



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# 1G'den 6G'ye hücreşel evrim üzerine kapsamlı bir derleme

## *A comprehensive study on cellular evolution from 1G to 6G*

**Yazar(lar) (Author(s)):** Nazifa Mustarı<sup>1</sup>, Muhammet Ali Karabulut<sup>2</sup>, A. F. M. Shahen Shah<sup>3</sup>, M. S. Ufuk Türeli<sup>4</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0003-2340-7754

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-2080-5485

ORCID<sup>3</sup>: 0000-0002-3133-6557

ORCID<sup>4</sup>: 0000-0002-4986-5270

**To cite to this article:** Mustarı N., Karabulut M. A., Shah A. F. M. S. ve Türeli U., "1G'den 6G'ye hücreşel evrim üzerine kapsamlı bir derleme", *Journal of Polytechnic*, \*(\*) : \*, (\*).

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz:** Mustarı N., Karabulut M. A., Shah A. F. M. S. ve Türeli U., "1G'den 6G'ye hücreşel evrim üzerine kapsamlı bir derleme", *Politeknik Dergisi*, \*(\*) : \*, (\*).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.1263687

# 1G'den 6G'ye Hücresel Evrim Üzerine Kapsamlı Bir Derleme







## A Comprehensive Study on Cellular Evolution from 1G to 6G

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ 1G'den 5G'ye hücresel ağ mimarilerinin bir araştırması sunulmaktadır. / A survey of cellular network architectures from 1G to 5G is presented.
- ❖ Çalışma yaklaşmakta olan 6G'nin neler getirebileceğine dair bir ön izleme sunmaktadır. / The study offers a preview of what the upcoming 6G might bring.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

1G'den 5G'ye kadar çeşitli erişim mekanizmaları araştırılmaktadır. Birkaç nesil hücresel iletişimin bir karşılaştırması bulunmaktadır. / Several access mechanisms ranging from 1G to 5G are investigated. There is a comparison of several generations of cellular communication.

1G	2G	3G	4G	5G	6G
					
<b>2.4 Kbps</b> Sesli arama Analog sinyaller	<b>64 Kbps</b> SMS Dijital sinyaller Daha büyük hizmet	<b>2 Mbps</b> Internet Web uygulamaları Akıllı telefonlar	<b>100-1000 Mbps</b> Yüksek Veri Hızı Mobil uygulamalar Uygulamaların İnterneti	<b>1-10 Gbps</b> Internet of Things Büyük Geniş Bant Akıllı şehir VR / AR	<b>10 Gbps'den daha fazla</b> Yeni Spektrum Enerji verimliliği Yapay zeka Blok zinciri
1980'ler	1990'lar	2000'ler	2010'lar	2020'ler	2030'lar

Şekil. Hücresel iletişimin evrimi / **Figure.** Cellular communication evolution

### Amaç (Aim)

Bu çalışmanın amacı 1G'den 6G'ye kadar hücresel evrim üzerine kapsamlı bir çalışma sunmaktır. / The aim of this study is to present a comprehensive study on cellular evolution from 1G to 6G.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Çalışmada hücresel ağ tasarımları, çoklu erişim stratejileri, modülasyon teknikleri ve gelişen teknolojiler ele alınmıştır. / In the study, cellular network designs, multiple access strategies, modulation techniques and emerging technologies are discussed.

### Özgünlük (Originality)

Bu çalışma, ağ mimarilerinin, çoklu erişim tekniklerinin, hizmetlerin, gelecek teknolojilerin ve 1G'den 5G'ye kadar olan diğer konuların anlaşılmasına yardımcı olacak ve gelecekteki araştırma alanlarını belirlemede faydalı olacaktır. / This study will help to understand network architectures, multiple access techniques, services, future technologies and other topics from 1G to 5G and will be useful in identifying future research areas.

### Bulgular (Findings)

Hücresel ağların 1G'den 6G'ye evrimi, önemli teknolojik ilerlemeler ve ağ performansı ile sonuçlanmıştır. / The evolution of cellular networks from 1G to 6G has resulted in significant technological advances and network performance.

### Sonuç (Conclusion)

Yeni çoklu erişim teknikleri ve teknolojileri ile daha fazla kullanıcıya daha hızlı hizmet vermek mümkün hale gelmektedir. / With new multiple access techniques and technologies, it becomes possible to serve more users faster.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# 1G'den 6G'ye Hücresel Evrim Üzerine Kapsamlı Bir Derleme

*Derleme / Survey*

**Nazifa Mustari<sup>1</sup>, Muhammet Ali Karabulut<sup>2</sup>, A. F. M. Shahen Shah<sup>1\*</sup>, M. S. Ufuk Türel<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kafkas Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 11.03.2023 ; Kabul/Accepted : 28.07.2023 ; Erken Görünüm/Early View : 11.09.2023)

**ÖZ**

Daha yüksek hizmet kalitesi, veri hızları, kapasite ve azalan gecikmeye yönelik artan ihtiyaç nedeniyle, hücresel iletişim gün geçtikçe gelişmektedir. Hücresel ağların tasarımı, bu talepleri karşılamak için önemli ölçüde geliştirilmektedir. Yeni çoklu erişim yöntemleri, modülasyon teknikleri, gelişen teknolojiler vb. sayesinde ihtiyaç ve talepler karşılanmaktadır. Bu çalışmada, birinci nesilden (1G) altıncı nesle (6G) kadar hücresel evrim üzerine kapsamlı bir çalışma sunulmaktadır. Çalışmada hücresel ağ tasarımları, çoklu erişim stratejileri, modülasyon teknikleri ve gelişen teknolojiler ele alınmıştır. Hücresel ağın mimarisi 1G'den 5G'ye kadar verilmiştir. Mimariyi geliştirmek ve kullanıcı taleplerini karşılamak için ortaya çıkan en önemli teknolojilerden bazıları ele alınmaktadır. Massive MIMO, yazılım tanımlı ağ, mmWave ve diğer gelecek teknolojiler bun önemli teknolojiler arasındadır. Ek olarak, 1G'den 5G'ye kadar çeşitli erişim mekanizmaları araştırılmaktadır. Birkaç nesil hücresel iletişimin bir karşılaştırması bulunmaktadır. Çalışma ayrıca yaklaşan 6G'nin neler getirebileceğine dair bir ön izleme sunmaktadır. 6G ile ilgili tartışılan zorluklar ve sorunlar açıklanmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** 5G, 6G, hücresel ağ mimarileri, massive MIMO, mmWave, çoklu erişim teknikleri, modülasyon teknikleri.

## A Comprehensive Study on Cellular Evolution from 1G to 6G

**ABSTRACT**

Due to the growing need for greater quality of service, data rates, capacity, and decreased latency, cellular communication is evolving. The design of cellular networks is being dramatically enhanced in order to meet these demands. The needs and demands are fulfilled due to new multiple access methods, modulation techniques, emerging technologies, etc. In this paper, a comprehensive study on cellular evolution from the first generation (1G) to sixth generation (6G) is presented. The cellular network designs, multiple access strategies, modulation techniques, and emerging technologies are considered in the study. The architecture of the cellular network is given from 1G to 5G. Some of the most important emerging technologies for improving architecture and meeting user demands are covered. Massive MIMO, software-defined networking, mmWave, and other upcoming technologies are among them. Additionally, several access mechanisms ranging from 1G to 5G are investigated. There is a comparison of several generations of cellular communication. The study also gives a preview of what the upcoming 6G may bring. There are obstacles and issues with 6G that are discussed.







**Keywords:** 5G, 6G, cellular network architectures, massive MIMO, mmWave, multiple access techniques, modulation techniques.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Artan kullanıcı sayısını, mobiliteyi, daha yüksek kapsama alanını, veri hızını, spektral verimliliği vb. desteklemek için hücresel iletişimin geliştirilmesine ihtiyaç vardır [1]. 1980'lerde, analog sinyaller olan sesli arama sağlamak için 1G başlatılmıştır. 1990'larda 2G, dijital sinyallerle ses hizmetleri sunmaya başlamıştır. 2G ayrıca kısa mesaj servisini (SMS) de destekler. 2.5G'den itibaren e-posta ve web'de gezinme başlamıştır. 2000'lerde 3G görüntülü telefon, mobil TV ve video konferansı başlatmıştır. Akıllı telefonların ve mobil geniş

bandın ortaya çıkışı gerçekleşmiştir. 1G ve 2G teknolojilerinde devre anahtarlama kullanılırken, 2.5G ve 3G'de hem devre hem de paket anahtarlama kullanılır. 2010'larda 4G, yüksek veri hızı uygulamalarını kolaylaştırır, örneğin HD TV, bulut bilişim, video oyun vb. (2020)'lerde Nesnelerin İnterneti (IoT) [2], akıllı şehir, devasa geniş bant, sanal gerçeklik (VR) [3], artırılmış gerçeklik (AR) [4], cihazdan cihaza iletişim, araçsal tasarsız ağlar (VANET'ler) [5] vb. 4G ve 5G'de yalnızca paket anahtarlama kullanılmaktadır. 1G'den 5G'ye hız ihtiyacı duyulmaktadır. 1G, 2G, 3G, 4G ve 5G sırasıyla 2,4 kbps, 64 kbps, 2000 kbps, 100 Mbps ve 1 Gbps'den fazlasını destekler. 6G hala araştırma aşamasında ve (2020)'lerin sonunda veya 2030'ların başında tanıtılması beklenmektedir. 6G'nin, saniyede 1

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : shah@yildiz.edu.tr

1G	2G	3G	4G	5G	6G
					
<b>2.4 Kbps</b> Sesli arama Analog sinyaller	<b>64 Kbps</b> SMS Dijital sinyaller Daha büyük hizmet	<b>2 Mbps</b> Internet Web uygulamaları Akıllı telefonlar	<b>100-1000 Mbps</b> Yüksek Veri Hızı Mobil uygulamalar Uygulamaların İnterneti	<b>1-10 Gbps</b> Internet of Things Büyük Geniş Bant Akıllı şehir VR / AR	<b>10 Gbps'den daha fazla</b> Yeni Spektrum Enerji verimliliği Yapay zeka Blok zinciri
1980'ler	1990'lar	2000'ler	2010'lar	2020'ler	2030'lar

Şekil 1. Hücreli iletişimin evrimi (Cellular communication evolution)

Çizelge 1. Derleme çalışmamız ile benzer çalışmalar arasındaki farklar (The difference between our survey and other studies in literature)

Ref.	Çoklu Erişim Teknikleri	Gelişen Teknolojiler	Modülasyon Teknikleri	Analitik/Simülasyon	Hücreli Nesiller
Dogra vd. [1]	X	√	X	X	√
Chettri vd. [2]	X	√	X	X	√
Guo vd. [3]	X	√	X	X	√
Qiao vd. [4]	X	√	X	X	√
Shah vd. [6]	√	X	X	X	√
Shah [7]	√	√	X	X	√
Bizim çalışma	√	√	√	√	√

terabayta ulaşan veri aktarım hızlarıyla 5G'den bile daha hızlı olması hedeflenmektedir. Ayrıca holografik iletişim ve gerçek zamanlı tele bulunma gibi yeni kullanım durumlarını da etkinleştirilmesi beklenmektedir. 6G yeni nesil mobil teknolojinin temeli ve yalnızca hayal etmeye başlayabileceğimiz yeni iletişim ve bağlantı biçimleri mümkün olacaktır. 6G hızının minimum 10 Gbps ile 1 Tbps veri hızları olduğu tahmin edilmektedir. Hücreli iletişimin evrimi Şekil 1'de sunulmaktadır.

Frekans bölmeli çoklu erişim (FDMA), zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA), kod bölmeli çoklu erişim (CDMA) ve ortogonal frekans bölmeli çoklu erişim (OFDMA), 1G'den 5G'ye gelişen çoklu erişim yöntemlerinden bazılarıdır [6]. FDMA, TDMA, CDMA ve OFDMA sırasıyla 1G, 2G, 3G, 4G'de kullanılır. Bu çoklu erişim tekniklerinin tümü ortogonal çoklu erişimdir (OMA) [7]. 5G'de ortogonal olmayan çoklu erişimin (NOMA) [8] kullanılması beklense de OFDMA da kullanılmaktadır. Çoklu erişim tekniği, 1G'den 5G'ye farklıdır ve bu, kullanıcı sayısını desteklemede önemli bir rol oynar. Kullanıcıların farklı hizmetler ve daha yüksek hız taleplerini karşılamak için evrim devam etmektedir. 5G'yi etkinleştiren massive çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO) [9], yazılım tanımlı ağ oluşturma [10], mm-Wave [11] vb. gibi bazı gelişmekte olan teknolojiler vardır. Bu teknolojilerin hücreli iletişim anlayışında gelişme sağlaması önemlidir. Yeni nesil hücreli iletişim

için yeni teknolojilerin oluşturulması oldukça önem arz etmektedir. Çizelge 1, derleme çalışmamız ile diğer derleme çalışmalar arasındaki farkı daha da açıklamaktadır. Bu çalışmanın literatüre katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- 1G'den 5G'ye hücreli ağ mimarilerinin bir araştırması sunulmaktadır. 1G'den 5G'ye kadar kullanılan çoklu erişim teknikleri tartışılmaktadır. Ayrıca her hücreli ağ mimarisi için kullanılan modülasyon teknikleri açıklanmaktadır.
- Kullanıcıların taleplerini karşılamak için her neslin arkasında tartışılan bir teknoloji vardır. Özellikle 5G için gelişen teknolojiler sunulmaktadır.
- Zorluklar tartışılıp gelecekteki araştırma kılavuzlarından bahsedilmektedir.
- Bu çalışma, ağ mimarilerinin, çoklu erişim tekniklerinin, hizmetlerin, gelecek teknolojilerin ve 1G'den 5G'ye kadar olan diğer konuların anlaşılmasına yardımcı olacak ve gelecekteki araştırma alanlarını belirlemede faydalı olacaktır.
- Çalışma ayrıca yaklaşmakta olan 6G'nin neler getirebileceğine dair bir ön izleme de sunmaktadır. Ayrıca, zorluklar ve daha fazla kapsam sunulmaktadır.

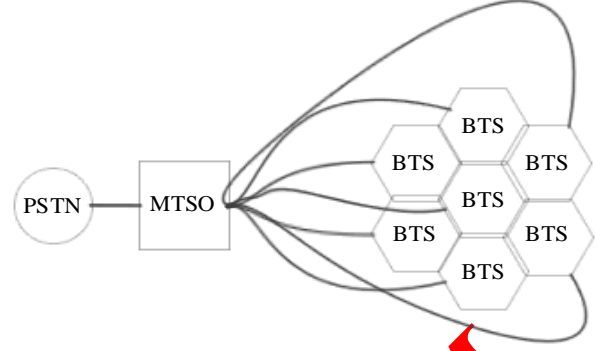
Çalışmanın geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2, hüresel ağ mimarisinin gelişimini göstermektedir. Bölüm 3, 5G için ortaya çıkan teknolojileri açıklamaktadır. 4. Bölümde, çoklu erişim teknikleri sunulmaktadır. Bölüm 5, RF teknolojisi hakkında bilgi vermektedir. Bölüm 6, 6G için zorluklar ve açık sorunlar vermektedir. Sonuçlar, Bölüm 7'de sunulmaktadır.

## 2. HÜCRE AĞ MİMARİSİNİN EVRİMİ (EVOLUTION OF CELL NETWORK ARCHITECTURE)

Hüresel ağ mimarisi, kablosuz iletişim teknolojilerindeki önemli bir gelişmedir. İlk hüresel ağ mimarisi, 1G olarak adlandırılan analog bir sistemdi ve yalnızca sınırlı sayıda kullanıcıya hizmet verebiliyordu. 2G, sayısal teknolojinin kullanıldığı ve veri aktarım hızlarının arttığı bir dönüşüm dönemi olmuştur. 3G ile birlikte, veri hızları daha da arttı ve mobil internet kullanımı yaygın hale geldi. 4G, çoklu anten teknolojisi kullanarak daha yüksek hızlara ve daha fazla veri kapasitesine olanak tanıdı. Son olarak, 5G, daha yüksek frekans bantlarını kullanarak ve çok daha hızlı veri aktarım hızları sağlayarak kablosuz bağlantı teknolojilerinde devrim yarattı. 5G, daha fazla cihazın bağlanmasına izin veren ve düşük gecikme süreleri sağlayan bir ağ mimarisi sunar. Hüresel ağ mimarisi, kablosuz iletişim teknolojilerindeki sürekli gelişmelerle birlikte evrim geçirmiş ve daha fazla cihazın daha hızlı ve daha güvenilir bir şekilde bağlanmasını sağlamaktadır.

