enerjiye duyarlı yönlendirme gibi yöntemler yer almaktadır. Ayrıca, yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji hasadı teknolojilerinin kullanım potansiyeli ele alınmıştır.

Hüzmleme ve Büyük MIMO teknolojileri, ağın enerji verimliliğini artırmanın yanı sıra kapasite ve spektral verimliliği iyileştirme potansiyeline sahip temel yenilikler olarak vurgulanmıştır. Bunun yanı sıra, ağ dilimleme ve yapay zeka tabanlı tahmine dayalı analizler, 5G ağlarında kaynak tahsisini optimize etmek ve enerji tasarrufu sağlamak için önemli araçlar olarak değerlendirilmiştir. Çalışma, enerji verimliliği ile diğer temel performans göstergeleri (KPI) arasında bir denge kurulması gerektiğini vurgulamaktadır.

Günümüzde 4G ağ hizmeti yüksek kullanımda büyük bir dijital büyümeye yol açmıştır. Görüntülü görüşmeler ve hızlı veri indirme gibi uygulamalar, 4G'nin öne çıkan özellikleridir. 5G beklentisi, 2G, 3G ve 4G ağlarının ardından daha gelişmiş özellikler içeren yeni nesil bir teknolojiyi vaat etmektedir. Bu makale, 5G ağlarının hibrit enerji depolama sisteminde kesintisiz telekomünikasyon hizmeti sunmayı amaçladığını belirtmektedir. Çalışma, 5G ağları için enerji verimliliği ve Yapay Zeka (AI) otomasyonu sağlamak adına Akıllı Hesaplama Modeli (ICM) önererek %96,31 ağ hızı yönetimi, %90,63 pil kapasitesi yönetimi, %92,27 ağ cihazı yönetimi, %93,57 enerji verimliliği ve %88,41 AI otomasyonu elde edilmiştir.

Bu çalışma, 5G ağlarında enerji verimliliğini artırmak ve AI otomasyonunun ağ yönetimi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sonuçlar, önerilen Akıllı Hesaplama Modeli'nin ağ hızı, pil kapasitesi yönetimi, ağ cihazı yönetimi ve enerji verimliliği gibi performans göstergelerini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir.

Model, ağın enerji tüketimini minimize ederek yüksek verimlilik sağlamak ve AI otomasyonu ile sürecin manuel müdahale olmadan gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır. Bu, sadece ağın performansını artırmakla kalmaz, aynı zamanda hizmet kalitesinin de iyileştirilmesine katkı sağlamaktadır [43].

[44] nolu çalışmada, Ka-bandı için kompakt bir MIMO anteni geliştirilmiştir ve bu anten, 5G kablosuz ağlarında yüksek performans sunmak üzere optimize edilmiştir.

Anten, 20 GHz genişliğinde bant genişliği ve yüksek izolasyon seviyeleri ile öne çıkmaktadır. Polarizasyon çeşitliliği sayesinde, anten tasarımında radyasyon elemanı girişimi azaltılmış ve bu da antenin daha verimli çalışmasını sağlamıştır. Tasarımda elde edilen 17,6 dBi'lik kazanç ve yüksek verimlilik (%87 toplam verimlilik, %91 radyasyon verimliliği), antenin 5G uygulamaları için potansiyelini ortaya koymaktadır.

Ayrıca, MIMO sisteminin çeşitlilik özellikleri, antenin güvenilirliğini daha da artırmıştır. Simülasyonlar ve gözlemler arasındaki yüksek uyum, bu tasarımın pratikte de etkili olabileceğini göstermektedir. Bu anten tasarımı, 5G ağlarının performansını artırırken enerji verimliliği açısından da avantaj sağlamaktadır.

Acarer (2020) çalışmasında, yeni nesil mobil erişim sistemlerinin KOBİ'lerin finansal süreçlerinde önemli değişimler yarattığını ve bu teknolojilerin işletmelere sunduğu yeni fırsatları ele almıştır. Çalışmada, 5G gibi yüksek hızlı bağlantı teknolojilerinin KOBİ'ler için finansal işlemleri daha güvenli, hızlı ve erişilebilir hale getirdiği vurgulanmaktadır. Özellikle dijital cüzdanlar, blockchain tabanlı finansal çözümler ve mobil ödeme sistemlerinin yaygınlaşmasıyla KOBİ'lerin geleneksel finansal yapılardan daha esnek ve yenilikçi çözümlere yöneldiği ifade edilmiştir [45].

Acarer (2023) tarafından yapılan bir çalışma, yeni nesil 5G mobil iletişim sistemlerinin deniz haberleşmesindeki kullanımını inceleyerek enerji verimliliği açısından önemli bulgular ortaya koymuştur. Çalışmada, anten konfigürasyonları, beamforming teknikleri ve frekans seçimlerinin haberleşme sistemlerinin performansına etkileri değerlendirilmiş ve 5G teknolojisinin düşük gecikme süresi, yüksek bant genişliği ve esnek spektrum yönetimi sayesinde, özellikle zorlu çevresel koşullarda daha verimli iletişim sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca, verici anten yüksekliği, verici gücü ve çevresel faktörlerin haberleşme kalitesine etkisi analiz edilmiş ve beam steering tekniklerinin enerji tüketimini optimize etmek için önemli bir araç olduğu gösterilmiştir [46].

GaN (Galyum Nitrür) tabanlı güç amplifikatörlerinin 5G sistemlerindeki enerji verimliliğini artırma potansiyeli, Türk ve arkadaşlarının (2024) geliştirdiği kompakt güç amplifikatörü modülü tasarımında açıkça gösterilmiştir. Bu modül, LTE ve 5G Yeni Radyo (NR) bantları için 3,5 GHz merkez frekansında tasarlanmış olup, yüksek verimlilik ve kompakt yapısıyla enerji tüketimini optimize etmekte etkili bir çözüm

sunmaktadır. GaN HEMT transistörleri kullanılarak gerçekleştirilen bu tasarım, küçük sinyal kazancı ve doymuş çıkış gücü ölçümleriyle yüksek performans sergileyerek, 5G sistemlerinde enerji verimliliği sağlamak adına dikkate alınması gereken bir yaklaşım olarak öne çıkmaktadır [47].

5G millimetre dalga uygulamaları için yüksek kazanç ve kompakt anten tasarımı gereksinimleri, literatürde çeşitli çalışmalarda ele alınmıştır. Örneğin, Sumathi ve arkadaşları (2025), 37 ile 44 GHz frekans bandında çalışan, Rogers RT Duroid 5880 malzemesi kullanılan kompakt bir MIMO anten tasarımı önermektedir. Bu tasarım, 10 dB empedans bant genişliği ve -20 dB izolasyon değeri ile yüksek kazanç sağlamakta olup, 5G sistemleri, insansız sistemler, kablosuz güç transferi ve uydu hizmetleri gibi uygulamalar için oldukça uygundur. Anten elemanlarının stratejik olarak yerleştirilmesi ve geniş frekans spektrumunda sağlam bir performans sunulması, bu tasarımı güçlü kılmaktadır [48].

5G ağlarında enerji verimliliğini artırmak amacıyla yeni bir yaklaşım, Gauss Karışım Modelleri (GMM) kullanılarak sunulmuştur. Alsalami ve arkadaşları (2024), veri toplama, model eğitimi ve gerçek zamanlı karar alma adımlarını içeren bir yöntem önermektedir. Bu süreçte, Expectation-Maximization (EM) algoritması kullanılarak model geliştirilmekte ve pekiştirmeli öğrenme ile geliştirilmiş model üzerinde gerçek zamanlı kararlar alınmaktadır. Yapılan vaka analizlerinde, bu yaklaşımın enerji tüketimini bir trafik birimi başına %14, ağ verimliliğini %11 ve gecikmeyi %49 oranında azalttığı, başlangıç koşullarına kıyasla önemli iyileşmeler sağladığı gözlemlenmiştir [49].

5G kablosuz iletişim sistemlerinde, Massive MIMO (Çoklu Giriş Çoklu Çıkış) anten teknolojisinin benimsenmesiyle birlikte, RF (Radyo Frekansı) devreleri için büyük sayıda RF zinciri kullanılması gerekmektedir. Ancak, fazla sayıda RF zinciri, sadece RF devrelerinin maliyetini artırmakla kalmaz, aynı zamanda 5G kablosuz iletişim sistemlerinde ek enerji tüketimine yol açmaktadır. Bu çalışmada, çok sayıda anten ve RF zinciri bulunan 5G kablosuz iletişim sistemleri için enerji ve maliyet verimliliği optimizasyon çözümleri incelenmiştir. Massive MIMO antenleri ve milimetre dalga teknolojisi kullanan 5G kablosuz iletişim sistemleri için enerji verimliliği optimizasyonu sorunu formüle edilmiştir. Amaç fonksiyonunun konveks olmayan özellikleri dikkate alınarak, enerji verimliliğini maksimize etmek için enerji verimli

hibrit precoding (EEHP) algoritması geliştirilmiştir. RF devrelerinin maliyetini azaltmak için, minimum RF zinciri ile enerji verimli hibrit precoding (EEHP-MRFC) algoritması da önerilmiştir. Ayrıca, iletim antenlerinin sayısı ve kullanıcı ekipmanları (UE) sayısı üzerinden enerji verimliliğini optimize etmek amacıyla kritik anten sayısı arama (CNAS) ve kullanıcı ekipmanı sayısı optimizasyonu (UENO) algoritmaları da geliştirilmiştir. Sayısal sonuçlar, geleneksel sıfır-kümeleme (ZF) precoding algoritması ile karşılaştırıldığında, önerilen EEHP ve EEHP-MRFC algoritmalarının sırasıyla %220 ve %171 oranında enerji verimliliğini artırdığını göstermektedir [50].

Mobil hücresel ağların beşinci nesil (5G) versiyonunda karşılaşılan zorluklardan biri, enerji tüketimi verimliliğidir. Bu çalışmada, enerji verimliliğini maksimize etmek için bir optimizasyon algoritması önerilmektedir. Önerilen optimizasyon algoritması, hem kapalı alan kullanıcıları hem de açık alan kullanıcıları için uygulanmaktadır. Enerji verimliliği optimizasyonu, farklı ağ koşulları altında gerçekleştirilmiştir; bu koşullar arasında bit hızını maksimize etmek, iletim gücünü minimize etmek ve parazitleri azaltmak bulunmaktadır. Enerji verimliliği açısından optimal çözümü bulmak için, optimal güç dağılımı koşulunda çiftli ayrıştırma tekniği kullanılmıştır. Sonuçlar, önerilen algoritmanın enerji verimliliğinde bir artış sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, dinamik güç dağılımı altında daha yüksek enerji verimliliği elde edildiği, sabit güç dağılımına kıyasla belirgin bir şekilde gösterilmiştir [51].

LTE, 5G Non-Standalone (5G-NSA), 5G-Standalone (5G-SA) ve Özel 5G-SA ağlarının kullanıcı ekipmanı (UE) tarafındaki enerji tüketimi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Sonuçlar, 5G-NSA'nın LTE'ye kıyasla %92 ile %111 arasında daha fazla enerji tükettiğini, 5G-SA'nın ise LTE'ye kıyasla %79 daha fazla enerji harcadığını göstermektedir. Ancak, 5G-SA, 5G-NSA'dan %6,5 daha verimli olmasına rağmen, her iki teknoloji de LTE'ye göre daha az verimlidir. En dikkat çekici bulgu, Özel 5G-SA'nın 5G-SA'ya kıyasla %63 daha enerji verimli olmasıdır. Bu, özel ağ tasarımları kullanılarak önemli enerji tasarrufları sağlanabileceği potansiyelini ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, gelecekteki mobil ağlarda güç tüketiminin optimize edilmesine dair önemli bilgiler sunmakta ve teknoloji seçiminde kullanım senaryolarına dayalı yönergelerin oluşturulması gerektiğini vurgulamaktadır [52].

## İKİNCİ BÖLÜM

### MATERYAL VE YÖNTEM

Ray tracing, elektromanyetik dalgaların, özellikle radyo sinyallerinin belirli bir ortamda nasıl yayıldığını modellemek için kullanılan bir tekniktir. Kentsel alanlarda iletişim bağlantılarının ve kapsama alanlarının analizine yönelik uygulamalarda, ışın izleme, radyo sinyallerinin binalar ve diğer kentsel yapılar gibi engellerle karşılaştığında nasıl yansıdığını, kırıldığını, dağılacığını ve bu süreçlerin sinyal gücü üzerindeki etkilerini simüle etme imkânı sunar. Bu sayede, kentsel ortamlardaki iletişim altyapılarının verimliliği daha doğru bir şekilde değerlendirilebilir.

#### 2.1 Kentsel Çevre Kapsama Analizi

Bu çalışmada, İstanbul'daki Beyazıt Meydanı'na ait bina verileri, OpenStreetMap (.osm) dosyasından elde edilerek analiz edilmiştir. Elde edilen bina bilgileri, Site Viewer kullanılarak görselleştirilmiştir. Küçük hücre vericisi ve alıcısı belirtilen koordinatlara yerleştirilmiş, izotropik antenlerle donatılmış ve çeşitli taşıyıcı frekanslarında çalıştırılmıştır. Verici anteninin yüksekliği değiştirildiğinde, sinyal alımı üzerindeki etkiler, alıcı anten yüksekliği değiştirilerek incelenmiştir. Sinyal iletimi ve alımı, yapı malzemeleri (beton, tuğla, ahşap, cam, metal) ile etkileşimler dikkate alınarak ışın izleme yayılma modeli kullanılarak hesaplanmıştır [53, 54, 55, 56].

#### 2.2 Konfigürasyon

Küçük Hücre Vericisi, izotropik antenlerle donatılmıştır ve çeşitli taşıyıcı frekanslarında çalışmaktadır: 2,5 GHz, 3,5 GHz, 3,7 GHz, 4,2 GHz, 5,5 GHz, 24 GHz, 28 GHz, 36 GHz, 37 GHz, 39 GHz, 47 GHz, 66 GHz ve 81 GHz. Verici güç seviyeleri olarak 5 W, 10 W ve 20 W değerlendirilmektedir.

Farklı verici anten yüksekliklerinin sinyal yayılımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Küçük Hücre Vericisi, 41.00920 enlem ve 28.96668 boylam koordinatlarında konumlanmaktadır. Küçük Hücre Alıcısı, 41.008871 enlem ve 28.967746 boylam koordinatlarında yer almaktadır.

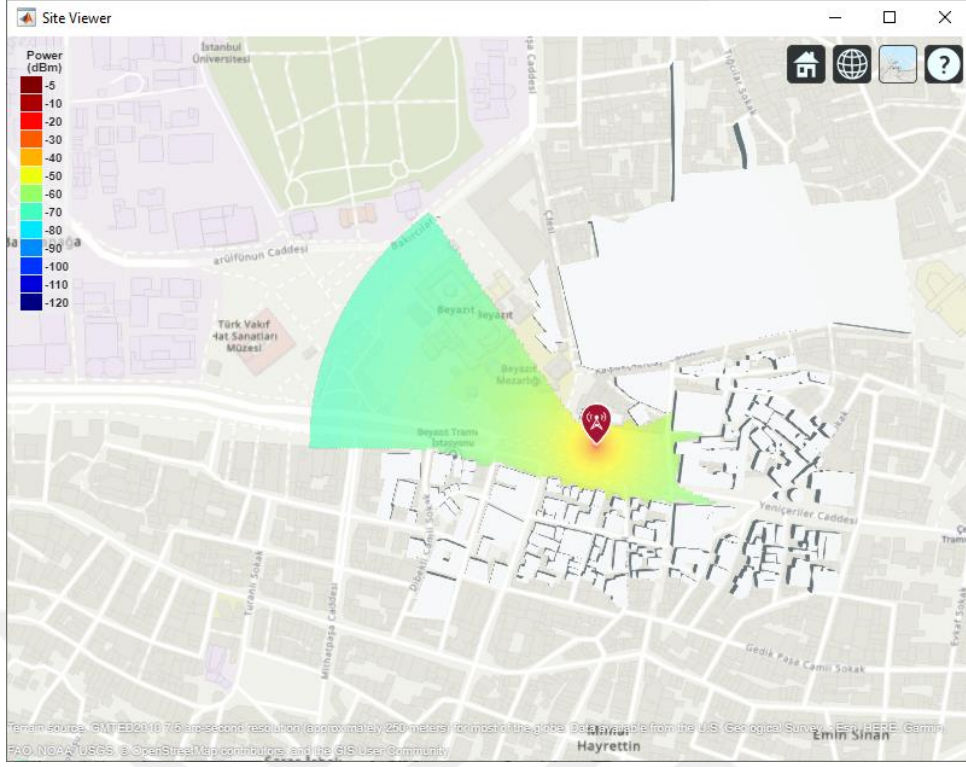
Bu çalışmada, ışın izleme yayılım modelinin Atış ve Zıplayan Işınlara (SBR - Shooting and Bouncing Rays) yöntemiyle kullanımı, elektromanyetik dalgaların karmaşık ortamlarda nasıl yayıldığını incelemek için etkili bir yaklaşım olarak uygulanmıştır.

Model, dalgaların yayılma yollarını belirlemek ve her bir yola karşılık gelen yol kayıplarını hesaplamak için ışın izleme analizinden faydalanır. Yol kayıplarının hesaplanmasında dikkate alınan faktörler arasında serbest alan kaybı, yansıma, kırılma ve anten polarizasyon kaybı yer almaktadır [57].

Bölgedeki binalar, beton, tuğla, ahşap, cam, metal ve mükemmel elektrik iletkenleri gibi farklı yüzey malzemeleri ile tanımlanmaktadır. Bu malzemelerin, sinyal yayılımı üzerindeki etkileri dikkate alınarak analiz edilmiştir.

