BİLGİ TEKNOLOJİLERİ VE İLETİŞİM KURUMU

DÜNYA'DA 5G ADAPTASYONU VE 6G TEKNOLOJİSİNİN GETİRECEĞİ POTANSİYEL YENİLİKLER



SEKTÖREL ARAŞTIRMA VE STRATEJİ GELİŞTİRME DAİRESİ BAŞKANLIĞI

İÇİNDEKİLER

1. GİRİŞ 10

2. 5G TEKNOLOJİSİNİN KÜRESEL ADAPTASYONU 13
2.1. 5G'nin Yaygınlaşma Süreci ve Mevcut Durum 13
2.1.1. 5G Penetrasyonunun Coğrafi Dağılımı 14
2.1.2. Öne Çıkan Piyasalar 16
2.1.3. 5G'nin Yayılmasını Tetikleyen Faktörler 17
2.1.4. 5G Genişlemesinin Önündeki Zorluklar ve Engeller 18
2.2. Geleceğe İlişkin Tahminler 19

3. BAŞARILI 5G ADAPTASYONU GÖSTEREN ÜLKELER 21
3.1. Çin: 5G Liderliği ve Yatırımları 23
3.2. Güney Kore: 5G Kapsama Alanı ve Yayılımı 26
3.3. ABD: 5G Büyüme Süreci ve Stratejisi 28
3.4. Japonya: Teknolojik Altyapı ve 5G'nin Geleceği 31

4. 5G ADAPTASYONUNDA KARŞILAŞILAN ZORLUKLAR 35
4.1. Avrupa: Düşük Kapsama Oranı ve Engeller 35
4.2. Filipinler: Cihaz Fiyatları ve Dijital Okuryazarlık Sorunları 39
4.3. Afrika: Altyapı ve Erişim Engelleri 40

5. 5G ADAPTASYONUNU ENGELLEYEN GENEL FAKTÖRLER 45
5.1. Ekonomik Engeller ve Yatırım Gereksinimi 45
5.2. Altyapı Yetersizlikleri ve Spektrum Verimliliği 47
5.3. Kapsama Alanı Boşlukları ve Kırsal Bölgelere Etkisi 49
5.4. Sağlık Endişeleri ve Kamu Algısı 51

6. TÜRKİYE'NİN 5G FREKANS İHALESİ VE STRATEJİK ETKİLERİ 52
6.1. 5G Teknolojisi Bağlamında Türkiye'nin Stratejik Yol Haritası 52
6.2. İhale Sonuçları ve Teknik Analiz: Spektrum Dağılımı ve Rekabetçi Konumlandırma 53
6.3. Finansal Analiz: Yatırım Maliyeti ve Ekonomik Sürdürülebilirlik 55
6.4. İşletmeci Yükümlülükleri: Yerlilik Şartı 55
6.5. Gelecek Perspektifi: Düzenleyici İkilem ve Endüstriyel 5G'ye Odaklanma 57

7. 6G TEKNOLOJİSİNİN GELİŞİMİ 58
7.1. 6G ve 6G'ye Geçiş Süreci 58
7.2. 6G Teknolojisinin Getireceği Yenilikler 70
7.2.1. 6G'de Etkinleştirici Temel Teknolojiler 70
7.2.1.1. Milimetre Dalga, Terahertz Bandı, Görsel ve Optik Haberleşme 71
7.2.1.2. Telsiz Erişim Teknolojileri ve Masif MIMO 72
7.2.1.3. 6G'de Derin Öğrenme, Makine Öğrenmesi ve Yapay Zekâ 73
7.2.1.4. Karasal Olmayan Ağlar 77
7.2.1.5. 6G'de Kuantum Haberleşme 78
7.2.1.6. Sanal/Artırılmış/Karma/Genişletilmiş Gerçeklik (AR/VR/MR/XR) 79
7.2.1.7. Holografik İletişim 80
7.2.1.8. Dijital İkiz 82
7.2.1.9. Dokunsal (Tactile) İletişim (Dokunsal İnternet) ve Haptik Uygulamalar 84
7.2.1.10. İnsan-Makine (Beyin-Bilgisayar) Arayüzü (HMI/BCI) ve İnsan Merkezli Hizmetler (HCS) 87
7.2.1.11. Blokzincir ve Dağıtık Defter Teknolojileri (DLT) 88
7.3. 6G'de Yeni İsterler 90
7.3.1. Büyük Gelişmiş Mobil Genişbant 91
7.3.2. Büyük Ultra Güvenilir Düşük Gecikmeli Haberleşme 91
7.3.3. Mobil Geniş Bant Güvenilir ve Düşük Gecikmeli Haberleşme 92
7.3.4. Diğer Bazı İsterler ve Tanımlamalar 92
7.4. 6G'nin Dikey Sektörlerde Yenilikçi Uygulamaları ve Bazı Kullanım Senaryoları 94

8. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME 97
KAYNAKLAR 101

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1: Çin'de 5G Baz İstasyonları Sayısı (Bin adet)..... 25
Şekil 3.2: Çin'de Mobil Genişbant Trafiği (100 milyon GB)..... 25
Şekil 3.3: Güney Kore 5G Abone Sayıları (Milyon kişi)..... 28
Şekil 3.4: Japonya Ulusal 5G Planı Çerçevesi..... 33
Şekil 4.1: Bölgelere Göre Mobil Aboneliklerin Dağılımı..... 35
Şekil 4.2: Afrika Kıtasında 5G Teknolojisinin Mevcut Durumu..... 41
Şekil 6.1: Türkiye İçin Tahmin Edilen 5G Abone Sayısı Yayılımı (Milyon)..... 56
Şekil 7.1: ITU Varsayımsal Palet Diyagramı..... 66
Şekil 7.2: 5G ve 6G Zaman Çizelgesi..... 66
Şekil 7.3: Mobil Haberleşme Teknolojilerinin Evrimi..... 67

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 2.1: 5G Penetrasyon Oranları..... 16
Tablo 3.1: Ülke Bazlı 5G Göstergeleri..... 22
Tablo 6.1: 5G İhalesi Spektrum Tahsis Sonuçları ve İşletmeci Konumlandırması..... 54
Tablo 7.1: Mobil Haberleşme Teknolojisi..... 63

ÖNSÖZ



Bilgi ve İletişim Teknolojilerindeki hızlı dönüşüm, haberleşme altyapılarını ekonomik büyüme, sanayinin dijitalleşmesi, kamu hizmetlerinin etkinliği ve teknolojik bağımsızlık açısından stratejik bir konuma taşımaktadır. Bu dönüşümün merkezinde yer alan 5G; yüksek kapasite, düşük gecikme ve çok sayıda cihazın eş zamanlı bağlantısını mümkün kılan yapısıyla, akıllı üretimden sağlığa, ulaştırmadan kamu hizmetlerine kadar geniş bir alanda dijital dönüşümün temel altyapılarından biri hâline gelmiştir.

Bu anlayışla hazırlanan "Dünya'da 5G Adaptasyonu ve 6G Teknolojisinin Getireceği Potansiyel Yenilikler" başlıklı raporumuzda; 5G'nin küresel yayılımını, öne çıkan ülke uygulamalarını, adaptasyonu hızlandıran ve sınırlayan unsurları ve Türkiye'nin 5G'ye geçiş sürecini kapsamlı biçimde ele aldık. İncelemelerimiz, başarılı bir teknolojik dönüşümün yalnızca altyapı yatırımlarıyla değil; öngörülebilir düzenleyici çerçeve, sürdürülebilir yatırım ortamı, Ar-Ge kapasitesi ve kamu-özel sektör iş birliğiyle mümkün olduğunu göstermektedir.

Türkiye açısından 5G'ye geçişi yalnızca yeni bir mobil haberleşme teknolojisinin devreye alınması olarak değil; yerli teknoloji ekosisteminin güçlendirilmesi, sanayinin dijital dönüşümünün hızlandırılması ve teknolojik yetkinliğimizin artırılması bakımından önemli bir fırsat olarak görüyoruz. Özellikle endüstriyel 5G ve akıllı üretim uygulamalarının ülkemiz için yüksek katma değer oluşturabilecek alanlar arasında yer aldığı değerlendirilmektedir.

Öte yandan, 5G'nin yaygınlaşması devam ederken 2030'lu yıllarda ticarileşmesi beklenen 6G teknolojilerine yönelik hazırlıkların da bugünden başlatılması gerektiğine inanıyoruz. Yapay zekâ destekli ağlar, terahertz frekansları, karasal olmayan ağlar, kuantum haberleşme ve yeni nesil dijital uygulamalar, geleceğin haberleşme ekosistemini şekillendirecektir. Türkiye'nin bu süreçte yalnızca teknolojiyi kullanan değil, standartlara katkı sunan ve teknoloji geliştiren bir ülke olarak konumlanmasını önemsiyoruz.

Bu raporun, ülkemizin 5G ve 6G alanındaki politika, düzenleme ve strateji çalışmalarına katkı sağlamasını temenni ediyorum.

Mehmet KOÇYİĞİT
Kurul Başkanı

YÖNETİCİ ÖZETİ

21. yüzyılın ilk çeyreğini geride bırakırken, Bilgi ve İletişim Teknolojileri (BİT) alanında yaşanan hızlı gelişmeler, ülkelerin ekonomik kalkınma modellerini ve uluslararası rekabet güçlerini yeniden tanımlayan en belirleyici faktör haline gelmiştir. Bu çerçevede hazırlanan bu rapor, telekomünikasyon sektörünün içinden geçmekte olduğu tarihsel dönüşümü; küresel veriler, ülke stratejileri ve geleceğe yönelik teknolojik öngörüler ışığında, Türkiye'nin stratejik hedefleriyle uyumlu bir perspektifte değerlendirmektedir. Raporun temel çıkış noktası, beşinci nesil (5G) ve ufukta beliren altıncı nesil (6G) mobil haberleşme teknolojilerinin yalnızca birer iletişim altyapısı değil, aynı zamanda ulusal egemenlik, siber güvenlik ve endüstriyel verimlilik açısından temel unsurlardan biri olduğudur. Küresel görünüm incelendiğinde, 5G teknolojisinin yaygınlaşma hızının, kendisinden önceki nesil olan dördüncü nesil (4G) teknolojisine kıyasla çok daha yüksek olduğu görülmektedir. 2025 yılı sonu itibarıyla küresel düzeyde 5G bağlantıları 2,7 milyarı aşmış olup, bu durum dijitalleşmenin küresel ekonominin merkezine yerleştiğini teyit etmektedir. Ancak bu küresel yönelimin, coğrafi bölgeler arasında farklılaşan stratejik öncelikler ve uygulama modelleriyle şekillendiği görülmektedir. Kuzey Amerika ve Asya-Pasifik bölgeleri kapsama alanı ve abone sayısında önemli mesafeler katetmişken, Avrupa bölgesi daha temkinli ve regülasyon odaklı bir süreç izlemektedir. Bu durum, 5G teknolojisinin kullanımında tek bir evrensel modelin bulunmadığını; her ülkenin kendi demografik, coğrafi ve ekonomik gerçeklerine uygun özgün stratejiler geliştirmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Rapor kapsamında detaylıca incelenen ülke örnekleri, kamunun etkili liderliğinin teknolojik dönüşümdeki belirleyici rolünü açıkça göstermektedir. Özellikle Çin Halk Cumhuriyeti örneği, 5G teknolojisinin sadece bireysel iletişim ihtiyaçlarını karşılamakla kalmayıp, sanayi üretiminin dijitalleştirilmesi, lojistik süreçlerin optimizasyonu ve akıllı şehir uygulamalarının hayata geçirilmesi için kullanıldığını gözler önüne sermektedir. Çin'in altyapı yatırımlarını ulusal bir kalkınma projesi olarak ele alması ve yerli teknoloji üreticilerini destekleyen bütüncül politikaları, bu alanda ölçek ekonomisinin yakalanmasını sağlamıştır. Benzer şekilde Güney Kore ve Amerika Birleşik Devletleri örnekleri, kamu ve özel sektör iş birliğinin, spektrum yönetimindeki esnekliğin ve inovasyon odaklı rekabet ortamının, teknolojinin ticarileşme sürecini hızlandırdığını göstermektedir. Bu deneyimler, altyapı yatırımlarının sürdürülebilirliği açısından işletmecilerin yatırım iştahının korunma-

sının ve yerli ekosistemin desteklenmesinin önemini ortaya koymaktadır.