### 2.1. 1G (1st Generation)

Birinci nesil, 1G olarak adlandırılır ve gelişmiş cep telefonu hizmetleri olarak bilinmektedir. 1G, 1980'lerin ortalarında kullanılmaya başlanan ilk nesil kablosuz iletişim teknolojisiydi. İlk defa analog ses sinyallerini kullanarak kablosuz telefon hizmeti sunmuştur. 1G, ses tabanlı analog iletişimi destekleyen ilk ticari mobil telefon sistemidir. 1G'nin temel özelliği frekans modülasyonu kullanarak ses sinyallerini iletmektir. İletişim, FM (Frekans Modülasyonu) veya AM (Genlik Modülasyonu) teknikleriyle gerçekleştirilir. Bu sistemde, analog sinyaller radyo dalgalarına dönüştürülür ve kablosuz olarak iletilir. Spektrum, kanallar olarak adlandırılan 30 kHz frekanslarında bölümlere ayrılmıştır. Arama süresi boyunca tek bir kullanıcı tüm kanalı kullanır. Geniş bir kapsama alanı sağlamak için bir frekans yeniden kullanım yaklaşımı oluşturulmuştur. Diğer kullanıcıların, aralarındaki mesafe az parazit oluşturmaya yeterli olduğu sürece, aynı frekans kanallarını aynı zamanlarda kullanmalarına izin verilir. 1G sistemlerinin spektral verimliliği düşüktü ve genellikle 0,1 ile 0,2 bps/Hz arasında değişmekteydi. Bu, frekans spektrumunun her Hertz'i için çok az miktarda bilginin taşınabileceğini göstermektedir. Genel sistem kapasitesini artırmak amacıyla dar bant AMPS (N-AMPS) olarak bilinen yeni bir teknoloji başlatılmıştır. Bu durumda kanal aralığı 10 kHz'e düşürülmüştür. Şekil 2, tipik bir 1G hüresel ağ tasarımı göstermektedir.



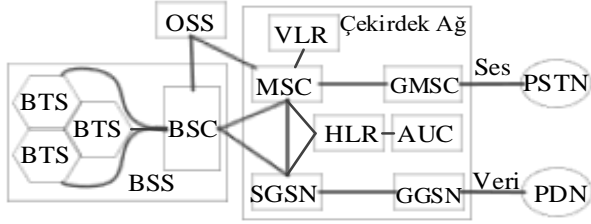
Şekil 2. 1G ağ mimarisi blok diagramı [7] (Block diagram of 1G network architecture)

Bir hücreyi temsil etmek için altıgen bir form kullanılmaktadır. Hücreleri kapasiteyi artırmak için genellikle sektörler olarak bilinen daha küçük hücrelere bölünebilir. Bazı alıcı-verici istasyonları (BTS) ve ayrıca halka açık anahtarlamalı telefon ağı (PSTN), mobil telefon anahtarlama ofisi (MTSO) aracılığıyla bağlanır. Ayrıca, diğer şeylerin yanı sıra aktarmaları, çağrı yönlendirmeyi, kaydı ve kimlik doğrulamayı yönetmektedir. Bu, devre anahtarlamalı (CS) [12] bir ağıdır. Ses hizmetleri sunmak için ağı, operatörlerin uygun düzenleyici kuruluşlardan edindiği lisanslı bir spektruma ihtiyacı bulunmaktaydı. 1G'de üç hüresel standart vardı: ABD'de AMPS, Kuzey ülkelerinde Kuzey Avrupa cep telefonu (NMT) ve Birleşik Krallık'ta Toplam erişim iletişim sistemi.

### 2.2. 2G (2nd Generation)

İkinci Nesil olarak da bilinen 2G, 1990'ların başında ortaya çıkan kablosuz iletişim teknolojisinin ikinci yinelenmesini ifade etmektedir. Dijital iletişimi sunarak, gelişmiş veri hızları, gelişmiş kapasite ve daha fazla güvenlik sunarak selefi 1G'ye göre önemli bir ilerleme kaydetmiştir. Dijitale yapılan bu değişiklik, ses kodlayıcıların (vocoder'lar), orijinal olarak SMS yoluyla veri servislerinin, güvenlik şifrelemesinin ve gelişmiş sistem kapasitesinin kullanılması yoluyla gelişmiş sesli iletişime izin vermiştir. Bunların tümü, paket anahtarlamalı (PS) tabanlı ağlara arayüze izin veren uzantıları (örn., 2G'den 2.5G'ye 2.75G'ye) içerecek şekilde zamanla gelişen CS tabanlı ağlardı [12]. Müşterilerin talepleri arttıkça 2G, 2.5G (GPRS) [14] ve 2.75 (EDGE) [15] gibi küçük aşamalarda gelişmeye zorlanmıştır. Her ikisi de, mobil iletişim (GSM) kapasitesi için temel küresel sistemin üzerindeki kullanıcı veri hızlarını artırmak ve paket hizmetleri yeteneği sağlamak üzere tasarlanmıştır. 2G sistemlerinin spektral verimliliği, genel olarak 1G sistemlerinden önemli ölçüde yüksek olmasına rağmen, kullanılan teknolojiye bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Örneğin, en yaygın kullanılan 2G teknolojilerinden biri olan mobil iletişim (Global System for Mobile Communications, GSM) standardının spektral verimliliği kabaca 0,3 ila 0,6 bps/Hz idi. Şekil 3, GSM ağ mimarisinin bir blok şemasını göstermektedir.





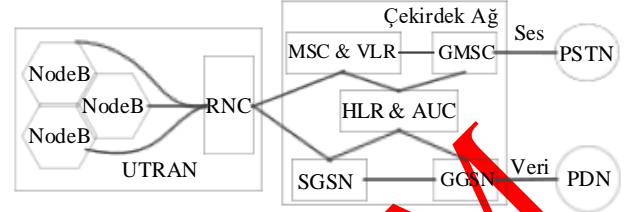
Şekil 3. 2G GSM ağ mimarisinin blok şeması [7] (2G GSM network architecture block diagram)

Baz istasyonu alt sistemi (BSS) iki bileşenden oluşur: baz alıcı-verici istasyonları (BTS'ler) ve baz istasyonu kontrolörü (BSC). Tüm GSM ağı, işletim ve destek alt sistemi (OSS) tarafından kontrol edilip izlenmektedir. Kayıt, kimlik doğrulama, çağrı yönlendirme, çağrı konumu ve diğer hizmetler, mobil anahtarlama merkezi (MSC) tarafından sağlanmaktadır. Abone bilgilerinin yer aldığı bir veri tabanına Ev/Ziyaretçi Konum Kaydı (HLR/VLR) adı verilir. Çağruları doğru MSC'ye yönlendirmek için HLR, ağ geçidi mobil anahtarlama merkezine (GMSC) abone verileri sağlamaktadır. Hareketlilik ve paket yönlendirmeyi yönetmek için hizmet veren bir GPRS destek düğümü (SGSN) kullanılır. GPRS ağı ile dış paket anahtarlama ağları arasındaki ağ bağlantısı, Ağ Geçidi GPRS destek düğümü (GGSN) tarafından düzenlenir. Bir mobil cihaz internete bağlanmak istediğinde GGSN, mobil cihazın konumunu belirlemek için önce SGSN ile iletişim kurar. SGSN, mobil cihazın konumunu GGSN'ye bildirir. GGSN daha sonra mobil cihazın abone bilgilerini elde etmek ve kullanıcının İnternet erişimi talebini doğrulamak için HLR ile iletişim kurar. HLR, kullanıcının abone bilgilerini doğrular ve GGSN'ye kullanıcının internete bağlanma yetkisi olduğunu onaylar. Avrupa'da GSM, Amerika Birleşik Devletleri'nde IS-54 (IS-136 olarak da bilinir) ve Amerika Birleşik Devletleri ve Kore'de IS-95 (CDMA-One olarak da bilinir), 2G'de kullanılan üç hücrel protokolüdür.

### 2.3. 3G (3rd Generation)

3G, 2000'li yılların başında 2G'den bir evrim olarak ortaya çıkan üçüncü nesil kablosuz iletişim teknolojisini ifade etmektedir. Daha hızlı veri hızları sağlayarak, multimedya hizmetlerini destekleyerek ve mobil cihazlarda internet bağlantısı sağlayarak öncekilere göre önemli ilerlemeler sağlamıştır. Aynı zamanda, hücrel kullanıcıların telefonlarında video uygulamalarının tanıtılması için bir kıvılcımdı [7]. En başından beri hem CS hem de PS hizmetleri sağlanmıştır. Çoklu erişim (MA) teknolojisi, standart olarak TDMA'dan CDMA'ya değişmiştir. GSM/IS-136, Geniş Bant CDMA (WCDMA) olarak CDMA-One ise CDMA2000 olarak geliştirilmiştir. Birden çok abone, sözde rastgele gürültü (PN) kodları ile ayrılır ve CDMA'da mevcut olan tüm bant genişliği boyunca eşzamanlı olarak yayınlanır. 3G sistemlerinin spektral verimliliği, genel olarak 2G sistemlerinden önemli ölçüde yüksek olmasına rağmen, kullanılan teknolojiye bağlı olarak değişiklik

göstermiştir. Örneğin, en yaygın olarak kullanılan 3G teknolojilerinden biri olan Evrensel Mobil Telekomünikasyon Sistemi (UMTS), kabaca 0,5 ila 2,5 bps/Hz arasında bir spektral verimliliğe sahiptir. Şekil 4, 3G WCDMA ağ mimarisini göstermektedir.

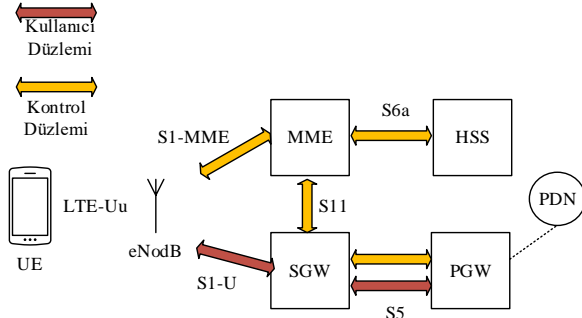


Şekil 4. 3G WCDMA ağ mimarisinin blok şeması [7] (3G WCDMA network architecture block diagram)

Radyo ağı denetleyicisi (RNC), BSC fonksiyonlarının yerini alırken, NodeB, BTS fonksiyonlarının yerini almıştır. UMTS, WCDMA'nın başka bir adıdır. NodeB ve RNC grupları, UMTS karasal radyo erişim ağını (UTRAN) oluşturur. WCDMA hücrel sistemi, hem aşağı bağlantı (HSDPA) hem de yukarı bağlantı (HSUPA) öğelerine sahip olan yüksek hızlı paket erişimine (HSPA) dönüşmüştür. HSPA, paket hizmetleri sunmanın daha verimli bir yöntemine yönelik talebe yanıt olarak geliştirilmiştir. HSPA, hibrit otomatik tekrar isteklerini (HARQ) mümkün kılan uyarlamalı modülasyon ve kodlamanın (AMC) yanı sıra paylaşılan kanal fikrine öncülük etmiştir. WCDMA (genellikle UMTS olarak bilinir) ve CDMA2000, 3G'de kullanılan iki hücrel protokoldür [6].

### 2.4. 4G (4th Generation)

Dördüncü Nesil olarak da bilinen 4G, 2000'lerin sonunda ortaya çıkan kablosuz iletişim teknolojisinin dördüncü yinelenmesini ifade etmektedir. Daha yüksek veri hızları, gelişmiş ağ kapasitesi, daha düşük gecikme süresi ve multimedya uygulamaları için gelişmiş destek sağlayarak, selevi 3G'den önemli bir sıçramayı temsil etmektedir. Genellikle 4G olarak bilinen uzun vadeli evrim (LTE), yalnızca PS tabanlı ağ iletişimi sağlayan bir teknolojidir. Kullanıcılar için veri hızlarını, gecikme süresini, sistem kapasitesini ve genel kullanıcı deneyimini iyileştirmek amacıyla lisanslı, lisanssız ve paylaşılan spektrum seçenekleri LTE'ye dahil edilmiştir [7]. OFDMA, spektrumu 15 kHz aralıklarla alt kanallara ayıran FDMA çoklu erişimini etkin bir şekilde kullanmak için seçilmiştir. 4G'de MIMO kullanılmaktadır. 4G ağlarının spektral verimliliği, genel olarak 3G sistemlerinden önemli ölçüde daha yüksek olmasına rağmen, kullanılan teknolojiye bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Örneğin, en yaygın kullanılan 4G LTE standardı, 1 ila 5 bps/Hz arasında bir spektral verimliliğe sahiptir. Şekil 5, 4G LTE ağ mimarisinin blok şemasını göstermektedir.



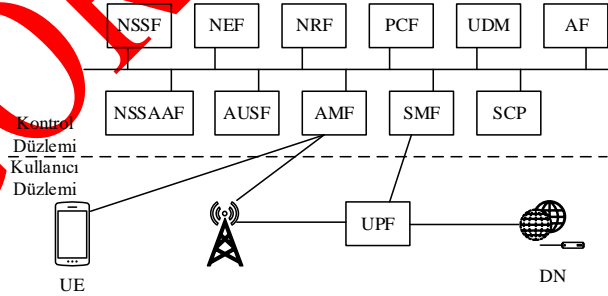
Şekil 5. 4G LTE ağ mimarisinin blok şeması (4G LTE network architecture block diagram)

4G'de amaç dünya çapında tek bir hücresel standartta birleşmektir. Çekirdek ağ (CN) fonksiyonları, geliştirilmiş paket çekirdeği (EPC) ile NodeB fonksiyonları, eNodeB ile değiştirilmiştir. eNodeB ve EPC grupları, gelişmiş UTRAN'ı (EUTRAN) oluşturur. EUTRAN- EPC bağlantısında hem kontrol düzlemi hem de kullanıcı düzlemi sinyalleri kullanılır. UMTS ve GSM'den ev abone sunucusu (HSS) elemanı alınmaktadır. Paket veri ağı ağ geçidi (P-GW), paket veri ağlarını (PDN) dış dünyaya bağlayan bir ağ geçididir. Her paket veri ağını tanımlamak için bir erişim noktası adı (APN) kullanılır. Baz istasyonundan gelen veriler, hizmet ağ geçidi (S-GW) aracılığıyla PDN ağ geçidine yönlendirilmektedir. UMTS ve GSM ile PDN ağ geçidi, GGSN ve SGSN ile aynı kapasitede hizmet vermektedir. Hareketlilik yönetimi varlığı (MME), cep telefonunun üst düzey işleyişini yönetmek için sinyal mesajlarını ve HSS'yi kullanmaktadır. Politika kontrol uygulama fonksiyonunun (PCEF) bir parçası olarak P-GW, politika kontrol ve ücretlendirme kuralları fonksiyonu (PCRF), politika kontrol kararları vermektedir ve akışa dayalı ücretlendirme özelliklerini düzenlemektedir. Kontrol düzlemi, düğümler tarafından birbirleriyle iletişim kurmak ve sinyal mesajlarını değiş tokuş etmek için kullanılmaktadır. UE'nin veri oturumu, sinyal mesajları tarafından kontrol edilmektedir. Düğümler, UE'nin veri oturumunu başlatmak, durdurmak veya değiştirmek için sinyal mesajlarını kullanabilir. Düğümler kullanıcı düzlemindeyken, UE ile PDN arasında iletilen ve alınan kullanıcı verileri değiş tokuş edilmektedir.

VoLTE (Uzun Vadeli Evrim Üzerinden Ses) [16], LTE tarafından geliştirilen yüksek hızlı bir hücresel iletişim protokolüdür. IP Multimedya Alt Sistemi (IMS) mimarisi çerçevesi, ses hizmetinin kontrol ve medya düzlemleri için özel özelliklerle VoLTE'yi desteklemektedir. Devre anahtarlamalı geri dönüş (CSFB) [17], GSM veya başka bir devre anahtarlamalı ağın LTE cihazlarına ses ve SMS hizmetleri sağlamasına izin veren bir tekniktir. LTE, paket tabanlı tamamı IP bir ağ olduğundan, devre anahtarlamalı aramaları etkinleştirememektedir. Bunun için CSFB gereklidir. Bir LTE cihazı sesli arama veya SMS yolladığında veya aldığında, konuşmayı bitirmek veya SMS metin mesajını göndermek için 3G veya 2G şebekesine "geri döner".