Işın yönlendirme ve Phased Array System Toolbox™ kullanılarak, MATLAB R2023b akademik sürümü, görüş hattı olmayan bağlantıları optimize etmek amacıyla kullanılmıştır. Bu optimizasyon süreci, çeşitli çevresel koşullar ve kısıtlamalar altında sinyal kalitesini ve güvenilirliğini artırmayı hedeflemektedir.

MATLAB R2023b uygulamasında, alınan sinyal gücü yöntemi hesaplamalar için kullanılmıştır. Ayrıca, bir baz istasyonundan maksimum 250 metrelik bir menzile için kapsama haritası oluşturulmuş ve bu kapsama alanındaki yer konumları için alınan güç, Şekil 2.1'de gösterilen haritada görselleştirilmiştir.

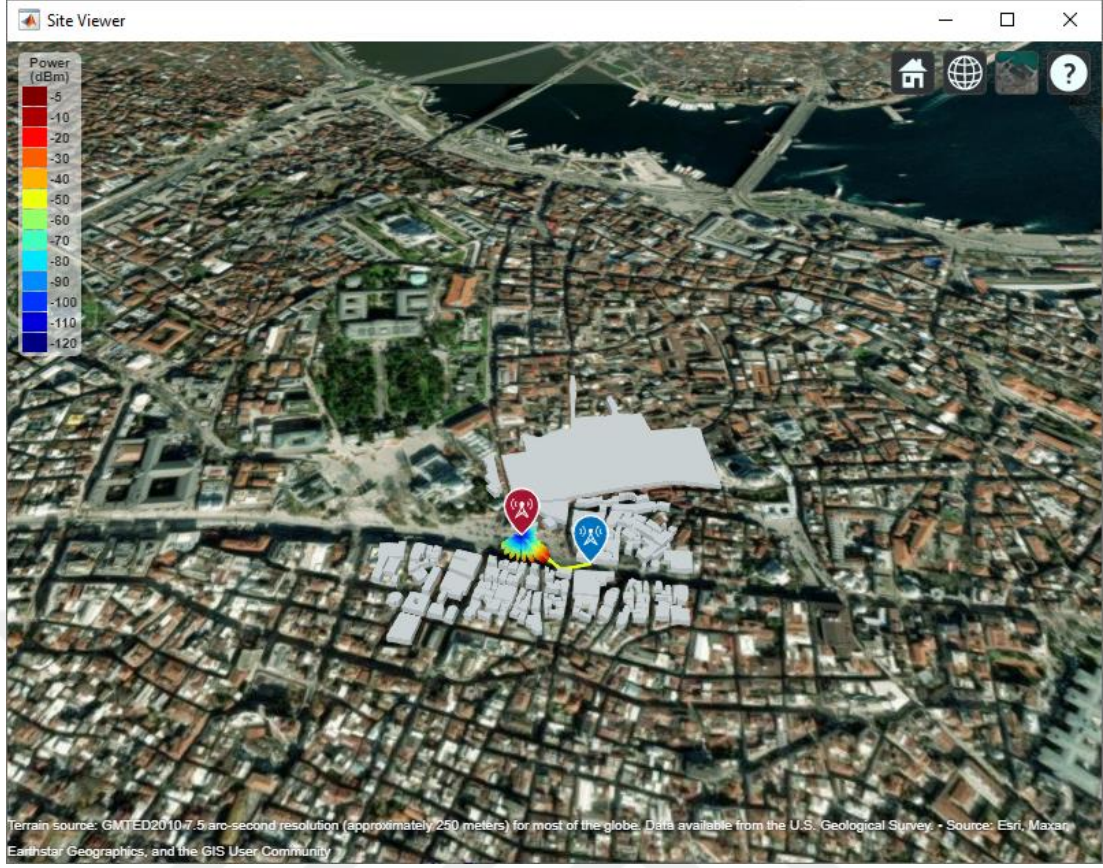


**Şekil 2.1: Maksimum Yansıma Sayısını 0 Kabul Eden Kapsama Haritası**

**Kaynak:** Matlab

İstanbul'daki Beyazıt Meydanı'na ait veriler, OpenStreetMap (OSM) dosyasından elde edilmiştir. Bu dosyadan çıkarılan bina bilgileri, görselleştirme amacıyla Site Viewer platformuna aktarılmıştır. Küçük Hücre Verici ve Alıcı cihazlarının yerleri, belirtilen enlem ve boylam koordinatlarına göre belirlenmiştir.

Şekil 2.2'de İstanbul Beyazıt Meydanı görselleştirilmiş olup, çalışma verici ve alıcı antenleri eklenerek gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 2.2: İstanbul Beyazıt Meydanı (41.00920 enlem ve 28.96668 boylam)**

**Kaynak:** OpenStreetMap, 2024, OpenStreetMap Contributors

### 2.3 Genel Alıcı Gücü (Received Power) Formülü

$$Pr = Pt + Gt + Gr - PL(f, d, A, Lr, Lw) + Gbs$$

Burada:

- $Pt$ : Transmitter Power (Verici Gücü) (dBm)
- $Gt$ : Transmitter Antenna Gain (Verici Anteni Kazancı)
- $Gr$ : Receiver Antenna Gain (Alıcı Anteni Kazancı)
- $PL(f, d, A, Lr, Lw)$ : Path loss (Yol Kayıpları), which depends on frequency (Frekans) ( $f$ ), distance (Mesafe) ( $d$ ), material attenuation (Malzeme Zayıflaması) ( $A$ ), reflection path loss (Yansıma Yol Kayıpları) ( $Lr$ ) and weather loss (Hava Koşulları Kayıpları) ( $Lw$ )
- $Gbs$ : Beam steering Gain (Işın Yönlendirme Kazancı) (dB)

Yol kaybı terimi  $PL(f, d, A, Lr, Lw)$  daha ayrıntılı olarak şu şekilde parçalanabilir:

$$PL(f, d, A, Lr, Lw) = 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(d) + A + Lr + Lw$$

Burada:

- $f$ : Frequency (Frekans) (GHz)
- $d$ : Distance (Mesafe) (m)
- $A$ : Material attenuation factor (Malzeme Zayıflama Faktörü) (dB)
- $Lr$ : Reflection loss (Yansıma kaybı), yansıma ve kırılma yollarının sayısına bağlı olarak değişir.
- $Lw$ : Weather loss (Hava Koşulları Kayıpları)

## 2.4 Optimizasyon Amacı

Amacımız,  $Pr$  (alıcı gücü) değerini maksimize etmek olduğundan, formül şu şekilde olur:

$$\max Pr = Pt + Gt + Gr - PL(f, d, A, Lr, Lw) + Gbs$$

## 2.5 Optimizasyon Stratejisi

1. Minimize Frequency ( $f$ ): Sinyal gücünü iyileştirmek için frekansın minimize edilmesi önemli bir stratejidir. Yüksek frekanslar, sinyalin daha fazla zayıflamasına yol açarken, düşük frekanslar yol kaybını azaltır ve sinyalin daha güçlü bir şekilde alıcıya ulaşmasını sağlar. Bu bulgu, özellikle uzun mesafeli iletişimde daha düşük frekansların tercih edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca, düşük frekansların kullanılması, alıcı gücünü artırarak daha verimli ve güvenilir bir iletişim sağlar. Bu bağlamda, yüksek frekanslı sistemlerin kullanımı, yalnızca kısa mesafelerde veya belirli ortam koşullarında uygun olabilir. Genel olarak, düşük frekanslar kullanılarak, path loss ve zayıflama etkileri minimize edilebilir, böylece daha güçlü ve uzun mesafeli sinyal iletimi sağlanabilir.

2. Maximize Transmitter Power ( $P_t$ ): Verici gücünün artırılması, alıcıdaki sinyal gücünün iyileştirilmesinde temel bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Yapılan ölçümler, verici gücünün artırılmasının alıcı gücünü doğrudan artırdığını ve böylece daha güçlü ve güvenilir bir iletişim sağlandığını göstermektedir. Ancak, verici gücünün artırılması, yalnızca sinyal gücünü artırmakla kalmaz, aynı zamanda enerji tüketimini ve sistemin genel performansını da etkiler. Bu nedenle, verici gücünün optimize edilmesi gerekmektedir.

Yüksek verici güçlerinin kullanılması, belirli mesafelerde faydalı olabilirken, sistemin enerji verimliliği ve çevresel etkileri göz önünde bulundurularak dengeli bir güç düzeyi tercih edilmelidir. Verici gücünün artırılması, daha uzun mesafelerde sinyalin iletilmesini sağlasa da, bunun çevresel faktörler ve sistem verimliliği açısından dikkate alınarak yapılması önemlidir.

3. Optimize Antenna Height ( $h$ ): Anten yüksekliğinin optimize edilmesi, sinyal iletiminde önemli bir rol oynamaktadır. Anten yüksekliğini artırarak, sinyalin daha geniş bir alana yayılması sağlanabilir. Ancak, bu artışın yansıma ve difraksiyon gibi faktörleri artırarak alıcıdaki gücü zayıflatmaması için dikkatli bir denge kurulmalıdır. Bu bağlamda, anten yüksekliğinin belirlenmesinde çevresel koşullar ve malzeme özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır. Yansıma ve difraksiyon oranlarını azaltmak amacıyla, her koşulda en uygun yükseklik seviyesi belirlenmelidir.

4. Select Low-Attenuation Materials ( $A$ ): Alıcıda elde edilen gücü artırmak amacıyla, daha düşük zayıflama değerlerine sahip malzemeler tercih edilmelidir. Metal ve cam malzemeleri, sinyal kaybını en aza indirirken, tuğla ve ahşap gibi malzemelerden kaçınılmalıdır. Sistem tasarımında bu malzeme seçimine özen gösterilmesi, alıcı gücünü artırarak sistemin genel verimliliğini iyileştirebilir. Her ortamın malzeme özellikleri dikkate alınarak, sinyalin iletiminde en verimli malzeme seçimi yapılmalıdır.

Ayrıca, malzeme seçimi, anten yüksekliği ve verici gücü gibi diğer parametrelerle birlikte optimize edilerek en iyi iletim verimliliği sağlanmalıdır.

5. Optimize Reflection Path Loss ( $L_r$ ): Yansıma yolu kaybı ( $L_r$ ), sinyal iletiminde önemli bir etkiye sahiptir ve kaybı minimize etmek için tek yansıma yolları tercih edilmelidir. Eğer çoklu yansılardan kaçınılması mümkün değilse, yansıma sayısını azaltmak için ortamın yapısı gözden geçirilebilir ve uygun malzemeler seçilerek kayıp minimize edilebilir. Bu tür optimizasyonlar, alıcı gücünü artırarak sistemin genel verimliliğini iyileştirebilir.
6. Enable Beam Steering ( $Gbs$ ): Işın yönlendirme, sinyalin yansıma yollarındaki kayıpları azaltarak alıcı gücünü artırmada etkili bir yöntemdir. Özellikle çoklu yansıma yolları ve yansıma etkilerinin yoğun olduğu ortamlarda, ışın yönlendirme kullanımı önemli avantajlar sağlar. Bu teknoloji, antenlerin daha verimli bir şekilde çalışmasını ve sinyalin en uygun yoldan alıcıya ulaşmasını sağlar.

Bu formül, alınan gücün ( $Pr$ ) en üst düzeye çıkarılmasına yönelik konfigürasyonların iyileştirilmesi için bir temel oluşturmaktadır. Her bir parametre, belirli çevresel koşullar ve kullanılan ekipman özelliklerine göre optimize edilerek en uygun sonuçlar elde edilebilir.

Bu formül  $20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(d)$  genellikle radyo frekansı (RF) iletişimde, frekans ( $f$ ) ve mesafe ( $d$ ) bazında alınan gücü desibel (dBm) cinsinden hesaplamak için kullanılır. Bu ifade, sinyalin uzayda yol alırken yaşadığı kaybı (yol kaybı) hesaplar ve alıcıdaki toplam alınan gücün belirlenmesinde önemlidir.

Bu formülde:  $f$ , radyo sinyalinin frekansını temsil eder ve genellikle hertz (Hz) cinsindedir,  $d$ , verici ile alıcı arasındaki mesafeyi ifade eder ve genellikle metre (m) cinsindedir. Bu hesaplamanın sonucu, dalganın yayılması nedeniyle meydana gelen sinyal kaybını gösterir ve bu bilgi, optimum alım için iletim gücü veya anten yerleşiminin ayarlanmasında kullanılabilir.

Desibel (dB), iki değer oranını ifade etmek için kullanılan logaritmik bir birimdir; genellikle güç veya yoğunluk oranlarını ifade etmek için kullanılır. Güç seviyeleri büyük ölçüde değişebileceğinden, logaritmik bir ölçek kullanmak, bu değerlerin daha kolay bir şekilde işlenmesini ve karşılaştırılmasını sağlar.

Logaritmik bir ölçek, çok büyük veya çok küçük sayıların daha yönetilebilir hale gelmesini sağlar. Bu sayede, özellikle elektronik ve haberleşme sistemlerinde sinyal gücü gibi büyük değişimlere sahip değerlerin analizi ve yorumlanması daha pratik bir hale gelir. Desibel, genellikle 10 tabanlı logaritma kullanarak hesaplanır ve bu, güçlü sinyalleri veya zayıf sinyalleri anlamada daha anlamlı sonuçlar elde edilmesini sağlar.

$20\log_{10}(f)$  , logaritmik olarak ifade edilen bu formülde, güç ile voltaj arasındaki orantıyı hesaba katmak için çarpan olarak 20 kullanılır. Bu, yol kaybını ve frekansın etkisini doğru bir şekilde modelleyebilmek için gereklidir. Frekansın artmasıyla yol kaybı arttığı için, bu terim sinyal gücünün ve mesafenin etkilerini doğru bir biçimde hesaplamamıza olanak sağlar.

Formüldeki  $20\log_{10}(d)$  , terimi, mesafenin sinyal gücü üzerindeki etkisini hesaplar. Serbest uzayda, bir sinyalin gücü, vericiden uzaklık arttıkça mesafenin karesiyle ters orantılı olarak azalır. Bu da, mesafe arttıkça sinyal gücünde meydana gelen zayıflamanın logaritmik bir şekilde gerçekleştiği anlamına gelir. Free-Space Path Loss (Serbest Uzay Yol Kaybı) (FSPL), serbest uzay yol kaybı (FSPL) denkleminde türetilmiştir ve serbest uzayda mesafe arttıkça sinyal gücünün ne kadar kaybolduğunu açıklar. FSPL, desibel (dB) cinsinden ifade edilebilir, bu da bu logaritmik formun RF (radyo frekansı) hesaplamaları için uygun olmasını sağlar.

Özetle, bu formül, mühendislerin sinyalin frekansı ve vericiye olan mesafeye dayalı olarak alınan gücü hesaplamalarını sağlar. Bu hesaplama, mesafe ve frekans kaynaklı sinyal kaybı ilkelerini pratik bir şekilde birleştirerek, iletişim sistemlerinde sinyal gücünü değerlendirme ve optimize etme süreçlerini kolaylaştırır.

## 2.6 Kablosuz İletişimde Alınan Gücün Maksimize Edilmesi

Kablosuz iletişim sistemlerinde alınan gücün ( $P_r$ ) maksimize edilmesi, verimli veri iletimi ve ağ performansı açısından kritik bir öneme sahiptir. Alınan güç; verici gücü ( $P_t$ ), verici ve alıcı anten kazançları ( $G_t$ ,  $G_r$ ), iletim frekansı ( $f$ ) ve mesafe ( $d$ ) gibi temel parametrelerin yanı sıra, malzeme kaynaklı zayıflama ( $A$ ), yansıtma kaybı ( $L_r$ ), hava koşullarına bağlı kayıplar ( $L_w$ ) ve ışın yönlendirme kazancı ( $G_{bs}$ ) gibi çevresel faktörlerden etkilenmektedir. Bu çalışma, serbest uzay yol kaybı (FSPL) modeli temelinde, alınan gücün artırılması için anten optimizasyonu, beam steering teknikleri ve düşük kayıplı malzeme kullanımı gibi stratejileri ele almaktadır.

### Inputs:

- **Pt**: Transmitter Power (dBm)
- **Gt**: Transmitter Antenna Gain (dB)
- **Gr**: Receiver Antenna Gain (dB)
- **f**: Frequency (GHz)
- **d**: Distance (m)
- **A**: Material attenuation factor (list of material attenuations, dB)
- **Lr**: Reflection loss (dB)
- **Lw**: Weather loss (dB)
- **Gbs**: Beam steering Gain (dB)

### Constants:

- The path loss formula constants:
  - **c1** = 20 # Coefficient for frequency in dB
  - **c2** = 20 # Coefficient for distance in dB

### 2.6.1 Yol Kaybı (Path Loss) Hesaplaması

Yol kaybı modeli, frekans, mesafe, malzeme zayıflaması ve yansıma ve hava durumu gibi çevresel etkiler dâhil olmak üzere birden fazla faktörü dikkate alır.

#### Input:

f → Frequency in GHz

d → Distance in meters

A → List of material attenuation factors (dB)

Lr → Reflection loss in dB

Lw → Weather loss in dB

#### Output:

total\_path\_loss → Total path loss in dB

Procedure Calculate\_Path\_Loss(f, d, A, Lr, Lw):

1. If  $f \leq 0$  or  $d \leq 0$ , then:

    Raise error "Frequency and distance must be positive values."

2. Set  $c1 = 20$  // Coefficient for frequency-related loss

3. Set  $c2 = 20$  // Coefficient for distance-related loss

4. Compute  $freq\_loss = c1 * \log_{10}(f)$

5. Compute  $distance\_loss = c2 * \log_{10}(d)$

6. Compute  $total\_path\_loss = freq\_loss + distance\_loss + sum(A) + Lr + Lw$

7. Return  $total\_path\_loss$

### 2.6.2 Alınan Güç (Received Power) Hesaplaması

Alınan güç, verici gücüne, anten kazanımlarına, yol kaybına ve ışın yönlendirme kazanımına bağlıdır.