Ülkemizin bu küresel denklemdeki konumu, ticari 5G hizmetlerine geçiş süreci, salt bir gecikme olarak değil, teknolojinin olgunlaşma evresini bekleyerek en güncel ve verimli standartlarla sisteme dahil olma stratejisinin bir parçası olarak okunmalıdır. Türkiye, sahip olduğu genç ve teknolojiye ilgi duyan nüfusu, güçlü mobil şebeke altyapısı ve dinamik pazar yapısıyla, 5G teknolojisine geçişte önemli bir potansiyele sahiptir. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı başta olmak üzere ilgili kamu kurumlarının ortaya koyduğu vizyon, Türkiye'nin yalnızca teknolojiyi kullanan değil, aynı zamanda üreten ve geliştiren bir aktör olma hedefini güçlendirmektedir. Bu kapsamda, gerçekleştirilen frekans ihalesi ve lisanslama süreci, sadece bir altyapı kurulumu olarak değil, "Milli Teknoloji Hamlesi"nin kritik bir aşaması olarak değerlendirilmektedir. Sürecin en hassas ve stratejik boyutu, şebeke kurulumundaki hız beklentisi ile yerli ve milli teknolojilerin sisteme entegrasyonu hedefleri arasındaki dengenin, ulusal çıkarlarımıza en uygun şekilde yönetilmesidir. ULAK ve diğer yerli teknoloji firmalarımızın geliştirdiği donanım ve yazılımların, ticari şebekelerde aktif olarak kullanılması, teknolojik dışa bağımlılığın azaltılması ve siber güvenlik risklerinin minimize edilmesi için önem taşımaktadır. Dolayısıyla, yerli ürün kullanım oranlarının kademeli olarak artırılması ve sektör paydaşlarının bu ekosistemi benimsemeye teşvik edilmesi, Türkiye'nin temel stratejik öncelikleri arasında yer bulmaktadır.

5G teknolojisinin ülkemiz ekonomisine sağlayacağı katma değerin maksimize edilmesi için, raporun işaret ettiği en önemli alanlardan biri de dikey sektörlerdir. Bireysel abone pazarının belirli bir doygunluğa ulaştığı günümüzde, 5G'nin asıl radikal etkisi, imalat sanayii, otomotiv, enerji, sağlık ve tarım gibi sektörlerin sayısal dönüşümünde görülecektir. Düşük gecikme süreleri, yüksek veri aktarım hızları ve yüksek kapasite imkânları, Organize Sanayi Bölgeleri ve fabrikalarda "Akıllı Üretim" döneminin başlamasına önemli katkı sağlayacaktır. Bu kapsamda, sanayi kuruluşlarımızın kendi özel 5G ağlarını kurabilmelerine imkan tanıyacak düzenlemelerin hayata geçirilmesi, üretimde verimliliği artıracak ve ihracatımızın rekabet gücünü artıracaktır. OSTİM ve Arçelik gibi öncü kuruluşlarımızda gerçekleştirilen pilot uygulamalar, bu potansiyelin sahada somut başarılara dönüşebileceğinin en açık göstergesidir. Kamu otoritesinin, sanayici ile teknoloji sağlayıcıları arasında köprü vazifesi görmesi ve gerekli düzenleyici altyapıyı tesis etmesi, bu dönüşümün hızlanmasını sağlayacaktır.

Bu teknolojinin yaygınlaştırılması ve "sayısal uçurum" riskinin bertaraf edilmesi de kamunun sosyal devlet anlayışının bir gereği olarak raporda öne çıkan hususlardan biridir. Kırsal bölgelerimiz ile büyükşehirlerimiz arasındaki sayısal erişim imkanlarının eşitlenmesi hem toplumsal adaletin sağlanması hem de kırsal kalkınmanın desteklenmesi açısından zorunludur. Bu noktada, yüksek yatırım maliyetlerinin yönetilebilir seviyelerde

tutulması için, işletmeciler arasında aktif ve pasif altyapı paylaşımı modellerinin teşvik edilmesi, mükerrer yatırımların önlenmesi ve kaynak verimliliğinin sağlanması önemlidir. Ayrıca, Evrensel Hizmet Fonu kaynaklarının, 5G altyapısının kırsal bölgelere etkin bir şekilde ulaştırılması, teknolojinin sunduğu imkanlardan tüm vatandaşlarımızın eşit şekilde faydalanmasını sağlayacaktır. Bununla birlikte, teknolojinin toplumsal kabulü ve baz istasyonlarına yönelik kamuoyu algısının yönetilmesi hususunda, şeffaf ve bilimsel verilere dayalı bir iletişim stratejisinin yürütülmesi, yatırımların kesintiye uğramaması için dikkate alınması gereken bir diğer husustur.

Raporun geleceğe dönük boyutunu oluşturan 6G teknolojisine yönelik değerlendirmeler ise ülkemizin gelecek on yıllık yol haritası açısından önemli ipuçları sunmaktadır. Henüz 5G altyapısının kurulum aşamasında olsak da 2030'lu yıllarda ticari hayata girmesi beklenen 6G teknolojisi için hazırlıklara bugünden başlanması stratejik açıdan kritik olacaktır. 6G, fiziksel dünya ile sayısal dünyanın tam anlamıyla bütünleştiği, yapay zekanın şebeke yönetiminin merkezine yerleştiği ve uyduların sisteme dahil olduğu yeni bir paradigma sunmaktadır. Ülkemizin bu yeni dönemde, standartları belirleyen masada yer alabilmesi için, üniversitelerimiz, araştırma merkezlerimiz ve savunma sanayii kuruluşlarımız bünyesinde yürütülen Araştırma ve Geliştirme (Ar-Ge) faaliyetlerinin koordineli bir şekilde desteklenmesi gerekmektedir. Terahertz (THz) frekansları, görünür ışıkla haberleşme ve kuantum teknolojileri gibi 6G'nin yapı taşlarını oluşturan alanlarda yetkinlik kazanılması, geleceğin dünyasında söz sahibi olabilmemiz için şarttır. Bu kapsamda, ITU ve 3GPP gibi uluslararası kurumlarda ülkemizin temsil gücünün artırılması ve fikri mülkiyet hakları konusundaki çalışmaların yoğunlaştırılması, teknolojik egemenliğimizin geleceği açısından önem taşımaktadır.

Sonuç olarak, 5G ve ötesindeki teknolojiler, Türkiye Yüzyılı vizyonumuzun sayısal altyapısını oluşturmaktadır. Kamu idaresi, düzenleyici kurumlar, özel sektör işletmecileri ve akademi dünyasının ortak bir akılla hareket etmesi, bu dönüşüm sürecinin başarıya ulaşmasını garanti altına alacaktır. Kamu politikalarının yatırımları teşvik eden, yerli üretimi destekleyen ve teknolojinin ekonomik ve toplumsal faydasını yaygınlaştıran düzenleyici ve denetleyici rolü, bu sürecin en önemli güvencelerinden biridir. Önümüzdeki dönemde atılacak kararlı ve planlı adımlar, Türkiye'nin küresel teknoloji liginde hak ettiği üst sıralara taşınmasını sağlayacak, sanayimizin dijitalleşmesine öncülük edecek ve vatandaşlarımızın yaşam kalitesini artıracaktır. Bu rapor, söz konusu hedeflere ulaşma yolunda mevcut durumu tespit eden, riskleri ve fırsatları analiz eden ve karar vericilere stratejik bir perspektif sunmaktadır.

1. GİRİŞ

İçinde bulunduğumuz mobil teknoloji çağı, merkezinde 5G'nin yer aldığı köklü bir dönüşüm sürecinden geçmektedir. 5G'yi, bir önceki nesil olan 4G'nin yalnızca daha hızlı bir sürümü olarak değerlendirmek, bu teknolojinin ağ mimarisi, kapasite, gecikme ve kullanım senaryoları bakımından sunduğu devrim niteliğindeki dönüşüm potansiyelini gözardı etmek anlamına gelmektedir. Bu teknoloji, mobil internet hızını artırmanın ötesinde; endüstriyel üretimden sağlığa, ulaşımdan kamu hizmetlerine kadar geniş bir yelpazede dijital dönüşümün temel altyapılarından biri olarak konumlanmaktadır. Ultra düşük gecikme süresi, yüksek veri aktarım kapasitesi ve çok sayıda cihaza aynı anda bağlanabilme yeteneği sayesinde 5G; nesnelerin interneti (IoT), akıllı şehir altyapıları, otonom sistemler ve Endüstri 4.0 gibi kritik alanların merkezine yerleşerek fiziksel ve dijital dünyalar arasında yeni bir etkileşim ve verimlilik çağını başlatmaktadır.

Bu rapor, söz konusu teknolojik dönüşümü iki temel eksen etrafında incelemektedir:

- **5G Adaptasyonu:** Raporun ilk bölümü, 5G'nin küresel yayılımını istatistiksel veriler ışığında analiz etmektedir. Bu kapsamda, Çin ve Güney Kore gibi lider ülkelerin proaktif kamu politikaları ve büyük altyapı yatırımlarıyla nasıl öne çıktığı incelenmektedir. Buna karşılık, Avrupa gibi bölgelerin parçalı pazar yapıları nedeniyle neden yavaş ilerlediği ve gelişmekte olan coğrafyaların altyapı, cihaz maliyetleri ve dijital okuryazarlık gibi engellerle nasıl mücadele ettiği detaylandırılmaktadır. Bu analiz, 5G adaptasyonunu şekillendiren ekonomik, altyapısal, düzenleyici ve sosyal faktörleri bütüncül bir bakış açısıyla ortaya koymaktadır.
- **6G Vizyonu:** Raporun ikinci ekseni ise, vizyonunu 5G'nin ötesine taşıyarak henüz standartlaşma süreci devam eden telekomünikasyon dünyasında şimdiden heyecan yaratan 6G teknolojisine odaklanmaktadır. Bu bölümde 6G'ye geçiş sürecinin yol haritası ele alınmakta; THz frekansları, yapay zekâ destekli ağ yönetimi, entegre algılama ve iletişim gibi çığır açıcı teknoloji başlıkları incelenmektedir. Ayrıca, 6G'nin sürdürülebilirlik, güvenlik ve küresel kapsayıcılık gibi temel tasarım ilkeleri etrafında nasıl şekillendiği tartışılmaktadır.

Bu rapor, 5G ve 6G teknolojilerinin mevcut durumunu ve gelecekteki yörüngesini anlamak isteyen tüm paydaşlar için kapsamlı bir referans kaynağı sunmayı amaçlamaktadır. Hedef kitlesi; ulusal dijital dönüşüm politikalarını şekillendiren politika yapıcılar,

telekomünikasyon işletmecileri, yatırımcılar, teknoloji şirketleri ve akademisyenlerden oluşmaktadır. Rapor, bu paydaşlara küresel rekabet ortamını, teknolojik fırsatları ve potansiyel riskleri veriye dayalı bir bakış açısıyla sunarak stratejik bir yol haritası sağlamayı hedeflemektedir.