## 2.5. 5G (5th Generation)

5G, 2010'ların sonunda kullanılmaya başlayan beşinci nesil kablosuz iletişim teknolojisini ifade etmektedir. Gelişmiş veri hızları, daha düşük gecikme süresi, büyük cihaz bağlantısı, daha yüksek güvenilirlik ve gelişmiş ağ verimliliği sunarak selefi 4G'ye göre önemli bir sıçrama yapması beklenmektedir. Artan sistem kapasitesi, muazzam sayıda bağlantı, daha yüksek kullanıcı veri hızı, azaltılmış uçtan uca gecikme, esnek bant genişliği dağıtımları, çeşitli hizmet karışımları, ağ esnekliği ve daha enerji verimli iletişimlere geçiş, tümü 5G'nin itici nedenleridir [1]. 5G sistemlerinin spektral verimliliği, kullanılan belirli teknolojiye ve kullanılan frekans bandına bağlı olarak değişir, ancak genel olarak önceki nesil kablosuz teknolojilerden çok daha yüksektir. Örneğin en yaygın kullanılan 5G teknolojisi olan 5G New Radio (NR) standardı, ideal koşullarda 30 bps/Hz'e kadar spektral verim elde edebilmektedir. Bu ihtiyaçların karşılanması için 5G'de bazı yeni teknolojiler önermektedir ve geliştirilmektedir. Yazılım tanımlı ağ oluşturma, massive MIMO, mm-Wave, NOMA, bulut radyo erişim ağı (bulut-RAN) [17], mobil uç bilgi işlem, M2M iletişim, ultra yoğun ağlar, kablosuz önbelleğe alma ve tam çift yönlü iletişim, bu teknolojilerden sadece birkaçıdır. Şekil 6, 5G hücresel ağ mimarisinin bir blok şemasını göstermektedir.



Şekil 6. 5G ağ mimarisi blok şeması (5G network architecture block diagram)

Akıllı telefon, tablet veya modem gibi son kullanıcının mobil aygıtı, kullanıcı ekipmanı (UE) olarak anılır. UE'ye hava dalgaları üzerinden veri gönderip almaktan sorumlu olan hava arayüzü aracılığıyla 5G ağı ile iletişim kurulur. 5G Çekirdeği, UE ile internet arasındaki veri akışını yönetmekten sorumlu olan 5G sisteminin çekirdek ağıdır. Erişim ve mobilite yönetimi fonksiyonu (AMF), oturum yönetimi fonksiyonu (SMF), kullanıcı düzlemi fonksiyonu (UPF), ağ dilim seçimi fonksiyonu (NSSF) ve politika kontrol fonksiyonu (PCF), temel ağ fonksiyonları arasındadır. AMF, farklı Radyo Erişim Teknolojileri (RAT'ler) arasındaki geçişleri yönetmekten ve UE'nin 5G ağı içindeki hareketliliğini kontrol etmekten sorumludur. SMF, UE ile ağ arasında veri oturumlarının oluşturulmasını, değiştirilmesini ve sonlandırılmasını içeren oturum yönetiminden sorumludur. UPF, UE ile harici ağlar arasında veri paketlerinin yönlendirilmesinden ve RAT'ler arasında geçiş yaparken UE'nin IP adresini ve veri oturumunu

**Çizelge 2. 5G'de kullanılan teknolojilerin karşılaştırılması (Comparison of technologies used in 5G)**

Teknoloji	Tanımı	Avantajları	Zorluklar
Massive MIMO	Aynı anda birden fazla veri akışı gönderip alarak kablosuz iletişimi iyileştirmek için çok sayıda anten kullanan bir teknolojidir.	Artan spektral verimlilik, daha yüksek veri hızları, iyileştirilmiş kapsama alanı ve kapasite, azaltılmış parazit	Daha yüksek enerji tüketimi, daha yüksek hesaplama karmaşıklığı, donanım ve maliyet gereksinimleri.
SDN	Yazılım tanımlı ağ oluşturma (SDN), kontrol düzlemini veri düzleminde ayıran ve daha esnek ağ yönetimi ve kontrolü sağlayan bir ağ mimarisi yaklaşımıdır.	Basitleştirilmiş ağ yönetimi, artırılmış ağ ölçeklenebilirliği, geliştirilmiş güvenlik, daha verimli kaynak kullanımı.	Mevcut ağ altyapısında önemli değişiklikler, yüksek ilk yatırım maliyetleri, potansiyel güvenlik açıkları gerektirir.
mmWave	Milimetre dalga (mmWave), kısa mesafelerde çok yüksek veri hızlarını destekleyebilen 30 ile 300 GHz arasındaki bir frekans bandıdır.	Çok yüksek veri hızları, artırılmış bant genişliği, azaltılmış tıkanıklık, yoğun nüfuslu alanlarda iyileştirilmiş performans.	Sınırlı menzil, binalar ve bitki örtüsü gibi engeller nedeniyle yüksek zayıflama, altyapının artan maliyeti ve karmaşıklığı.

yönetmek için hareketlilik sabitlemesi yapmaktan sorumludur. NSSF, talep edilen hizmetlere ve QoS gereksinimlerine dayalı olarak UE için uygun ağ dilimini seçmekten sorumluyken, PCF, QoS politikalarını ve veri trafiği kaynak tahsisini yönetmekten sorumludur. Radyo Erişim Ağı (RAN), UE ile ağ arasında kablosuz bağlantı sağlamaktan sorumludur. gNodeB, radyo erişim kontrolü (RAC) ve Dağıtılmış Birim (DU) dahil olmak üzere birkaç temel bileşenden oluşmaktadır. gNodeB, hava arayüzü yoluyla UE'ye veri gönderip almaktan ve ayrıca radyo kaynağı tahsisini, programlamayı ve güç kontrolünü yönetmekten sorumludur. RAC, gNodeB'nin çalışmasını kontrol etmekte sorumluyken, DU, gNodeB ile 5G çekirdeği arasında veri işleme ve yönlendirmeden sorumludur. Ağ açığa çıkarma fonksiyonu (NEF), 5G ağının yeteneklerini ve hizmetlerini üçüncü taraf uygulamalar ve hizmetler gibi harici varlıklara sunmaktan sorumludur. NEF, harici varlıkların 5G ağının fonksiyonlarına ve hizmetlerine erişmesine izin veren standartlaştırılmış bir API seti sağlar. Bu, 5G ağına ek olarak yeni ve yenilikçi hizmetlerin geliştirilmesini sağlayarak yeni iş fırsatları ve gelir akışları sağlar. Ağ deposu fonksiyonu (NRF), 5G sisteminde bulunan tüm ağ işlevlerinin ve hizmetlerinin takibinden sorumludur. NRF, merkezi bir ağ fonksiyonları ve hizmetleri dizini sağlayarak diğer ağ işlevlerinin ve varlıklarının ağ fonksiyonlarını daha verimli bir şekilde keşfetmesine ve seçmesine olanak tanır. NRF ayrıca ağ işlevine ve hizmet kaydına, aboneliğe ve bildirim izin vermektedir.

Ağ fonksiyonu sanallaştırması (network function virtualization, NFV), daha önce tahsis edilmiş donanım üzerinde çalıştırılan ağ işlevlerinin sanallaştırılmasına izin veren bir teknolojidir. 5G bağlamında NFV, ağ hizmeti sunumu için esnek ve ölçeklenebilir bir mimari sağlayarak 5G ağlarının konuşlandırılmasını sağlamada kritik öneme sahiptir. Ağ operatörleri, ağ fonksiyonlarını daha verimli bir şekilde dağıtmasını ve yönetmesini sağlamaktadır. Ayrıca kullanıcılarına daha geniş bir hizmet yelpazesi sunmaktadır.

## 2.6. 6G (6th Generation)

6G'nin, 5G'den daha yüksek veri aktarım hızları, daha düşük gecikme süresi ve daha yüksek kapasite sağlayan, kablosuz teknolojinin bir sonraki gelişimi olması amaçlanmıştır. 5G'nin kullandığı mmWave frekanslarından daha yüksek olan Terahertz (THz) frekanslarında çalışması beklenmektedir. THz frekansları, saniyede yüzlerce gigabit'e ulaşan önemli ölçüde daha yüksek veri aktarım hızları sağlayacaktır. 6G'nin uzaktan cerrahi, sürücüsüz araçlar ve endüstriyel otomasyon gibi uygulamalar için kritik olacak 5G'den daha düşük gecikme süresine sahip olacağı tahmin ediliyor. 5G'nin sinyal paraziti nedeniyle sorun yaşayabileceği yoğun metropol lokasyonlarında, 6G'nin daha kararlı bağlantı sunması öngörülmektedir.

6G mimarisinin çekirdeğinin bazı önemli değişikliklerle 5G temeli üzerine inşa edilmesi beklenmektedir. THz bölgesinde daha yüksek frekans bantlarının kullanılması bir potansiyel farktır. Bu, yeni radyo erişim teknolojilerinin yanı sıra yüksek frekanslı sinyalleri işleyebilen anten tasarımlarının geliştirilmesini gerektirecektir.

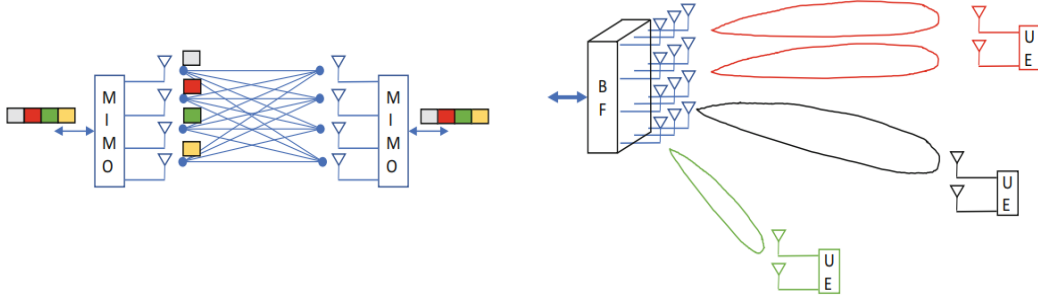
## 3. 5G İÇİN GELİŞEN TEKNOLOJİLER (EMERGING TECHNOLOGIES FOR 5G)

5G, ortaya çıkan bazı teknolojiler sayesinde gerçeğe dönüşen birçok yeni uygulamayı mümkün kılmaktadır. Bu bölümde, bu yeni teknolojiler tartışılacaktır. Bu teknolojilerin karşılaştırılması Çizelge 2'de gösterilmektedir.

### 3.1. Massive MIMO (Massive MIMO)

MIMO, radyo bağlantısının kalitesini, verimini ve kapasitesini artırmak için hem vericiye hem de alıcıya birden fazla anten yerleştiren bir radyo anteni teknolojisidir. Çok kullanıcı MIMO (MU-MIMO), aynı zaman ve frekans kaynakları üzerinden birçok kullanıcıya aynı anda birden çok akış göndererek ağ kapasitesini artırır. MIMO, Wi-Fi ve LTE dahil olmak





**Şekil 7.** Uzamsal çoğullama (solda) ve tek/çok kullanıcılu hüzmeye oluşturma (sağda), massive MIMO'nun iki örneğidir (Massive MIMO is demonstrated by spatial multiplexing (left) and single/multi-user beamforming (right)) [7]

üzere birçok modern kablosuz ve RF teknolojisinde kullanılmaktadır. Kablosuz standartların tanımlanmasından sorumlu küresel kuruluş olan 3GPP, MIMO'yu LTE için ilk olarak 2008'de Sürüm 8'de belirtmiştir. Bu ilk sürüm, iki verici ve iki alıcı, 2x2 MIMO kullanmıştır ve işlem gücündeki artışlar, 4x4 MIMO kullanan mevcut 4G LTE ağları ile kablosuz ağlarda daha fazla eşzamanlı veri akışının kullanılmasını sağlamıştır.

Massive MIMO, anten sinyali işlemede kullanılan çok sayıda anten bileşenine atıfta bulunan bir terimdir. Çok büyük olarak adlandırılması için, anten sayısının 64'ten büyük olması gerekir. Çok sayıda antenden gelen sinyaller havada birleştirildiğinde, kanal ve donanım kusurlarının (gürültü, zayıflama ve donanım gibi) ortalamasının alınmasını sağlamak için massive MIMO'da büyük sayılar işlemi kullanılır. Birkaç antenle, bunların nasıl kullanılacağına dair iki seçenek vardır: İlk adım, enerjiyi arzu edilen sinyal yönlerinde odaklarken, istenmeyen sinyal yönlerinde enerjiyi sıfırlayarak (bir hüzmeye oluşturarak) dizi kazancı üretmektir. Daha sonra, her bir anten üzerinde farklı veri akışları ileterek, uzamsal çoğullama kazancı elde edilebilir. Toplam kullanıcı veya sistem veri hızını artırmak için her iki strateji de kullanılabilir. Şekil 7 her iki durumu da göstermektedir.

Bir hücrede ulaşılabılır spektral verim [19]

$$SE = N_K \left(1 - \frac{D}{S}\right) \log_2 \left(1 + \frac{1}{I}\right), \quad [\text{bit/s/Hz/cell}] \quad (1)$$

olarak verilebilir. Burada,  $SE$ , spektral verimliliği ifade eder. Baz istasyonları (BS), o sırada  $N_K$  tek anten kullanıcı ekipmanları (UE'ler) ile iletişim kurar.  $S$ , çerçeve başına iletim sembolleridir ve  $D$  pilot iletim sembolleridir.  $I$  girişim terimidir.

Massive MIMO, uzamsal çeşitlilik [20], uzamsal çoğullama ve hüzmeye oluşturma [21] olmak üzere üç temel kavram üzerine kuruludur. Yansıtılan çeşitli sinyaller, birden çok sinyal yoluna neden olan farklı engeller nedeniyle farklı zaman gecikmeleri, zayıflama seviyeleri ve seyahat yönü ile alıcı antene ulaşacaktır. Birden fazla alıcı anten konuşlandırıldığında, her bir anten, iletilen sinyalin kalitesini iyileştirmek için matematiksel olarak birleştirilebilen sinyalin biraz farklı bir versiyonunu alır. Bu teknik, alıcı antenler birbirinden uzamsal olarak ayrıldığından, uzamsal çeşitlilik olarak bilinir. Uzamsal çeşitlilik, radyo sinyalini birden fazla

anten üzerinden ileterek, her bir antenle, bazı durumlarda sinyalin değiştirilmiş versiyonlarını göndererek elde edilir. Uzamsal çeşitlilik, radyo bağlantısının güvenilirliğini artırırken, uzamsal çoğullama, veri taşımak için ek kanallar olarak çoklu geçiş yollarını kullanarak radyo bağlantısının kapasitesini artırır. Uzamsal çoğullama, verici ve alıcı arasında birden fazla, benzersiz, veri akışının gönderilmesine izin vererek, verimi önemli ölçüde artırır ve dolayısıyla MU-MIMO terimi birden fazla ağ kullanıcılarının tek bir verici tarafından desteklenmesine olanak tanımaktadır.

Geniş bir bölgeye yayın yapmak yerine, hüzmeye biçimlendirme, kablosuz sinyali belirli bir yönde yoğunlaştırmak için modern anten teknolojilerini kullanır. Hüzmeyeleme (beamforming), ağ kapasitesini ve performansını artırmak için massive MIMO ile birlikte çalışan bir diğer önemli kablosuz yöntemdir. Geniş bir bölgeye yayın yapmak yerine, hüzmeye oluşturma, kablosuz bir sinyali kesin bir yönde yoğunlaştırmak için gelişmiş anten teknolojilerini kullanmaktadır. Bu yöntem, çeşitli yönlerde yönlendirilen kırılgan arasındaki paraziti azaltarak daha büyük anten dizilerinin yerleştirilmesine izin vermektedir. Bir massive MIMO sisteminin çok fazla sayıda anteni, abonelere yönelik hem yatay hem de dikey ışınlar üreten 3D hüzmeye şekillendirmeye izin vererek tüm aboneler için veri hızlarını (ve kapasitesini) iyileştirir – özellikle yüksek katlı metropol ortamlarında yardımcı olur. Massive MIMO, 6G için ultra massive MIMO'ya (UM MIMO) yükseltilebilir. Massive MIMO sistemlerinin avantajları, bilgi teorik bakış açısından gözden geçirilebilir. Massive MIMO sistemleri, elverişsiz yayılma ortamlarından kaynaklanan sorunları ortadan kaldırırken, büyük noktadan noktaya MIMO sistemlerinin umut verici çoğullama kazancını elde edebilir.