Input:

$P_t$  → Transmitter power in dBm

$G_t$  → Transmitter antenna gain in dB

$G_r$  → Receiver antenna gain in dB

$f$  → Frequency in GHz

$d$  → Distance in meters

$A$  → List of material attenuation factors (dB)

$L_r$  → Reflection loss in dB

$L_w$  → Weather loss in dB

$G_{bs}$  → Beam steering gain in dB

Output:

$P_r$  → Received power in dBm

Procedure Calculate\_Received\_Power( $P_t$ ,  $G_t$ ,  $G_r$ ,  $f$ ,  $d$ ,  $A$ ,  $L_r$ ,  $L_w$ ,  $G_{bs}$ ):

1. Compute  $path\_loss = Calculate\_Path\_Loss(f, d, A, L_r, L_w)$
2. Compute  $Pr = P_t + G_t + G_r - path\_loss + G_{bs}$
3. Return  $Pr$

## 2.7 Optimizasyon Amacı (Optimization Logic)

Amacımız, kablosuz iletişim sistemlerinde alınan gücü en üst düzeye çıkaran parametre yapılandırmasını bulmaktır. Bu süreçte, frekans, mesafe, malzeme zayıflaması, yansıma kaybı, hava kaybı ve ışın yönlendirme kazancı gibi çeşitli faktörler dikkate alınarak farklı giriş değerleri arasında yinleme yapılır. Bu parametrelerin her biri, sinyalin iletim kalitesini ve alıcıda alınan gücü doğrudan etkiler.

Input:

$P_t$  → Transmitter power in dBm

$G_t$  → Transmitter antenna gain in dB

$G_r$  → Receiver antenna gain in dB

$freq\_range$  → List of frequency values in GHz

$dist\_range$  → List of distance values in meters

$material\_attenuations$  → List of material attenuation factors (dB)

$L_r\_values$  → List of reflection loss values (dB)

$L_w\_values$  → List of weather loss values (dB)

$G_{bs\_range}$  → List of beam steering gain values (dB)

Output:

$max\_Pr$  → Maximum received power found (dBm)

$best\_config$  → Configuration that yields  $max\_Pr$

Procedure Optimize\_Received\_Power(Pt, Gt, Gr, freq\_range, dist\_range, material\_attenuations, Lr\_values, Lw\_values, Gbs\_range):

1. Initialize max\_Pr =  $-\infty$
2. Initialize best\_config = None
3. For each f in freq\_range:
  4. For each d in dist\_range:
    5. For each Lr in Lr\_values:
      6. For each Lw in Lw\_values:
        7. For each Gbs in Gbs\_range:
          8. Compute Pr = Calculate\_Received\_Power(Pt, Gt, Gr, f, d, material\_attenuations, Lr, Lw, Gbs)
          9. If Pr > max\_Pr:
            10. Set max\_Pr = Pr
            11. Update best\_config with:
              - Frequency (GHz) = f
              - Distance (m) = d
              - Reflection Loss (dB) = Lr
              - Weather Loss (dB) = Lw
              - Beam Steering Gain (dB) = Gbs
12. Return max\_Pr, best\_config

## 2.8 Pseduo Code

1. Initialize:

$\max\_Pr \leftarrow -\infty$

$\text{best\_configuration} \leftarrow \text{None}$

2. Define function Calculate\_Path\_Loss(f, d, A, Lr, Lw):

a. Compute frequency loss:  $\text{freq\_loss} \leftarrow c1 * \log_{10}(f)$

b. Compute distance loss:  $\text{distance\_loss} \leftarrow c2 * \log_{10}(d)$

c. Compute total path loss:

$\text{path\_loss} \leftarrow \text{freq\_loss} + \text{distance\_loss} + \text{sum}(A) + Lr + Lw$

d. Return path\_loss

3. Define function Calculate\_Received\_Power(Pt, Gt, Gr, f, d, A, Lr, Lw, Gbs):

a. Compute path loss using Calculate\_Path\_Loss()

b. Compute received power:

$Pr \leftarrow Pt + Gt + Gr - \text{path\_loss} + Gbs$

c. Return Pr

4. Define function Optimize\_Received\_Power(Pt, Gt, Gr, f\_range, d\_range, A, Lr\_values, Lw\_values, Gbs\_range):

a. Iterate over each f in f\_range:

i. Iterate over each d in d\_range:

- Iterate over each Lr in Lr\_values:

- Iterate over each Lw in Lw\_values:

- Iterate over each Gbs in Gbs\_range:

\* Compute Pr using Calculate\_Received\_Power()

\* If Pr > max\_Pr:

- Update max\_Pr  $\leftarrow$  Pr

- Update best\_configuration with current values

##### 5. Return max\_Pr and best\_configuration

Burada açıklanan yaklaşım, kablosuz iletişim sistemlerinde alınan gücü en üst düzeye çıkarmak için en uygun yapılandırmayı belirlemek için kullanılabilir. Farklı parametre değerleri üzerinde yineleme yaparak, en yüksek alınan güçle sonuçlanan frekans, mesafe, yansıma kaybı, hava kaybı ve ışın yönlendirme kazancının en etkili kombinasyonunu belirleyebiliriz.

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### DENEYSEL SONUÇLAR

Bu çalışma, kentsel 5G kablosuz iletişim sistemlerinde enerji verimliliğini artırmaya yönelik optimizasyon yaklaşımlarını ele almaktadır. Yüksek frekansların (30 GHz - 100 GHz) kısa menzil dezavantajı nedeniyle daha yoğun bir baz istasyonu ağına ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiş ve bu durumun enerji tüketimi açısından önemli bir faktör olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışma, 5G sistemlerinde alınan gücün (Pr) maksimize edilmesini merkeze alarak, frekans yönetimi, anten konfigürasyonu, malzeme türlerinin etkisi, sinyal yayılım senaryoları ve beam steering teknolojisinin katkılarını kapsamlı biçimde analiz etmektedir. Söz konusu analiz, yoğun kentsel ortam koşulları göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiş ve enerji verimliliğine katkı sağlayacak öneriler sistematik biçimde sunulmuştur.

Anten yüksekliği, anten verici gücü, materyal, frekans, yansıma yolları ve ışın yönlendirmesinin alınan güç (dBm) üzerindeki etkisini gösteren sonuçlar, Tablo A.1'den Tablo A.9'a kadar eklerde ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

Ayrıca, 5G altyapısında çevresel faktörlerin RF sinyal gücü üzerindeki etkileri incelenmiş, özellikle yüksek frekansların malzemelerden geçiş sırasında daha fazla kayba uğradığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, enerji verimliliği perspektifinden bakıldığında, düşük frekans bantlarının (2,5 GHz - 5,5 GHz) daha uzun mesafelerde daha kararlı sinyal iletimi sunduğu ve ağ planlamasında bu faktörün dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Çalışmada ayrıca, enerji verimliliğini artırmak için ağ dilimleme (network slicing) ve uç bilişim (edge computing) teknolojilerinin rolü değerlendirilmiştir. Ağ dilimleme sayesinde belirli kullanım senaryolarına uygun sanal ağlar oluşturularak kaynakların daha etkin yönetilebileceği belirlenmiştir.

Uç bilişim altyapısının güçlendirilmesiyle veri işleme yükünün merkezi sunucular yerine uç düğümlerde gerçekleştirilebileceği ve bu sayede veri iletimine bağlı enerji tüketiminin azaltılabileceği görülmüştür.

5G baz istasyonlarının sayısındaki artışın enerji tüketimi üzerindeki etkileri analiz edilmiş ve enerji tasarrufu sağlayacak baz istasyonu tasarımlarının geliştirilmesi gerektiği belirlenmiştir. Bu doğrultuda, anten tasarımlarının optimize edilmesi, ışın yönlendirme (beamforming) tekniklerinin iyileştirilmesi ve çok yönlü girişim azaltma yöntemlerine yönelik araştırmaların teşvik edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, kentsel alanlarda 5G'nin enerji tüketimini minimize etmek için şehir planlaması ile telekomünikasyon altyapısının entegre edilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Sonuç olarak, kentsel 5G kablosuz iletişim sistemlerinde enerji verimliliğini artırmak için çok boyutlu optimizasyon stratejilerinin benimsenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, frekans seçimi, baz istasyonu dağılımı, anten tasarımı ve veri işleme yöntemleri gibi faktörlerin bütüncül bir yaklaşımla ele alınması gerektiği tespit edilmiştir. Enerji verimliliğini artırmaya yönelik bu bulgular, gelecekteki 5G ağlarının sürdürülebilirliğini sağlamak adına kritik öneme sahiptir.

Bu çalışma kapsamında, 5G kablosuz iletişim sistemlerinde kullanılan radyo frekanslarının enerji verimliliği üzerindeki etkileri incelenirken, aynı zamanda elektromanyetik radyasyonun potansiyel riskleri de değerlendirilmiştir. Radyo frekanslarının olası etkileri, iyonlaştırıcı ve iyonlaştırıcı olmayan radyasyon özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. İyonlaştırıcı radyasyon, yüksek enerjili olup atomları iyonize edebilirken, 5G teknolojisi iyonlaştırıcı olmayan radyasyon aralığında çalışmaktadır ve bu nedenle iyonlaştırıcı radyasyonun oluşturabileceği sağlık risklerini taşımamaktadır.

5G teknolojisi, elektromanyetik spektrumun 30 GHz ile 100 GHz arasındaki frekans bandında faaliyet göstermekte olup, bu frekanstaki dalgalar, günlük hayatta maruz kalınan güneş radyasyonundan çok daha düşük enerjiye sahiptir. Yapılan bilimsel çalışmalar, 5G sinyallerinin gücünün, güneşten yayılan enerjiden 2.567 ila 14.333 kat daha zayıf olduğunu ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, mevcut bilimsel bulgular doğrultusunda, 5G'nin iyonlaştırıcı radyasyon açısından güvenli olduğu kabul edilmektedir.

5G teknolojisinin sunduğu yüksek veri iletim hızları, 30 GHz ile 100 GHz arasındaki geniş radyo frekansı aralığını kullanmasına dayanmaktadır. Bu geniş frekans spektrumu, özellikle yoğun veri aktarımı gerektiren uygulamalarda önemli avantajlar sağlamakta olup, ağ kapasitesinin artırılmasına katkıda bulunmaktadır. Ancak, yüksek frekansların temel dezavantajlarından biri, sinyal menziline kısıtlı olmasıdır. 4G teknolojisiyle kıyaslandığında, 5G sinyalleri daha kısa mesafelere ulaşmakta ve binalar, atmosferik koşullar gibi çevresel etkenlerden daha fazla etkilenmektedir. Bu durum, kapsama alanının sürdürülebilirliği için daha yoğun bir baz istasyonu ağının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Kentsel alanlardaki 5G baz istasyonları, kompakt tasarımları sayesinde yoğun nüfuslu bölgelerde kurulum kolaylığı sağlamakta ve ağın yaygınlaştırılmasına katkıda bulunmaktadır. Ancak, bu yüksek hızlı ve düşük gecikmeli iletişim altyapısının sürdürülebilirliği için kapsamlı bir ağ planlamasına ihtiyaç duyulmaktadır. Şehir içi uygulamalarda, baz istasyonlarının konumlandırılması, spektrum verimliliğinin artırılması ve çoklu erişim tekniklerinin optimizasyonu, sistem performansını doğrudan etkilemektedir.

Bu doğrultuda, 5G'nin enerji verimliliğini artırmak adına ağ altyapısının optimize edilmesi gerekmektedir. Küçük hücreli baz istasyonu dağıtım stratejilerinin iyileştirilmesi, enerji tüketiminin azaltılması ve frekans yönetiminin etkinleştirilmesi kritik öneme sahiptir. Özellikle, yüksek frekans bandındaki sinyal yayılım kayıplarını azaltmak için anten tasarımlarının geliştirilmesi, ışın yönlendirme (beamforming) tekniklerinin ilerletilmesi ve malzeme bilimi alanında yenilikçi çözümler üzerinde çalışılması gerekmektedir.

Ayrıca, baz istasyonu yoğunluğunun artmasıyla birlikte enerji tüketimi ve çevresel etkiler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu bağlamda, sürdürülebilir ağ yönetimi politikalarının benimsenmesi, enerji tasarruflu baz istasyonlarının geliştirilmesi ve şehir planlaması ile telekomünikasyon altyapısının entegrasyonuna yönelik disiplinler arası çalışmaların teşvik edilmesi önem arz etmektedir. 5G ağlarının enerji verimliliğini artırmaya yönelik alınacak önlemler, hem işletme maliyetlerini düşürecek hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayacaktır.

Bu çalışmada, radyo frekansı (RF) sinyal gücünü etkileyen malzeme türü, yayılma yolları ve ışın yönlendirme gibi çevresel faktörlerin yanı sıra, frekans seçimi, verici anten yüksekliği ve verici gücü gibi teknik parametreler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, çevresel koşulların ve teknik parametrelerin RF sinyallerinin zayıflama, yansıma ve alım kalitesi üzerindeki etkilerini anlamada kritik rol oynadığını ortaya koymaktadır. Özellikle, farklı frekansların ve yayılma yollarının, yoğun nüfuslu kentsel ortamlardaki sinyal davranışlarını önemli ölçüde şekillendirdiği belirlenmiştir.

Yüksek frekansların (örneğin 24 GHz ve üzeri), malzemelerdeki yol kaybına ve atmosferik zayıflamaya karşı daha hassas olduğu ve bu durumun daha yüksek enerji tüketimi gerektirdiği tespit edilmiştir. Buna karşılık, daha düşük frekansların (örneğin 2,5 GHz ile 5,5 GHz arası) daha kararlı bir sinyal performansı sunduğu, engelleri daha kolay aşarak uzun mesafeli iletişimde daha verimli bir kullanım sağladığı görülmüştür. Bu bulgular, kentsel alanlarda kullanılacak RF tabanlı iletişim sistemlerinin frekans seçiminin, enerji verimliliği açısından çevresel faktörler ve sinyal gereksinimleri dikkate alınarak yapılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

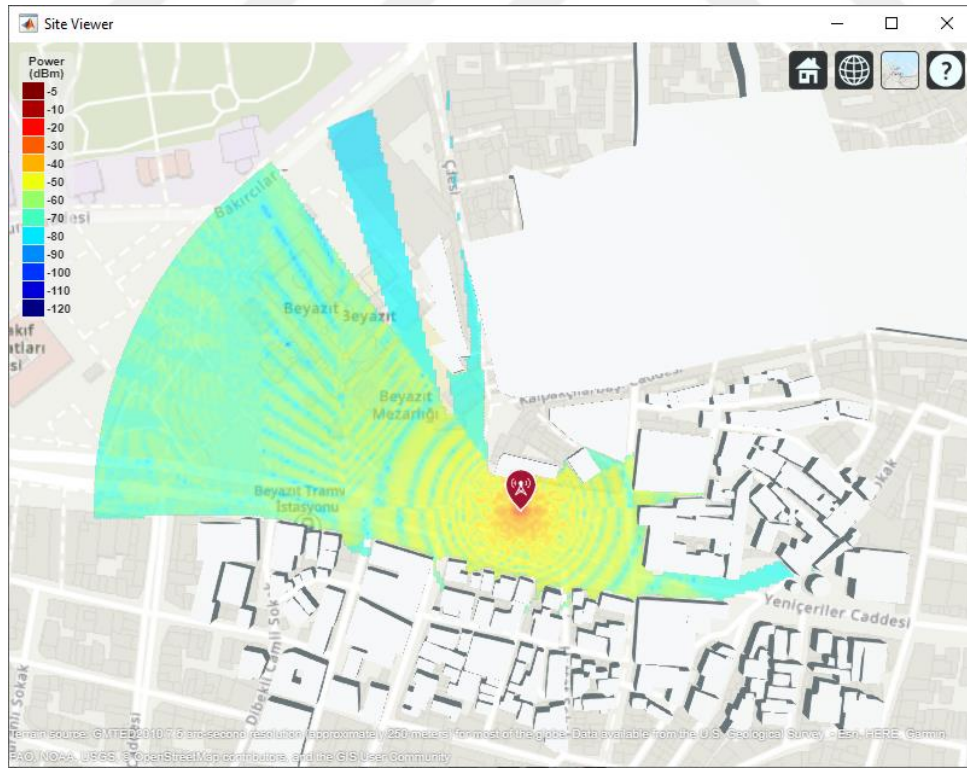
Gelecekteki araştırmalarda, farklı frekansların malzeme emilimi ve atmosferik etkiler üzerindeki spesifik etkilerini daha derinlemesine anlamak için deneysel ve simülasyon tabanlı çalışmalar gerçekleştirilmelidir. Özellikle, 24 GHz ve üzerindeki yüksek frekansların performansını optimize etmek ve enerji tüketimini azaltmak amacıyla, çoklu girişim etkilerini minimize eden yeni nesil anten tasarımları ve ışın yönlendirme teknikleri geliştirilmelidir.

Bunun yanı sıra, düşük frekansların kentsel alanlardaki uzun mesafeli iletişimde sağladığı avantajları daha etkin kullanabilmek için, bu frekans aralıklarını destekleyen ağ altyapılarının enerji verimliliği açısından optimize edilmesi önerilmektedir. Ayrıca, çevresel faktörlerin RF sinyal davranışına etkilerini daha iyi modelleyebilmek için, malzeme özelliklerini ve hava koşullarını içeren kapsamlı bir matematiksel çerçeve geliştirilerek, enerji tüketimini minimize edecek stratejiler belirlenmelidir.

### 3.1 Konfigürasyon Bulguları

Zemin konumlarındaki alınan gücü hesaplayan ve bina tepeleri veya yanlarını hariç tutan kapsama haritası, yayılma ortamının aşırı basitleştirilmiş bir modelini sunmaktadır. Bu haritada, -120 dBm ile -5 dBm arasındaki sinyal gücü aralığı, alınan güçteki geniş varyasyonu göstermektedir. Maksimum yansıma sayısının sıfıra ayarlanması, yalnızca verici ile alıcı arasındaki doğrudan görüş hattı (LOS) yolunun dikkate alındığını ve kentsel ortamlarda yaygın olan yansıyan sinyallerin etkilerinin göz ardı edildiğini belirtir [58].