Bu amaç doğrultusunda rapor, konuyu sistematik bir şekilde ele alan bölümler halinde tasarlanmıştır:

- **Küresel 5G Adaptasyonunun Mevcut Durumu:** 5G'nin küresel yayılımı ve 2024 itibarıyla mevcut durumu istatistiksel verilerle analiz edilmektedir.
- **Başarılı Adaptasyon Örnekleri:** Çin, Güney Kore, ABD ve Japonya gibi 5G adaptasyonunda lider olan ülkeler vaka analizi olarak incelenmektedir.
- **Adaptasyonda Karşılaşılan Zorluklar:** Avrupa, Filipinler ve Afrika gibi 5G'ye geçişte önemli zorluklarla karşılaşan bölgeler mercek altına alınmaktadır.
- **Adaptasyonu Engelleyen Genel Faktörler:** Dünya genelinde 5G'nin yayılmasını yavaşlatan ekonomik, altyapısal, sosyal ve düzenleyici faktörler tematik olarak ele alınmaktadır.
- **Geleceğin Teknolojisi 6G'nin Gelişimi ve Potansiyeli:** Raporun ikinci ana bölümünde 6G'ye geçiş süreci ve getirmesi beklenen çığır açıcı yenilikler incelenmektedir.
- **Sonuç ve Değerlendirme:** Tüm analizler bir araya getirilerek genel bir değerlendirme yapılmakta ve stratejik öneriler sunulmaktadır.

5G ve ufuktaki halefi 6G teknolojilerine yönelik küresel rekabet, basit bir teknik ilerleme yarışının ötesinde, 21. yüzyılın ikinci çeyreğinde ekonomik kalkınmayı, dijital özerkliği ve stratejik nüfuzu şekillendirecek temel bir mücadele niteliği taşımaktadır. Bu teknolojilerin geliştirilmesi, ülkeler için artık bir tercih değil, geleceğin ekonomisinde ve jeopolitik dengelerinde söz sahibi olabilmek için stratejik bir zorunluluktur. Bu önemin altında yatan çok katmanlı dinamikler bulunmaktadır:

- **Ekonomik Boyut:** 5G ve 6G, Endüstri 4.0'ın ve dijital ekonominin temel altyapısını oluşturmaktadır. Akıllı fabrikalardan otonom araçlara, tele-sağlık uygulamalarından hassas tarıma kadar sayısız alanda devasa bir katma değer potansiyeli taşımaktadır. Bu teknolojilere erken adapte olan ekonomiler, küresel rekabette önemli bir avantaj elde edecektir.
- **Toplumsal Boyut:** Bu teknolojiler, artırılmış ve sanal gerçeklik uygulamalarıyla eğitimi zenginleştirme, sağlık hizmetlerine uzaktan erişimi kolaylaştırma ve dijital uçurumu kapatma potansiyeline sahiptir. Özellikle Karasal Olmayan Ağların (Non-Terrest-

rial Networks, NTN) yani uyduların entegrasyonu, daha önce bağlantı kurulamayan kırsal bölgelere yüksek hızlı internet götürerek bölgesel kalkınmayı destekleyebilir.

- **Stratejik ve Jeopolitik Boyut:** İletişim standartlarını belirlemedeki rol, ülkelere küresel sahnede önemli bir stratejik koz sağlamaktadır. Ağların giderek daha karmaşık ve yazılım tabanlı hale gelmesiyle veri güvenliği, ağların şeffaflığı ve denetlenebilirliği gibi konular ulusal güvenlik meselesi haline gelmektedir. Hangi ülkenin teknoloji ve standartlarının küresel olarak benimsendiği, o ülkenin jeopolitik gücünü doğrudan etkilemektedir.

Bu nedenlerle rapor, yalnızca bir teknolojinin teknik analizini sunmakla kalmamakta, aynı zamanda sanayiden topluma, ekonomiden uluslararası ilişkilere kadar hayatın her alanını yeniden şekillendirecek olan temel dinamikleri anlamak ve bu büyük dönüşüme hazırlanmak için kritik bir kaynak niteliği taşımaktadır.

2. 5G TEKNOLOJİSİNİN KÜRESEL ADAPTASYONU

2.1. 5G'nin Yaygınlaşma Süreci ve Mevcut Durum

2024 yılı, 5G teknolojisinin küresel ölçekte yaygınlaşması ve benimsenmesi açısından önemli bir dönüm noktası olmuştur. 5G Americas (2025) ve Omdia tarafından derlenen veriler, dünya genelindeki toplam 5G bağlantı sayısının yıl sonu itibarıyla 2,25 milyara ulaştığını ortaya koymaktadır. Bu durum, yeni nesil kablosuz teknolojilerin gerek tüketiciler gerekse endüstriyel sektörler tarafından hızlı bir şekilde benimsendiğini göstermektedir.

Ericsson'un Mobilite Raporu'ndaki (Ericsson, 2025a) tamamlayıcı veriler de bu tabloyu desteklemektedir. Rapora göre küresel 5G abone sayısının, 2025 sonunda 2,9 milyara yaklaşması beklenmektedir. Bu sayı, dünya genelindeki tüm mobil aboneliklerin yaklaşık üçte birine karşılık gelmektedir. 4G'den 5G'ye geçiş sürecinde ise 4G abone sayısının 2025 yılı sonunda 4,8 milyara düşeceği öngörülmektedir. Bu noktada önemli bir ayrım bulunmaktadır: "Bağlantılar" terimi kullanıcı başına birden fazla bağlantıyı içerebilirken, "abonelikler" genellikle tekil kullanıcı hesaplarını ifade etmektedir. Bununla birlikte, her iki veri de 5G'nin küresel ölçekte ulaştığı önem ve artan yaygınlığı açıkça ortaya koymaktadır. Aynı rapora göre, 2025 yılı itibarıyla dünyada 340'tan fazla işletmeci ticari olarak 5G hizmeti sunarken yaklaşık 70 işletmeci bağımsız 5G mimarisinde (5G Standalone, 5G SA) hizmet vermektedir.

Benimsenme oranlarındaki artışa paralel olarak, 5G ağlarının kapsama alanı da önemli ölçüde genişlemiştir. Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunications Union, ITU), 5G kapsama alanının 2024 yılı itibarıyla dünya nüfusunun yaklaşık %51'ine ulaşacağını tahmin etmektedir (ITU, 2025). Bu durum, dünya nüfusunun önemli bir bölümünün 5G ağlarının mevcut olduğu bölgelerde yaşamasına rağmen, fiili kullanım oranlarının farklılık gösterebildiğini ortaya koymaktadır. Gerçek penetrasyon oranı; cihaz sahipliği, hizmet aboneliği ve diğer piyasa koşulları gibi çeşitli faktörlerden etkilenmektedir. Dolayısıyla, 5G ağlarının coğrafi erişimi genişledikçe, abone sayılarında da buna paralel bir artış yaşanması öngörülmektedir.

5G'nin benimsenme hızı, önceki nesil mobil teknolojilerle kıyaslandığında, kaydettiği iv-

meyi net bir şekilde göstermektedir. 5G Americas ve Omdia verilerine göre 5G'nin yayılımı, 4G LTE'nin kendi başlangıç dönemine göre dört kat daha hızlıdır. Nitekim ticari lansmanından yalnızca birkaç yıl sonra, 2024 sonu itibarıyla 5G bağlantıları 2,25 milyar seviyesini aşmıştır. Buna karşılık 4G LTE, benzer bir zaman diliminde (2014 sonu) henüz 500 milyon bağlantıya ulaşabilmiştir. Aradaki bu önemli fark, 5G teknolojisinin güçlü bir pazar ivmesi yakaladığını ve sunduğu değere yönelik yüksek bir beklenti olduğunu göstermektedir. Bu hızlı benimsenme sürecini tetikleyen temel faktörler arasında; gelişmiş ağ altyapılarına yönelik yatırımlar, 5G uyumlu cihazların pazara erken ve yaygın bir şekilde sunulması ve yüksek bant genişliği gerektiren uygulamalara yönelik artan talep yer almaktadır.

2.1.1. 5G Penetrasyonunun Coğrafi Dağılımı

Kuzey Amerika, 5G adaptasyonunda 2025 yılı itibariyle de küresel lider konumunu sürdürmektedir. Bölgedeki 5G bağlantı sayısı 2023 sonundaki 196 milyondan 2024 sonunda 289 milyona yükselmiş, 2025'in ilk çeyreğinde ise 314 milyona ulaşmıştır. Aynı dönemde 5G kapsaması bölge nüfusunun yaklaşık %83'üne erişmiştir. Ericsson Mobility Report'un bölgesel görünümüne göre ise Kuzey Amerika'da 5G aboneliklerinin 2025 yıl sonunda 359 milyona ve 5G abonelik penetrasyonunun %79'a ulaşması beklenmektedir. Bu veriler birlikte değerlendirildiğinde, Kuzey Amerika'nın yalnızca hızlı büyüyen değil, aynı zamanda yüksek kapsama ve abonelik derinliğiyle olgunlaşmış bir 5G ekosistemi sunduğu anlaşılmaktadır (5G Americas, 2025; Ericsson, 2025a).

Latin Amerika da 5G teknolojisinin benimsenmesinde dikkat çekici bir ivme yakalamıştır. Bölgedeki 5G bağlantı sayısı 2023 yılına göre yaklaşık iki katına çıkarak 2024 sonunda 76 milyona ulaşmıştır. (5G Americas, 2025) Bununla birlikte, 593 milyon bağlantı ve %74'lük pay ile 4G LTE bölgedeki baskın mobil teknoloji konumunu korumaktadır. Ericsson Mobility Report'a göre Latin Amerika'da 5G aboneliklerinin 2025 sonunda 106 milyona ulaşması beklenmektedir. Ayrıca 5G Americas'ın bölgesel dağıtım verileri, 2025 yılı içinde Latin Amerika ve Karayipler'de 5G ağlarının sayısının artmasına rağmen LTE altyapısının hâlen belirgin ağırlığını koruduğunu göstermektedir. Bu çerçevede, Latin Amerika'da 5G büyümesi belirgin biçimde hızlanmakla birlikte, teknolojik geçiş sürecinin hâlen kademeli ve çok katmanlı bir yapıda ilerlediği görülmektedir (5G Americas, 2025; Ericsson, 2025a)

Avrupa'da 5G altyapısı önemli ölçüde gelişmiştir. Ericsson'un 2024 tarihli bölgesel değerlendirmesine göre, 2024 sonu itibarıyla kıta genelinde 5G'nin nüfusu kapsama oranının %80'e ulaştığı, yüksek hız ve düşük gecikme sunan orta bant kapsama oranının ise bir önceki yıla göre artarak %45 seviyesine yükseldiği değerlendirilmektedir. Bununla bir-

likte, Batı Avrupa için öngörülen %41'lik 5G abonelik penetrasyonu Kuzey Amerika'nın gerisinde kalmaktadır. Ericsson Mobility Report'un güncel Regional subscription outlook verilerine göre ise Batı Avrupa'da 5G abonelikleri 2024 sonundaki 227 milyondan 2025 sonunda 307 milyona yükselecek ve 5G abonelik penetrasyonu %55'e ulaşacaktır. Bu durum, Avrupa'da 5G altyapısının belirgin biçimde geliştiğini göstermekle birlikte, kıtadaki parçalı pazar yapısı, yatırım dinamikleri ve ülkeler arasındaki farklı benimsenme hızlarının daha heterojen bir görünüm yarattığına işaret etmektedir (Ericsson, 2024; Ericsson, 2025a).