Her hücrenin tek anten kullanıcılarına bağlı  $K$  ve  $N$  antenli bir baz istasyonuna sahip olduğu,  $L$  hücrelerine sahip bir massive MIMO sistemini inceleyelim.  $h_{i,k;l;n}$   $l$ -inci hücredeki  $k$ -nıncı kullanıcıdan  $i$ -ninci baz istasyonunun  $n$ -ninci antenine kadar olan kanal katsayısını temsil etmektedir, bu da karmaşık bir küçük ölçekli sönümleme faktörüne eşdeğerdir [1]:

$$h_{i,k;l;n} = g_{i,k;l;n} \sqrt{d_{i,k;l}}, \quad (2)$$

burada  $g_{i,k;l;n}$  ve  $d_{i,k;l}$  sırasıyla karmaşık küçük ölçekli sönümleme ve büyük ölçekli sönümleme katsayılarını

temsil etmektedir. Büyük ölçekli sönmüleme katsayıları aynı baz istasyonundaki çeşitli antenler için aynıdır, ancak kullanıcıya bağlıdır. Daha sonra,  $l$ -inci hücredeki tüm  $K$  kullanıcılarından  $i$ -inci baz istasyonuna kanal matrisi şu şekilde ifade edilebilir:

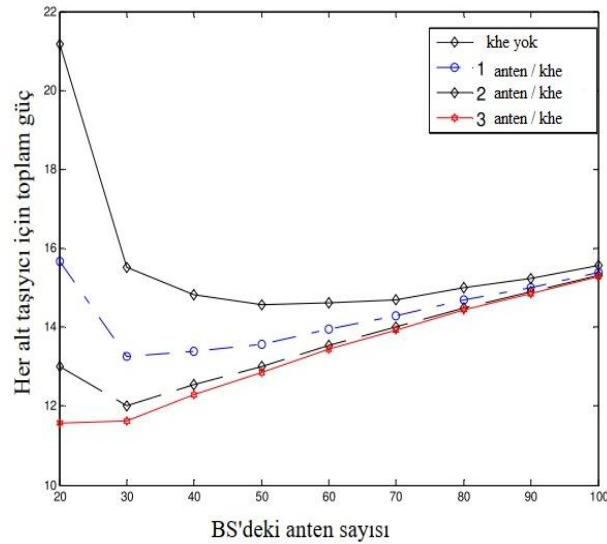
$$H_{i,l} = \begin{pmatrix} h_{i,l,l,1} & \cdots & h_{i,K,l,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{i,l,l,N} & \cdots & h_{i,K,l,N} \end{pmatrix} = G_{i,l} D_{i,l}^{1/2}, \quad (3)$$

$$G_{i,l} = \begin{pmatrix} g_{i,l,l,1} & \cdots & g_{i,K,l,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{i,l,l,N} & \cdots & g_{i,K,l,N} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$D_{i,c} = \begin{pmatrix} d_{i,l,l} & \cdots & \cdots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \cdots & \cdots & g_{i,K,l} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

$K$  tekli anten kullanıcıları ve  $N$  antenli bir baz istasyonu ile tek hücreli ( $L=1$ ) bir massive MIMO sistemini inceleyelim. Kolaylık sağlamak için, tek hücre sistemleri istendiğinde hücre ve baz istasyonu endeksleri düşer.

Şekil 8, küçük hücre erişim (khe) noktasında olduğu kadar baz istasyonundaki anten sayısını da arttırsak, küçük hücre erişim noktasında anten olmaması durumuna kıyasla alt taşıyıcı başına toplam gücün 10 katına düştüğünü açıkça göstermektedir. Ancak, ekstra donanımın artık toplam gücü azaltmayacağı doygunluk noktaları vardır.

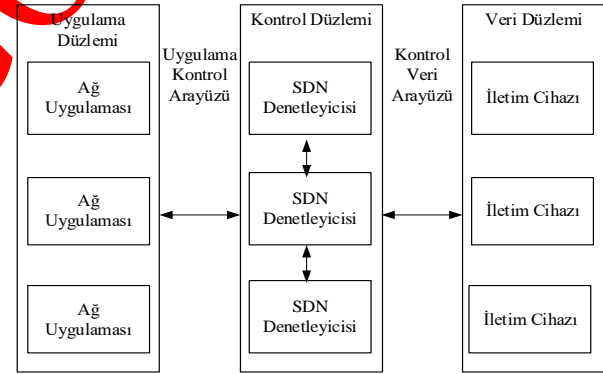


Şekil 8. Küçük hücre erişim (khe) noktaları içeren senaryodaki ortalama toplam güç tüketimi (In the scenario with small cell access points, the average total power consumption)

### 3.2. Yazılım Tabanlı Ağ (Software Defined Network)

Yazılım Tanımlı Ağ (SDN), ağ kontrol düzlemi ile veri düzleminin ayrılmasını sağlayarak daha verimli ve esnek

ağ kaynak yönetimine olanak tanıyan bir mimaridir. SDN ağ yönetimini basitleştirir ve programlayarak ağ operatörlerinin değişen ağ gereksinimlerine ve trafik modellerine daha kolay uyum sağlamasına olanak tanımaktadır. Kontrol düzlemi ağ topolojisini, yönlendirme kararlarını ve diğer ağ işlevlerini yönetirken, veri düzlemi veri paketlerini ağ cihazları arasında iletmektedir. Kontrol düzlemi ve veri düzlemi bir SDN mimarisinde ayrılır ve ağ, yazılım tabanlı bir kontrolör aracılığıyla merkezi olarak yönetilmektedir. Denetleyici, ağ cihazlarıyla etkileşime girerek onlara veri paketlerinin ağ politikalarına ve gereksinimlerine uygun olarak nasıl iletileceği konusunda talimat verir. Kurallar, her bir ağ cihazı yerine merkezi olarak değiştirilip güncellenebildiğinden, ağ yönetimi daha dinamik ve esnek hale gelmektedir. SDN ayrıca, birden fazla sanal ağın bir fiziksel ağ altyapısı üzerinde bir arada var olmasına izin veren sanal ağ kaplamalarının oluşturulmasına da izin vermektedir. Her sanal ağın kendi ağ ilkeleri ve gereksinimleri olabilir, bu da ağ operatörlerinin farklı kullanıcı ve uygulama türlerine özel hizmetler sunmasına olanak tanır. Anahtarlar ve yönlendiriciler gibi ağ cihazları, bir SDN mimarisinde açık protokoller ve uygulama programlama arabirimi (API) kullanılarak programlanır, bu da bunların manuel yerine yazılım aracılığıyla yönetilip yapılandırılmasına olanak tanır. Bu, manuel ağ cihazı yapılandırması ve yönetimi ihtiyacını azaltarak büyük ölçekli ağ dağıtımlarını yönetmeyi daha kolay ve verimli hale getirir.



Şekil 9. Temel SDN mimarisi (Basic SDN architecture)

Ağ uygulamaları, bulut düzenleme ve iş uygulamalarının tümü SDN uygulamalarına örnektir. Kontrol katmanında SDN, kontrol düzlemini veri düzleminde ayırır. SDN denetleyicisi, uygulama katmanı ihtiyaçlarını yorumlayan ve SDN veri kanallarını yöneten bir kontrol katmanı bileşenidir. SDN denetleyicisi, verimli kararlar almak için uygulama katmanında SDN uygulamaları için ağın mantıksal bir haritasını oluşturur ve görüntüler. Altyapı katmanı, SDN veri yollarını uygulayan ve trafiği ileten ağ donanımını (baz istasyonları, çekirdek ağ, anahtarlar, yönlendiriciler vb.) ifade etmektedir. SDN denetleyicilerinden programlamaya izin vermek için altyapı katmanı, altyapıya açık standartlara dayalı

programlı erişim sunmalıdır. Şekil 9'da temel bir SDN mimarisi gösterilmektedir.

Paket gecikmelerinin ağırlıklı toplamı, SDN mimarisindeki ortalama gecikmeyi tanımlamak için kullanılabilir. Paket  $Lat_{hit}$  ise, akış tablosunun erişimini vurur ve  $Lat_{miss}$  ise, paket akış girişini kaçırmaktadır. SDN anahtarında alınan paketin, akış tablosundaki akış girişini bulma olasılığı  $\varepsilon$ 'dur. Bu nedenle ortalama gecikme ( $l$ ) [22]

$$l = \varepsilon Lat_{hit} + (1 - \varepsilon) Lat_{miss}, \quad [s] \quad (6)$$

olarak verilebilir. Ortalama verim ( $t_h$ ), [22]

$$t_h = \lambda(1 - P_l)(\varepsilon + (1 - \varepsilon)(1 - P_c)), \quad [\text{packets/s}] \quad (7)$$

olarak verilebilir. Burada  $\lambda$  ortalama varış oranıdır.  $P_l$  ve  $P_c$  sırasıyla düşük öncelikli kuyruk için engelleme olasılığını ve kontrolör kuyruğunun engelleme olasılığını gösterir.

### 3.3. mmWave (mmWave)

mmWave kelimesi, 24 GHz ile 100 GHz arasında çok küçük bir dalga boyuna sahip radyo frekansı spektrumunun bir bölümünü ifade eder. Spektrumun bu kısmı genellikle kullanılmadığından, mmWave teknolojisi, erişilebilir bant genişliği miktarını önemli ölçüde artırmayı amaçlamaktadır. Genellikle 800 ile 3000 MHz arasındaki daha düşük frekanslar, modern 4G LTE ağlarının yanı sıra TV ve radyo yayınlarıyla daha fazla kalabalıktır. Bu küçük dalga boyunun bir başka avantajı, azaltılmış iletim mesafesine rağmen verileri daha da hızlı taşıyabilmesidir. Yüksek frekans bantları daha küçük bir alanı kapsar, ancak daha büyük bir alanı kapsayan daha az veri gönderen düşük frekans bantlarından çok daha fazla veri gönderebilmektedir. 24 GHz'in üzerindeki yüksek frekans bantları, muazzam bant genişliklerini ve yüksek veri hızlarını işleme yeteneğine sahip oldukları için seçilmiştir, bu da onları kablosuz ağ kapasitesini genişletmek için mükemmel kılacaktır. mmWave bantları 300 GHz'e kadar değişse de, 5G'nin 24 GHz ile 100 GHz arasındaki bantları kullanması planlanıyor. 2 GHz'e kadar bant genişlikleri, daha iyi veri çıkışı için bantları birleştirme gereksinimi olmaksızın 100 GHz'e kadar mmWave bantları tarafından desteklenebilir. Şekil 10, 5G mmWave spektrumunu göstermektedir.

Şekil 11'de görüldüğü gibi, 3.5 GHz ve 4.9 GHz civarındaki dar bantlara ek olarak, birçok ülke Ka-bandında, Q-bandında ve hatta E-bandında 5G NR iletişimleri için bir dizi mmWave bantları yayınlamıştır.

mmWave'in hücre boyutları daha küçük ve yoğunlukları daha büyük olacaktır. mmWave 5G ağları çok hızlıdır, ancak menzilleri de oldukça sınırlıdır. Banliyö ve kırsal yerlerde mmWave teknolojisinin kullanımının mümkün olmayan durumlar için bir abonenin 5G kulesinin bir bloğunda olması gerekir. Kapılar, pencereler, ağaçlar ve duvarlar mmWave sinyalini engeller ve gizler, potansiyel aralığını daha da kısıtlar ve kapsama alanı için çok fazla kuleye ihtiyaç duyduğundan, taşıyıcıların kurulumu maliyetlidir. mmWave teknolojisi, 6GHz altı ağların

kullanıldığı menzil eksikliği nedeniyle kırsal ve banliyö bölgelerinde uygulanabilir değildir. Sub-6GHz 5G [23], 4G'den daha hızlıdır, ancak mmWave ile aynı yüksek hızları sağlamamaktadır. Daha geniş bir menzile sahip olduğundan ve nesnelere daha iyi nüfuz edebildiğinden, taşıyıcıların konuşlandırılması çok daha ekonomiktir. 6GHz'in altındaki orta ve düşük frekans bantları, 6GHz altı olarak adlandırılır. LTE hızları, bağlanan cihazların sayısı nedeniyle sıkışık bölgelerde yavaşlayabilir, ancak mmWave teknolojisi, önemli performans düşüşleri yaşamadan daha fazla sayıda bağlantıyı yönetebilir. Sonuç olarak, mmWave, spor etkinlikleri, konserler, havaalanları ve diğer büyük toplantılar gibi ağ tıkanıklığının sorun olduğu sıkışık bölgelerde ve metropol alanlarda kurulabilir. 5G mmWave de massive MIMO antenleri kullanılır. 5G mmWave'in daha küçük hücre boyutları, frekanslar kısa mesafelerde yeniden kullanılabilir olduğundan, yalnızca büyük verim değil, aynı zamanda verimli spektrum kullanımı sağlar. Dış mekan hücre boyutlarının 100 ila 200 metre arasında olması beklenirken, yüksek yoğunluklu iç mekan kurulumları 10 metre kadar küçük olabilir. Görüş hattı (LOS) ve görüş hattı olmayan (NLOS) sinyal yayılımının yanı sıra anten tasarımı, 5G mmWave performansında büyük rol oynamaktadır. mmWave bağlantısı için yol kaybı [24]

$$L_{mm}(r) = \begin{cases} \rho + 10\alpha_L \log(r) + \chi_L & \text{link LOS ise} \\ \rho + 10\alpha_N \log(r) + \chi_N & \text{diğer,} \end{cases} \quad [\text{dB}] \quad (8)$$

olarak verilebilir. Burada  $L_{mm}(r)$ ,  $r$  [m] mesafesindeki mmWave bağlantısı için yol kaybını gösterir.  $\alpha_L$  ve  $\alpha_N$ , sırasıyla LOS ve NLOS için yol kaybı üssüdür.  $\chi_L$  ve  $\chi_N$ , sırasıyla LOS ve NLOS mmWave bağlantıları için sıfır ortalama log-normal değişkenlerdir. THz bant iletişimi, kısa mesafelerde yüksek veri hızları sağlayan 6G için mmWave'in yerini alabilir. THz bandı 0.1–10 THz arasındadır.

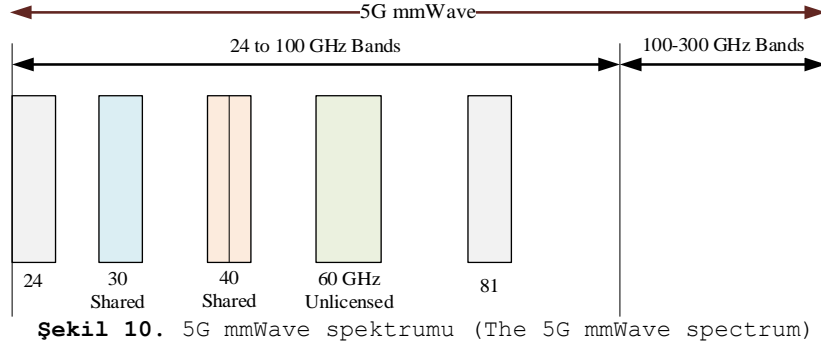
Aşağı bağlantı iletim şemasında kullanıcının mmWave BS'den  $r$ (m) mesafesinde aldığı güç aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$P_{r,mmWave} = \frac{P_t G(\theta) \mu}{L_{mm}(r)}. \quad (9)$$

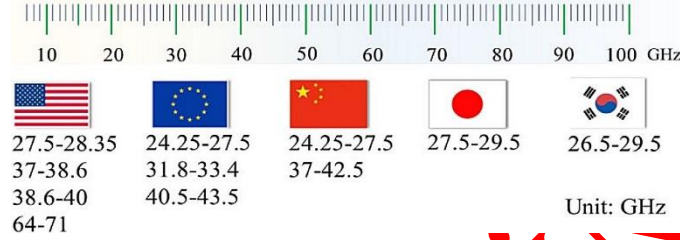
Burada  $P_t$  iletim gücüdür,  $G(\cdot)$  anten kazancıdır ve  $\mu$  çok yönlü sönmüleme zarfının karesini temsil etmektedir.