Aşağıdaki verici parametreleri tanımlanmıştır: "Küçük Hücre Vericisi", 41.00920 enleminde ve 28.96668 boylamında konumlandırılmıştır. Bu verici, 2 metre yüksekliğinde izotropik bir anten kullanmakta olup, 5 watt güçle çalışmakta ve 24 GHz frekansında iletim yapmaktadır. "Küçük Hücre Alıcısı" ise, 41.008871 enleminde ve 28.967746 boylamında yer almaktadır. Alıcı anten yüksekliği 1 metre olarak ayarlanmıştır. Bu parametreler, alıcıyı bir kablosuz iletişim sisteminde tanımlamak amacıyla kullanılmaktadır. Şekil 3.1'de, kapsama haritası Tek Yansımali Yollar yöntemiyle oluşturulmuştur.



Şekil 3.1: Tek Yansımali Yol İçeren Kapsama Haritası

Kaynak: Matlab

### 3.2 Sinyal Gücünün ve Malzemelerin Etkisinin Analizi

Sinyal gücünün farklı malzemeler ve yayılma yolları bağlamında analiz edilmesi, çevresel faktörlerin radyo frekansı (RF) sinyallerinin zayıflaması ve yansımaları üzerindeki etkilerinin anlaşılması açısından önemlidir. Bu tür bir analiz, sinyalin karşılaştığı malzemelerin (sinyali yansıtabilen, emebilen veya iletebilen) sinyal gücü üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlar. Sinyal gücü, desibel-miliwatt (dBm) cinsinden ölçülür ve malzeme türüne bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik gösterebilir. Düşük dBm değerleri, yüksek sinyal zayıflamasını (yani daha zayıf sinyaller) işaret eder, bu da sinyalin güç kaybı yaşadığına dair bir gösterge olarak değerlendirilir.

- Tuğla: Yapılan ölçümler neticesinde, tuğla malzemesi için tüm senaryolar boyunca ortalama alıcı gücü -67.75 dBm olarak belirlenmiştir. Farklı frekanslarda yapılan analizler, düşük frekansların (örneğin, 2.5 GHz) daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Özellikle, 2.5 GHz frekansında ölçülen alıcı gücü -51.33 dBm seviyesine ulaşmıştır. Ancak, frekans arttıkça (örneğin, 81 GHz) alıcı gücünde önemli bir azalma gözlemlenmiş ve -72.88 dBm seviyesine düşmüştür. Sadece "Single reflection" senaryosunda değerlendirilen verilere göre, ortalama alıcı gücü -67.75 dBm olarak hesaplanmıştır. Bu durum, yansıma etkilerinin alıcı gücü üzerindeki önemli bir rol oynadığını göstermektedir.
- Ahşap: Ahşap malzemesi için tüm senaryolar boyunca ortalama alıcı gücü -70.51 dBm olarak hesaplanmıştır. Bu, ahşap malzemenin sinyali belirgin ölçüde absorbe ettiğini göstermektedir. Düşük frekanslar (örneğin, 2.5 GHz) daha iyi sonuçlar sağlamış ve alıcı gücü ortalama -54.14 dBm olarak kaydedilmiştir. Yüksek frekanslar (örneğin, 81 GHz) için alıcı gücü önemli ölçüde düşmüş ve -77.82 dBm seviyesine gerilemiştir. Yalnızca "Single reflection" senaryosunda değerlendirilen verilerde, ortalama alıcı gücü -70.51 dBm olarak ölçülmüştür.
- Cam: Cam malzemesi için tüm senaryolar boyunca ortalama alıcı gücü -65.35 dBm olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, camın sinyali yansıtma ve geçirgenlik açısından orta seviyede bir performansa sahip olduğunu göstermektedir. Düşük frekanslar (örneğin, 2.5 GHz) cam yüzeylerde daha iyi sonuçlar vermiş ve alıcı

gücü ortalama -48.97 dBm olarak hesaplanmıştır. Yüksek frekanslar (örneğin, 81 GHz) cam yüzeylerde daha fazla kayba yol açmış ve alıcı gücü -73.88 dBm seviyesine gerilemiştir. "Single reflection" senaryosunda cam malzeme için ortalama alıcı gücü -65.35 dBm olarak ölçülmüştür. Yansımaların az olduğu durumlarda cam, sinyali nispeten iyi yansıtma ve geçirme yeteneği göstermiştir.

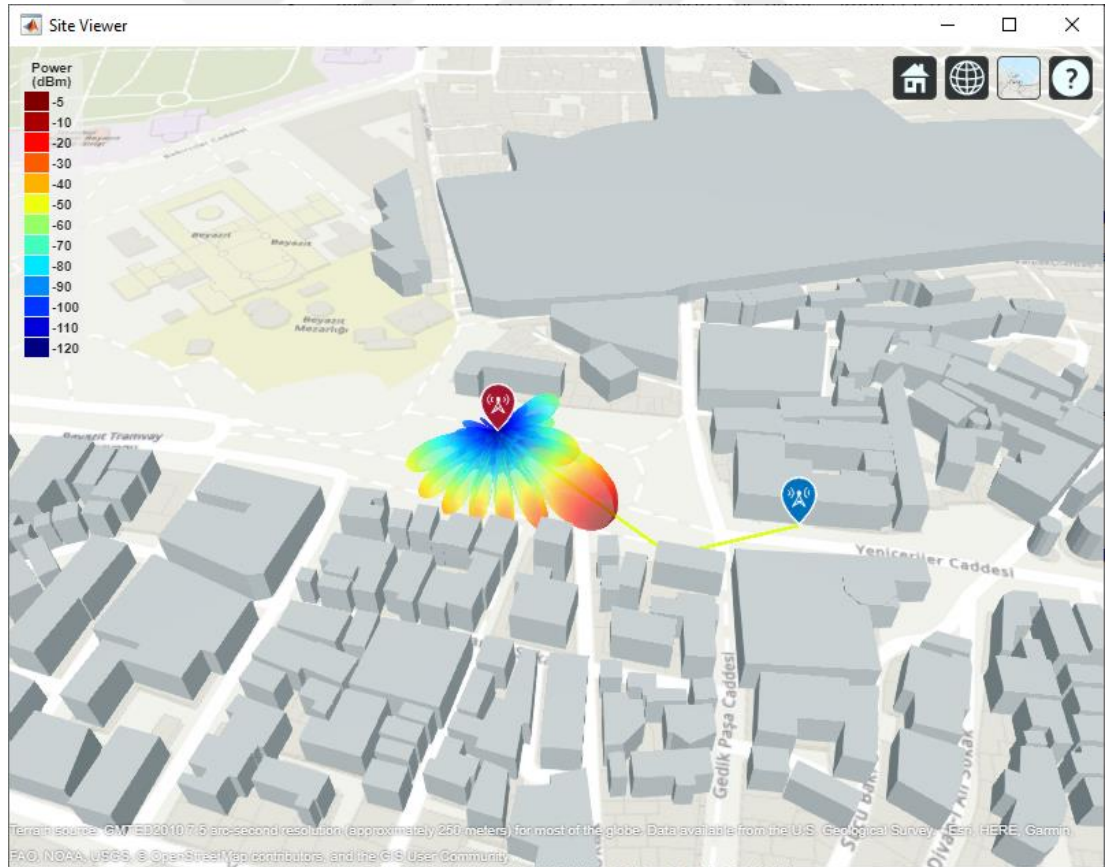
- Beton: Beton malzemesi için tüm senaryolar boyunca ortalama alıcı gücü -66.01 dBm olarak hesaplanmıştır. Bu, betonun sinyali büyük ölçüde absorbe ettiğini ve iletim performansını sınırladığını göstermektedir. Düşük frekanslar (örneğin, 2.5 GHz) beton yüzeylerde daha iyi sonuçlar sağlamış ve alıcı gücü ortalama -49.62 dBm olarak kaydedilmiştir. Yüksek frekanslar (örneğin, 81 GHz) alıcı gücü kayıplarını artırmış ve ortalama -74.89 dBm seviyesine gerilemiştir. "Single reflection" senaryosunda beton malzeme için ortalama alıcı gücü -66.01 dBm olarak hesaplanmıştır. Bu, yansımaların az olduğu durumlarda betonun kayda değer bir sinyal kaybına neden olduğunu göstermektedir.
- Metal: Metal malzemesi için tüm senaryolar boyunca ortalama alıcı gücü -47.75 dBm olarak hesaplanmıştır. Bu, metalin yüksek yansıtıcılık özelliği sayesinde sinyal kayıplarını minimize ettiğini göstermektedir. Düşük frekanslar (örneğin, 2.5 GHz) metal yüzeylerde daha iyi sonuçlar vermiş ve alıcı gücü ortalama -29.98 dBm olarak hesaplanmıştır. Yüksek frekanslar (örneğin, 81 GHz) ise sinyal kaybını artırmış ve alıcı gücü -57.89 dBm seviyesine gerilemiştir. "Beam steering (Single reflection)" senaryosunda metal malzeme için alıcı gücü ortalama -37.12 dBm olarak hesaplanmıştır. Diğer yansıma yollarında bu değer artış göstermiştir, ancak metalin yansıtıcı yapısı sayesinde genel kayıplar sınırlı kalmıştır.

Tüm malzemelerde en iyi sonuçlar düşük frekanslarda elde edilmiştir. Düşük frekanslar, sinyalin malzemelerden daha az kayıpla geçmesini sağlamaktadır. Yüksek frekanslarda sinyal kaybı tüm malzemelerde belirgin şekilde artmıştır.

Metal ve Cam yüzeyler, beam steering teknolojisi kullanıldığında yansıma kaynaklı kayıpları en aza indirmiştir. Ahşap, Beton ve Tuğla gibi malzemelerde ise yansıma sayısının artması sinyal kaybını daha belirgin hale getirmiştir.

Beam steering, özellikle yüksek frekanslar ve karmaşık yayılma yollarında kayıpları azaltmak için standart bir teknoloji olarak uygulanmalıdır. Bu teknoloji, enerji verimliliğini artırmak ve alıcı gücünü optimize etmek için önemlidir. Enerji Verimliliği: Beam steering, sinyal kaybını azaltarak verici gücünü optimize eder ve enerji tüketimini düşürür. Özellikle çoklu yansıma yollarında enerji tasarrufu sağlamak için beam steering teknolojisi entegrasyonu önerilir.

Şekil 3.2, hedefe doğru yönlendirme işlemi için beam steering (ışın yönlendirme) tekniğinin nasıl kullanılacağını göstermektedir.



**Şekil 3.2: Beam Steering ile İletim Yolu**

**Kaynak:** Matlab

### 3.3 Frekans Seçimi ve İletim Kararlılığı

Yapılan simülasyonlar, düşük frekanslı sinyallerin (örneğin 2.5 GHz – 5.5 GHz aralığı) hem uzun mesafeli iletişimde hem de fiziksel engellerin bulunduğu ortamlarda daha kararlı bir iletim sağladığını göstermektedir. Bu frekanslar, malzeme emilimine karşı daha dirençli olmakla birlikte, atmosferik zayıflamadan da daha az etkilenmektedir. Buna karşın, yüksek frekanslar (24 GHz ve üzeri) daha geniş bant genişliği sunmasına rağmen, özellikle beton, cam ve ahşap gibi yapı malzemelerinde ciddi sinyal kayıplarına neden olmaktadır.

- Frekans seçimi, iletişim sistemlerinin performansını doğrudan etkileyen kritik bir faktör olup, uzun mesafeli iletişim veya engelleyici yapıların yoğun olduğu kentsel bölgelerde düşük frekansların (2.5 GHz - 5.5 GHz) tercih edilmesi önerilmektedir.
- Yüksek frekanslar (24 GHz ve üzeri), kısa mesafeli iletişim ve beam steering gibi gelişmiş yönlendirme tekniklerinin kullanıldığı sistemlerde daha verimli olabilir. Ancak, bu tür uygulamalarda sinyal kaybını minimize etmek için malzeme seçimi ve anten tasarımı optimize edilmelidir.
- Hibrit sistemler, düşük ve yüksek frekansların birlikte kullanıldığı bir yapı ile iletişim sistemlerinin verimliliğini artırabilir. Gelecekteki araştırmalar, bu hibrit sistemlerin farklı çevresel koşullarda nasıl performans gösterdiğini analiz etmelidir.
- Yüksek frekansların sinyal kayıplarını azaltmak amacıyla anten dizilimleri, beamforming ve çoklu giriş-çoklu çıkış (MIMO) teknolojilerinin uygulanabilirliği daha detaylı incelenmelidir. Bu teknolojilerin, yüksek frekansların sınırlamalarını aşmak için nasıl optimize edilebileceği konusunda yeni stratejiler geliştirilmelidir.

Sonuç olarak, frekans seçimi, sinyal yayılımını optimize etmek ve iletişim sistemlerinin etkinliğini artırmak için temel bir strateji olarak değerlendirilmelidir.

Düşük frekanslar geniş kapsama alanı ve yüksek iletim kararlılığı sunarken, yüksek frekanslar gelişmiş yönlendirme teknikleri ile desteklendiğinde yüksek veri iletim hızları sağlayabilir. Bu bulgular, gelecekteki iletişim altyapılarının tasarım ve planlama süreçlerinde önemli bir rehber sunmaktadır.

### **3.4 Enerji Verimliliği ve Sürdürülebilirlik Perspektifi**

Kablosuz iletişim sistemlerinde enerji verimliliği ve sürdürülebilirlik, modern telekomünikasyon altyapılarının tasarımında önemli bir faktör haline gelmiştir. RF iletişim sistemlerinde kullanılan altyapının çevresel etkileri araştırılmalı ve bu doğrultuda çevre dostu tasarım ilkeleri uygulanarak optimize edilmelidir. Özellikle kentsel alanlarda, şehir planlaması ile telekomünikasyon altyapısının entegrasyonu büyük önem taşımaktadır. Yeni nesil iletişim ağlarının, mevcut şehir yapılarına entegre edilmesi ve bu süreçte disiplinler arası iş birliğinin teşvik edilmesi, enerji tüketiminin azaltılmasına ve sürdürülebilir şehircilik anlayışının güçlendirilmesine katkı sağlayacaktır.

Bu bağlamda, çevresel sürdürülebilirliği artırmak için:

- Daha düşük enerji tüketen baz istasyonları ve verimli anten sistemleri geliştirilmelidir.
- Alternatif enerji kaynaklarından (örneğin güneş ve rüzgar enerjisi) faydalanan iletişim altyapıları teşvik edilmelidir.
- Şehir planlamasında, RF iletişim sistemlerinin çevresel etkilerini azaltacak mekânsal düzenlemeler yapılmalıdır.

### **3.5 İletişim Altyapısında Malzeme Seçiminin Rolü**

İletişim altyapısında kullanılan malzemeler, RF sinyallerinin yayılma özelliklerini doğrudan etkilemekte ve sistemin genel performansını belirlemektedir. Bu doğrultuda, özellikle metal yüzeyler, sinyal iletim kalitesine sağladıkları katkılar nedeniyle önemli bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır.

### 3.6 Metal Malzemelerin RF Performansına Etkisi

Metal, yüksek yansıtıcılık özelliği sayesinde kablosuz iletişim sistemlerinde sinyal kayıplarını minimum seviyede tutan bir malzemedir. RF sinyallerinin metal yüzeyler tarafından yansıtılması, sinyal gücünü artırarak daha kararlı bir bağlantı sunmaktadır. Bu avantajlar doğrultusunda, metal malzemelerin RF performansına etkileri şu şekilde sıralanabilir:

- Düşük Frekanslarda (2.5 GHz - 5.5 GHz) Verimlilik: Metal yüzeylerde düşük frekanslar, sinyal kaybını minimize ederek uzun mesafeli iletişimi daha etkin hale getirmektedir.
- Yüksek Frekanslarda (24 GHz ve Üzeri) Kısa Mesafeli Kullanım: Yüksek frekanslı sinyaller, metal yüzeylerde daha yüksek yansıma katsayısına sahip olmakla birlikte, uzun mesafelerde kayıplar artmaktadır. Bu nedenle, kısa mesafeli haberleşme uygulamalarında daha verimli olmaktadır.
- Sinyal Yönlendirme ve Beamforming Teknolojileri: Metal yüzeyler, beam steering ve beamforming teknolojileri ile sinyalin belirli yönlere doğru optimize edilmesine imkân tanır. Bu sayede, özellikle milimetre dalga (mmWave) sistemlerinde yüksek hassasiyetle sinyal yönlendirme sağlanabilir.
- Enerji Verimliliğine Katkısı: Metal yüzeylerde sinyal kaybının düşük olması, RF iletişim sistemlerinde güç tüketimini azaltarak enerji verimliliğini artırmaktadır. Daha az sinyal kaybı, daha düşük güç tüketimi ile daha uzun mesafede etkili iletişim imkânı sunar. Bu durum, sürdürülebilir iletişim altyapıları geliştirmek için önemli bir avantajdır.

### 3.7 Cam Malzemelerin RF Performansına Etkisi

Metalden sonra en iyi performansı sergileyen malzemelerden biri olarak kabul edilen cam, kablosuz iletişim sistemlerinde dengeleyici geçirgenlik ve yansıtıcılık özellikleri ile öne çıkmaktadır. Cam, sinyal kayıplarını sınırlarken aynı zamanda verimli bir alıcı gücü sağlaması nedeniyle estetik ve işlevselliği bir arada sunan iletişim sistemleri için uygun bir malzeme olarak değerlendirilmektedir.