Asya-Pasifik bölgesi, 5G adaptasyonu konusunda karma bir görünüm sergilemektedir. Bölge içinde Çin ve Hindistan gibi büyük pazarlar çok hızlı ilerlerken, diğer alt bölgelerde benimsenme hızı daha kademeli seyretmektedir. Buna karşılık, Güney Kore ve Japonya gibi teknoloji liderlerini içeren Kuzeydoğu Asya'nın 2024 sonunda yaklaşık %52 düzeyindeki 5G abonelik penetrasyonunu 2025 sonunda %61'e yükseltmesi beklenmektedir. Hindistan, Nepal ve Bhutan alt bölgesinde ise 5G aboneliklerinin 2024'te 290 milyondan 2025 sonunda 395 milyona ulaşarak toplam mobil aboneliklerin yaklaşık %32'sini oluşturacağı öngörülmektedir. Çin ise 2024 sonunda 1 milyarı aşan, 2025 sonunda da yaklaşık 1,2 milyara ulaşması beklenen 5G abonelikleriyle bölgenin en büyük pazarı konumunu sürdürmektedir. Bu çerçevede, Asya-Pasifik'te 5G büyümesi güçlü olmakla birlikte, bölge içindeki pazar büyüklüğü, yatırım kapasitesi ve yaygınlaşma hızı bakımından önemli farklılıklar bulunduğu görülmektedir (Ericsson, 2025a; Ericsson, 2025b)

Orta Doğu ve Afrika, 2024 sonu itibarıyla %10'luk genel nüfus kapsama oranıyla diğer bölgelerin gerisinde kalmaktadır. Ancak, Körfez İşbirliği Konseyi[1] (Gulf Cooperation Counsil, GCC) ülkeleri bu genel eğilimden belirgin bir şekilde ayrışmaktadır.GCC bölgesinde 5G abonelik penetrasyonunun 2025 yılı sonunda %55'e ulaşması ve bu oranın 2030'a kadar %93 ile küresel liderliğe yükselmesi beklenmektedir (iotinsider, 2025). Bu durum, bölgedeki yüksek mobil kullanım oranları ve güçlü tüketici alım gücü gibi faktörlerle açıklanmaktadır. (Ericsson, 2025a; Ericsson, 2025b)

Tablo 2-1'de, farklı bölgelerdeki tahmini 5G penetrasyon ve kapsama oranları (2024) karşılaştırmalı olarak özetlenmektedir:

1 1 25 Mayıs 1981 tarihinde kurulan örgüt Bahreyn, Kuveyt, Umman, Katar, Suudi Arabistan ve Birleşik Arap Emirlikleri'nden oluşmaktadır.

Tablo 2.1: 5G Penetrasyon Oranları

BÖLGE	TAHMİNİ 5G PENETRASYON ORANI	TAHMİNİ 5G KAPSAMA ORANI
Kuzey Amerika	83*	77
Latin Amerika	Veri Yok	Veri Yok
Avrupa	55* (Batı Avrupa)	80
Asya Pasifik	61* (Kuzeydoğu Asya), 32* (Hindistan)	30 (Hindistan ve Çin hariç), ~95 (Hindistan)
Orta Doğu ve Afrika	55* (Körfez İşbirliği Ülkeleri)	10

**2025*

2.1.2. Öne Çıkan Piyasalar

5G teknolojisinin benimsenmesinde bazı ülkeler, küresel rekabette öncü bir rol üstlenmekte; yaygın 5G şebekesi kurulumları ve ileri teknoloji kullanımlarıyla öne çıkmaktadır.

Güney Kore, 5G'yi ilk uygulayan ülkelerden biri olarak bu alanda liderliğini ortaya koymuştur. Ülkenin 5G altyapısına yaptığı büyük yatırımlar, yüksek bağlantı hızlarına ulaşılmasını ve mobil bağlantıların önemli bir bölümünün bu teknolojiye geçmesini sağlamıştır. Hükümetin proaktif politikaları, bu başarının elde edilmesinde belirleyici bir rol oynamıştır.

Çin, 2025 yılı itibariyle 1.014 milyar 5G mobil abone sayısıyla yeni nesil mobil haberleşme teknolojisi alanında önde gelen güçlerden birisidir (Ericsson, 2025b). Ülkede 4,25 milyon civarında 5G baz istasyonu kurulmuş olup, 17 bin civarında fabrikaya 5G hizmeti sunulmaktadır (Market Research Store, 2025). Bu başarı, hükümetin güçlü desteğinin ve altyapı kurulumundaki yüksek hızın bir sonucudur.

Kuzey Amerika'da ise Amerika Birleşik Devletleri ve Kanada, bölgeyi küresel 5G pazarında öncü konuma taşıyan aktörlerdir. Bu pazarlarda yoğun rekabet ve 5G uyumlu cihazların yaygınlığı, teknolojinin hızla benimsenmesini sağlamıştır.

Körfez İşbirliği Konseyi ülkelerinin 2030 yılına kadar dünya genelinde en yüksek 5G penetrasyonuna ulaşması beklenmektedir. Yüksek mobil kullanım oranları, hızlı kentleşme ve güçlü tüketici alım gücü gibi faktörler, bu ülkelerin 2025 itibarıyla kaydettiği önemli ilerlemenin temelini oluşturmaktadır.

Diğer öne çıkan pazarlar arasında Latin Amerika'da Brezilya, Şili, Porto Riko ve Uruguay; Asya'da ise Hindistan yer almaktadır. Latin Amerika'daki bu ülkeler, teknolojiyi erken benimseyerek bölgede lider konumuna gelmiştir. Hindistan ise geniş nüfus kapsama alanı, uygun fiyatlı hizmetler ve yaygın ağ sunumu sayesinde abone sayısında hızlı bir büyüme kaydetmiştir.

Bu lider pazarların başarısı, bir dizi stratejik faktörün birleşimine dayanmaktadır. Çin ve Güney Kore örneklerinde görüldüğü gibi, hükümetlerin 5G altyapısına yönelik proaktif girişimleri ve büyük ölçekli yatırımları, dağıtım için sağlam bir zemin oluşturmaktadır. Benzer şekilde, düzenleyici kurumların 5G spektrumunu erken ve verimli bir şekilde tahsis etmesi de ağların zamanında yaygınlaşması için kritik bir öneme sahiptir. Kuzey Amerika'da olduğu gibi, mevcut telekomünikasyon altyapısının gücü ve sürekli iyileştirilmesi, 5G'ye geçişi hızlandırmaktadır. Son olarak, GCC ülkeleri ve Hindistan'da gözlemlendiği üzere, yüksek tüketici talebi, uygun fiyatlı 5G cihazlarının bulunabilirliği ve işletmeciler arası rekabetçi pazar dinamikleri de benimseme oranlarını artıran temel itici güçlerdir. Bu pazarların deneyimleri, başarılı bir 5G adaptasyonu için devlet desteği, endüstri yatırımları ve pazar dinamiklerini birleştiren bütüncül bir stratejinin önemini ortaya koymaktadır.

2.1.3. 5G'nin Yayılmasını Tetikleyen Faktörler

5G teknolojisinin uluslararası alanda hızla yayılması; teknolojik yenilikler, değişen tüketici tercihleri ve stratejik endüstri yatırımlarının birleşiminden güç almaktadır.

5G'nin yaygınlaşmasının temel nedenlerinden biri, önceki nesillere kıyasla sunduğu daha yüksek kapasite, daha düşük gecikme ve daha esnek hizmet mimarisidir. Teknoloji, saniyede birden fazla Gbit/sn seviyesine ulaşabilen teorik hızlar ve 100 Mbit/sn üzerindeki kararlı kullanıcı hızları ile veri aktarımında önemli bir artış sağlamaktadır. Bu hız artışı, tüketicilere daha akıcı çevrimiçi deneyimler sunarken, işletmeler için de veri yoğun uygulamaların önünü açmaktadır. Buna ek olarak 5G, gecikme süresini 1 milisaniyenin altına düşürme potansiyeli ile neredeyse anlık bir iletişim imkânı tanımaktadır. Bu ultra düşük gecikme özelliği, otonom araçlar, uzaktan cerrahi ve gelişmiş endüstriyel otomasyon gibi kritik ve yenilikçi uygulamaların hayata geçirilmesi için bir zorunluluktur.

Bir diğer önemli itici güç ise veri ve bant genişliğine yönelik sürekli artan taleptir. Akıllı telefonların ve yüksek çözünürlüklü video akışı, çevrimiçi oyunlar gibi veri yoğun uygulamaların yaygınlaşması, mevcut mobil ağların kapasitesini zorlamaktadır. 5G, sunduğu yüksek kapasiteyle bu baskıyı azaltmakta ve aynı anda çok sayıda cihazın sorunsuz bir

şekilde iletişim kurmasına imkan tanımaktadır. Bu özellik, milyarlarca cihazın ağa bağlanmasının beklendiği IoT ekosisteminin genişlemesi için sağlam ve verimli bir altyapı sunmaktadır. Esasen, Ericsson Mobility Report'a göre 2025 yılı sonu itibarıyla dünyada IoT kapsamında yaklaşık 4,5 milyar bağlantı bulunmaktadır.

Tüketici talebi de 5G'nin yayılımında önemli bir rol oynamaktadır. Mevcut ekonomik koşullara rağmen kullanıcılar, sunduğu daha iyi deneyim nedeniyle 5G hizmetlerine geçme konusunda güçlü bir eğilim göstermektedir. Bu talebe paralel olarak işletmeciler ve hükümetler, 5G altyapısını kurmak ve mevcut ağları yükseltmek için büyük ölçekli yatırımlar yapmaktadır. Bu yatırımlar, şebeke kapsamının genişletilmesi ve kapasitenin artırılması için kritik öneme sahiptir. Son olarak, akıllı telefonlardan IoT sensörlerine kadar çok çeşitli 5G uyumlu cihazların pazarda giderek daha erişilebilir ve uygun fiyatlı hale gelmesi, teknolojinin geniş kitleler tarafından benimsenmesini kolaylaştırmaktadır.

Teknolojinin dönüştürücü potansiyeli, farklı endüstriyel sektörlerdeki benimsenme oranını da artırmaktadır. Endüstriyel otomasyon, tele-sağlık, akıllı şehirler, otonom araçlar ve sabit kablosuz erişim gibi alanlar; verimliliği artırmak, yenilikçi hizmetler sunmak ve rekabet avantajı elde etmek için 5G'nin sunduğu imkânlardan faydalanmaktadır. Örneğin, 5G'nin düşük gecikme süresi endüstriyel robotların gerçek zamanlı kontrolü için kritik bir işlev görürken, yüksek bant genişliği tele-tıp uygulamalarını ve sanal gerçeklik deneyimlerini mümkün kılmaktadır. 5G'nin bu çok yönlülüğü ve yüksek performansı, onu hem tüketiciler hem de işletmeler için vazgeçilmez bir teknoloji haline getirmekte ve küresel büyümesini hızlandırmaktadır.

2.1.4. 5G Genişlemesinin Önündeki Zorluklar ve Engeller

5G'nin benimsenmesinde kaydedilen önemli ilerlemelere rağmen, bu haberleşme teknolojisinin küresel yayılımının hızını ve kapsamını sınırlayan çok sayıda zorluk ve engel de bulunmaktadır.