Bir BS'ye bağlı kullanıcıların bir zaman bölmeli çoğullama çoklu erişim sistemi (time division multiplexing multiple Access, TDMA) kullanılarak çoğullandığı ve böylece termal gürültünün tüm sistem bant genişliği üzerinde toplandığı varsayılmaktadır. Kullanıcının başlangıç noktasında olduğu ve BS'nin  $r$  mesafesinde olduğu varsayılır, kullanıcının sinyal-parazit artı gürültü oranı (signal-to-interference plus noise ratio, SINR) aşağıdaki gibi verilir [24]:

$$SINR = \frac{P_{r,mmWave}}{\sum_{x \neq r} P_r(x) + \sigma^2}. \quad (10)$$



Şekil 10. 5G mmWave spektrumu (The 5G mmWave spectrum)



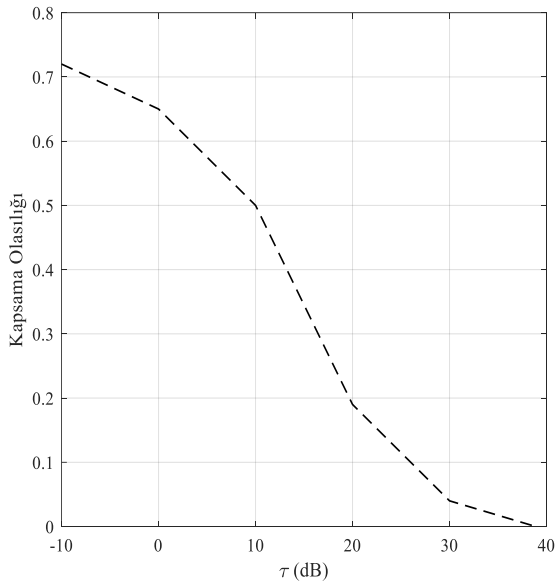
Şekil 11. Farklı ülkelere göre mmWave 5G bantları spektrumu (mmWave 5G bands spectrum by different countries)

Burada  $\sigma^2 = -174 \text{ dBm/Hz} + 10 \log(B \text{ Hz})$  olarak hesaplanır. Belirli bir  $\tau$  eşliğine sahip SINR kapsama olasılığı toplam  $N$  kullanıcıya sahip bir BS'de [24]

$$P(\text{Rate} = \frac{B}{N} \log_2(1 + \text{SINR}) > \tau) = P(\text{SINR} > 2^{\frac{\tau N}{B}} - 1) \quad (11)$$

olarak tanımlanır.

Şekil 12 BS ağındaki mmWave'in SINR kapsama olasılığını göstermektedir. SINR eşiği  $\tau$ 'nin artmasıyla birlikte kapsama olasılığı düşmektedir.



Şekil 12. 5 km<sup>2</sup>'lik için mmWave ağındaki SINR kapsama olasılığı (SINR coverage in mmWave network for 5km<sup>2</sup> BS)

#### 4. ÇOKLU ERİŞİM TEKNİĞİ (MULTIPLE ACCESS TECHNIQUE)

Mobil radyo erişim teknolojileri (RAT'ler), evrimsel faydaları ve avantajları ile birlikte bu bölümde sunulmaktadır. FDMA, TDMA, CDMA ve OFDMA, çoklu erişim yöntemlerinin örnekleridir [25]. Yukarıda bahsedilen çoklu erişim stratejilerinin tümü, bir tür "ortogonal" olarak düşünülebilir, burada kullanıcıların erişimi, kablosuz kanalı paylaşırken birbirleriyle karışmaz. Ortogonal olmaya zorlayan mevcut kaynakların sayısı ile sınırlıdır. CDMA, kablosuz cihazın BS'ye iletimi özünde ortogonal olmadığı için bu kuralın bir istisnasıdır. FDMA'da frekans, farklı kullanıcıların kullanabilmesi için kanallara ayrılmıştır. FDMA'da aynı kanala çok sayıda taşıyıcı tahsis etmek zordur. Komşu frekans bantlarına spektral emisyonları sınırlamak için frekans alanındaki koruyucu bantlar gereklidir. Zaman, birkaç kullanıcının hücresel sisteme bağlanmasını sağlamak için TDMA'da zaman dilimlerine bölünür. Semboller arası girişim (dengeleme) için telafi gereklidir. Koruma bantları, UL iletim süresi gecikme değişikliklerine uyum sağlamak için zaman alanında kullanılmaktadır. OMA konseptini yok etmekten kaçınmak için zaman dilimleri tüm kullanıcılar arasında senkronize edilmelidir. Aboneler, CDMA'da PN kodlarına bölünür ve hepsi aynı anda tam frekans kanalı üzerinden iletir. Yayılma kodları, tüm bant genişliğini aynı anda kullanmak için kullanılır. Aboneler, OFDMA'da değiştirilmiş zaman dilimlerinde farklı frekans kanallarına atanır. Çeşitli kullanıcılara (çeşitli zaman dilimlerinde) çeşitli alt taşıyıcılar atanır. Çizelge 3, güç, zaman ve frekans olmak üzere üç alanla ilişkili birkaç çoklu erişim stratejisinin görsel bir temsili göstermektedir.



**Çizelge 3.** Farklı çoklu erişim sistemlerinin ana hatları (An overview of various multiple access systems)

Erişim Yöntemi	Temel İlke	Avantajları	Dezavantajları
FDMA	Frekans bölümlenmesi	Basit, düşük gecikme, iyi spektral verimlilik	Kanal sayısı sınırlıdır, ölçeklenebilir değil
TDMA	Zaman bölümlenmesi	Esnek, yüksek kapasite, ölçeklenebilir	Senkronizasyon gerekli, zamanlama hassasiyeti önemlidir
CDMA	Kod bölümlenmesi	Yüksek kapasite, çoklu hizmetler, güvenli	Çoklu kullanıcı sayısı sınırlıdır, karmaşık algoritma
OFDMA	Ortogonal frekans bölümlenmesi	Yüksek spektral verimlilik, yüksek kapasite, esnek	Pulsasyonlu ortamda performansı azalır, yönetim karmaşıklığı

Hata olasılığı ( $P_e$ ), alınan sinyalde ortaya çıkan hataların oranıdır. OFDMA için,  $M$ -ary PSK'nın  $P_e$  değeri [26]

$$P_e \cong 2\left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right) \operatorname{erfc} \left[ \sqrt{\frac{3E_{av}}{2(M-1)N_0}} \right], \quad (12)$$

olarak verilebilir.  $N_0$ , AWGN'deki yoğunluktur,  $E_{av}$ ,  $M$ -ary QAM'de iletilen ortalama sembol enerjisinin değeridir.

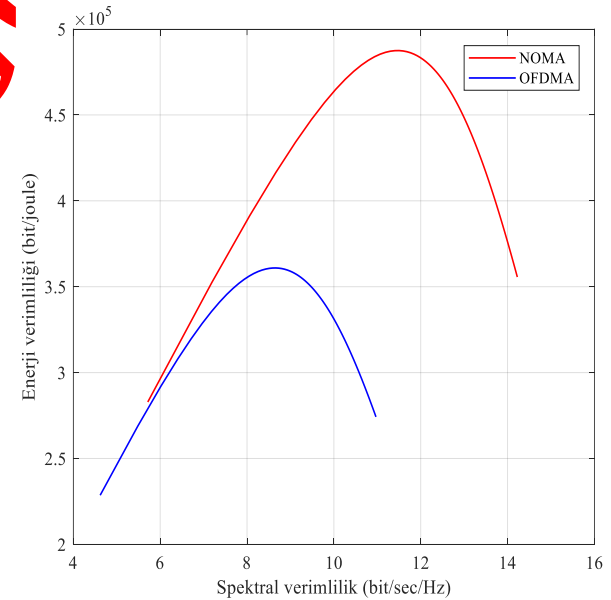
OFDMA, alt taşıyıcı aralığının ve zaman aralığı uzunluklarının esnek ve çok çeşitli ihtiyaçları ve kullanım durumlarını karşılamak için uyarlanabilir olduğu 5G dijital hücresel sistemde hala kullanılmaktadır. 5G'de NOMA'nın da kullanılması planlanmaktadır. Hücre içi (kullanıcılar arası) girişimi önlemek için TDMA ve FDMA gibi bir OMA sistemindeki kullanıcılar arasında ortogonal kaynak tahsisi kullanılır. Kullanılabilir ortogonal kaynakların sayısı, çalıştırılacak abonelerin sayısını sınırlar. NOMA, kullanıcı kaynak tahsisinde hücre içi girişime izin verir ve bundan faydalanır. Bu girişimi azaltmak için, örneğin başarılı girişim iptali (SIC) veya çok kullanıcı algılama (MUD) gibi yaklaşımlar kullanılır. NOMA, birkaç kullanıcının tek bir kaynağı paylaşmasına izin veren ve böylece abone ve sistem verimini artıran ortogonal olmayan MA anlamına gelir. Tek hücreli bir ağda, güç alanı NOMA, kullanıcılar arasındaki kanal gücü eşitsizliklerinden yararlanır ve kapasiteye ulaşır. NOMA tabanlı sistemlerde iki abone aynı spektral bandı paylaşabilir ve her abonenin kendisine atanmış ayrı bir gücü vardır. NOMA, bu durumda farklı güç seviyelerine dayalı çoğullamayı gerçekleştirir. Düşük karmaşıklıktaki

çok kullanıcı algılama algoritmaları genellikle kod alanı NOMA sistemlerinde kullanılır. Kod alanı NOMA, seyrek kodlu çoklu erişim (SCMA), düşük yoğunluklu yayılma (LDS)-CDMA ve ara bölmeli çoklu erişim (IDMA) ile örneklenir. NOMA bu durumda çoğullamayı çeşitli kodlar kullanarak gerçekleştirir. 6G için değişen koşullara (ortogonal veya ortogonal olmayan, rastgele veya planlı) uyum sağlayabilen yeni nesil çoklu erişim (NGMA) önerilebilir.

Şu anda 5G için kullanılan ortama erişim teknolojisi, OFDM'nin OFDMA adı verilen çoklu erişim çeşididir. Bu nedenle, ortogonal olmayan sistemlerin ortogonal sistemlerle farklılaşmasını gözlemlemek için NOMA ve OFDMA arasında bir karşıtlık oluşmaktadır.  $|h_1|^2/N_1 \geq |h_2|^2/N_2 \geq \dots \geq |h_K|^2/N_K$  azalan düzene dayalı bir güç tahsisi  $p_1 \leq p_2 \leq \dots \leq p_K$ 'nin alınabileceğini varsayıldığında, girişim yapan sinyallerin kodunun tamamen hatasız olarak çözüldüğü varsayılarak, ulaşılabılır kullanıcı oranı  $R_i$  ( $i = 1, 2, \dots, K$ ) [6]

$$R_i = W \log_2 \left( 1 + \frac{p_i |h_i|^2}{\left( \sum_{j=1}^{i-1} p_j \right) |h_i|^2 + N_i W} \right), \quad (13)$$

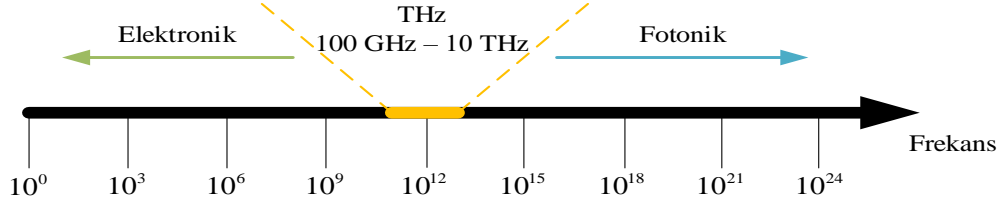
olarak verilebilir. Burada  $W$  bant genişliğidir. NOMA ve OFDMA karşılaştırmaları, spektrum verimliliği için Şekil 13'te gösterilmektedir.



**Şekil 13.** NOMA ve OFDMA'nın spektrum verimliliği karşılaştırması (Spectrum efficiency comparison of NOMA and OFDMA)

## 5. RF TEKNOLOJİSİ (RF TECHNOLOGY)

Kablosuz haberleşme, bugünün dünyasında hemen hemen herkesin kullandığı bir teknolojidir. İnternet, cep telefonları, televizyon ve radyo yayımları gibi birçok iletişim aracı, RF (Radyo Frekansı) teknolojisi



Şekil 14. THz spektrumu (THz spectrum)

kullanarak çalışır. RF teknolojisi, elektromanyetik dalga formunda iletişim sağlar. Bu dalga formu, verici ve alıcı arasında bir kablosuz iletişim bağlantısı oluşturmaktadır. RF teknolojisi, elektromanyetik dalga formunda iletişim sağlayarak vericiden alıcıya veri gönderir. Bu dalga, verici antenden çıkar ve havada ilerler. Alıcı anten ise, havadaki bu dalga formunu alır ve veriye dönüştürür. RF teknolojisi, birçok farklı frekans bandında çalışabilir [27]. Bu frekans bantları, kablosuz iletişim için ayrılmış belirli bir frekans aralığıdır.

THz frekans aralığı, elektromanyetik spektrumun yüksek frekanslı bölgesinde yer almaktadır ve genellikle 0,1 ila 10 THz aralığında tanımlanmaktadır [28]. Şekil 14 THz spektrumu göstermektedir. Bu frekans aralığı, kablosuz haberleşme sistemleri için büyük bir potansiyele sahiptir çünkü veri transfer hızları mmWave teknolojilerinin ötesinde olabilir. Ayrıca, THz radyasyonu, elektromanyetik ışımının "güvenli bölgesi" olarak kabul edilen frekans aralığından daha yüksek frekanslarda yer aldığı için, daha yoğun bir veri transferi için daha geniş bir bant genişliği sunar. Bu nedenle, THz haberleşme teknolojisi, birçok uygulama için özellikle de tıbbi görüntüleme, güvenlik tarama ve endüstriyel otomasyon gibi alanlarda büyük bir potansiyele sahiptir.

Kablosuz veri trafiği, son birkaç yılda benzeri görülmemiş bir genişlemeye tanık olmaktadır. Özellikle (2021) ile 2025 yılları arasında mobil veri trafiğinin yedi kat, video trafiğinin ise aynı zaman diliminde üç kat artması beklenmektedir. Büyük veri kablosuz bulutu, ultra hızlı kablosuz indirme ve kesintisiz veri aktarımı, telekomünikasyon ortamını dönüştürecek ve insanların iletişim kurma ve bilgiye erişme biçiminde devrim yaratacak gelişmelerdir.

THz frekans bandı, teorik olarak birkaç THz'e kadar ulaşan ve saniyede Terabit mertebesinde potansiyel bir kapasiteyle sonuçlanan kapsamlı bir bant genişliği vaat etmektedir. THz bandının analizi, bu frekansların ayrıca optik frekanslara kıyasla bir dizi avantaja sahip olduğunu göstermektedir. THz dalgaları, yukarı bağlantı iletişimi için aday olarak kabul edilir. Görüş hattı olmayan (NLoS) yayılmaya izin verirler ve sis, toz ve turbülans gibi uygunsuz iklim koşullarında iyi bir ikame görevi görürler. Tablo 4, bu bandın mmWave teknolojiye yönelik nihai vaadini göstermek için bir karşılaştırma sunmaktadır.

## 6. MODÜLASYON TEKNİKLERİ (MODULATION TECHNIQUES)

RF teknolojisi, genellikle frekans modülasyonu (FM) veya genlik modülasyonu (AM) gibi modülasyon

teknikleri kullanır. Bu teknikler, veri sinyalini bir taşıyıcı dalga ile birleştirir. Veri sinyali, taşıyıcı dalga frekansını değiştirerek modülasyon sağlar. Bu, veri sinyalinin kablosuz iletişim bağlantısı üzerinden alıcıya aktarılmasını sağlar.

Kablosuz haberleşme sistemlerinde RF teknolojisi, farklı frekans bandlarına dayanan birçok standart ve protokolü içermektedir [29]. Bu standartlar arasında Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, NFC ve RFID gibi kablosuz teknolojiler yer alır. Bu standartlar, kablosuz iletişim cihazlarının birbirleriyle iletişim kurmasını ve veri alışverişini yapmasını sağlamaktadır.

1G ve 5G arasındaki modülasyon teknikleri oldukça farklıdır. Modülasyon, bir taşıyıcı sinyalin bir bilgi sinyali ile değiştirilmesi anlamına gelir. Bu değiştirme, sinyalin taşınmasına yardımcı olan frekans, faz veya genlik gibi özelliklerdeki değişiklikler yoluyla gerçekleştirilir [30-32].