- Düşük Frekanslarda (2.5 GHz - 5.5 GHz) Daha Az Sinyal Kaybı: Cam yüzeylerde düşük frekanslar kullanıldığında, sinyalin büyük bir kısmı malzeme tarafından emilmeden iletilir. Bu durum, sinyal kaybını azaltarak daha uzun mesafeli iletişimi mümkün kılar.
- Sinyal Geçirgenliği ve Yansıtıcılık Dengesi: Cam, hem sinyal geçirebilen hem de belirli bir oranda yansıtılabilen bir malzeme olduğu için RF sinyallerinin yönlendirilmesine katkı sağlar. Bu özellik, beam steering ve beamforming gibi gelişmiş sinyal işleme teknikleriyle birleştirildiğinde, sinyal kayıplarının daha da minimize edilmesine olanak tanır.
- Yüksek Frekanslarda (24 GHz ve Üzeri) Kullanım Potansiyeli: Yüksek frekanslı sinyaller cam yüzeylerden geçerken belirli oranda zayıflama yaşansa da, malzeme mühendisliği ile optimize edilmiş cam türleri (örneğin, düşük kayıplı dielektrik camlar) kullanılarak bu kayıplar minimize edilebilir.
- Enerji Verimliliği Açısından Avantajlar: Cam yüzeyler üzerinden geçen RF sinyallerinde kaynak tarafından üretilen enerji kayıpları minimal seviyededir. Bu durum, düşük frekansların (örneğin, 2.5 GHz - 5.5 GHz) kullanımı ile birleştirildiğinde, enerji tüketiminin azaltılmasına ve çevre dostu haberleşme sistemleri geliştirilmesine katkı sağlar.

### 3.8 Camın Kullanım Alanları ve Gelecek Perspektifi

- Akıllı Binalar ve Kentsel Haberleşme Sistemleri: Günümüzde akıllı binalarda görsel ve işlevsel bütünlük sağlamak amacıyla cam yüzeyler yoğun şekilde kullanılmaktadır. Camın RF geçirgenliği ve yansıtıcılığı sayesinde, binaların iletişim altyapıları ile uyumlu olacak şekilde tasarlanması, 5G ve gelecekteki 6G teknolojileriyle entegrasyon açısından avantaj sağlamaktadır.
- Beamforming ve Beam Steering Teknikleri ile Entegrasyon: Daha gelişmiş sinyal yönlendirme mekanizmaları (beamforming ve beam steering) kullanılarak, cam yüzeylerden geçen RF sinyalleri daha verimli hale getirilebilir. Bu tür sistemler, özellikle yüksek frekanslı iletişim teknolojilerinin (mmWave) verimliliğini artırmak için kritik öneme sahiptir.

- Malzeme Mühendisliği ile Optimize Edilmiş Cam Türleri: Camın RF performansını artırmak amacıyla nano-kaplama teknolojileri, düşük kayıplı dielektrik malzemeler ve akıllı cam yüzeyler gibi yeni nesil çözümler üzerinde çalışmalar sürdürülmelidir.

Cam, metalden sonra en iyi RF performansı sergileyen malzemelerden biri olup, sinyal geçirgenliği ve yansıtıcılık dengesi sayesinde modern kablosuz haberleşme sistemlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle akıllı şehir uygulamaları, IoT cihaz entegrasyonu ve 5G haberleşme sistemleri açısından değerlendirildiğinde, cam malzemenin sinyal kaybını en aza indiren yapısal özellikleri kritik avantajlar sunmaktadır. Gelecekteki çalışmaların, yüksek frekans bandında cam yüzeylerin performansını artırmaya yönelik optimizasyonlar ve yeni malzeme tasarımlarına odaklanması, camın iletişim altyapılarında daha yaygın bir şekilde kullanılmasını sağlayacaktır.

Beton, tuğla ve ahşap gibi malzemeler, RF iletişim sistemlerinde genellikle sinyal kayıplarına yol açan yapılar olarak bilinse de, doğru teknolojiler ve malzeme mühendisliği ile bu malzemelerin etkisi azaltılabilir. Her malzeme, farklı frekans bantlarında ve koşullarda çeşitli performans özellikleri sergiler, bu yüzden optimal iletişim için doğru malzeme ve teknolojinin birleşimi gereklidir.

### **3.9 Beton ve Tuğla Malzemelerinin RF Performansına Etkisi**

- Beton: Yoğun yapısı nedeniyle yüksek sinyal emilimi yapar. Ancak düşük frekansta (2.5 GHz - 5.5 GHz) daha az emilim yaparak, bu frekans aralığında verimli iletişim sağlanabilir. Yüksek frekansta (24 GHz ve üzeri) ise sinyal kayıpları artar ve bu durum kısa mesafeli iletişimle sınırlı kalır.
  - Enerji Tüketimi: Beton, sinyal kaybı oluşturduğundan daha güçlü vericiler gerektirir, bu da enerji tüketimini artırır. Adaptif RF teknolojileri ile enerji verimliliği sağlanabilir.

- Tuğla: Tuğla da benzer şekilde, düşük frekansta (2.5 GHz - 5.5 GHz) verimli çalışırken, yüksek frekansta (24 GHz ve üzeri) önemli sinyal kayıplarına yol açar. Yüksek frekanslar için beamforming ve beam steering teknolojileri ile kayıplar minimize edilebilir.
  - Enerji Tüketimi: Tuğla, sinyal kayıpları nedeniyle daha güçlü vericiler gerektirebilir, bu da sistemin enerji tüketimini artırır. Ancak adaptif RF teknolojileri ile bu kayıplar azaltılabilir.

### 3.10 Ahşap Malzemesinin RF İletişim Sistemlerindeki Etkisi

- Ahşap: Ahşap, RF sinyallerini büyük ölçüde emen bir malzemedir. Bu nedenle, yüksek sinyal kaybı yaşanır ve ahşap yapıların RF iletişim altyapılarında kullanımı sınırlıdır. Düşük frekanslı sinyaller (2.5 GHz - 5.5 GHz) bu kayıpları minimize etmede daha etkilidir. Yüksek frekanslı sinyaller ise büyük ölçüde zayıflar.
  - Enerji Tüketimi: Ahşap yüzeylerden kaynaklanan kayıpları telafi etmek için güçlü vericilere ihtiyaç duyulur, bu da enerji tüketimini artırır. Bu kayıpları minimize etmek için adaptif RF sistemleri ve güç optimizasyon algoritmaları kullanılmalıdır.

### 3.11 Sinyal Gücünün ve Malzemelerin Kombinasyonu

Yapılan analizler, yüksek verici gücü ile düşük frekansların bir araya getirilmesinin, malzeme türünden bağımsız olarak en iyi sinyal iletim performansını sağladığını göstermektedir. Bu kombinasyon, sinyal kayıplarını minimize ederek daha kararlı bir iletişim altyapısı sunmaktadır. Özellikle düşük frekansların, malzemeler tarafından emilim oranının düşük olması nedeniyle, uzun mesafelerde daha etkin performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Ek olarak, beam steering (ışın yönlendirme) tekniklerinin, yansıtıcı malzemelerle sinyal gücünü artırmada kritik bir rol oynadığı belirlenmiştir. Metal ve cam gibi yüksek yansıtıcılığa sahip malzemeler üzerinde gerçekleştirilen testlerde, beam steering uygulamalarının sinyal gücünü optimize ettiği ve bu malzemelerle uyumlu çalıştığı görülmüştür. Bu durum, kentsel alanlarda yüksek yansıma koşullarının neden olduğu sinyal bozulmalarını azaltmak ve iletişim performansını artırmak için beam steering kullanımının önemini vurgulamaktadır.

- **Yüksek Verici Gücü ve Düşük Frekanslar:** 20 Watt verici gücü ve 2.5 GHz frekans aralığının kombinasyonu, sinyal kaybını minimize ederek daha kararlı bir iletişim altyapısı sağlamaktadır. Düşük frekanslar, malzemeler tarafından daha az emilir ve uzun mesafelerde daha etkili performans sergiler.
- **Beam Steering Tekniklerinin Rolü:** Beam steering teknikleri, yüksek yansıtıcılığa sahip malzemeler (metal, cam) üzerinde sinyal gücünü artırmada kritik bir rol oynamaktadır. Bu teknikler, yansıyan sinyallerin yönlendirilmesini optimize ederek, kentsel alanlardaki sinyal bozulmalarını azaltır.
  - **Düşük Frekansların Kullanımı:** Geniş kapsama alanı ve uzun mesafeli iletişim gereksinimleri için düşük frekanslar (2.5 GHz - 5.5 GHz) tercih edilmelidir. Bu frekans aralığı, malzeme emilimine karşı daha dayanıklıdır ve atmosferik zayıflamalara karşı da daha az hassastır.
  - **Beam Steering ve Anten Tasarımı:** Beam steering tekniklerinin optimize edilmesi, özellikle yoğun kentsel alanlarda iletişim kalitesini artırabilir. Anten yerleşimleri ve sinyal yansıtma özelliklerinin mühendislik çözümleriyle geliştirilmesi gerekmektedir.
  - **Yüksek Frekansların Kullanımı:** Yüksek frekanslar (24 GHz ve üzeri), kısa mesafeli iletişim ve gelişmiş yönlendirme tekniklerinin kullanıldığı sistemlerde daha verimli olabilir. Ancak, yüksek frekansların sinyal kayıplarını azaltmak için malzeme seçimi ve anten tasarımı daha hassas bir şekilde yapılmalıdır.

### 3.12 Yayılma Yolu Etkilerinin Sinyal Gücü Üzerindeki Analizi

Yayılma yolu senaryoları, sinyal iletim kalitesini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Analizler, farklı malzemelerin sinyal gücü üzerindeki etkilerini ve yayılma yollarının performansını incelemiştir.

- **Tek Yansıma Senaryoları:** Metal ve cam gibi yüksek yansıtıcılığa sahip malzemeler, sinyal kayıplarını minimize ederek etkili bir sinyal yayılımı sağlar. Bu malzemelerin kullanımı, sinyalin en yüksek alıcı gücünü elde etmesini mümkün kılmaktadır.

- İki Yansıma Senaryoları: Her bir yansıma sırasında sinyalin bir kısmı malzeme tarafından emilir veya çevreye dağılır. Bu, sinyal kayıplarının artmasına yol açmaktadır.
- Çoklu Yansıma ve Difraksiyon Senaryoları: İki yansıma ve bir difraksiyonun kombinasyonu, en fazla sinyal kaybına neden olmaktadır. Ahşap ve beton gibi malzemeler, sinyal kayıplarını artırırken, difraksiyon nedeniyle sinyal enerjisinin önemli ölçüde dağılması, alıcıya ulaşan sinyal gücünü ciddi şekilde azaltmaktadır.
- Yansıtıcı Malzemeler: Metal ve cam gibi malzemeler, tek yansıma senaryolarında sinyal iletiminin optimize edilmesine yardımcı olabilir. Bu malzemelerin iletişim altyapılarında bilinçli bir şekilde seçilmesi önerilmektedir.
- Beam Steering ve Adaptif Sinyal İşleme: İki yansıma ve difraksiyon içeren senaryolarda, beam steering ve adaptif sinyal işleme teknikleri, sinyal kayıplarını azaltmaya yardımcı olabilir. Bu teknikler, sinyalin yönlendirilmesini optimize ederek iletişim kalitesini artırabilir.
- Çoklu Yansıma ve Difraksiyon Senaryoları: Karmaşık yayılma yollarının etkisini daha ayrıntılı bir şekilde incelemek, sinyal iletimini iyileştirmek için önemlidir. Yapı malzemelerinin sinyal iletimine etkisini en aza indirecek stratejiler geliştirilmelidir.

Sonuç olarak, yayılma yolu senaryolarının analizi, RF sinyal iletiminin optimize edilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Özellikle yansıtıcı malzemelerin tek yansıma senaryolarında sunduğu avantajlar, bina içi ve dışı iletişim sistemlerinin daha verimli tasarlanmasına katkı sağlayabilir. Bu bulgular, gelecekteki iletişim altyapılarının tasarımında ve yapı malzemelerinin seçiminde önemli bir rehber niteliği taşımaktadır.

### **3.13 Beam Steering Teknolojisinin Sinyal Gücü Üzerindeki Etkisi**

Beam steering teknolojisinin sinyal kaybını azaltmadaki etkinliği, çeşitli yayılma senaryolarında detaylı olarak incelenmiştir. Bu teknoloji, özellikle karmaşık yayılma yollarında sinyal kayıplarını azaltma kapasitesine sahiptir.

- Tek Yansıma Senaryoları: Beam steering teknolojisi, sinyal kaybını belirgin bir şekilde azaltmıştır. Bu, sinyalin hassas bir şekilde yönlendirilmesini sağlamakta ve yüksek performans elde edilmesini mümkün kılmaktadır.
- İki Yansıma Senaryoları: Beam steering, yansıma senaryolarında da kayıpları önemli ölçüde azaltmıştır, bu da teknolojinin yönlendirme avantajlarının çoklu yüzeylerden gelen sinyallerle de korunduğunu göstermektedir.
- Difraksiyon Senaryoları: Daha karmaşık bir yayılma yolunda sinyal kayıpları gözlemlense de, beam steering teknolojisi bu kayıpları önemli ölçüde azaltmıştır. Yüksek frekanslarda (24 GHz ve üzeri), beam steering'in etkisi daha belirgin olmuştur.
- Yüksek Frekanslı İletişim Sistemlerinde Beam Steering: Beam steering, özellikle 24 GHz ve üzeri frekanslarda sinyal kaybını azaltmada etkili bir çözüm sunmaktadır. Bu frekans aralığında yüksek performans sağlamak için beam steering teknolojisinin entegrasyonu önemlidir.
- İleri Yönlendirme Algoritmalarının Geliştirilmesi: Beam steering teknolojisinin daha karmaşık yayılma yollarında daha verimli çalışması için ileri yönlendirme algoritmalarının geliştirilmesi gerekmektedir.
- Adaptif Sinyal İşleme ve MIMO Teknolojileri: Beam steering'in adaptif filtreleme ve MIMO sistemleri gibi diğer sinyal optimizasyon teknikleriyle entegrasyonu, sinyal performansını artırabilir.
- Çevresel Koşullara Göre Performans Testleri: Farklı malzeme türleri ve çevresel koşullar altında beam steering'in performansını test etmek, teknolojinin geniş bir perspektifle değerlendirilmesi açısından önemlidir.

Beam steering teknolojisi, RF sinyal kayıplarını azaltmak ve iletişim ağlarının performansını optimize etmek için güçlü bir araçtır. Özellikle yüksek frekanslı uygulamalarda, beam steering iletişim altyapılarının etkinliğini artırmakta kritik bir rol oynamaktadır. Bu teknoloji, gelecekteki kablosuz iletişim sistemlerinin tasarımında önemli bir yer tutacak ve iletişim altyapılarının verimliliğini artıracaktır.

### 3.14 Optimizasyon

Kablosuz iletişim sistemlerinde alınan sinyal gücünün (received power,  $P_r$ ) maksimize edilmesi problemi, sistem performansının artırılması ve güvenilir haberleşmenin sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, verilen genel alıcı gücü formülü aşağıdaki şekildedir:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - PL(f, d, A, L_r, L_w) + G_{bs}$$

Burada:

- $P_t$ : Verici gücü (dBm)
- $G_t, G_r$ : Sırasıyla verici ve alıcı anten kazançları (dB)
- $PL(f, d, A, L_r, L_w)$ : Frekans ( $f$ ), mesafe ( $d$ ), malzeme zayıflaması ( $A$ ), yansıma kaybı ( $L_r$ ) ve hava durumu kaynaklı kayıpları ( $L_w$ ) içeren yol kaybı (path loss)
- $G_{bs}$ : Işın yönlendirme kazancı (dB)

Bu formülasyonda verilen optimizasyon yaklaşımları, alınan gücü maksimize etmek amacıyla belirlenen parametrelerin etkili yönetimini içermektedir.

İlk adımda, frekans seçimi, iletim mesafesi ve ortam koşullarıyla uyumlu bir şekilde belirlenir. Düşük frekanslar daha uzun mesafelerde geçiş sağlar, ancak daha fazla yansıma kaybına yol açabilir. Yüksek frekanslar ise daha kısa mesafelerde verimli olabilir, fakat hava kayıpları ve malzeme zayıflamaları gibi faktörlerle daha fazla kayba yol açabilir. Bu nedenle, frekans aralığı üzerinde yapılan denemelerle, en uygun geçiş koşulları sağlanır.

Mesafe faktörü de önemli bir parametre olup, sinyal kayıplarını doğrudan etkiler. Mesafe arttıkça, sinyal zayıflar ve bu zayıflamanın etkisi, malzemenin zayıflama katsayısına ve çevresel faktörlere göre değişir. Malzeme zayıflaması, sinyalin geçeceği ortamın özelliklerine bağlı olarak belirlenir. Beton, tuğla ve ahşap gibi malzemeler daha yüksek kayıplara yol açarken, cam ve metal gibi malzemeler daha düşük kayıplarla iletişimi sürdürür.

Yansıma kaybı da, özellikle karmaşık yayılma ortamlarında önemli bir faktördür. Sinyalin çevresindeki yüzeylerden yansması, kayıplara neden olur ve bu kayıplar,

çevredeki malzemelerin ve yüzeylerin özelliklerine bağlı olarak değişir. Bu kayıplar, ışın yönlendirme teknolojileriyle (beam steering) azaltılabilir. Beam steering teknolojisi, sinyalin doğru hedefe yönlendirilmesini sağlayarak, yansımalarından kaynaklanan kayıpları minimize eder ve böylece iletişim verimliliği artar.

Hava kaybı, yüksek frekanslarda özellikle önemlidir ve atmosferdeki koşullara bağlı olarak değişir. Yüksek frekanslı sinyaller, nem, yağmur ve diğer hava koşullarından daha fazla etkilenir, bu nedenle hava kayıpları dikkate alınarak uygun frekans aralıkları belirlenmelidir.