Genişlemenin önündeki en temel engellerden birini, 5G ağlarının kurulumu için gereken yüksek finansal yatırım oluşturmaktadır. Daha yoğun bir baz istasyonu ağı, küçük hücreler ve gelişmiş fiber optik altyapı kurulumu gibi gereksinimler, maliyetleri artıran başlıca unsurlardır. İşletmeciler için spektrum lisanslarının temini de önemli bir mali yük getirebilmekte ve bu durum, yatırımları sınırlayabilmektedir. Özellikle 5G SA mimarisine geçişin başlangıç maliyetleri, bazı işletmeciler için önemli bir engel teşkil etmektedir.

Mevcut altyapının yetersiz veya eski olması da 5G'nin performansını ve yaygınlaşmasını

engelleyen bir faktördür. 5G'nin gerektirdiği daha yoğun baz istasyonu ağını kurma süreci, düzenleyici prosedürlerin karmaşıklığı ve yerel düzeyde karşılaşılan itirazlar nedeniyle yavaşlayabilmektedir.

Şebeke güvenliği, eski nesil altyapılarla birlikte çalışma gereksinimi de önemli risk alanları oluşturmaktadır. 5G ağlarının önceki nesillere göre artan karmaşıklığı, siber saldırılar için potansiyel riski artırmaktadır. Tedarik zincirindeki zafiyetler ve mevcut 5G kurulumlarının büyük oranda 4G altyapısına dayanması, eski sistemlerden kaynaklanan güvenlik açıklarının yeni ağları da etkileme riskini beraberinde getirmektedir.

Cihaz uyumluluğu ve erişilebilirliği de benimseme hızını doğrudan etkilemektedir. 5G destekli cihazların yaygınlaşmasına rağmen, bazı bölgelerdeki yüksek fiyatlar ve model çeşitliliğinin sınırlı olması, kitlesel yayılımın önünde bir engel olarak durmaktadır. Spektrum tahsis süreçlerinde yaşanan gecikmeler veya verimsizlikler, 5G'ye geçişi yavaşlatabilmektedir. Ayrıca, farklı 5G teknolojileri ve şebekeleri arasında birlikte çalışabilirliği sağlayacak ortak standartların eksikliği, rekabetçi ve bütüncül bir ekosistemin gelişimini zorlaştırmaktadır.

Son olarak, bazı kullanıcılar ve işletmeler için 5G'nin sunduğu katma değerin henüz net olarak algılanmaması da bir diğer zorluktur. Mevcut ihtiyaçları için 4G'yi yeterli gören kullanıcıların 5G'ye geçişi ertelemesi, benimseme oranlarını etkileyebilmektedir. Kurumsal alanda ise özel 5G ağlarının Wi-Fi gibi mevcut sistemlerle entegrasyonu, teknik zorluklar barındırabilmektedir.

Özetle, 5G'nin küresel potansiyeline tam olarak ulaşabilmesi için özetlenen bu çok yönlü zorlukların; stratejik yatırımlar, net düzenleyici çerçeveler, teknolojik yenilikler ve teknolojinin faydalarına yönelik etkili iletişim yoluyla aşılması gerekmektedir.

2.2. Geleceğe İlişkin Tahminler

Geleceğe yönelik tahminler, 5G mobil bağlantılarının ve penetrasyon oranlarının dünya genelinde önemli ölçüde artacağını göstermektedir. Sektör raporları, küresel 5G bağlantı sayısının 2029 yılına kadar 8,3 ila 8,4 milyara ulaşacağını ve bu rakamın tüm kablosuz teknolojilerin yaklaşık %59'unu temsil edeceğini öngörmektedir. Abonelik bazında ise, 2030 sonunda küresel 5G aboneliklerinin yaklaşık 6,3 milyara ulaşması ve toplam mobil aboneliklerin %67'sini oluşturması ve 5G SA abone sayısının ise 3,7 milyara ulaşması beklenmektedir. Büyümenin yakın vadedeki hızı da dikkat çekicidir; 2025 yılı gibi erken bir tarihte abone sayısının 3 milyarı bulacağı tahmin edilmektedir.

Bölgesel bazda, Körfez İşbirliği Konseyi ülkelerinin 2030 yılına kadar %93'lük bir penet-

rasyon oranına ulaşarak bu alanda küresel lider olması beklenmektedir. Aynı dönemde Batı Avrupa'nın %92 ve Kuzey Amerika'nın %91'lik oranlarla lideri yakından takip edeceği öngörülmektedir. Hindistan'ın da 2030'a kadar %74'lük bir penetrasyon oranına ulaşarak önemli bir büyüme kaydedeceği tahmin edilmektedir.

Benimsenme sürecindeki en önemli kilometre taşlarından birinin 2027 yılında yaşanması beklenmektedir. Bu tarihte 5G'nin, abone sayısı bakımından 4G LTE'yi geride bırakarak dünya genelinde baskın mobil erişim teknolojisi haline geleceği öngörülmektedir. Kuzey Amerika, 2025 yılı sonu itibarıyla %79'luk oranla dünyada 5G penetrasyonunun en yüksek olduğu bölge konumuna gelmiştir. Bölgedeki mobil bağlantıların büyük bir kısmı 5G'ye kayarken, 4G (LTE) kullanımı hızla azalarak %20 seviyelerine gerilemiştir. (Ericsson Mobility Report 2025)

Teknolojinin evrimi kesintisiz biçimde devam edecektir. 5G şebekelerinin, zamanla 5G'nin tüm potansiyelini sunan bağımsız mimariye geçişi hızlanacaktır. 2030 yılına gelindiğinde, toplam 6,3 milyar 5G aboneliğinin yaklaşık 3,6 milyarının SA ağları üzerinden hizmet alacağı tahmin edilmektedir. Bununla birlikte, bu potansiyelin tam olarak hayata geçirilmesi için altyapı yatırımlarının sürdürülmesi gerekmektedir. Nitekim 2024 sonu itibarıyla, Çin hariç küresel baz istasyonlarının yalnızca %30'unun 5G orta bant kapasitesine yükseltilmiş olması, bu alandaki ihtiyacı ortaya koymaktadır. Genel tablo, 5G'nin önümüzdeki yıllarda mobil iletişimin temel standardı haline geleceğini ve çok çeşitli gelişmiş hizmet ve uygulamalara olanak tanıyacağını göstermektedir.

3. BAŞARILI 5G ADAPTASYONU GÖSTEREN ÜLKELER

Beşinci nesil mobil haberleşme teknolojisi olarak tanımlanan 5G, yalnızca mobil internet hızını artıran bir gelişme olmanın ötesinde; endüstriyel üretimden sağlığa, ulaştırmadan kamu hizmetlerine kadar geniş bir alanda dijital dönüşümü destekleyen temel altyapılardan biri haline gelmiştir. Gecikme süresinin son derece düşük olması, veri aktarım kapasitesinin yüksekliği ve aynı anda çok sayıda cihazla iletişim kurabilme yeteneği sayesinde, IoT, akıllı şehir altyapıları, otonom ulaşım sistemleri, uzaktan sağlık hizmetleri ve endüstri 4.0 uygulamaları gibi kritik alanlarda 5G, teknolojik gelişimin önemli unsurlarından biri haline gelmiştir. Bu sebeple, 5G alanında yaşanan rekabet yalnızca teknik bir ilerleme yarışı değil; aynı zamanda ekonomik kalkınmayı hızlandırma, dijital özerklik sağlama ve küresel ölçekte stratejik nüfuz kazanma mücadelesi olarak görülmektedir.

Bu yarışta öne çıkan ülkeler, genellikle kamu politikalarının yön verdiği, özel sektörün ise aktif katılım sağladığı hibrit modeller ile başarıya ulaşmaktadır. Altyapı geliştirmeleri, Ar-Ge teşvikleri, düzenleyici çerçevelerin sadeleştirilmesi ve sektörler arası iş birlikleri, bu başarının temel yapı taşlarını oluşturmaktadır. Çin, Güney Kore, Amerika Birleşik Devletleri ve Japonya, bu bağlamda sadece iletişim teknolojileri alanında değil, aynı zamanda teknolojik özerklik, küresel standart belirleyiciliği ve yenilikçi çözümler geliştirme konusunda da stratejik bir vizyon ortaya koymaktadır. Söz konusu ülkeler, gerek kapsayıcı altyapı atılımlarıyla gerekse çok yönlü uygulama örnekleriyle, 5G teknolojisinin ekonomik, toplumsal ve endüstriyel etkilerini şekillendiren çok katmanlı politikalar uygulamakta ve bu yönleriyle diğer ülkelere örnek teşkil etmektedir.

Tablo 3-1, söz konusu dört ülkenin 5G adaptasyonu konusundaki temel göstergelerini karşılaştırmalı olarak sunmakta ve her birinin güçlü yönlerini özetlemektedir:

Tablo 3.1: Ülke Bazlı 5G Göstergeleri

	ÇİN	GÜNEY KORE	ABD	JAPONYA
Ticari 5G Başlangıç Yılı	2019	2019	2019	2020
Toplam 5G Baz İstasyonu	3.000.000+	330.000+	280.000+	250.000+
5G Abone Sayısı (milyon)	~700	~50	~120	~45
Nüfus Kapsama Oranı (%)	98%	94%	85%	80%
Ortalama 5G Hızı (Mbps)	~500	~800	~400	~450
Başlıca İşletmeciler	China Mobile, China Telecom, China Unicom	SK Telecom, KT, LG Uplus	Verizon, AT&T, T-Mobile	NTT Docomo, KDDI, SoftBank
5G Ar-Ge Harcaması (USD)	$12 milyar+	$3 milyar+	$10 milyar+	$4 milyar+
Öne Çıkan Kullanım Alanları	Akıllı üretim, sağlık, otonom sistemler	Yayıncılık, robotik cerrahi, akıllı şehir	Savunma, tarım, finans, otomotiv	Endüstri 4.0, afet yönetimi, mobil eğlence
Küresel Standart Katkısı	Yüksek (Huawei, ZTE)	Yüksek (Samsung)	Yüksek (Qualcomm, Intel)	Orta (NEC, Fujitsu)

Kaynak: GSMA Intelligence (2024); ITU (2023); Ookla (2024); China Mobile (2023); FCC (2023); Ministry of Science and ICT, Korea (2023); NTT Docomo (2023); SK Telecom (2023); Verizon (2023); Huawei (2023); IPlytics (2024); Qualcomm (2023)

3.1. Çin: 5G Liderliği ve Yatırımları

Çin, 5G teknolojisinin geliştirilmesi ve ülke yaygınlaştırılmasını, ulusal kalkınma stratejisinin temel bileşenlerinden biri olarak benimsemiştir. Bu kapsamda "Made in China 2025" ve 14. Beş Yıllık Kalkınma Planı (2021-2025) kapsamında 5G ile ilgili hususlara önemli bir yer ayrılmıştır.

Çin Hükümeti tarafından 2015 yılında yayımlanan "Made in China 2025" (MIC 2025) Eylem Planı, ülkenin düşük maliyetli ve iş gücü yoğun üretim modelinden çıkış yaparak yüksek katma değerli, yenilik odaklı ve teknolojik açıdan bağımsız bir sanayi altyapısı oluşturmayı amaçlayan stratejik bir dönüşüm planıdır. Endüstri 4.0 modeli baz alınarak tasarlanan bu plan, Çin'in liderliği hedeflediği kritik sanayi alanlarına atıf yapmaktadır. Bu alanlar arasında özellikle ileri ICT öne çıkmaktadır.