### 6.1. 1G'de Kullanılan Modülasyon Teknikleri (Modulation Techniques Used in 1G)

1G teknolojisi, analog bir teknolojidir ve sadece ses sinyallerinin taşınması için kullanılır. Ana modülasyon teknikleri FM ve AM'dir. FM, taşıyıcı frekansının modülasyon sinyali ile değiştirilmesi yoluyla gerçekleştirilirken, AM, taşıyıcı sinyalin genliğinin değiştirilmesi yoluyla gerçekleştirilir. 1G teknolojisi, ilk nesil kablosuz telefon teknolojisidir ve analog bir teknolojidir. 1G'de kullanılan temel modülasyon teknikleri şunlardır:

- Genlik Modülasyonu (AM): Taşıyıcı frekansının amplitüdünün modülasyon sinyali ile değiştirilmesiyle gerçekleştirilir. Bu değişiklik, analog ses sinyallerinin taşınması için kullanılır. AM, modüle edilen sinyalin gücünde bir değişiklik yaparak taşıyıcı sinyaldeki genlik değişimleriyle bilgiyi taşır.
- Frekans Modülasyonu (FM): Taşıyıcı frekansının modülasyon sinyali ile değiştirilmesiyle gerçekleştirilir. FM, AM'nin aksine, modüle edilen sinyaldeki genlik değişikliklerine bağlı değildir ve daha iyi bir ses kalitesi sağlar. Bu nedenle, FM 1G teknolojisinde daha yaygın olarak kullanılır.
- Darbe Kod Modülasyonu (Pulse Code Modulation, PCM): Analog ses sinyallerini dijital sinyallere dönüştürmek için kullanılan bir tekniktir. Bu teknik, analog sinyalin örneklenmesi, kuantalama ve kodlanması yoluyla gerçekleştirilir. Örnekleme, analog sinyalin belirli aralıklarla örneklenmesi anlamına gelir. Kuantalama, örnekleme sonrası

sayısal değerlerin belirli bir seviyeye indirgenmesidir. Kodlama, sayısal değerlerin dijital olarak kodlanması anlamına gelir.

Bu teknikler, 1G'nin analog doğası nedeniyle daha az veri transferi ve daha düşük ses kalitesi sağlar. Ancak, o zamanlar bu teknolojiler, kablosuz haberleşme için bir devrim niteliğindeydi ve mobil telefonculuğun temelini oluşturdu.

## 6.2. 2G'de Kullanılan Modülasyon Teknikleri (Modulation Techniques Used in 2G)

2G teknolojisi, dijital bir teknolojidir ve özellikle veri taşımak için kullanılır. 2G kablosuz telefon teknolojisi, analog teknolojiye farklı olarak daha yüksek veri transfer hızları ve daha iyi ses kalitesi sunar. 2G'de kullanılan temel modülasyon teknikleri şunlardır:

- Gauss Minimum Kaydırmalı Anahtarlama (Gaussian Minimum Shift Keying, GMSK): Taşıyıcı frekansını modüle etmek için bir faz kaydırma anahtarlama tekniğidir. Bu teknik, FM modülasyonuna benzer şekilde çalışır ve ses kalitesi için kullanılır. GMSK, darbe şekli ve taşıyıcı frekansı arasındaki ilişkiyi optimize ederek verimli bir veri transferi sağlar.
- Sürekli Faz Modülasyonu (Continuous Phase Modulation, CPM): Taşıyıcı frekansının fazının modülasyon sinyali ile değiştirilmesiyle gerçekleştirilir. Bu teknik, GMSK gibi bir FM benzeri tekniktir ve veri transferi için kullanılır. CPM, GMSK'ye kıyasla daha yüksek hızlı veri transferleri sağlar ve daha az spektral genişlik gerektirir.
- Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access, TDMA): Birçok kullanıcının aynı frekansı paylaşmasına izin veren bir çoğullama teknolojisidir. Bu teknik, frekans bandını zaman dilimleri olarak bölerek her kullanıcının belirli bir zaman diliminde sadece kendisine ayrılmış olan taşıyıcı frekansına erişmesini sağlar. Bu, daha yüksek kapasite ve daha iyi verimlilik sağlar.
- Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Code Division Multiple Access, CDMA): Her kullanıcının kendine özgü bir kod kullanarak aynı frekansı paylaşmasına izin veren bir çoğullama tekniğidir. Bu teknik, kullanıcıları birbirinden ayırmak için bir dizi kodlama işlemi kullanır. CDMA, TDMA'ya kıyasla daha fazla kapasite sağlar.

Bu teknikler, 2G'de daha yüksek veri transfer hızları ve daha iyi ses kalitesi sağlar. Ayrıca, TDMA ve CDMA gibi çoğullama teknikleri, daha fazla kullanıcının aynı frekansı paylaşmasına izin vererek kablosuz haberleşmede daha yüksek kapasite sağlar. Bu özellikler, mobil telefonculuğun daha yaygın hale gelmesini sağladı.

## 6.3. 3G'de Kullanılan Modülasyon Teknikleri (Modulation Techniques Used in 3G)

3G teknolojisi, 2G teknolojisinden daha gelişmiş bir teknolojidir ve daha yüksek hızda veri transferi için kullanılır. 3G (Üçüncü nesil) kablosuz telefon teknolojisi, daha yüksek hızlı veri transferi, daha iyi ses

kalitesi ve daha fazla kullanıcı kapasitesi sunan bir teknolojidir. 3G'de kullanılan temel modülasyon teknikleri şunlardır:

- Geniş Bant Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Wideband Code Division Multiple Access, WCDMA): CDMA'nın geliştirilmiş bir versiyonudur ve daha yüksek hızlı veri transferleri sağlar. Bu teknik, her kullanıcının kendine özgü bir kod kullanarak aynı frekansı paylaşmasına izin veren bir çoğullama tekniğidir. Ancak, CDMA'dan farklı olarak WCDMA, daha geniş bir frekans bandı kullanır ve daha yüksek hızlı veri transferleri için daha fazla kapasite sağlar.
- Yüksek Hızlı Downlink Paket Erişimi (High-Speed Downlink Packet Access, HSDPA): WCDMA'nın bir uzantısıdır ve daha yüksek hızlı indirme (downlink) veri transferleri sağlar. Bu teknik, hücresel ağlarda kullanılan bir paket anahtarlama teknolojisidir. HSDPA, modülasyon teknikleri olarak QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) ve 16QAM (16-QAM) kullanır.
- Yüksek Hızlı Uplink Paket Erişimi (High-Speed Uplink Packet Access, HSUPA): WCDMA'nın bir uzantısıdır ve daha yüksek hızlı yükleme (uplink) veri transferleri sağlar. Bu teknik, HSDPA'nın tamamlayıcısıdır ve aynı modülasyon teknikleri olan QPSK ve 16QAM kullanır.
- Zaman Bölmeli-Senkron Kod Bölmeli Çoklu Erişim (Time Division-Synchronous Code Division Multiple Access, TD-SCDMA): Çin'de kullanılan bir 3G teknolojisidir ve WCDMA ve CDMA2000'den farklı bir çoğullama tekniği kullanır. Bu teknik, TDMA ve CDMA teknolojilerinin bir kombinasyonudur ve kullanıcıları zaman ve kod bölümlerine ayırır.

Bu teknikler, 3G'nin daha yüksek hızlı veri hızlarına ve daha fazla kullanıcı kapasitesi sunmasını sağlar. Ayrıca, QPSK ve 16QAM gibi modülasyon teknikleri, daha yüksek veri hızlarına izin verir ve daha geniş bir kapsama alanı sağlar.

## 6.4. 4G'de Kullanılan Modülasyon Teknikleri (Modulation Techniques Used in 4G)

4G teknolojisi, 3G teknolojisinden daha hızlı veri transferi ve daha yüksek bant genişliği sağlamak için tasarlanmıştır. Ana modülasyon teknikleri OFDM (Ortogonal Frekans Bölme Çokluma) ve SC-FDMA (Tek Taşıyıcı Frekans Bölmeli Çoklu Erişim) dir. OFDM, birden fazla alt taşıyıcı sinyalinin kullanılmasıyla yüksek bant genişliği sağlar. SC-FDMA ise OFDM'den daha verimli bir şekilde çalışır ve tek taşıyıcı sinyali kullanarak bant genişliğini daha iyi yönetir. 4G kablosuz telefon teknolojisi, daha yüksek hızlı veri transferi, daha düşük gecikme süresi, daha yüksek kapasite ve daha iyi kullanıcı deneyimi sunan bir teknolojidir. 4G'de kullanılan temel modülasyon teknikleri şunlardır:

- Dikgen Frekans Bölmeli Çokluma (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM): 4G'nin temel modülasyon tekniğidir. Bu teknik, verileri çok

sayıda alt taşıyıcı frekans üzerinde modüle eder ve böylece daha yüksek veri hızlarına ve daha iyi hata düzeltme performansına izin verir. OFDM aynı zamanda yüksek hızlı veri transferi için çoklu anten kullanımını da mümkün kılar.

- Dördün Genlik Modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation, QAM): OFDM'in bir uzantısıdır ve yüksek veri hızları için kullanılır. Bu teknik, her bir alt taşıyıcı frekansının genliğini ve fazını değiştirerek veriyi modüle eder. Yüksek hızlarda, 64QAM ve 256QAM gibi yüksek dereceli QAM modülasyonları kullanılır.
- Çok girişli çok çıkışlı (Multiple Input Multiple Output, MIMO): OFDM ile birlikte kullanılan bir tekniktir ve veri hızlarını artırmak ve kapsama alanını genişletmek için kullanılır. Bu teknik, çoklu antenler kullanarak aynı frekansı paylaşarak daha fazla veri transferi yapar.
- Tek Taşıyıcı-Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access, SC-FDMA): 4G'nin yukarı bağlantı (uplink) veri transferi için kullanılan bir tekniktir. Bu teknik, OFDM'nin bir uzantısıdır ve düşük güç tüketimi ve daha yüksek veri hızları sağlamak için kullanılır.

4G'de, daha yüksek hızlı veri transferi, daha düşük gecikme süresi, daha yüksek kapasite ve daha iyi kullanıcı deneyimi bu teknikler sayesinde sunulmaktadır. Ayrıca, OFDM ve QAM gibi modülasyon teknikleri, daha yüksek veri hızlarına ve daha geniş bir kapsama alanına izin verir. MIMO teknolojisi de kapsama alanını artırarak daha iyi bir kullanıcı deneyimi sağlar.

#### 6.5. 5G'de Kullanılan Modülasyon Teknikleri (Modulation Techniques Used in 5G)

5G kablosuz telefon teknolojisi, daha yüksek hızlı veri transferi, daha düşük gecikme süresi, daha yüksek kapasite ve daha iyi kullanıcı deneyimi sunan bir teknolojidir. 5G'de kullanılan temel modülasyon teknikleri şunlardır:

- OFDM: 5G'de kullanılan OFDM, verileri çok sayıda alt taşıyıcı frekans üzerinde modüle eder ve böylece daha yüksek veri hızlarına ve daha iyi hata düzeltme performansına izin verir. OFDM aynı zamanda yüksek hızlı veri transferi için çoklu anten kullanımını da mümkün kılar.
- QAM: 5G'de kullanılan QAM, OFDM'in bir uzantısıdır ve yüksek veri hızları için kullanılır. Bu teknik, her bir alt taşıyıcı frekansının genliğini ve fazını değiştirerek veriyi modüle eder. Yüksek hızlarda, 256QAM gibi yüksek dereceli QAM modülasyonları kullanılır.
- Polar Kod Modulation (Polar Code Modulation, PCM): 5G'de yeni bir modülasyon teknolojisidir. Bu teknik, veri aktarımı sırasında hata düzeltme ve kodlama işlemlerini aynı anda gerçekleştirir. Böylece daha yüksek güvenilirlik ve veri hızları sağlanır.
- MIMO: MIMO, OFDM ile birlikte kullanılan bir tekniktir ve veri hızlarını artırmak ve kapsama alanını

genişletmek için kullanılır. Bu teknik, çoklu antenler kullanarak aynı frekansı paylaşarak daha fazla veri transferi yapar.

- Beamforming: Beamforming, MIMO teknolojisi ile birlikte kullanılır ve daha yüksek hızlı veri transferi ve daha iyi kapsama alanı sağlar. Bu teknik, veriyi bir anten ile yoğunlaştırarak kapsama alanını artırır.

5G'nin daha yüksek hızlı veri transferi, daha düşük gecikme süresi, daha yüksek kapasite ve daha iyi kullanıcı deneyimi sunmasına bu modülasyon teknikleri olanak sağlamaktadır. Ayrıca, OFDM ve QAM gibi modülasyon teknikleri, daha yüksek veri hızlarına ve daha geniş bir kapsama alanına izin verirken, PCM teknolojisi de daha yüksek güvenilirlik sağlar. MIMO ve beamforming teknolojileri ise kapsama alanını artırarak daha iyi bir kullanıcı deneyimi sunar.

#### 6.6. 6G'de Kullanılması (Planlanan / Öngörülen) Modülasyon Teknikleri (Modulation Techniques to be Used in 6G (Planned/Predicted))

6G teknolojisi, henüz tam olarak standartlaştırılmamış olsa da, bazı modülasyon teknikleri hakkında öngörüler ve araştırmalar mevcuttur. 6G teknolojisi, daha yüksek hızlı veri transferi, daha düşük gecikme süresi, daha yüksek kapasite ve daha fazla cihaz bağlanabilirliği gibi özellikler sunacak şekilde tasarlanmaktadır. Aşağıdaki modülasyon teknikleri, 6G'de kullanılması düşünülen teknolojilerdir:

- THz Dalga Modülasyonu: 6G teknolojisi, daha yüksek frekans bantlarından yararlanarak daha yüksek hızlı veri transferi sağlamayı amaçlamaktadır. Bu nedenle, THz dalga modülasyonu gibi teknikler üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. THz dalga modülasyonu, daha yüksek frekans bantlarında daha yüksek veri hızlarına ulaşılmasına izin verir.
- Yörünge Açılal Momentum (Orbital Angular Momentum, OAM): 6G teknolojisi için yeni bir modülasyon tekniğidir. Bu teknik, elektromanyetik dalgaların dönme hareketini kullanarak veriyi modüle eder ve böylece daha yüksek hızlı veri transferi sağlar. OAM aynı zamanda, daha yüksek kapasite ve daha düşük gecikme süresi gibi özellikleri de sağlar.
- Dikey Olmayan Çoklu Erişim (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA): 6G teknolojisinde kullanılacak olan bir diğer modülasyon tekniğidir. Bu teknik, birden fazla cihazın aynı frekansı paylaşarak veri transferini gerçekleştirmesine izin verir. Böylece, daha fazla cihazın aynı anda bağlanması ve daha yüksek kapasite sağlanır.
- Makine Öğrenmesi (Machine Learning, ML): 6G teknolojisi için öngörülen bir diğer tekniktir. Bu teknik, veri aktarımını optimize etmek için kullanılır. Özellikle, daha yüksek veri hızları ve daha düşük gecikme süresi için veri trafiğini akıllıca yönlendirir ve gereksiz veri akışlarını azaltır.



**Çizelge 5.** Kullanılan haberleşme sistemleri ve modülasyon teknikleri (Communication systems and modulation techniques used)

Haberleşme Sistemleri	Kullanılan Modülasyon Sistemi
GSM 2G	GMSK
GPRS 2.5G	
EDGE 2.75G	8PSK
CDMA 2000	QPSK
UMTS 3G	QPSK
HSDPA 3.5G	QPSK, 16QAM
WiFi	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
LTE 4G	QPSK, 16QAM
WiMAX	QPSK, 16QAM, 64QAM

- Full-Duplex (FD): 6G teknolojisinde kullanılacak bir diğer tekniktir. Bu teknik, aynı anda veri gönderme ve veri almayı mümkün kılar ve böylece daha yüksek kapasite sağlar. FD ayrıca, daha iyi bir kullanıcı deneyimi sunar ve gecikme süresini azaltır.

Kullanılan haberleşme sistemleri ve modülasyon teknikleri Çizelge 5'te sunulmaktadır. Çizelge 6'da 1G'den 5G'ye kadar kullanılan modülasyon teknikleri verilmektedir.

**Çizelge 6.** 1G ve 5G arasında kullanılan modülasyon teknikleri (Modulation techniques used between 1G and 5G)

Modülasyon Tekniği	1G	2G	3G	4G	5G
FM	X				
AM	X				
FSK		X			X
PSK		X	X	X	X
QAM			X	X	X
OFDM				X	X
SC-FDMA			X		X
MIMO			X	X	X
Massive MIMO				X	X
Beamforming				X	X
Polar Coding					X

## 7. 6G İÇİN ZORLUKLAR VE AÇIK KONULAR (CHALLENGES AND OPEN TOPICS FOR 6G)

Çizelge 7'de, 5G, 5G ötesi ve devrim niteliğinde bir 6G adımı olmak üzere karşılanacak yeni performans hedefleri ve gereksinimleri açıklanmaktadır. Çizelge 8'de, 6G ile ilgili literatürün kapsamlı olarak kategorize edilmiş araştırma yönleri sunulup tartışılmaktadır.