Son olarak, ışın yönlendirme kazancı (beamforming), çoklu yansıma yollarında ve karmaşık ortam koşullarında kayıpların azaltılmasında etkili bir teknoloji olarak devreye girer. Beamforming, sinyali hedefe yönlendirerek, sinyal kaybını önemli ölçüde azaltabilir ve alıcıda daha yüksek güç elde edilmesini sağlar.

Bu parametrelerin her biri üzerinde yapılan yinelemelerle, en yüksek alıcı gücünü elde etmek için ideal bir yapılandırma bulunabilir. Yineleme süreci, farklı kombinasyonların test edilmesi ve sonuçların analiz edilmesiyle devam eder. Böylece, her parametrenin optimal değeri bulunur ve kablosuz iletişim sisteminin verimliliği artırılır.

### **3.14.1 Frekansın Minimize Edilmesi**

Frekansın azaltılması, dalga boyunun uzamasına ve böylelikle yayılma ortamında karşılaşılan zayıflamanın azalmasına yol açar. Bu, özellikle uzun mesafeli iletişimlerde frekans seçiminde düşük bantların tercih edilmesini teşvik eder. Ancak düşük frekansların sınırlı bant genişliği sunduğu ve veri iletim hızını azaltabileceği gerçeği göz ardı edilmemelidir. Bu nedenle, haberleşme sisteminde kullanım amacı, veri hızı gereksinimi ve uygulama alanı göz önüne alınarak optimum frekans dengesi sağlanmalıdır.

### **3.14.2 Verici Gücünün Maksimize Edilmesi**

Verici gücünün artırılması, alıcıda algılanan sinyal seviyesini doğrudan artırarak sistemin kapsama alanını genişletebilir. Bununla birlikte, yüksek verici gücü, enerji tüketimini artırarak enerji verimliliğini düşürmekte ve elektromanyetik çevre kirliliğine (EM kirlilik) neden olmaktadır. Bu durum, sistem tasarımında verici gücünün çevresel ve enerji verimliliği açısından optimal bir seviyede tutulmasını gerektirir.

### **3.14.3 Anten Yüksekliğinin Optimize Edilmesi**

Anten yüksekliğinin artırılması, görüş hattı (Line-of-Sight, LoS) koşullarının iyileştirilmesine ve dolayısıyla sinyal yayılımının daha geniş bir alana yayılmasına olanak sağlar. Buna karşılık, aşırı yükseklik artışı çoklu yol yayılımı (multipath propagation), yansıma ve kırınım etkilerini artırabilir. Optimal anten yüksekliği seçimi, çevresel koşullar ve antenin kurulum yerindeki fiziksel özellikler dikkate alınarak belirlenmelidir.

### **3.14.4 Düşük Zayıflama Faktörlü Malzemelerin Kullanımı**

Malzeme zayıflama faktörünün düşürülmesi, alınan sinyal gücünü doğrudan artıran etkili bir yöntemdir. İletişim ortamında metal ve cam gibi düşük kayıplı malzemeler tercih edilirken, tuğla, ahşap ve beton gibi yüksek zayıflama faktörüne sahip malzemelerden kaçınılması gereklidir. Malzeme seçimi, çevresel koşullar ve sistemin yerleştirildiği fiziksel ortamın özelliklerine göre özenle yapılmalıdır.

### **3.14.5 Yansıma Kaybının Optimize Edilmesi**

Yansıma kayıplarının azaltılması için tek yansıma yollarının tercih edilmesi, iletişim performansını önemli ölçüde artırabilir. Çoklu yansımanın kaçınılmaz olduğu durumlarda ise yansıma sayısını minimize etmek adına ortam koşullarının uygun malzeme seçimi ve anten yönlendirmesi ile iyileştirilmesi gerekir.

### **3.14.6 Işın Yönlendirme Kazancı (Beam Steering) Kullanımı**

Işın yönlendirme teknolojisi, anten dizilerini kullanarak sinyali belirli bir doğrultuda yönlendirmek ve dolayısıyla alıcıdaki sinyal gücünü artırmak için etkili bir yöntemdir. Bu yöntem, özellikle karmaşık ve çoklu yol yayılım ortamlarında performansı önemli ölçüde iyileştirir.

### **3.14.7 Optimizasyon Algoritması**

Optimum parametre konfigürasyonunun bulunması için sunulan algoritmik yaklaşım, frekans, mesafe, malzeme zayıflaması, yansıma kaybı ve ışın yönlendirme kazancının sistematik olarak taranmasına dayanır. Bu yaklaşım, maksimum alınan güç değerinin belirlenmesi için etkin ve kapsamlı bir yöntemdir.

Verilen formüller ve optimizasyon yöntemleri, kablosuz iletişim sistemlerinde alınan sinyal gücünü maksimize etmek için etkin bir analiz ve optimizasyon çerçevesi sunmaktadır. Parametrelerin her biri, çevresel ve operasyonel kısıtlamalar gözetilerek dikkatle optimize edilmelidir. Optimizasyonun etkinliği, gerçek ortam koşullarının dikkatli bir şekilde incelenmesine ve parametrelerin karşılıklı etkileşimlerinin hesaba katılmasına bağlıdır. Bu bağlamda, uygulama odaklı simülasyonlar ve saha deneyleri, önerilen teorik çerçevenin etkinliğini doğrulamak açısından kritik önem taşımaktadır.

## SONUÇLAR

Bu çalışmada, yoğun kentsel ortamlarda 5G kablosuz iletişim sistemlerinde enerji verimliliğinin optimizasyonu konusu, çeşitli analitik değerlendirmeler ve simülasyon çalışmaları ile ele alınmıştır. Frekans seçimi, anten yüksekliği, verici gücü, materyal özellikleri, yayılma yolları ve beam steering teknolojileri gibi farklı parametrelerin etkileşimli bir şekilde incelenmesiyle, enerji verimliliğini en üst düzeye çıkaracak stratejiler belirlenmiştir. Bu kapsamda yapılan analizler sonucunda elde edilen temel bulgular ve öneriler aşağıda ayrıntılı olarak sunulmuştur.

Çalışmamda elde edilen bulgular, literatürdeki benzer çalışmalara paralel sonuçlar sunmaktadır. Özellikle Acarer (2023) tarafından yapılan çalışmada da, 5G kablosuz iletişim sistemlerinde enerji verimliliği optimizasyonu için kullanılan yöntemlerin ve parametrelerin etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Acarer'in çalışmasında, anten konfigürasyonları, beamforming teknikleri ve frekans seçimlerinin haberleşme sistemleri üzerindeki etkileri vurgulanmış ve bu unsurların enerji verimliliğini artırmada önemli rol oynadığı gösterilmiştir.

Benzer şekilde, benim çalışmamda da enerji verimliliği stratejilerinin belirlenmesinde anten yüksekliği, verici gücü ve çevresel faktörler gibi parametreler önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle beam steering teknolojilerinin enerji verimliliğini optimize etmekteki rolü, her iki çalışmada da benzer bulgularla desteklenmiştir. Bu benzerlikler, enerji verimliliği optimizasyonu alanındaki yöntemlerin ve parametrelerin farklı bağlamlarda (kentsel ortamlar ve deniz haberleşmesi gibi) benzer şekilde etkin olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, literatürdeki bu benzer çalışmalar, 5G sistemlerinin enerji verimliliği açısından çeşitli çevresel faktörlere göre nasıl optimize edilebileceğine dair geniş bir anlayış sunmakta ve benim çalışmam da bu anlayışı kentsel ortamlar bağlamında genişleterek katkı sağlamaktadır.

Yoğun kentsel ortamlarda frekans seçiminin enerji verimliliği üzerindeki etkisi kritik düzeyde bulunmuştur. Düşük frekansların (2,5 GHz – 5,5 GHz), yoğun yapılaşma ve çevresel koşullar altında sinyal penetrasyonunu iyileştirerek daha kararlı ve enerji verimli iletişim sağladığı belirlenmiştir. Yüksek frekanslar (24 GHz ve üzeri) ise daha yüksek veri hızları sunsa da bina içi ve dışı iletişimde sinyal kayıplarını ciddi ölçüde artırarak enerji tüketimini yükseltmektedir. Bu nedenle, düşük frekanslı sistemlerin, genel kentsel iletişim ağlarında daha fazla kullanılması gerektiği önerilmektedir.

Yoğun kentsel ortamlarda anten yüksekliklerinin artırılması, sinyal kapsama alanını genişleterek enerji verimliliğini artırmaktadır. Ancak, anten yüksekliğinin aşırı artırılması, yansıma ve çoklu yol etkilerinin artmasına yol açmaktadır. Bu nedenle anten yüksekliklerinin, binaların ortalama yüksekliği ve çevresel yapılandırma göz önüne alınarak optimize edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Verici gücü, yoğun şehir ortamlarında doğrudan enerji tüketimini etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Çalışmada, verici gücünün dengeli bir şekilde artırılarak kapsama alanının iyileştirilebileceği ancak aşırı güç kullanımının elektromanyetik çevre kirliliğini artıracığı tespit edilmiştir. Optimal güç seviyelerinin belirlenmesi için adaptif güç kontrol sistemlerinin kullanımı önerilmektedir.

Kentsel ortamlarda kullanılan yapı malzemelerinin RF sinyal yayılımına etkileri kapsamlı olarak incelenmiştir. Metal ve cam yüzeylerin yüksek yansıtıcılık özellikleri ile enerji verimliliğini artırdığı gözlemlenmiştir. Beton, tuğla ve ahşap gibi malzemeler ise yüksek sinyal emilimi nedeniyle daha fazla enerji tüketimi gerektirmektedir. Bu nedenle, iletişim altyapılarında metal ve cam gibi malzemelerin stratejik kullanımının enerji tasarrufuna önemli katkılar sağlayacağı belirlenmiştir.

Yoğun kentsel alanlarda, farklı yayılma senaryolarının enerji verimliliği üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Tek yansıma senaryolarında, özellikle metal ve cam yüzeylerin kullanılmasıyla sinyal performansının önemli ölçüde iyileştiği belirlenmiştir. Çoklu yansıma ve difraksiyon durumlarında ise enerji kayıplarının arttığı ve beam steering teknolojileri ile bu kayıpların minimize edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Beam steering teknolojisinin yoğun kentsel alanlarda etkin kullanımı, sinyalin doğru hedeflere yönlendirilerek enerji verimliliğinin artırılmasında büyük önem taşımaktadır. Bu teknolojinin, özellikle yüksek frekans bandında ve çoklu yol

yayılımının yoğun olduğu alanlarda daha etkin sonuçlar sağladığı tespit edilmiştir. Beam steering sistemlerinin daha da geliştirilmesi ve adaptif algoritmalarla entegre edilmesi, enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik önemli bir strateji olarak önerilmektedir.

Yoğun kentsel bölgelerde ağ dilimleme (network slicing) ve uç bilişim (edge computing) teknolojileri, kaynak kullanımının optimize edilmesi ve enerji tüketiminin düşürülmesi açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Ağ dilimleme sayesinde uygulama bazlı enerji optimizasyonu sağlanırken, uç bilişim veri işleme yükünü merkezden dağıtarak enerji maliyetlerini önemli ölçüde azaltmaktadır.

Kentsel planlama ve telekomünikasyon altyapısının entegre edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Yoğun kentsel ortamlarda şehir planlaması ve telekomünikasyon altyapılarının entegrasyonu, kapsama alanının genişletilmesi ve enerji verimliliğinin artırılması için gerekli görülmektedir. Bu entegrasyonun disiplinler arası yaklaşımla gerçekleştirilmesi, sürdürülebilir kentsel gelişim açısından kritik önem taşımaktadır.

Anten yüksekliği, 10 metreye çıktığında alıcı gücünün önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Bu, daha yüksek anten konumlarının sinyalin daha geniş bir alana dağılmasına yardımcı olduğunu ve daha güçlü bir alıcı gücü sağladığını işaret eder.

Verici gücü de alıcı gücünü doğrudan etkileyen bir diğer önemli faktördür. Güç arttıkça alıcı gücü de yükselir ve en iyi sonuç, 20 Watt'lık bir güç ile elde edilmiştir.

Frekans, alıcı gücü üzerinde önemli bir rol oynar; düşük frekanslar (örneğin, 2.5 GHz) daha yüksek alıcı gücü sağlarken, yüksek frekanslar (24 GHz ve üzeri) alıcı gücünü düşürmektedir.

Malzeme etkisi de sinyal iletimi üzerinde belirleyici bir rol oynar; metal ve cam gibi malzemeler sinyal kaybını minimize ederken, ahşap ve beton gibi malzemeler daha fazla kayba neden olmaktadır.

Yansıma yolları ise, alıcı gücünü etkileyen bir başka faktördür. Tek yansıma durumunda alıcı gücü en yüksek seviyede iken, iki yansıma ve bir difraksiyon kombinasyonunda kayıplar belirgin şekilde artmaktadır.

Son olarak, beam steering teknolojisi kullanıldığında yansıma kayıplarını azaltarak alıcı gücünü artırmaktadır. Bu faktörler bir arada değerlendirildiğinde, alıcı gücünün optimizasyonu için önemli parametreler olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak, yoğun kentsel ortamlarda 5G kablosuz iletişim sistemlerinin enerji verimliliğini artırmak için; frekans yönetimi, anten yüksekliği ve gücü, malzeme kullanımı, yayılma yolları, beam steering teknolojileri, ağ dilimleme ve uç bilişim gibi çok yönlü ve etkileşimli optimizasyon stratejileri benimsenmelidir. Gelecekteki çalışmaların bu stratejilere odaklanarak daha sürdürülebilir ve enerji verimli çözümler geliştirmesi önerilmektedir.



## EKLER A

**Tablo A.1: 2m Anten Yüksekliği ve 5W Güçle Materyal, Frekans, Yansıtma Yolları ve Işın Yönlendirilmesinin Alınan Güç (dBm) Üzerindeki Etkisi**

Materyal	Yansıtma Yolu	Işın Yönlendirme	Verici Anten		Frekans (GHz) ve Alınan Güç (dBm) (-)													
			Güçü	2 m	5 watt	2.5 GHz	3.5 GHz	3.7 GHz	4.2 GHz	5.5 GHz	24 GHz	28 GHz	36 GHz	37 GHz	39 GHz	47 GHz	66 GHz	81 GHz
Tuğla	Tek Yansıtma	Hayır	57.538	58.024	59.130	61.479	74.286	75.625	77.808	78.046	78.503	80.124	83.073	84.852				
Ahşap	Tek Yansıtma	Hayır	60.377	60.860	61.960	64.301	77.091	78.429	80.611	80.849	81.306	82.925	85.872	87.650				
Cam	Tek Yansıtma	Hayır	55.086	55.569	56.670	59.012	71.808	73.147	75.329	75.567	76.024	77.645	80.593	82.372				
Beton	Tek Yansıtma	Hayır	55.755	56.238	57.341	59.687	72.497	73.837	76.022	76.260	76.717	78.339	81.290	83.069				
Metal	Tek Yansıtma	Hayır	47.249	47.732	48.833	51.176	63.976	65.315	67.499	67.737	68.194	69.816	72.766	74.546				
Metal	İki Yansıtma	Hayır	50.756	46.235	41.946	59.758	57.833	59.800	63.948	84.142	69.705	63.628	66.997	71.212				
Metal	İki Yansıtma ve Bir Kırınım	Hayır	50.496	42.987	40.910	51.720	58.819	58.567	63.444	75.670	71.755	64.168	67.524	71.376				
Metal	Tek Yansıtma	Evet	25.749	26.232	27.334	29.684	43.143	44.657	47.202	47.484	48.027	49.964	53.627	55.432				
Metal	İki Yansıtma	Evet	50.496	25.773	20.997	37.640	36.768	38.727	42.830	64.440	49.470	42.623	45.988	50.196				
Metal	İki Yansıtma ve Bir Kırınım	Evet	31.278	33.586	28.152	45.155	44.901	46.388	50.816	69.044	56.572	49.908	54.786	58.324				

**Tablo A.2: 2m Anten Yüksekliği ve 10W Güçle Materyal, Frekans, Yansıtma Yolları ve Işın Yönlendirilmesinin Alman Güç (dBm) Üzerindeki Etkisi**

Materyal	Yansıtma Yolu	Işın Yönlendirilme	Verici Anten		Frekans (GHz) ve Alman Güç (dBm) (-)										
			Güçü	10 watt	2.5 GHz	3.5 GHz	3.7 GHz	4.2 GHz	5.5 GHz	24 GHz	28 GHz	36 GHz	37 GHz	39 GHz	47 GHz
Tuğla	Tek Yansıtma	Hayır	51.582	54.528	55.013	56.119	58.469	71.276	72.615	74.798	75.036	75.493	77.114	80.063	81.842
Ahşap	Tek Yansıtma	Hayır	54.446	57.367	57.849	58.950	61.291	74.081	75.419	77.600	77.838	78.295	79.915	82.862	84.639
Cam	Tek Yansıtma	Hayır	49.153	52.076	52.558	53.659	56.001	68.797	70.136	72.319	72.557	73.014	74.635	77.583	79.362
Beton	Tek Yansıtma	Hayır	49.817	52.745	53.228	54.331	56.676	69.487	70.827	73.011	73.250	73.707	75.329	78.279	80.059
Metal	Tek Yansıtma	Hayır	41.316	44.239	44.722	45.823	48.166	60.965	62.305	64.489	64.727	65.184	66.805	69.756	71.536
Metal	İki Yansıtma	Hayır	33.621	47.745	43.224	38.936	56.748	54.823	56.789	60.938	81.132	66.695	60.618	63.986	68.201
Metal	İki Yansıtma ve Bir Kırınım	Hayır	32.829	47.486	39.977	37.900	48.710	55.809	55.557	60.434	72.659	68.745	61.158	64.513	68.365
Metal	Tek Yansıtma	Evet	19.814	22.738	23.221	24.324	26.674	40.133	41.647	44.192	44.474	45.016	46.954	50.616	52.422
Metal	İki Yansıtma	Evet	12.549	28.268	22.763	17.986	34.630	33.758	35.717	39.819	61.430	46.460	39.613	42.977	47.185
Metal	İki Yansıtma ve Bir Kırınım	Evet	19.119	34.786	30.576	25.141	42.145	41.891	43.378	47.805	66.033	53.562	46.898	51.776	55.314