MIC 2025 kapsamında, 5G ve diğer yeni nesil kablosuz iletişim teknolojileri, "öncelikli teknolojik yetkinlik alanları" arasında tanımlanmış olup bu kapsamda hem altyapı yatırımlarının hızlandırılması, hem de yerli çözümlerin geliştirilerek dışa bağımlılığın azaltılması hedeflenmektedir. Çin devleti, 5G teknolojisinin IoT, siber-fiziksel üretim sistemleri, akıllı şehir uygulamaları ve ulusal savunma kapasitesi gibi stratejik alanlara entegrasyonunu teşvik etmekte; bu doğrultuda Huawei, ZTE, China Mobile gibi önde gelen teknoloji firmalarına Ar-Ge sübvansiyonları ve patent teşvikleri sağlamaktadır. Ayrıca, Çin'in uluslararası 5G standartlarının şekillendirilmesinde söz sahibi olması da planın dış politika ve teknoloji diplomasisi boyutunda önemli bir hedef olarak belirlenmiştir (Wübbeke vd., 2016)[2].

Çin, 5G konusuna 14. Beş Yıllık Kalkınma Planı (2021–2025) kapsamında geniş yer ayırmıştır. Plan çerçevesinde teknolojik özerklik, dijital güvenlik, veri egemenliği ve yüksek kaliteli kalkınma ilkeleri çerçevesinde ICT'nin dönüştürücü rolüne odaklanmaktadır. Bu çerçevede, 5G teknolojisi, yeni altyapı yatırımlarının ve stratejik sanayi politikalarının merkezinde konumlandırılmış olup ilk etapta 5G için bir altyapı konsepti belirlenmiştir. Bu doğrultuda "yeni altyapı" (new infrastructure) konsepti altında değerlendirilen 5G, büyük veri merkezleri, yapay zekâ platformları, IoT ağları ve endüstriyel internet gibi dijital bileşenlerin sistematik olarak geliştirilmesini kapsamaktadır. Bu doğrultuda Çin, 2025 yılına kadar:

2 Wübbeke, J., Meissner, M., Zenglein, M. J., Ives, J., & Conrad, B. (2016). Made in China 2025: The making of a high-tech superpower and consequences for industrial countries. MERICS Papers on China, No. 2. **https://merics.org/en/report/made-china-2025**

- Ülke genelinde 5G ağ kapsamasını büyük ölçüde tamamlamayı,
- Öncelikli sektörlerde (imalat, enerji, ulaşım, sağlık) özel 5G ağlarının yaygınlaştırılmasını,
- 5G'nin endüstriyel üretimle entegrasyonunu sağlayacak "5G+ Industrial Internet" projelerini desteklemeyi hedeflemektedir.

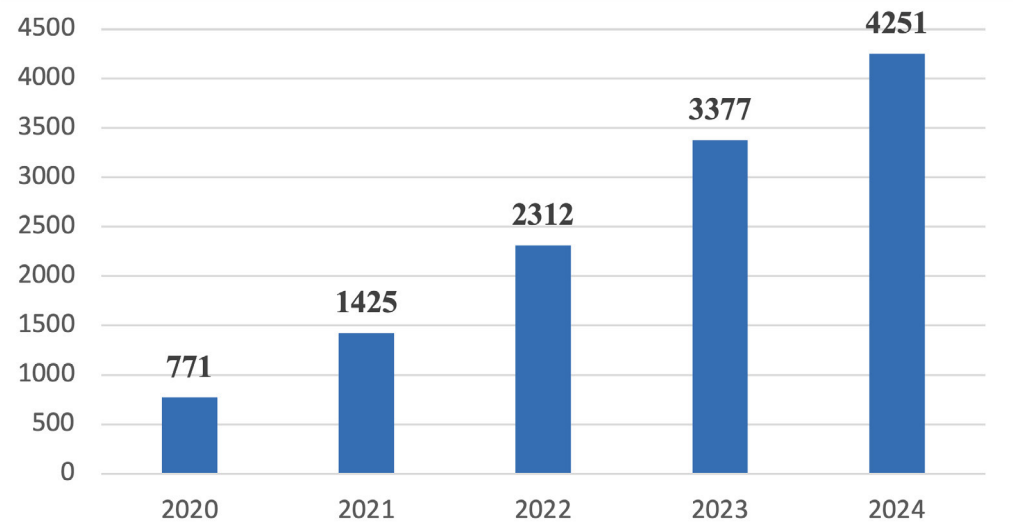
Ayrıca Kalkınma Planı, gigabit seviyesinde fiber optik altyapının yaygınlaştırılmasını ve bulut bilişim ile yapay zekâ destekli ağ optimizasyonlarının artırılmasını öngörmektedir. Bu doğrultuda, merkezi hükümetin yanında yerel yönetimlerin de teknoloji temelli kalkınma stratejileri oluşturması teşvik edilmektedir (State Council of the People's Republic of China, 2021).

Çin Hükümeti, 5G başta olmak üzere haberleşme teknolojilerinde kendine yeterlilik oranının artırılmasını açık bir hedef olarak ortaya koymaktadır. 5G çerçevesinde bu durum, hem ulusal üreticilerin (Huawei, ZTE) Ar-Ge kapasitesinin artırılması hem de uluslararası teknoloji standartları üzerindeki etkinliğin genişletilmesine yönelik çabaları artırmaktadır (OECD, 2021a).

Buna paralel olarak, Çin, uluslararası kuruluşlar nezdinde 5G standartlarının belirlenmesine yönelik diplomatik ve teknik katkılarını artırma stratejisini sürdürmektedir. Dijitalleşmenin yaygınlaşmasıyla birlikte veri güvenliği, ağ güvenliği ve bireysel mahremiyetin korunması gibi konulara da Çin'in gündeminde yer almakta olup bu bağlamda 5G ağlarının şeffaflık, güvenlik ve denetlenebilirlik ilkeleri doğrultusunda yönetilmesi, devletin stratejik öncelikleri arasında yer almaktadır. Aynı zamanda, büyük veri ve kişisel verilerin korunmasına ilişkin yasal çerçeveler güçlendirilmekte; hem bireysel kullanıcılar hem de kurumlar için yeni güvenlik standartları geliştirilmektedir (ITU, 2022).

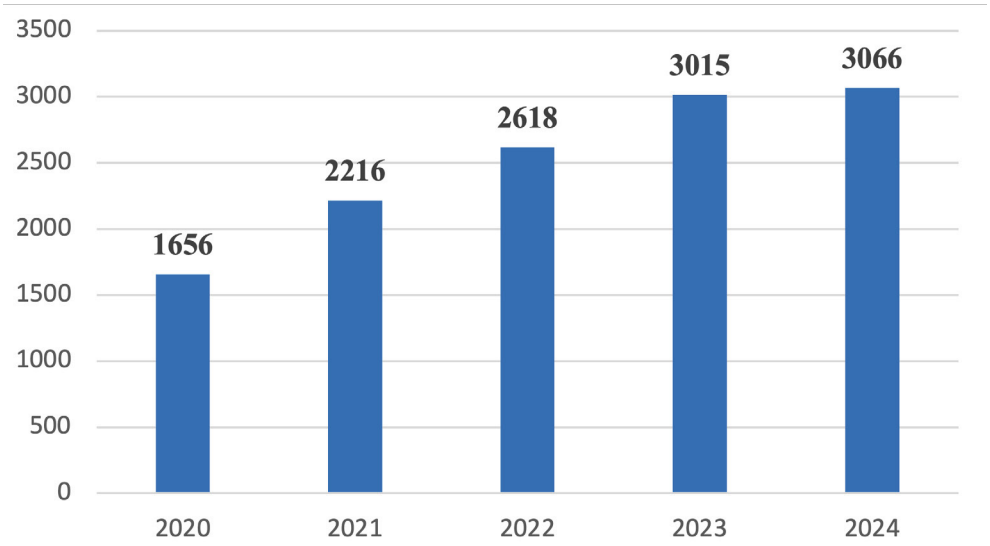
Çin, 5G hizmetlerini ülke genelinde yaygınlaştırmak amacıyla 5G baz istasyonları kurulum çalışmalarını hızla sürdürmektedir. Bu kapsamda son 5 yıl içinde 5G baz istasyonlarının sayısı yaklaşık 5,5 katına çıkarak 2024 yılı sonu itibariyle 4,2 milyonu aşmıştır (Bkz. Şekil 3-1).

Şekil 3.1: Çin'de 5G Baz İstasyonları Sayısı (Bin adet)[3]



5G hizmetlerinin yaygınlaşması ile birlikte Çin'de mobil internet trafiği de önemli ölçüde artış göstermiş olup yıllara göre mobil internet trafiğine Şekil 3-2'de yer verilmektedir. Bu kapsamda 2020 ila 2024 yılları arasında mobil genişbant trafiği yaklaşık iki katına çıkarak 306,6 milyar GB'a ulaştığı görülmektedir.

Şekil 3.2: Çin'de Mobil Genişbant Trafiği (100 milyon GB)[4]



3 Wen Zhou. (2025). Sanayi ve Bilişim Teknolojileri Bakanlığı: Çin'de 2024 sonu itibarıyla 5G baz istasyonu sayısı 4,251 milyon adede ulaştı. IT Home. **https://www.ithome.com/0/827/387.htm**

4 Ministry of Industry and Information Technology. (2024). National communication industry economic operation report. **https://www.cnnic.com.cn/IDR/ReportDownloads/202505/P020250514564119130448.pdf**

3.2. Güney Kore: 5G Kapsama Alanı ve Yayılımı

Güney Kore 5G teknolojilerinde öncü ülkelerden biri olup, 2019 yılında akıllı telefon bazlı ticari 5G hizmetlerini başlatan ilk ülkelerden biri olmuştur. Güney Kore Hükümetinin belirlediği spektrum yol haritası ve eş zamanlı mid-band (3.5 GHz) ile mmWave (28 GHz) tahsisi, işletmecilerin hızlı bir şekilde şebeke kurmalarına olanak vermiştir. Bu durum, hem iç piyasada hızla 5G abone kazanımını hem de Güney Koreli şirketlerin erken saha-deneyimi edinmesini sağlamıştır (World Bank, 2021).

Güney Kore, 5G teknolojisinin yayılımı konusunda yol gösterici bir çizgide hareket etmektedir. Bu kapsamda gerek kamu kesimi gerekse de özel sektör için politikalar belirlediği "5G+ Strategy" belgesini 2019 yılında yayımlamıştır. Strateji Belgesinde, Güney Kore Hükümeti, 2026 yılına kadar 5G+ stratejik alanlarında 180 trilyon wonluk üretkenliğe, 73 milyar dolarlık ihracata ulaşmak için 5 ana strateji belirlemiştir. Bunlar;

- Kamu sektörüne yatırım yaparak erken pazar güvenliğini sağlamak ve insanların yaşam kalitesini iyileştirmek,
- Özel sektöre yatırımı genişletmek ve endüstrileri geliştirmek için bir test ortamı oluşturmak,
- Sistem bakımı yoluyla 5G hizmet kolaylaştırma ve kullanıcı korumasını desteklemek,
- Endüstriyel bir temel oluşturarak dünya çapında tanınan yenilikçi işletmeleri ve yetenekleri beslemek,
- Yurtdışı genişlemeye destek sağlayarak Kore'nin 5G teknolojilerini ve hizmetlerini küreselleştirmektir (MSIT, 2019).

5G teknolojisinin başarılı bir şekilde uygulanması etkin bir spektrum yönetimi ve düzenleyici çerçeveye bağlıdır. Güney Kore, bu bağlamda dünyada öncü ülkelerden biri olarak dikkat çekmekte olup spektrumun etkin tahsisi ve regülasyonu sayesinde ülke, 2019 yılında dünyanın ilk ulusal ölçekte ticari 5G hizmetini başlatabilmiştir (Kim & Kim, 2020).