6G için zorluklar ve açık konular olarak özetlenebilir:

**Çizelge 7.** 5G ve 5G ötesi ve 6G gereksinimleri (5G requirements vs. beyond 5G requirements vs. 6G)

	5G	5G ötesi	6G
Uygulama tipleri	<ul style="list-style-type: none"> <li>eMBB (enhanced Mobile Broadband)</li> <li>URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communications)</li> <li>mMTC (massive Machine Type Communications)</li> </ul>	Güvenilir eMBB URLLC mMTC Hibrit (URLLC + eMBB)	<ul style="list-style-type: none"> <li>MBRLLC (mobile broadband reliable low latency communication)</li> <li>mURLLC (massive URLLC)</li> <li>HCS (human-centric services) <ul style="list-style-type: none"> <li>MPS (multi-purpose)</li> </ul> </li> <li>3CLS and energy services)</li> </ul>
Cihaz tipleri	Akıllı telefonlar Sensörler Dronlar	Akıllı telefonlar Sensörler Dronlar XR ekipmanı	Sensörler ve DLT cihazları CRAS XR ve BCI ekipmanı Akıllı implantlar
Hız gereksinimleri	1 Gb/s	100 Gb/s	1 Tb/s
Uçtan uca gecikme gereksinimleri	5 ms	1 ms	< 1 ms
Frekas aralığı	Sub-6 GHz Sabit erişim için mmWave	Sub-6 GHz Sabit erişim için mmWave	Sub-6 GHz Mobil erişim için mmWave Daha yüksek frekans ve THz bantlarının keşfi (300 GHz üzeri) RF olmayan (ör. optik, VLC, vb.)

**Tablo 8.** 6G ile ilgili literatürlerin listesi ve temel katkıları (A list of 6G literatures and their contributions)

Referans	Kategori	Araştırma Konusu ve Katkısı
[33-41]	6G Vizyonu	İlk nesil ağlardan 5G ağlarına son teknoloji bir form tartışılmaktadır. Ayrıca çalışmalar, 6G'nin ihtiyacını anlatmaktadır, bunları 5G ağ ve önceki teknolojilerle karşılaştırmaktadır ve kullanıcı ve hizmet sınıflarının bakış açısı ve taksonomisinden vizyonunu anlatmaktadır. Ayrıca literatürler, sıfır enerjili ağ oluşturma, güvenli iş modelleri, yeni nesil IoT ve birleşik hizmetler gibi 6G ağlarının geliştirilmesinde gelecekteki yönleri öngörmüştür.
[42-48]		Akıllı şehir, genişletilmiş gerçeklik, dokunsal iletişim, uzaktan sağlık, robotik ve insan-bilgisayar etkileşimi gibi 6G ağlarının öngörülen uygulamaları sunulmaktadır. Daha sonra, bu uygulamaların teknoloji gereksinimleri, makul teknoloji sağlayıcıları ve zorlukları tartışılmıştır.
[48-52]		Yazarlar, yaygın yapay zeka, hüresiz ağlar, metalmalzemeler, kablosuz güç aktarımı ve kuantum iletişimi gibi temel kolaylaştırıcıları ve bunların yararlarını tartışırken, 6G ağları ve kullanım durumları hakkında geliştirilmiş bir vizyon sunmaktadırlar.
[53-56]		Makale, beklenen uygulamaları, bu kullanım durumlarını destekleyen temel özellikleri ve özellikleri destekleyecek teknoloji bileşenlerini entegre ederek 6G ağları için yeni bir vizyon sunmaktadır. Ayrıca birden fazla açık araştırma problemlerine ışık tutmaktadır.
[45], [57-59]		6G ağları, yeni bir 6G ağları vizyonuyla derinlemesine öğrenilmiş, holografik olarak bağlantılı ve her yerde kapsanan ağlar olarak sınıflandırılmıştır. Yeni nesil ağların iletişim gereksinimleri, mevcut teknolojiler ve zorlukları hakkında ayrıntılı bir çalışma sunmaktadır. Ayrıca çeşitli uygulama gereksinimlerini karşılamak için 6G ağları için yeni KPI'lar sunmuşlardır.
[60-64]	Yapay Zeka	Bu makaleler, mobil uç bilgi işlem ve spektrum yönetimindeki yapay zeka uygulamaları dahil olmak üzere 6G ağları için yapay zeka tekniklerinin kullanım durumlarını incelemektedir. Ek olarak, 6G ağları iletişim senaryosunda yapay zekanın temel araştırma yönergelerini ve makul çözümlerini tartışmışlar.
[64-67]		6G ağ kablosuz iletişimi için yapay zekanın rolünü inceleyip ve otonom sürüşte yapay zeka algoritmalarının rolünü belirtmektedir.
[68-71]		Bu teknik incelemeler, özellikle 6G ağlarını hedefleyen kablosuz ağların (Fiziksel, orta erişim ve uygulama) farklı katmanları için çeşitli ML algoritmalarını incelerler.
[72-78]	Blok zincir	Yazarlar, 6G teknolojilerinde güvenlik ve mahremiyet perspektifinden blok zincir teknolojisinin önemini sundular. Blok zincirinin uygulanmasındaki zorlukları ve fırsatları vurgulamışlardır.
[79-81]	Kaynak tahsisi	Çalışmalar, iç mekan 6G ağ uygulamaları için yüksek veri hızlı optik iletişim için WDMA'da çok kullanıcı kaynak tahsisini araştırmışlardır. Çeşitlilik ve görüntüleme alıcılarındaki kaynak tahsisi sorunlarını ele alıp doğrusal programlama modeli formüle etmişlerdir.
[82-89]	Yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzeyler (RIS)	Yazarlar, yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzeylerin (RIS), iletilen sinyali akıllıca değiştirmek ve kanal farklılıklarına rağmen yüksek bir veri hızı sunmak için röleler olarak hareket edecek 6G ağlarının teknoloji bileşenlerinden biri olacağını öngörmüşlerdir. Ayrıca, RIS malzemelerinin tasarımı, RIS'de çok kullanıcı sistem için hüme şekillendirme gibi bu teknolojinin zorluklarını ve gelecekteki kapsamını da tartışmışlardır. Holografik iletişim için akıllı yüzeylerin potansiyel uygulamasını açıklamışlardır. Ayrıca, holografik iletişim için akıllı malzemelerin gelecekteki araştırma yönlerini ve zorluklarını da açıklamışlardır.
[90-93]	THz	THz iletişimi, enerji yönetimi, güvenlik ve mobilite yönetimi dahil olmak üzere 6G ağlarını optimize etmek için yapay zeka araçlarını uygulamaya yönelik bazı akıllı yaklaşımları özetlemişlerdir.
[94-103]	Gelecekteki Ağ Yapıları	Bu teknik incelemeler, özellikle 2030'da ortaya çıkacak olan 5G ağlarının ötesinde yeni nesil ağların özelliklerini, zorluklarını, iş modellerini ve teknoloji bileşenlerini tartışıyor.

1. 6G'nin, otonom araçlar ve endüstriyel otomasyon gibi uygulamalar için ultra güvenilir ve düşük gecikmeli iletişim dahil üzere çeşitli kullanım durumlarını desteklemek için yeni ağ mimarileri sunması beklenmektedir. Çeşitli gereksinimleri karşılamak için ölçeklenebilir, esnek ve programlanabilir ağ altyapısı tasarlamak çok önemli olacaktır.

2. 6G için önemli zorluklardan biri, katlanarak artan kablosuz bağlantı talebini karşılamak için yeterli spektrum kaynaklarını belirlemek ve tahsis etmek olacaktır. Yeni frekans bantlarını keşfetmeyi ve spektrum verimli bir şekilde kullanmak için yenilikçi yollar bulmayı gerektirecektir.

3. 6G'nin önceki nesillere kıyasla önemli ölçüde daha yüksek veri hızları ve kapasite sağlaması beklenmektedir. Saniyede terabit veri hızlarına ulaşmak, yeni modülasyon sistemleri, hümeleme ve massive MIMO gibi iletişim teknolojilerinde ilerlemeler gerektirecektir.

4. 6G için küresel standartlar ve düzenlemeler oluşturmak, farklı bölgelerde birlikte çalışabilirlik ve sorunsuz bağlantı için kritik olacaktır. Bu zorluğu etkili bir şekilde ele almak için endüstri paydaşları, hükümetler ve standardizasyon kuruluşları arasında uluslararası işbirliği ve koordinasyon gerekli olacaktır.

5. Kablosuz ağlar genişlemeye ve daha karmaşık hale gelmeye devam ettikçe, enerji verimliliği çok önemli olacaktır. 6G'nin enerji tüketimi endişelerini ele alması ve kablosuz cihazların ve ağ altyapısının güç verimliliğini iyileştirmenin yollarını bulması gerekecektir.

6. Kablosuz bağlantıya artan güven ile, sağlam güvenlik ve gizlilik mekanizmalarının sağlanması önemli bir zorluk olacaktır. 6G'nin güvenli iletişim protokolleri, şifreleme algoritmaları, kimlik doğrulama yöntemleri ve yapay zeka destekli saldırılar gibi ortaya çıkan tehditlere karşı koruma gibi sorunları ele alması gerekecektir.

7. Yapay Zekanın (AI), akıllı kaynak tahsisi, ağ optimizasyonu ve bağlama duyarlı hizmetler sağlayarak 6G ağlarında önemli bir rol oynaması muhtemeldir. Ancak, verimli AI algoritmaları geliştirmek, veri gizliliği endişelerini ele almak ve adil ve şeffaf karar verme süreçlerini sağlamak dahil olmak üzere, AI'nın kablosuz altyapıya entegrasyonu ile ilgili açık konular olacaktır.

Geleneksel şifreleme, büyük veri ve yapay zeka teknolojileri geliştikçe güvensiz hale gelmiştir. Sonuç olarak, yeni mahremiyet koruma tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. 6G'nin araştırma ve geliştirme çalışmalarının devam ettiğini ve teknoloji geliştikçe yeni zorlukların ve açık konuların ortaya çıkabileceğini not etmek önemlidir.

## 6. SONUÇ (CONCLUSION)

Hüresel ağların 1G'den 6G'ye evrimi, önemli teknolojik ilerlemeler ve ağ performansı ile sonuçlanmıştır. Her nesil, artan spektral verimlilik, dijital modülasyon teknikleri, çoklu erişim teknikleri ve son zamanlarda ağ

işlevi sanallaştırma ve yazılım tanımlı ağ iletişimi gibi yeni teknolojiler ve özellikler getirmiştir. 1G'den 6G'ye geçiş, sesli iletişimden yüksek hızlı veri aktarımına, cihazlarına ve akıllı şehirlere kadar yeni kullanım durumlarının ve uygulamalarının ortaya çıkmasına tanık olmuştur. Dünyada bağlantı sayısı artıka, daha güvenilir, daha hızlı ve güvenli ağlar için artan bir talep olacaktır. 5G şu anda en gelişmiş hüresel ağ olsa da araştırmacılar ve endüstri uzmanları şimdiden THz frekans bantları gibi daha fazla gelişme ve özellik getirmesi beklenen yeni nesil 6G'yi dört gözle beklemektedirler. Bu çalışma, hüresel ağ tasarımlarına, çoklu erişim tekniklerine ve 1G'den 5G'ye yeni ortaya çıkan teknolojilere genel bir bakış sunmaktadır. Çoklu erişim tekniklerindeki değişiklik dikkat çekicidir. 1G, AMPS FDMA kullanmıştır, 2G, GSM TDMA kullanmıştır, 3G, WCDMA UMTS CDMA kullanmıştır, 4G, LTE ve 5G NR OFDMA kullanmıştır. MIMO, 4G'de yeni bir teknoloji olarak kullanılırken, 5G'de mmWave massive MIMO kullanılmaktadır. Yeni çoklu erişim teknikleri ve teknolojileri ile daha fazla kullanıcıya daha hızlı hizmet vermek mümkün hale gelmektedir. 6G veya yeni nesil kablosuz iletişim teknolojisi için, THz bant iletişimi mmWave'in yerini alabilir, massive MIMO, UM MIMO'ya yükseltilebilir.

## ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Nazifa Mustari:** Fikrin oluşması, tasarımın yapılması ve yazımda katkıda bulunmuştur.

**M. Ali Karabulut:** Literatür taraması, simülasyonların yapılması ve yazım başlıklarında katkıda bulunmuştur.

**A. F. M. Shahen Shah:** İçerik açısından makalenin kontrol edilmesi, sonuçların incelenmesi ve değerlendirilmesi başlıklarında katkıda bulunmuştur.

**Ufuk Türel:** Denetim, inceleme, düzenleme ve eleştirel inceleme başlıklarında katkıda bulunmuştur. /

## ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışma ile ilgili herhangi bir kurum, kuruluş, kişi ile mali çıkar çatışması yoktur ve yazarlar arasında çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Dogra, A., Jha, R. K. and Jain, S. "A Survey on Beyond 5G Network With the Advent of 6G: Architecture and Emerging Technologies", *IEEE Access*, 9, 67512-67547, (2021).

- [2] Chettri, L. and Bera, R. "A Comprehensive Survey on Internet of Things (IoT) Toward 5G Wireless Systems", *IEEE Internet of Things Journal*, 7(1), 16-32, (2020).
- [3] Guo, F., et al., "An Adaptive Wireless Virtual Reality Framework in Future Wireless Networks: A Distributed Learning Approach", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(8), 8514-8528, (2020).
- [4] Ren, P. et al., "Edge AR X5: An Edge-Assisted Multi-User Collaborative Framework for Mobile Web Augmented Reality in 5G and Beyond," *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 10(4), 2521-2537, (2022).
- [5] Shah, A. F. M. S., Karabulut, M. A., Ilhan, H. and Tureli, U. "Performance optimization of cluster-based MAC protocol for VANETs," *IEEE Access*, 8(1), 167731-167738, (2020).
- [6] Shah, A. F. M. S., Qasim, A. N., Karabulut, M. A., Ilhan, H. and Islam, M. B. "Survey and Performance Evaluation of Multiple Access Schemes for Next-Generation Wireless Communication Systems," *IEEE Access*, 9(1), 113428-113442, (2021).
- [7] Shah, A. F. M. S., "A Survey From 1G to 5G Including the Advent of 6G: Architectures, Multiple Access Techniques, and Emerging Technologies", *IEEE 12th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, 1117-1123, (2022).
- [8] Budhiraja, I. et al., "A Systematic Review on NOMA Variants for 5G and Beyond," *IEEE Access*, 9, 85573-85644, (2021).
- [9] Sakai, M. et al. "Experimental Field Trials on MU-MIMO Transmissions for High SHF Wide-Band Massive MIMO in 5G," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 19(4), 2196-2207, (2020).
- [10] Tadros, C. N., Rizk, M. R. M. and Mokhtar, B. M. "Software Defined Network-Based Management for Enhanced 5G Network Services," *IEEE Access*, 8, 53997-54008, (2020).
- [11] Hussain R., "Shared-Aperture Slot-Based Sub-6-GHz and mm-Wave IoT Antenna for 5G Applications," *IEEE Internet of Things Journal*, 8(13), 10807-10814, (2021).
- [12] Nagai, H., et al, "Design and verification of large-scale optical circuit switch using ULCF AWGs for datacenter application," *Journal of Optical Communications and Networking*, 10(7), 82-89, (2018).
- [13] Van Heddeghem, W., et al., "A Quantitative Survey of the Power Saving Potential in IP-Over-WDM Backbone Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(1), 706-731, (2016).
- [14] Ming, F., et al., "GSM/GPRS Bearers Efficiency Analysis for Machine Type Communications", *IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC)*, 1-5, (2012).
- [15] Aggelis, K., Louvros, S., "GPRS performance optimization with pre-empted packet queue analysis", *6th International Conference on Design & Technology of Integrated Systems in Nanoscale Era (DTIS)*, 1-4, (2011).
- [16] Elnashar, A., El-Saidny, M. A. and Mahmoud, M. "Practical Performance Analyses of Circuit-Switched Fallback and Voice Over LTE," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(2), 1748-1759, (2017).
- [17] Elnashar, A., El-Saidny, M. A. and Mahmoud, M., "Practical Performance Analyses of Circuit-Switched Fallback and Voice Over LTE," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(2), 1748-1759, (2017).
- [18] Ferdouse, L., Erkucuk, S., Anpalagan, A. and Woungang, I. "Energy Efficient SCMA Supported Downlink Cloud-RANs for 5G Networks," *IEEE Access*, 8, 1416-1430, (2020).
- [19] Zhang, Y., Zhou, M., Zhao, H., Yang, L. and Zhu, H., "Spectral efficiency of superimposed pilots in cell-free massive MIMO systems with hardware impairments," *China Communications*, 18(6), 146-161, (2021).
- [20] Arabian, F., Nordin G. P. and Rice, M. "On the Ungerboeck and Forney Observation Models for Spatial Combining and Their Application to 5G Millimeter-Wave Bands," *IEEE Access*, 9, 22214-22231, (2021).
- [21] Guo, C., Tian, L., Jiang Z. H. and Hong, W. "A Self-Calibration Method for 5G Full-Digital TDD Beamforming Systems Using an Embedded Transmission Line," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 69(5), 2648-2659, (2021).
- [22] Suartana, I. M. and Rozaq, A., "Performance Modeling QoS for Multimedia Streaming in Software Defined Network," *Fourth International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE)*, Surabaya, Indonesia, (2021), pp. 1-5.
- [23] Asif, S. M., Anbiyaei, M. R., Ford, K. L., O'Farrell, T. and Langley, R. J. "Low-Profile Independently- and Concurrently-Tunable Quad-Band Antenna for Single Channel Sub-6GHz 5G New Radio Applications," *IEEE Access*, 7, 183770-183782, (2019).
- [24] Banerjee, S., Gochhayat, S. P. and Shetty, S., "Performance Analysis of Fixed Broadband Wireless Access in mmWave Band in 5G," *International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, Honolulu, USA, (2023), 124-129.
- [25] Boccuzzi, J., "Introduction to Cellular Mobile Communications," In: M. Vaezi, Z. Ding, H. Poor (eds): *Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond*, Springer, Cham, 3-37, (2016).
- [26] Navita, A., "Performance analysis of OFDMA, MIMO and SC-FDMA technology in 4G LTE networks," *6th International Conference- Cloud System and Big Data Engineering*, Noida, India, (2016), 554-558.
- [27] Hartmann, M. et al., "CNTFET Technology for RF Applications: Review and Future Perspective," *IEEE Journal of Microwaves*, 1(1), 275-287, (2021).
- [28] Liu, S., Yu, X., Guo, R., Tang, Y. and Zhao, Z., "THz channel modeling: Consolidating the road to THz communications," *China Communications*, 18(5), 33-49, (2021).
- [29] Kolodziej, K. E., et al., "Multitap RF Canceller for In-Band Full-Duplex Wireless Communications," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 15(6), 4321-4334, (2016).
- [30] Secgin, S., "Cellular Communication and 1G Systems," in *Evolution of Wireless Communication Ecosystems*, *IEEE*, (2023), 51-56.
- [31] Kumar, S., Gupta, G. and Singh, K. R., "5G: Revolution of future communication technology," *International Conference on Green Computing and Internet of Things*, Greater Noida, India, (2015), 143-147.