**Tablo A.3: 2m Anten Yüksekliği ve 20W Güçle Materyal, Frekans, Yansıtma Yolları ve Işın Yönlendirmesinin Alınan Güç (dBm) Üzerindeki Etkisi**

Materyal	Yansıtma Yolu	Işın Yönlendirme	Verici Anten		Frekans (GHz) ve Alınan Güç (dBm) (-)													
			Yüksekliği	Güçü	2.5 GHz	3.5 GHz	3.7 GHz	4.2 GHz	5.5 GHz	24 GHz	28 GHz	36 GHz	37 GHz	39 GHz	47 GHz	66 GHz	81 GHz	
Tuğla	Tek Yansıtma	Hayır	2 m	20 watt	48.572	51.518	52.003	53.109	55.459	68.265	69.604	71.787	72.025	72.483	74.103	77.052	78.831	
Alışıp	Tek Yansıtma	Hayır			51.435	54.357	54.839	55.940	58.281	71.071	72.409	74.590	74.828	75.285	76.905	79.851	81.629	
Cam	Tek Yansıtma	Hayır			46.143	49.065	49.548	50.649	52.991	65.787	67.126	69.309	69.547	70.004	71.624	74.573	76.351	
Beton	Tek Yansıtma	Hayır			46.807	49.734	50.218	51.320	53.666	66.477	67.817	70.001	70.239	70.697	72.318	75.269	77.049	
Metal	Tek Yansıtma	Hayır			38.306	41.229	41.712	42.813	45.155	57.955	59.295	61.478	61.716	62.174	63.795	66.745	68.525	
Metal	İki Yansıtma	Hayır			30.611	44.735	40.214	35.925	53.738	51.813	53.779	57.928	78.122	63.684	57.608	60.976	65.191	
Metal	İki Yansıtma ve Bir Kırınım	Hayır			29.818	44.476	36.966	34.889	45.699	52.798	52.547	57.423	69.649	65.734	58.148	61.503	65.355	
Metal	Tek Yansıtma	Evet			16.804	19.728	20.211	21.313	23.663	37.122	38.636	41.182	41.463	42.006	43.944	47.606	49.412	
Metal	İki Yansıtma	Evet			9.538	25.258	19.752	14.976	31.620	30.747	32.707	36.809	58.419	43.450	36.603	39.967	44.175	
Metal	İki Yansıtma ve Bir Kırınım	Evet			16.109	31.776	27.565	22.131	39.135	38.881	40.368	44.795	63.023	50.551	43.888	48.766	52.304	

**Tablo A.4: 5m Anten Yüksekliği ve 5W Güçle Materyal, Frekans, Yansıtma Yolları ve Işın Yönlendirilmesinin Alınan Güç (dBm) Üzerindeki Etkisi**

Materyal	Yansıtma Yolu	Işın Yönlendirme	Verici Anten		Frekans (GHz) ve Alınan Güç (dBm) (-)												
			Yüksekliği	Güçü	2.5 GHz	3.5 GHz	3.7 GHz	4.2 GHz	5.5 GHz	24 GHz	28 GHz	36 GHz	37 GHz	39 GHz	47 GHz	66 GHz	81 GHz
Tuğla	Tek Yansıtma	Hayır	5m	5 watt	54.381	57.327	57.812	58.918	61.267	74.074	75.413	77.596	77.834	78.291	79.912	82.861	84.640
Ahşap	Tek Yansıtma	Hayır	5m	5 watt	57.199	60.120	60.603	61.703	64.044	76.834	78.173	80.354	80.592	81.049	82.668	85.615	87.393
Cam	Tek Yansıtma	Hayır	5m	5 watt	52.008	54.931	55.414	56.514	58.857	71.653	72.991	75.174	75.412	75.869	77.490	80.438	82.217
Beton	Tek Yansıtma	Hayır	5m	5 watt	52.657	55.584	56.068	57.170	59.516	72.326	73.666	75.851	76.089	76.546	78.168	81.119	82.898
Metal	Tek Yansıtma	Hayır	5m	5 watt	44.336	47.259	47.742	48.843	51.186	63.985	65.325	67.508	67.746	68.204	69.825	72.776	74.555
Metal	İki Yansıtma	Hayır	5m	5 watt	44.195	39.420	43.259	48.275	50.423	62.898	60.797	66.491	63.072	76.124	66.845	72.975	75.072
Metal	İki Yansıtma ve Bir Kırınım	Hayır	5m	5 watt	49.484	38.904	43.762	50.460	47.623	63.324	60.590	66.570	63.683	70.353	64.517	73.961	72.401
Metal	Tek Yansıtma	Evet	5m	5 watt	22.834	25.758	26.241	27.343	29.693	43.153	44.667	47.212	47.494	48.037	49.975	53.638	55.444
Metal	İki Yansıtma	Evet	5m	5 watt	23.782	18.400	22.182	27.823	29.385	42.286	39.681	45.701	42.109	57.275	45.806	52.078	54.171

**Tablo A.5: 5m Anten Yüksekliği ve 10W Güçle Materyal, Frekans, Yansıtma Yolları ve Işın Yönlendirilmesinin Alman Güç (dBm) Üzerindeki Etkisi**

Materyal	Yansıtma Yolu	Işın Yönlendirme	Verici Anten		Frekans (GHz) ve Alman Güç (dBm) (-)										
			Güçü	10 watt	2.5 GHz	3.5 GHz	3.7 GHz	4.2 GHz	5.5 GHz	24 GHz	28 GHz	36 GHz	37 GHz	39 GHz	47 GHz
Tuğla	Tek Yansıtma	Hayır	51.370	54.316	54.801	55.907	58.257	71.063	72.402	74.585	74.823	75.281	76.901	79.850	81.629
Ahşap	Tek Yansıtma	Hayır	54.189	57.110	57.593	58.693	61.034	73.824	75.162	77.344	77.582	78.039	79.658	82.605	84.383
Cam	Tek Yansıtma	Hayır	48.998	51.921	52.403	53.504	55.846	68.642	69.981	72.164	72.402	72.859	74.479	77.428	79.207
Beton	Tek Yansıtma	Hayır	49.646	52.574	53.057	54.160	56.506	69.316	70.656	72.840	73.078	73.536	75.158	78.108	79.888
Metal	Tek Yansıtma	Hayır	41.326	44.249	44.732	45.833	48.175	60.975	62.314	64.498	64.736	65.194	66.815	69.765	71.545
Metal	İki Yansıtma	Hayır	41.185	36.410	40.249	45.264	47.412	59.887	57.787	63.481	60.062	73.113	63.835	69.964	72.061
Metal	İki Yansıtma ve Bir Kirinim	Hayır	46.474	35.894	40.752	47.450	44.613	60.313	57.580	63.559	60.673	67.342	61.506	70.951	69.391
Metal	Tek Yansıtma	Evet	19.824	22.747	23.230	24.333	26.683	40.142	41.657	44.202	44.484	45.027	46.965	50.628	52.433
Metal	İki Yansıtma	Evet	20.771	15.389	19.172	24.812	26.375	39.276	36.671	42.690	39.099	54.265	42.796	49.068	51.160
Metal	İki Yansıtma ve Bir Kirinim	Evet	27.301	22.085	30.020	40.201	29.717	48.428	44.790	49.994	45.645	57.636	49.748	56.626	58.365

**Tablo A.6: 5m Anten Yüksekliği ve 20W Güçle Materyal, Frekans, Yansıtma Yolları ve Işın Yönlendirmesinin Alınan Güç (dBm) Üzerindeki Etkisi**

Verici Anten Yüksekliği	5 m	Işın Yönlendirme	Verici Anten Gücü		Frekans (GHz) ve Alınan Güç (dBm) (-)													
			2.5 GHz	3.5 GHz	3.7 GHz	4.2 GHz	5.5 GHz	24 GHz	28 GHz	36 GHz	37 GHz	39 GHz	47 GHz	66 GHz	81 GHz			
Tuğla	Tek Yansıtma	Hayır	48.360	51.306	51.791	52.897	55.246	68.053	69.392	71.575	71.813	72.270	73.891	76.840	78.619			
Ahşap	Tek Yansıtma	Hayır	51.179	54.100	54.582	55.683	58.024	70.814	72.152	74.333	74.571	75.028	76.648	79.595	81.372			
Cam	Tek Yansıtma	Hayır	45.988	48.910	49.393	50.494	52.836	66.971	66.971	69.153	69.391	69.849	71.469	74.418	76.196			
Beton	Tek Yansıtma	Hayır	46.636	49.563	50.047	51.150	53.495	66.306	67.646	69.830	70.068	70.526	72.147	75.098	76.878			
Metal	Tek Yansıtma	Hayır	38.316	41.239	41.721	42.822	45.165	57.965	59.304	61.488	61.726	62.183	63.805	66.755	68.535			
Metal	İki Yansıtma	Hayır	38.174	33.400	37.238	42.254	44.402	56.877	54.777	60.471	57.052	70.103	60.824	66.954	69.051			
Metal	İki Yansıtma ve Bir Kırınım	Hayır	43.463	32.884	37.741	44.440	41.603	57.303	54.570	60.549	57.663	64.332	58.496	67.941	66.381			
Metal	Tek Yansıtma	Evet	16.813	19.737	20.220	21.322	23.672	37.132	38.646	41.192	41.473	42.016	43.954	47.617	49.423			
Metal	İki Yansıtma	Evet	17.761	12.379	16.162	21.802	23.365	36.266	33.661	39.680	36.089	51.255	39.786	46.057	48.150			
Metal	İki Yansıtma ve Bir Kırınım	Evet	24.291	19.075	27.010	37.191	26.707	45.418	41.779	46.984	42.635	54.625	46.738	53.616	55.355			

**Tablo A.7: 10m Anten Yüksekliği ve 5W Güçle Materyal, Frekans, Yansıtma Yolları ve Işın Yönlendirmesinin Alınan Güç (dBm) Üzerindeki Etkisi**

Materyal	Yansıtma Yolu	10 m Işın Yönlendirme	Verici Anten Gücü 5 watt										Frekans (GHz) ve Alınan Güç (dBm) (-)															
			2.5 GHz	3.5 GHz	3.7 GHz	4.2 GHz	5.5 GHz	24 GHz	28 GHz	36 GHz	37 GHz	39 GHz	47 GHz	66 GHz	81 GHz	2.5 GHz	3.5 GHz	3.7 GHz	4.2 GHz	5.5 GHz	24 GHz	28 GHz	36 GHz	37 GHz	39 GHz	47 GHz	66 GHz	81 GHz
Tuğla	Tek Yansıtma	Hayır	54.057	57.003	57.488	58.594	60.943	73.749	75.088	77.271	77.509	77.966	79.587	82.536	84.315	54.057	57.003	57.488	58.594	60.943	73.749	75.088	77.271	77.509	77.966	79.587	82.536	84.315
Ahşap	Tek Yansıtma	Hayır	56.798	59.719	60.202	61.302	63.643	76.433	77.772	79.953	80.191	80.648	82.267	85.214	86.992	56.798	59.719	60.202	61.302	63.643	76.433	77.772	79.953	80.191	80.648	82.267	85.214	86.992
Cam	Tek Yansıtma	Hayır	51.774	54.696	55.179	56.280	58.622	71.418	72.757	74.940	75.178	75.635	77.255	80.204	81.982	51.774	54.696	55.179	56.280	58.622	71.418	72.757	74.940	75.178	75.635	77.255	80.204	81.982
Beton	Tek Yansıtma	Hayır	52.398	55.325	55.808	56.911	59.257	72.067	73.406	75.591	75.829	76.287	77.908	80.859	82.638	52.398	55.325	55.808	56.911	59.257	72.067	73.406	75.591	75.829	76.287	77.908	80.859	82.638
Metal	Tek Yansıtma	Hayır	44.366	47.289	47.772	48.873	51.216	64.015	65.355	67.538	67.776	68.234	69.855	72.805	74.585	44.366	47.289	47.772	48.873	51.216	64.015	65.355	67.538	67.776	68.234	69.855	72.805	74.585
Metal	İki Yansıtma	Hayır	42.405	43.499	48.076	46.862	46.873	74.949	61.924	67.064	65.379	65.161	67.407	71.285	83.867	42.405	43.499	48.076	46.862	46.873	74.949	61.924	67.064	65.379	65.161	67.407	71.285	83.867
Metal	İki Yansıtma ve Bir Kurunum	Hayır	43.679	41.691	48.111	46.592	51.604	78.747	61.748	64.835	64.952	66.031	66.592	70.845	81.405	43.679	41.691	48.111	46.592	51.604	78.747	61.748	64.835	64.952	66.031	66.592	70.845	81.405
Metal	Tek Yansıtma	Evet	22.895	25.818	26.301	27.404	29.754	43.215	44.730	47.277	47.558	48.102	50.041	53.706	55.512	22.895	25.818	26.301	27.404	29.754	43.215	44.730	47.277	47.558	48.102	50.041	53.706	55.512
Metal	İki Yansıtma	Evet	20.968	22.067	26.627	25.425	25.443	53.238	40.494	45.625	43.947	43.731	45.976	49.854	62.311	20.968	22.067	26.627	25.425	25.443	53.238	40.494	45.625	43.947	43.731	45.976	49.854	62.311
Metal	İki Yansıtma ve Bir Kurunum	Evet	27.311	28.371	32.944	33.421	35.606	63.009	48.603	51.134	50.679	52.743	53.559	56.794	67.672	27.311	28.371	32.944	33.421	35.606	63.009	48.603	51.134	50.679	52.743	53.559	56.794	67.672

**Tablo A.8: 10m Anten Yüksekliği ve 10W Güçle Materyal, Frekans, Yansıtma Yolları ve Işın Yönlendirmesinin Alınan Güç (dBm) Üzerindeki Etkisi**

Materyal	Yansıtma Yolu	Işın Yönlendirme	Verici Anten		Frekans (GHz) ve Alınan Güç (dBm) (-)												
			Yüksekliği	Güçü	2.5 GHz	3.5 GHz	3.7 GHz	4.2 GHz	5.5 GHz	24 GHz	28 GHz	36 GHz	37 GHz	39 GHz	47 GHz	66 GHz	81 GHz
Tuğla	Tek Yansıtma	Hayır	10 m	10 watt	51.047	53.992	54.477	55.583	57.932	70.739	72.078	74.261	74.499	74.956	76.577	79.526	81.305
Ahşap	Tek Yansıtma	Hayır			53.788	56.709	57.191	58.292	60.633	73.423	74.761	76.943	77.181	77.638	79.257	82.204	83.982
Cam	Tek Yansıtma	Hayır			48.764	51.686	52.169	53.270	55.612	68.408	69.747	71.929	72.167	72.624	74.245	77.194	78.972
Beton	Tek Yansıtma	Hayır			49.387	52.315	52.798	53.901	56.246	69.056	70.396	72.581	72.819	73.276	74.898	77.848	79.628
Metal	Tek Yansıtma	Hayır			41.356	44.279	44.762	45.863	48.205	61.005	62.344	64.528	64.766	65.223	66.845	69.795	71.575
Metal	İki Yansıtma	Hayır			39.395	40.488	45.066	43.852	43.863	71.939	58.914	64.054	62.368	62.151	64.396	68.275	80.856
Metal	İki Yansıtma ve Bir Kırınım	Hayır			40.669	38.680	45.101	43.582	48.594	75.736	58.738	61.825	61.942	63.021	63.582	67.834	78.394
Metal	Tek Yansıtma	Evet			19.884	22.808	23.291	24.393	26.744	40.205	41.720	44.266	44.548	45.091	47.030	50.696	52.502
Metal	İki Yansıtma	Evet			17.957	19.057	23.616	22.414	22.433	50.227	37.484	42.615	40.936	40.721	42.966	46.844	59.300
Metal	İki Yansıtma ve Bir Kırınım	Evet			24.301	25.361	29.934	30.411	32.595	59.999	45.593	48.123	47.668	49.733	50.549	53.783	64.661

**Tablo A.9: 10m Anten Yüksekliği ve 20W Güçle Materyal, Frekans, Yansıma Yolları ve Işın Yönlendirmesinin Alınan Güç (dBm) Üzerindeki Etkisi**

Verici Anten Yüksekliği	10 m	Verici Anten Gücü	20 watt	Frekans (GHz) ve Alınan Güç (dBm) (-)																
				2.5 GHz	3.5 GHz	3.7 GHz	4.2 GHz	5.5 GHz	24 GHz	28 GHz	36 GHz	37 GHz	39 GHz	47 GHz	66 GHz	81 GHz				
Materyal	Yansıma Yolu	Işın Yönlendirme																		
Tuğla	Tek Yansıma	Hayır		48.037	50.982	51.467	52.573	54.922	67.728	69.067	71.250	71.488	71.946	73.566	76.515	78.294				
Ahşap	Tek Yansıma	Hayır		50.777	53.699	54.181	55.282	57.623	70.413	71.751	73.932	74.170	74.627	76.247	79.194	80.971				
Cam	Tek Yansıma	Hayır		45.753	48.676	49.158	50.259	52.601	65.398	66.736	68.919	69.157	69.614	71.235	74.183	75.962				
Beton	Tek Yansıma	Hayır		46.377	49.304	49.788	50.890	53.236	66.046	67.386	69.570	69.808	70.266	71.888	74.838	76.618				
Metal	Tek Yansıma	Hayır		38.346	41.269	41.751	42.852	45.195	57.995	59.334	61.518	61.756	62.213	63.834	66.785	68.564				
Metal	İki Yansıma	Hayır		36.385	37.478	42.056	40.841	40.853	68.928	55.904	61.043	59.358	59.141	61.386	65.264	77.846				
Metal	İki Yansıma ve Bir Kırınım	Hayır		37.658	35.670	42.090	40.572	45.584	72.726	55.727	58.814	58.932	60.010	60.572	64.824	75.384				
Metal	Tek Yansıma	Evet		16.874	19.798	20.281	21.383	23.733	37.195	38.709	41.256	41.538	42.081	44.020	47.686	49.491				
Metal	İki Yansıma	Evet		14.947	16.047	20.606	19.404	19.423	47.217	34.474	39.605	37.926	37.711	39.956	43.833	56.290				
Metal	İki Yansıma ve Bir Kırınım	Evet		21.291	22.350	26.924	27.400	29.585	56.989	42.582	45.113	44.658	46.723	47.539	50.773	61.651				