Güney Kore Hükümeti, Haziran 2018'de dünyada ilk kez hem orta bant (3.42–3.7 GHz) hem de mmWave (26.5–28.9 GHz) frekans bantlarını aynı anda kapsayan geniş ölçekli bir 5G frekans ihalesi düzenlemiştir. Bu süreçte Güney Kore'nin üç büyük mobil işletmecisi (SK Telecom, KT Corporation, LG Uplus) toplamda 3.5 GHz bandında 280 MHz, 28 GHz bandında ise 2400 MHz'lik kullanım hakkı elde etmiştir (MSIT, 2018). İşletmecilere verilen 10 yıllık lisans süresi, uzun vadeli yatırım güvencesi sağlayarak yüksek maliyetli altyapı yatırımlarının önünü açmıştır.

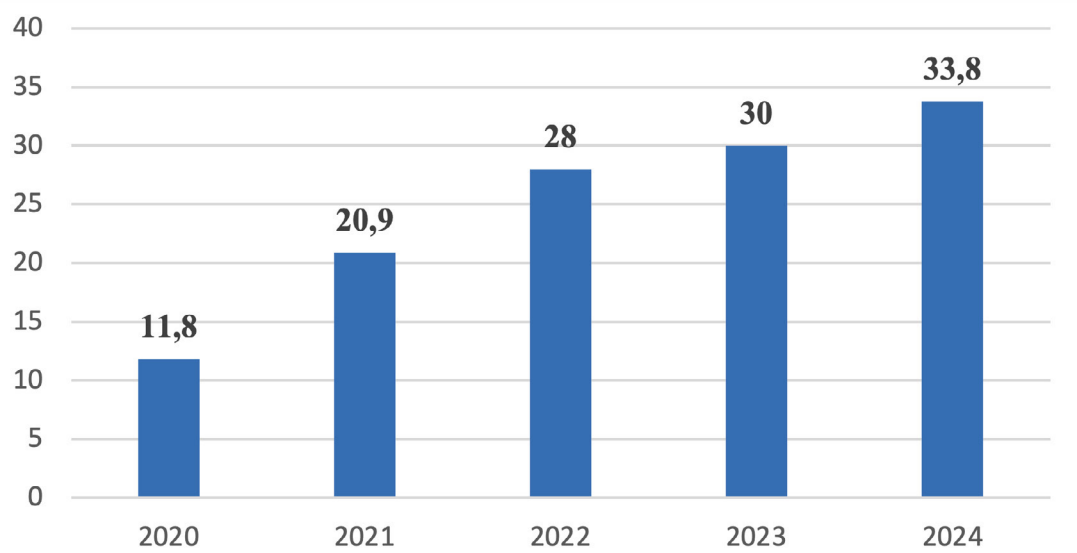
Güney Kore'nin 5G spektrum regülasyonu, üç temel ilkeye dayanmaktadır (OECD, 2021b):

1. **Şeffaflık ve Rekabet:** İhale süreci, işletmecilerin eşit koşullarda yarışabileceği şekilde tasarlanmış, fiyat rekabeti yanında hizmet kalitesi ve kapsama yükümlülükleri de göz önünde bulundurulmuştur.
2. **Kullan ya da Kaybet İlkesi:** İşletmecilerin tahsis edilen frekansları belirlenen süre içinde kullanmaması durumunda lisansların geri alınabileceği kuralı getirilmiştir. Bu, kaynakların etkin kullanımını garanti altına almıştır (OECD, 2021b).
3. **Teknoloji Nötr Yaklaşım:** Frekans tahsisi belirli bir teknolojiye bağlanmamış, gelecekteki inovasyonlara uyum sağlamak amacıyla esnek bir çerçeve benimsenmiştir.

Güney Kore'nin spektrum politikaları, ITU-R tavsiyeleri ve 3GPP standartları ile uyumlu olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu durum, ülkenin küresel ölçekte cihaz uyumluluğunu sağlamasına ve 5G ekosistemini hızla geliştirmesine olanak tanımıştır (Park, 2021). Ayrıca, Güney Kore'nin deneyimi, OECD ve ITU raporlarında diğer ülkelere örnek gösterilen bir model olarak değerlendirilmektedir.

2024'te, Güney Kore Bilim ve İletişim Bakanlığı (MSIT) tarafından yapılan açıklamaya göre, ülke tam ulusal 5G kapsamasına ulaşmıştır. Ülke genelinde hem kentsel hem kırsal alanlarda 3 büyük işletmeci (SK Telecom, KT, LG U+) tarafından kurulan ağlarla 5G erişimi sağlanmıştır (Operator Watch, 2024). Ayrıca Güney Kore 100.000 kişi başına 593 adet 5G baz istasyonu sayısı ile OECD içinde altyapısı en iyi ülkeler arasında yer almaktadır (OECD, 2024). 5G hizmetlerinin yaygınlaşmasının sonuçları abone sayılarına da net bir şekilde yansımış olup 2020 ila 2024 yılları arasında 5G abone sayısı yaklaşık üç katına çıkarak 2024 yılı sonu itibariyle 33,8 milyona ulaşmıştır (Bkz. Şekil 3-3). Bu durum ülke nüfusunun %65,4'ünün 5G abonesi olduğunu göstermektedir.

Şekil 3.3: Güney Kore 5G Abone Sayıları (Milyon kişi)



3.3. ABD: 5G Büyüme Süreci ve Stratejisi

ABD, küresel teknoloji yarışında 5G alanında liderliği hedefleyen ülkelerden biridir. 5G teknolojisi yalnızca daha hızlı veri iletimi ve düşük gecikme süresi sağlamakla kalmamakta; aynı zamanda ekonomik büyüme, ulusal güvenlik ve teknolojik liderlik açısından da stratejik bir araç olarak öne çıkmaktadır. ABD, küresel rekabette üstünlüğünü pekiştirmek amacıyla 5G alanında öncü bir yaklaşım benimsemiş ve kamu ile özel sektörü kapsayan bütüncül bir strateji geliştirmiştir. Bu strateji, spektrum yönetimi, altyapı yatırımları, tedarik zinciri güvenliği ve kırsal bölgelerde erişimin sağlanması gibi çok katmanlı politikaları içermektedir.

Bu kapsamda ilk olarak ABD telekomünikasyon düzenleyici kurumu Federal İletişim Komisyonu (FCC) 2018 yılında "5G FAST Plan" (Facilitate America's Superiority in 5G Technology) belgesini yayımlamıştır. 5G FAST Plan, ABD'nin küresel 5G yarışında liderliğini sürdürmesini hedefleyen stratejik bir girişimdir. Plan, 5G altyapısının hızlı yayılımını sağlamak, spektrumu etkin kullanmak ve düzenleyici engelleri azaltmak üzere kamu ve özel sektör iş birliğini güçlendirmektedir. Raporda öne çıkan hususlar; spektrum politikasının yenilenmesi, altyapı dağılımı ve regülasyonlardır. FCC, 5G hizmetleri için 24 GHz ve 28 GHz bantlarında mmWave spektrum açık artırmaları düzenlemiş, orta bant spektrumları ise ticari kullanıma açmıştır. Toplamda yaklaşık 1.700 MHz ek yüksek frekans spektrumu 5G için tahsis edilmiştir. Ayrıca FCC, 5G altyapısının yayılımını hızlandırmak amacıyla küçük hücre (small cell) kurulum sürecinde yerel izin prosedürlerini kolaylaş-

tırmış ve özellikle yerel yönetimlerden alınması gereken altyapı izinlerinin süresini kısaltmıştır (Linebaugh, 2019).

ABD'nin "National Strategy to Secure 5G" stratejisi, 5G teknolojisinin ülke içinde güvenli, dayanıklı ve stratejik bir şekilde uygulanmasını sağlamak amacıyla hazırlanmış kapsamlı bir plandır. Bu strateji, yalnızca 5G'nin ekonomik potansiyelini değerlendirmekle sınırlı kalmamakta, aynı zamanda ulusal güvenlik açısından ortaya çıkabilecek riskleri en aza indirmeyi ve kritik altyapının korunmasını hedeflemektedir. Strateji belgesi, federal kurumlar, özel sektör aktörleri ve uluslararası ortaklarla koordineli bir şekilde yürütülen çok katmanlı bir yaklaşımı öngörmektedir. (NTIA, 2021).

Stratejinin temel hedefleri dört ana eksende şekillenmektedir:

- **Güvenli 5G Dağıtımı:** ABD içindeki 5G altyapısının etkin ve güvenilir bir şekilde kurulmasını sağlamak, Ar-Ge faaliyetlerini destekleyerek ülkenin teknik üstünlüğünü korumak.
- **Altyapı Güvenliği ve Risk Yönetimi:** Kritik ağ bileşenlerinin güvenliğini sağlamak ve tedarik zincirindeki olası riskleri azaltmak için standartlar geliştirmek. Bu çerçevede, açık ağ mimarisi ve sanallaştırılmış ağ teknolojileri ile tedarikçi bağımlılığı minimize edilmektedir.
- **Ekonomik ve Ulusal Güvenlik Çıkarlarının Korunması:** 5G altyapısının ekonomik ve stratejik değerini güvence altına almak; yerli üretim ve kamu-özel iş birliği modelleri ile kritik teknolojilere erişimi ve inovasyonu teşvik etmek.
- **Küresel Güvenlik ve İş Birliği:** ABD'nin müttefikleri ile iş birliğini güçlendirerek, güvenli ve güvenilir 5G tedarik zincirlerinin küresel ölçekte yayılımını desteklemek ve uluslararası standartların geliştirilmesine katkıda bulunmak.

Stratejinin uygulanması, federal kurumlar, özel sektör ve akademi arasında yakın bir koordinasyonu gerektirmektedir. Uygulama planı, 5G altyapısının yayılımını hızlandırmayı, güvenlik risklerini minimize etmeyi, ekonomik ve ulusal güvenlik hedeflerini korumayı ve küresel iş birliğini artırmayı amaçlayan dört "line of effort" çerçevesinde organize edilmiştir. Bu plan, stratejik önceliklerin etkin bir şekilde hayata geçirilmesini sağlayacak somut adımlar ve zaman çizelgeleri sunmaktadır (NTIA, 2021; ITIF, 2020).

Strateji aynı zamanda risklerin farkında olarak, tedarik zincirinin çeşitlendirilmesi, kaynak tahsisi ve kurumlar arası koordinasyon gibi alanlarda olası zorlukları da ele almaktadır. Bu yaklaşım, ABD'nin hem yerel hem de küresel düzeyde 5G teknolojilerinde liderliğini sürdürmesini ve kritik altyapısını güvence altına almasını mümkün kılmaktadır.

ABD 5G teknolojisinin güvenlik boyutunu en üst düzeyde ele almakta özellikle ulusal güvenliğe yönelik hususlara da politikalarında yer vermektedir. Bu çerçevede ABD Savunma Bakanlığı'nın (Department of Defence, DoD) 15 Aralık 2020 tarihli "5G Strategy Implementation Plan" raporu, 5G Stratejisi'nin uygulamaya geçirilmesine yönelik kapsamlı bir yol haritası sunmaktadır. Plan, 5G teknolojisinin savunma alanında kritik bir stratejik yetenek olarak konumlanmasını ve bu alanda hem teknolojik liderliğin hem de güvenliğin sağlanmasını amaçlamaktadır. 5G, makine-makine iletişimi, veri odaklı uygulamalar ve gerçek zamanlı komuta-kontrol kabiliyetleri açısından DoD'ye önemli operasyonel avantajlar sunarak geleceğin "bağlantılı savaşı" konseptine temel oluşturmaktadır (DoD, 2020).