- [32] Del Peral-Rosado, J. A., et al., "Survey of Cellular Mobile Radio Localization Methods: From 1G to 5G," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(2), 1124-1148, (2018).
- [33] David, K. and Berndt, H., "6G vision and requirements: Is there any need for beyond 5G?" *IEEE Veh. Technol. Mag.*, 13(3), 72–80, Sep. (2018).
- [34] Monserrat, J. F., et al., "Key technologies for the advent of the 6G," *IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. Workshops*, 1–6, (2020).
- [35] Lu, Y. and Ning, X., "A vision of 6G—5G's successor," *J. Manage. Anal.*, 7(3), 301–320, Aug. (2020).
- [36] Chen, Y., et al., "Pervasive intelligent endogenous 6G wireless systems: Prospects, theories and key technologies," *Digit. Commun. Netw.*, 6, 2–14, (2020).
- [37] Khan, L. U., I. Yaqoob, M. Imran, Z. Han, and C. S. Hong, "6G wireless systems: A vision, architectural elements, and future directions," *IEEE Access*, 8, 147029–147044, (2020).
- [38] Bi, Q., "Ten trends in the cellular industry and an outlook on 6G," *IEEE Commun. Mag.*, 57(12), 31–37, (2019).
- [39] Qamar, F., et al., "Issues, challenges, and research trends in spectrum management: A comprehensive overview and new vision for designing 6G networks," *Electronics*, 9, 14-16, (2020).
- [40] Lu, Y. and Zheng, X., "6G: A survey on technologies, scenarios, challenges, and the related issues," *J. Ind. Inf. Integr.*, 19, 1–52, Jul. (2020).
- [41] Ahmed, R. and Matin, M. A., "Towards 6G wireless networks-challenges and potential technologies," *J. Electr. Eng.*, 71(4), 290–297, (2020).
- [42] Chowdhury, M. Z., et al., "6G Wireless Communication Systems: Applications, Requirements, Technologies, Challenges, and Research Directions," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 1, 957-975, (2020).
- [43] Akyildiz, I. F., Kak, A., and Nie, S., "6G and beyond: The future of wireless communications systems," *IEEE Access*, 8, 133995–134030, Jul. (2020).
- [44] Tonkikh, E. V., Burobina, K. D., and Shurakhov, A. A., "Possible applications of sixth generation communication networks," *Syst. Signals Gener. Process. Field Board Commun.*, Moscow, Russia, 1–6, (2020).
- [45] Elmeadawy, S., and Shubair, R. M., "6G Wireless Communications: Future Technologies and Research Challenges," *International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA)*, Ras Al Khaimah, UAE, (2019), 1-5.
- [46] Nayak, S., and Patgiri, R., "6G communications: A vision on the potential applications," 1–8, Apr. (2020), arXiv:2005.07531. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2005.07531>
- [47] Tataria, H., et al., "6G wireless systems: Vision, requirements, challenges, insights, and opportunities," 109(7), 1166-1199, (2021).
- [48] Yang, W. et al., "Semantic Communications for Future Internet: Fundamentals, Applications, and Challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 25(1), 213-250, (2023).
- [49] Tariq, F., et al., "A Speculative Study on 6G," *IEEE Wireless Communications*, 27(4), 118-125, (2020).
- [50] Sergiou, C., et al., "Complex systems: A communication networks perspective towards 6G," *IEEE Access*, 8, 89007–89030, May (2020).
- [51] Yang, Y., et al., "Towards 6G wireless communication networks: Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts," *Sci. China Inf. Sci.*, 64, 1–76, May (2020).
- [52] Bariah, L., et al., "A prospective look: Key enabling technologies, applications and open research topics in 6G networks," *IEEE Access*, 8, 174792–174820, Sep. (2020).
- [53] Saad, W., Bennis, M., and Chen, M., "A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems," *IEEE Network*, 34(3), 134-142, (2020).
- [54] Zhao, Y., et al., "6G mobile communication networks: Vision, challenges, and key technologies," *Scientia Sinica Inf.*, 49(8), 963–987, Aug. (2019).
- [55] Katz, M., et al., "6Genesis flagship program: Building the bridges towards 6G-enabled wireless smart society and ecosystem," *IEEE 10th Latin-American Conf. Commun. (LATINCOM)*, Levi, Finland., 1–9, (2018).
- [56] Dang, S., Amin, O., Shihada, B., and Alouini, M.-S., "From a human-centric perspective: What might 6G be?" *Nature Electron.*, 3, 20–29, Jan. (2020).
- [57] Ahokangas, P., Alves, H., de Beek, J. V., and Bennis M., "Key drivers and research challenges for 6G ubiquitous wireless intelligence 6G research visions 1," *6G Flagship White Paper*, Sep. (2019).
- [58] Yuan, Y., Zhao, Y., Zong, B., and Parolari, S., "Potential key Technologies for 6G mobile communications," *Sci. China Inf. Sci.*, 63(8), 1–19, May (2020).
- [59] Giordani, M., Polese, M., Mezzavilla, M., Rangan, S., and Zorzi, M., "Towards 6G networks: Use cases and technologies," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 3, pp. 51–63, Mar. (2020).
- [60] Yang, H., Alphones, A., Xiong, Z., Niyato, D., Zhao, J. and Wu, K., "Artificial-Intelligence-Enabled Intelligent 6G Networks," *IEEE Network*, 34(6), 272-280, (2020).
- [61] Letaief, K. B., Chen, W., Shi, Y., Zhang, J., and Zhang, Y.-J.-A., "The roadmap to 6G: AI empowered wireless networks," *IEEE Commun. Mag.*, 57(8), 84–90, (2019).
- [62] Shafin, R., et al., "Artificial intelligence-enabled cellular networks: A critical path to beyond-5G and 6G," *IEEE Wireless Commun.*, 27(2), 212–217, Apr. (2019).
- [63] Piran, M. J. and Suh, D. Y., "Learning-Driven Wireless Communications, towards 6G," *International Conference on Computing, Electronics & Communications Engineering (iCCECE)*, 219-224, (2019).
- [64] Tang, F., Kawamoto, Y., Kato, N., and Liu, J., "Future intelligent and secure vehicular network toward 6G: Machine-learning approaches," *Proc. IEEE*, 108(2), 292–307, (2020).
- [65] Tareq, B., et al., "A vision on the artificial intelligence for 6G communication," *ICT Express*, 9(2), 197-210, (2023).
- [66] Shafin, R., Liu, L., Chandrasekhar, V., Chen, H., Reed, J. and Zhang, J. C., "Artificial Intelligence-Enabled Cellular

- Networks: A Critical Path to Beyond-5G and 6G," *IEEE Wireless Communications*, 27(2), 212-217, (2020).
- [67] Tang, F., Kawamoto, Y., Kato, N., and Liu, J., "Future intelligent and secure vehicular network toward 6G: Machine-learning approaches," *Proc. IEEE*, vol. 108, no. 2, pp. 292–307, Feb. (2020).
- [68] 6G White Paper on Machine Learning in Wireless Communication Networks-6GFlagship, *6G White Paper*, Apr. (2020).
- [69] Kato, N., Mao, B., Tang, F., Kawamoto, Y., and Liu, J., "Ten challenges in advancing machine learning technologies toward 6G," *IEEE Wireless Commun.*, 27(3), 96–103, (2020).
- [70] Mao, B., Kawamoto, Y., and Kato, N., "AI-based joint optimization of QoS and security for 6G energy harvesting Internet of Things," *IEEE Internet Things J.*, 7(8), 7031–7042, Mar. (2020).
- [71] Nawaz, S. J., Sharma, S. K., Wyne, S., Patwary, M. N., and Asaduzzaman, M., "Quantum machine learning for 6G communication networks: State-of-the-art and vision for the future," *IEEE Access*, 7, 46317–46350, (2019).
- [72] Nguyen, T., Tran, N., Loven, L., Partala, J., Kechadi, M.-T., and Pirttikangas, S., "Privacy-aware blockchain innovation for 6G: Challenges and opportunities," *2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, Levi, Finland, 1–5, (2020).
- [73] Hewa, T., Gür, G., Kalla, A., Ylianttila, M., Bracken, A., and Liyanage, M., "The role of blockchain in 6G: Challenges, opportunities and research directions," *2nd 6G Wireless Summit*, Levi, Finland, 1-5, (2020).
- [74] Lu, Y., "Security in 6G: The prospects and the relevant technologies," *J. Ind. Integr. Manage.*, 5, 1–24, (2020).
- [75] Manogaran, G., Rawal, B. S., and Saravanan, V., "Blockchain based integrated security measure for reliable service delegation in 6G communication environment," *Comput. Commun.*, 161, 1–22, Jul. (2020).
- [76] Tschorsch, F. and Scheuermann, B., "Bitcoin and beyond: A technical survey on decentralized digital currencies," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, 18(3), 2084–2123, (2016).
- [77] Dai, H.-N., Zheng, Z., and Zhang, Y., "Blockchain for Internet of Things: A survey," *IEEE Internet Things J.*, 6(5), 8076–8094, Oct. (2019).
- [78] Xie, J., Yu, F., R. Huang, T., Xie, R., Liu, J., and Liu, Y., "A survey on the scalability of blockchain systems," *IEEE Netw.*, 33(5), 166–173, (2019).
- [79] Qamar, F., Siddiqui, M. U. A., Hindia M. N., Hassan R., and Nguyen Q. N., "Issues, challenges, and research trends in spectrum management: A comprehensive overview and new vision for designing 6G networks," *Electronics*, 9, 14-16, Sep. (2020).
- [80] Sadi, Y., Erkucuk, S., and Panayirci, E., "Flexible physical layer based resource allocation for machine type communications towards 6G," *2nd 6G Wireless Summit*, Levi, Finland, 1–5, (2020).
- [81] Bilge, K. Ç., Nuno, K. P., "Resource sharing and scheduling in device-to-device communication underlying cellular network", *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg.* 27(5), 604-609, (2021).
- [82] Yuan, X., Zhang, Y.-J. A., Shi, Y., Yan, W. and Liu, H., "Reconfigurable-Intelligent-Surface Empowered Wireless Communications: Challenges and Opportunities," *IEEE Wireless Communications*, 28(2), 136-143, April (2021).
- [83] Basar, E., "Reconfigurable intelligent surface-based index modulation: A new beyond MIMO paradigm for 6G," *IEEE Trans. Commun.*, 68(5), 3187–3196, (2020).
- [84] Huang, C., et al., "Holographic MIMO surfaces for 6G wireless networks: Opportunities, challenges, and trends," *IEEE Wireless Commun.*, 27(5), 118–125, (2020).
- [85] Wymeersch, H. and Denis, B., "Beyond 5G wireless localization with reconfigurable intelligent surfaces," *IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, pp. 1–6, (2020).
- [86] Renzo, M. Di, "6G Wireless: Wireless Networks Empowered by Reconfigurable Intelligent Surfaces," *25th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, Ho Chi Minh City, Vietnam, (2019).
- [87] Hodge, J. A., Mishra, K. V., and Zaghoul, A. I., "Intelligent timevarying metasurface transceiver for index modulation in 6G wireless networks," *IEEE Antennas Propag. Lett.*, 19, 1891–1895, (2020).
- [88] Tang, W., Chen, M. Z., Dai, J. Y., Zeng, Y., Zhao, X., Jin, S., Cheng, Q., and Cui, T. J., "Wireless communications with programmable metasurface: New paradigms, opportunities, and challenges on transceiver design," *IEEE Wireless Commun.*, 27(2), 180–187, Apr. (2020).
- [89] Bariah, L. et al., "A prospective look: Key enabling technologies, applications and open research topics in 6G networks," *IEEE Access*, 8, 174792–174820, (2020).
- [90] Ji, B. et al., "Several Key Technologies for 6G: Challenges and Opportunities," *IEEE Communications Standards Magazine*, 5(2), 44-51, ((2021)).
- [91] Rikkinen, K., Kyosti, P., Leinonen, M. E., Berg, M., and Parssinen, A., "THz radio communication: Link budget analysis toward 6G," *IEEE Commun. Mag.*, 58(11), 22–27, (2020).
- [92] Polese, M., et al., "Toward end-to-end, full-stack 6G terahertz networks," *IEEE Commun. Mag.*, 58(11), 48–54, (2020).
- [93] Du, J., Jiang, C., Wang, J., Ren, Y., and Debbah, M., "Machine learning for 6G wireless networks: Carrying forward enhanced bandwidth, massive access, and ultrareliable/low-latency service," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, 15(4), 122–134, Dec. (2020).
- [94] 5G Evolution and 6G, Docomo White Paper, Jan. (2020).
- [95] Networks-2030, a Blueprint of Technology, Applications and Market Drivers Towards the Year 2030 and Beyond, *White Paper-Focus Group Network*, 2030.
- [96] 6G Drivers and the UN SDGs-6GFlagship, 6G White Paper, Jun. (2020).
- [97] "6G waves magazine-6GFlagship," *Spring, Tech. Rep.*, (2020).
- [98] White Paper on 6G-the Next Hyper Connected Experience for All, *Samsung*, Seoul, South Korea, 1–46, (2020).
- [99] Li, R., "Towards a new Internet for the year 2030 and beyond," *Future Netw.*, 1–23, Jul. (2019).

- [100] Liu, G., et al., "Vision, requirements and network architecture of 6G mobile network beyond 2030," *China Communications*, 17(9), 92-104, (2020).
- [101] Alwis, C. D., et al., "Survey on 6G Frontiers: Trends, Applications, Requirements, Technologies and Future Research," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2, 836-886, (2021).
- [102] Bhat, J. R., and Alqahtani, S. A., "6G Ecosystem: Current Status and Future Perspective," *IEEE Access*, 9, 43134-43167, (2021).
- [103] Wang, M, Lin, Y, Tian, Q. and Si, G., "Transfer Learning Promotes 6G Wireless Communications: Recent Advances and Future Challenges," *IEEE Transactions on Reliability*, 70(2), 790-807, (2021).

ERKEN GÖRÜNÜM