## REFERANSLAR

- [1] International Telecommunication Union. (2019). *World Radiocommunication Conference 2019 (WRC-19)*, Sharm el-Sheikh, Egypt, 28 October to 22 November 2019. <https://www.itu.int/en/ITU-R/conferences/wrc/2019/Pages/default.aspx>
- [2] Eberspächer, J., & Vögel, H.-J. (2009). *GSM - Architecture, Protocols and Services*.
- [3] Rappaport, T. S. (2002). *Wireless Communications: Principles and Practice*.
- [4] Holma, H., & Toskala, A. (2004). *WCDMA for UMTS: HSPA Evolution and LTE*. John Wiley & Sons.
- [5] Furht, B., & Ahson, S. A. (2011). *Long Term Evolution: 3GPP LTE Radio and Cellular Technology*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420072112>
- [6] Holma, H., & Toskala, A. (Eds.). (2012). *LTE-Advanced: 3GPP Solution for IMT-Advanced*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118399439>
- [7] Republic of Turkey General Directorate of Highways. (n.d.). *Durma ve İntikal Süreleri*. <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Trafik/DurmaIntikal.aspx>
- [8] Andrews, J. G., Buzzi, S., Choi, W., Hanly, S. V., Lozano, A., Soong, A. C., & Zhang, J. C. (2014). *What will 5G be?* IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 32(6), 1065-1082. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2014.2328098>
- [9] Rappaport, T. S., Sun, S., Mayzus, R., Zhao, H., Azar, Y., Wang, K., ... & Gutierrez, F. (2013). *Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!* IEEE Access, 1, 335-349. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2013.2260813>

- [10] Jasso, A. (2024, February 29). *What is 5G & frequency bands?* Wilson Amplifiers. <https://wilsonamplifiers.ca/blog/5g-frequency-bands-explained/>
- [11] Brake, D. (2023, June 29). *China commits to 5G mid-band spectrum with 6 GHz allocation: U.S. needs clear response.* CTIA. <https://www.ctia.org/news/china-commits-to-5g-mid-band-spectrum-with-6-ghz-allocation-u-s-needs-clear-response>
- [12] GSMA Intelligence. (2024, February 28). *5G momentum continues with 1.6 billion connections worldwide, rising to 5.5 billion by 2030, according to GSMA Intelligence.* GSMA Newsroom. <https://www.gsma.com/newsroom/press-release/5g-momentum-continues-with-1-6-billion-connections-worldwide-rising-to-5-5-billion-by-2030-according-to-gsma-intelligence/>
- [13] ACARER, T. (2017), *Bilgi ve İletişim Sistemlerinde Eğilim Kitabı*, İstanbul, Boyut Yayıncılık ve Tic. A.Ş., Sertifika No:10855, ISBN:978-975-23-1200-5
- [14] Turkcell. (2018, August 29). *Turkcell dünya devleriyle 5G destekli araç haberleşmesi projesini geliştirecek.* Turkcell Medya. <https://medya.turkcell.com.tr/bulletins/turkcell-dunya-devleriyle-5g-destekli-arac-haberlesmesi-projesini-gelistirecek/>
- [15] Turkcell. (2019, January 23). *Türkiye'nin ilk canlı 5G arama testi Turkcell'den.* Turkcell Medya. <https://medya.turkcell.com.tr/bulletins/turkiyenin-ilk-canli-5g-arama-testi-turkcellden/>
- [16] Turkcell. (2021, May 7). *Turkcell'in liderlik ettiği uluslararası 5G projesi başarıyla tamamlandı.* Turkcell Medya. <https://medya.turkcell.com.tr/bulletins/turkcellin-liderlik-ettigi-uluslararası-5g-projesi-basariyla-tamamlandi/>
- [17] Türk Telekom. (2019, Kasım 2). *Türk Telekom'dan gerçek 5G denemesinde dünya hız rekoru.* Türk Telekom. <https://medya.turktelekom.com.tr/turk-telekom-dan-gercek-5g-denemesinde-dunya-hiz-rekoru>
- [18] MarketScreener. (n.d.). MarketScreener. <https://www.marketscreener.com/>
- [19] 5G Radio. (n.d.). 5G Radio. <https://www.5gradio.com/>

- [20] Khan, A., Dhar, S. P., Shanmugasundaram, R., & Chemparathy, J. (2024). 5G networks: An overview of architecture, design, use cases and deployment
- [21] Cisco. (2021, April). *AMF overview*. Cisco. Retrieved November 14, 2024, from [https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/ucc/amf/2021-04/config-and-admin/b\\_ucc-5g-amf-config-and-admin-guide\\_2021-04/m\\_amf-overview.html](https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/ucc/amf/2021-04/config-and-admin/b_ucc-5g-amf-config-and-admin-guide_2021-04/m_amf-overview.html)
- [22] Deutsche Telekom AG. (n.d.). Telekom. <https://www.telekom.com>
- [23] Deutsche Telekom. (2022, February 9). *5G network as foundation for autonomous driving*. <https://www.telekom.com/en/company/details/5g-network-as-foundation-for-autonomous-driving-561986>
- [24] Gigabyte. (n.d.). <https://www.gigabyte.com>
- [25] Firat, E. (2020, June 12). *Otonom Sistemler [Autonomous Systems]*. Havelsan Akademi
- [26] Çel, Ö. (2020, June 23). *5G ve Uygulamaları [5G and Its Applications]*. Havelsan Akademi
- [27] Guevara, L., & Auat Cheein, F. (2020). The role of 5G technologies: Challenges in smart cities and intelligent transportation systems. *Sustainability*, *12*(16), 6469. <https://doi.org/10.3390/su12166469>
- [28] Samsung Electronics Co. (2015). *5G vision (White paper)*. Samsung Electronics Co., Technical Report. Suwon-si, Korea. Retrieved from [https://images.samsung.com/is/content/samsung/p5/global/business/networks/insights/white-paper/5g-vision/White-Paper\\_Samsung-5G-Vision.pdf](https://images.samsung.com/is/content/samsung/p5/global/business/networks/insights/white-paper/5g-vision/White-Paper_Samsung-5G-Vision.pdf)
- [29] Lai, C., Lu, R., Zheng, D., & Shen, X. (2020). Security and privacy challenges in 5G-enabled vehicular networks. *IEEE Network*, *34*(2), 37–45. <https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900220>
- [30] Rao, S. K., & Prasad, R. (2018). Impact of 5G technologies on Industry 4.0. *Wireless Personal Communications*, *100*, 145–159. <https://doi.org/10.1007/s11277-018-5615-7>

- [31] Molinaro, A., Campolo, C., Härrri, J., Rothenberg, C. E., & Vinel, A. (2020). 5G-V2X communications and networking for connected and autonomous vehicles. *Future Internet*, 12(7), 116. <https://doi.org/10.3390/fi12070116>
- [32] Yu, K., Lin, L., Alazab, M., Tan, L., & Gu, B. (2021). Deep learning-based traffic safety solution for a mixture of autonomous and manual vehicles in a 5G-enabled intelligent transportation system. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(7), 4337–4347. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3042504>
- [33] Ji, H., Park, S., Yeo, J., Kim, Y., Lee, J., & Shim, B. (2018). Ultra-reliable and low-latency communications in 5G downlink: Physical layer aspects. *IEEE Wireless Communications*, 25(3), 124–130. <https://doi.org/10.1109/MWC.2018.1700294>
- [34] Schulz, P., Matthe, M., Klessig, H., Simsek, M., Fettweis, G., & Ansari, J. (2017). Latency critical IoT applications in 5G: Perspective on the design of radio interface and network architecture. *IEEE Communications Magazine*, 55(2), 70–78. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600435CM>
- [35] Lema, M. A., Laya, A., Mahmoodi, T., Cuevas, M., Sachs, J., & Markendahl, J. (2017). Business case and technology analysis for 5G low latency applications. *IEEE Access*, 5, 5917–5935. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2685687>
- [36] Di Taranto, R., Muppirisetty, S., Raulefs, R., Slock, D., Svensson, T., & Wymeersch, H. (2014). Location-aware communications for 5G networks: How location information can improve scalability, latency, and robustness of 5G. *IEEE Signal Processing Magazine*, 31(6), 102–112. <https://doi.org/10.1109/MSP.2014.2332611>
- [37] Sachs, J., Wikstrom, G., Dudda, T., Baldemair, R., & Kittichokechai, K. (2018). 5G radio network design for ultra-reliable low-latency communication. *IEEE Network*, 32(2), 24–31. <https://doi.org/10.1109/MNET.2018.1700232>
- [38] Fayad, A., & Cinkler, T. (2024). Energy-efficient joint user and power allocation in 5G millimeter wave networks: A genetic algorithm-based approach. *IEEE Access*, 12, 20019–20030. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3361660>

- [39] Liu, Z., Garg, N., & Ratnarajah, T. (2025). Dynamic energy efficient resource allocation for massive MIMO networks using randomized ensembled double Q-learning algorithm. *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*. <https://doi.org/10.1109/TCCN.2024.3524640>
- [40] Shwetha, H. M., & Anuradha, S. (2024). Energy efficiency analysis of novel index modulation-based non-orthogonal multiple access (IM-NOMA) system for 5G networks. *2024 26th International Conference on Advanced Communications Technology (ICACT)*, 04–07 February 2024. <https://doi.org/10.23919/ICACT60172.2024.10471981>
- [41] Elgarhy, O., Reggiani, L., Alam, M. M., Zoha, A., Ahmad, R., & Kuusik, A. (2024). Energy efficiency and latency optimization for IoT URLLC and mMTC use cases. *IEEE Access*, *12*, 23132–23148. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3364349>
- [42] Chinthu, V. R., Goel, O., & Kumar, L. (2021). Optimization techniques for 5G NR networks: KPI improvement. *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*, *9*(9), d817–d818. <https://www.ijcrt.org/papers/IJCRT2109425.pdf>
- [43] Bagwari, A., Logeshwaran, J., Raja, M., Devisivasankari, P., Bagwari, J., & Rathi, V. (2024). Intelligent computational model for energy efficiency and AI automation of network devices in 5G communication environment. *Tsinghua Science and Technology*, *29*(6), 1728-1751. <https://doi.org/10.26599/TST.2024.9010005>
- [44] Tiwari, P., Gahlaut, V., Mishra, U. N., Shastri, A., & Kaushik, M. (2024). Polarization diversity configuration of millimeter wave MIMO antenna for Ka-band application in 5G wireless networks. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, *23*(3), 486-507. <https://doi.org/10.1080/09205071.2024.2319683>
- [45] Acarer, T. (2020). *Yeni Nesil Mobil Erişim Sistemlerinin Kobilerin Finansal İşlerinde Sunduğu Değişimler ve Yeni Fırsatlar*. *Social Sciences Research Journal*, *9*(3), 124-132
- [46] Acarer, T. (2023) "Yeni nesil mobil iletişim sistemlerinin gemi kara arasındaki deniz haberleşmesinde kullanım olanağı" <https://doi.org/10.51513/jitsa.1179112>

- [47] Türk, B. B., Hürcan, F., Savcı, H. Ş., & Doğan, H. (2024). A Compact GaN Power Amplifier Module for New Generation Cellular Basestations. *BS Engineering*, 7(3), 587–593. <https://doi.org/10.34248/bsengineering.1455495>
- [48] Sumathi, K., Sabarinathan, S., Priyadharshini, S., & Sarath Kumar, P. (2025). “Design and Analysis of MIMO Antenna for 5G Millimeter Wave Application”. *Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things (IDCIoT)*, Bengaluru, Hindistan. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IDCIOT64235.2025.10914837>
- [49] Alsalamy, Z., Kasthuri, R., Sowmiya, S., Rani, P., Gupta, D. K., & Gowtham Kumar Reddy, I. V. (2024). “Energy Efficiency in 5G Networks Using Gaussian Mixture Models”. *Proceedings of the IEEE International Conference on Communication, Computing and Signal Processing (IICCCS)*, Asansol, Hindistan. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IICCCS61609.2024.10763881>
- [50] Zi, R., Ge, X., Thompson, J., Wang, C.-X., Wang, H., & Han, T. (2016). “Energy Efficiency Optimization of 5G Radio Frequency Chain Systems”. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(4), 758–771. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2544579>
- [51] Maloku, B., Krasniqi, B., & Ademaj, F. (2016). “Optimizing the energy efficiency for future 5G networks”. *Proceedings of the 2016 International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, 23-25 Mayıs 2016. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IWSSIP.2016.7502751>
- [52] Singh, R., Jadaan, D., Ghimire, D., Berger, M., Skavhaug, A., & Dittmann, L. (2024). “Evaluating Energy Efficiency: A Comparative Study of LTE, 5G-NSA, 5G-SA, and Private 5G Networks”. *Proceedings of the 7th International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (CommNet)*, 04-06 Aralık 2024, Rabat, Fas. IEEE. <https://doi.org/10.1109/CommNet63022.2024.10793350>

[53] Report ITU-R M.2412, "Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020", 2017. <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2412>

[54] Report ITU-R M.[IMT-2020.EVAL], "Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020", 2017. <https://www.itu.int/md/R15-SG05-C-0057>

[55] Report ITU-R M.2135-1, "Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced", 2009. [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2135-1-2009-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2135-1-2009-PDF-E.pdf)

[56] S. Sun, T. S. Rappaport, T. A. Thomas, A. Ghosh, H. C. Nguyen, I. Z. Kovács, I. Rodriguez, O. Koymen, and A. Partyka, "Investigation of Prediction Accuracy, Sensitivity, and Parameter Stability of Large-Scale Propagation Path Loss Models for 5G Wireless Communications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 5, pp. 2843-2860, May 2016, doi: 10.1109/TVT.2016.2543139

[57] MathWorks. (n.d.). MATLAB MathWorks. <https://au.mathworks.com>

[58] *What is 5G? Everything you need to know about 5G*. Qualcomm. Retrieved November 2, 2024, from <https://www.qualcomm.com/5g/what-is-5g>

[59] 5G speed is data transmission in real time. Deutsche Telekom. (2018, October 8). *5G speed is data transmission in real time*. Deutsche Telekom. Retrieved November 2, 2024, from <https://www.telekom.com/en/company/details/5g-speed-is-data-transmission-in-real-time-544498>

[60] *Low latency: What makes 5G different*. Reply. Retrieved November 2, 2024, from <https://www.reply.com/en/industries/telco-and-media/low-latency-what-makes-5g-different>

[61] *How 5G reduces data transmission latency*. EDN Network. Retrieved November 2, 2024, from <https://www.edn.com/how-5g-reduces-data-transmission-latency/>

[62] *What is 5G? An illustrated Q&A*. Thales Group. Retrieved November 2, 2024, from <https://www.thalesgroup.com/en/markets/digital-identity-and-security/mobile/inspired/5G>

[63] *G, autonomous systems and the revenge of real time and determinism!*. Electronics Specifier. Retrieved November 2, 2024, from <https://www.electronicsspecifier.com/products/5g/5g-autonomous-systems-and-the-revenge-of-real-time-and-determinism>

[64] *Yeni dünyanın kazananı: Optimizasyona yatırım yapan şirketler olacak*. Bloomberg HT. Retrieved November 2, 2024, from <https://www.bloomberght.com/yeni-dunyanin-kazanani-optimizasyona-yatirim-yapan-sirketler-olacak-2290627>

[65] EMF Explained. *EMF Explained*. Retrieved November 2, 2024, from <https://emfexplained.info/>

[66] ResearchGate. (n.d.). <https://www.researchgate.net>

[67] Turcomat. (n.d.). Turcomat. <https://turcomat.org/>

## CV

### KİŞİSEL BİLGİLER

---

- **İsim** : Bünyamin HATİPOĞLU

### İŞ TECRÜBELERİ

---

- Gozen Digital Aviation (Yazılım Mühendisi)
- İstanbul Sağlık Bilimleri Üniversitesi (Yazılım Mimarı)
- Techlife Bilişim Çözümleri (Takım Lideri / Proje Yöneticisi)

### EĞİTİM DURUMU

---

- Bilgisayar Mühendisliği – Ph. D. – İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi
- Bilgisayar Mühendisliği – MSc – İstanbul Aydın Üniversitesi
- Bilgisayar Mühendisliği (İngilizce) – Uluslararası Kıbrıs Üniversitesi

### YABANCI DİL

---

- İngilizce- Uluslararası Kıbrıs Üniversitesi

### KURS VE SERTİFİKALAR

---

- Gamified Applied Agile & Scrum Product Development Approach Principles, BT Akademi
- Design Patterns and OOP Principles, BT Akademi, 32 Hours

### ARAŞTIRMA MAKALELERİ / YAYINLAR

---

- Optimizing Energy Efficiency in Urban 5G Wireless Communication Systems - <https://cnrpublishing.com/index.php/ejens/issue/view/5/12>
- Optimizing Energy Efficiency in Urban 5G Wireless Communication Systems: Antenna Configuration and Beam Steering Approach – The 5th International Conference on Electrical Computer and Energy Technologies / 03-06 July 2025 Paris/France