Stratejinin uygulanması dört ana konu üzerinden organize edilmiştir. İlki, teknoloji geliştirilmesi olup, DoD'nin araştırma, test ve pilot projeler aracılığıyla 5G teknolojisinin geliştirilmesini hedeflemektedir. İkincisi, güvenlik risklerinin değerlendirilmesi ve yönetimidir; kritik altyapı ve tedarik zincirindeki potansiyel risklerin tespit edilmesi ve minimize edilmesi önceliklidir. Üçüncüsü, standartlar ve politika etkisi ile DoD'nin ulusal ve uluslararası düzeyde 5G standartlarının şekillendirilmesine katkıda bulunmasını sağlamaktadır. Dördüncüsü ise ortaklıklar ekseninde, özel sektör, akademi ve uluslararası müttefiklerle iş birlikleri kurularak 5G ekosisteminin desteklenmesi ve savunma uygulamalarıyla entegrasyonun sağlanmasıdır (DoD, 2020).

Plan, her çaba hattı için somut eylemler, sorumlular, kaynak gereksinimleri ve zamanlamaları belirler. DoD, test ve pilot projeleri kendi tesislerinde hayata geçirerek, 5G teknolojisini gerçek operasyonel senaryolarda değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, dinamik spektrum paylaşımı ve güvenilir tedarikçi ekosisteminin geliştirilmesi ile hem tedarik güvenliği hem de teknolojik yenilik desteklenmektedir (DoD, 2020; Defense.gov, 2021).

5G'nin savunma operasyonlarına entegrasyonu, lojistik yönetimi, komuta kontrol ve sensör-ağ entegrasyonu gibi alanlarda yeni operasyonel kapasite yaratmaktadır. Özel 5G ağlarının savunma tesislerinde konuşlandırılması, güvenli ve görev odaklı kullanım imkânı sunarak, DoD'nin teknolojiye erken erişimini ve stratejik avantaj elde etmesini sağlamaktadır. (DoD, 2020; CTO, 2020).

ABD, 5G teknolojisinin yayılımı ve ticarileşmesinde küresel liderlerden biri olma konumunu korumaktadır. ABD Kablosuz Haberleşme ve İnternet Birliğinin (CTIA) 2024 Yıllık Anket Raporunda, ABD'de toplam kablosuz bağlantı sayısı 558 milyonun üzerine çıktığı ve bunların yaklaşık 216 milyonunun akıllı telefon, IoT cihazları, akıllı saat gibi aktif 5G ci-

hazlarının oluşturduğu bilgisine yer verilmiştir. Bu veriler, toplam bağlantıların %39'unun 5G cihazı üzerinden gerçekleştirildiğini göstermektedir. Aynı rapor kapsamında işletmecilerin 2023 yılında yaklaşık 30 milyar USD yatırım yaptığını ve 2018'den itibaren toplamda 190 milyar ABD doları seviyesinde yatırım yaptığı görülmektedir (CTIA, 2024).

ABD'de 5G hizmetleri kapsama açısından incelendiğinde, nüfusun önemli bir bölümünün kapsama alanı içinde olduğu görülmektedir. Ericsson'un 2024'te yayımladığı "North America: A Closer Look" raporu, ABD'de düşük bantlı 5G ile yaklaşık 300 milyon insanın kapsandığını; orta bantta ise 210–300 milyon kişiye erişim sağlandığını ortaya koymaktadır (Ericsson, 2024). Bu çok bantlı strateji, işletmecilere hem geniş coğrafi kapsama hem de yüksek hızlı bağlantı hizmeti verme olanağı sağlamaktadır. Veri trafiği açısından da 5G'nin etkisi açık bir şekilde görülmektedir. Bu çerçevede, ABD'de kullanıcı başına aylık mobil veri tüketimi ortalaması yaklaşık 104,6 GB seviyesine yükselmiş durumdadır (5G Americas, 2025a).

ABD, 5G teknolojisini yalnızca bir iletişim altyapısı değil, ekonomik rekabet gücünü, ulusal güvenliği ve küresel teknolojik liderliği şekillendirecek stratejik bir unsur olarak konumlandırmaktadır. Bu doğrultuda federal kurumlar, özel sektör, akademi ve uluslararası ortaklar arasında güçlü bir eşgüdüm mekanizması inşa edilmiş; spektrum yönetiminden altyapı yatırımlarına, tedarik zinciri güvenliğinden savunma uygulamalarına kadar geniş bir politika çerçevesi hayata geçirilmiştir. 5G'ye yönelik tüm bu yaklaşım, ABD'nin teknoloji alanındaki konumunu güçlendirmeyi amaçlayan bütüncül bir devlet politikası olarak öne çıkmaktadır. Kamu-özel iş birliğini merkezine alan bu stratejik yönelim, ülkenin 5G ekosistemini güvenli, dayanıklı ve küresel ölçekte rekabetçi kılmayı amaçlamaktadır.

3.4. Japonya: Teknolojik Altyapı ve 5G'nin Geleceği

Japonya, teknoloji ve telekomünikasyon alanında dünya çapında önde gelen ülkelerden biri olarak, dijital dönüşüm hedeflerini uzun vadeli ve planlı bir vizyon doğrultusunda şekillendirmektedir. Japonya, 5G teknolojisinin sunduğu yüksek hız, düşük gecikme ve geniş bağlantı kapasitesini yalnızca mobil iletişimde değil; sanayi, sağlık, ulaşım ve kamu hizmetlerinde de önemli bir dönüştürücü güç olarak değerlendirmektedir. Japonya'nın 5G stratejisi, güçlü bir teknolojik altyapı oluşturmak, özel sektör ile devlet arasındaki iş birliğini güçlendirmek ve yenilikçi uygulama alanlarını geliştirmek olmak üzere üç temel alan üzerine odaklanmaktadır.

Japon Hükümeti, 5G'yi ülke ekonomisinin büyüme motorlarından ve endüstriyel rekabetçiliğin kritik unsurlarından biri olarak tanımlamaktadır. Bu doğrultuda, düzenleyici

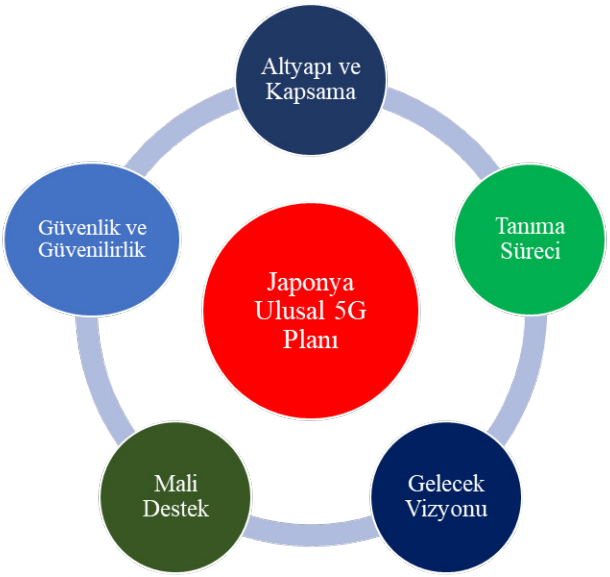
çerçeveyi hızla oluşturarak frekans tahsislerine öncelik vermektedir. Hükümetin yürütmekte olduğu strateji, sadece büyük telekom işletmecilerini değil, start-up'lar, araştırma merkezleri ve yerel yönetimleri kapsayan çok katmanlı bir ekosistem yaratmayı hedeflemektedir. Ayrıca Japonya, akıllı şehirler, otonom araçlar ve IoT tabanlı üretim sistemleri gibi alanlarda 5G'nin potansiyelini somut projelere dönüştürmek için pilot uygulamalar ve test sahaları geliştirmektedir.

Japonya 5G hizmetlerini vatandaşların hizmetine sunabilmek amacıyla yol haritaları hazırlamış ve yasal mevzuatın belirlenmesi adına çalışmalar yürütmüştür. Japonya, 5G teknolojisinin yaygınlaşmasını ve güvenli şekilde kullanılmasını sağlamak için kapsamlı bir yasal ve stratejik çerçeve geliştirmiştir. Bu çerçeve, öncelikle 2020 yılında yürürlüğe giren "Özel Yüksek İletişim Teknolojileri Sistemlerinin Geliştirilmesi, Tedariki ve Kurulumunun Teşvik Edilmesine İlişkin Kanun" ve Ulusal 5G Geliştirme ve Tedarik Planı ile şekillenmektedir.

Kanun, 5G altyapısının hem ulusal hem de yerel ölçekte geliştirilmesini hedeflemektedir. Bu kapsamda, Geliştirme ve Tedarik Planı ile Kurulum Planı olmak üzere iki aşamalı bir onay süreci öngörülmüştür. Tanınan projeler, mali destek ve idari kolaylıklar sayesinde teşvik edilmektedir. Ayrıca, kredi destekleri, yatırım teşvikleri ve vergi indirimleri gibi mekanizmalar, özellikle yerel ağların kurulmasını ekonomik açıdan desteklemektedir. Kanun, büyük şehirlerde olduğu kadar kırsal ve bölgesel alanlarda da 5G altyapısının kurulmasını öngörür ve sanayi tesisleri, kamu kurumları ile küçük belediyelerin kendi yerel ağlarını kurabilmesine olanak tanımaktadır. Söz konusu teşvikler yalnızca kamu kurumlarını değil yerli teknoloji firmaları ve start-up'ları da kapsamaktadır (METI, 2020a).

Japonya Ekonomi ve Sanayi Bakanlığı (METI) tarafından hazırlanmış olan Ulusal 5G Planı, kanunun öngördüğü altyapı ve projelerin uygulanmasını somutlaştıran bir yol haritasıdır. Plan, 5G sistemlerinin geliştirilmesi, tedarik edilmesi ve kurulumuna dair kapsamlı bir çerçeve sunmaktadır.

Şekil 3.4: Japonya Ulusal 5G Planı Çerçevesi



Japonya Ulusal 5G planı çerçevesinde 5 temel unsur belirlenmiş olup bunlar aşağıdaki gibi özetlenmektedir:

- **Altyapı ve Kapsama:** Plan yalnızca büyük işletmecileri değil yerel 5G sistemlerini de kapsamakta olup ve bölgesel, kırsal alanlarda dijital erişimi artırmayı hedefler.
- **Tanıma Süreci:** Sistemlerin güvenilir ve standartlara uygun olarak kurulabilmesi için planların onaylanması gereklidir. Tanınan projeler Hükümet tarafından teşvik edilir ve mali destek mekanizmalarından yararlandırılır.
- **Güvenlik ve Güvenilirlik:** 5G altyapısının güvenliği ve güvenilirliği temel önceliktir; tanınan projelerde kalite ve güvenlik kriterleri sağlanmalıdır.
- **Mali Destek:** Kredi desteği, yatırım teşvikleri ve vergi indirimleri, özellikle yerel ağların kurulmasını destekler.
- **Geleceğe Yönelik Vizyon:** Plan, 6G ve Beyond-5G teknolojileri için de zemin oluşturur. Yerel 5G sistemlerinin başarıyla çalışması ve tanınmış projelerin yaygınlaşması, ileri nesil iletişim teknolojilerine geçişi kolaylaştırır (METI, 2020b).

Japonya, 5G teknolojisini yalnızca mevcut iletişim ihtiyaçlarını karşılayan bir altyapı olarak değil onu 6G'ye geçişin temel basamağı olarak konumlandırmaktadır. Bu yaklaşım, Japonya'nın ICT'deliderliğini sürdürme, endüstriyel dönüşümü hızlandırma ve uluslararası rekabet gücünü artırma hedeflerini yansıtmaktadır. Japonya Bilgi İletişim Konseyi'nin 2022 tarihli "Beyond 5G/6G Strateji Belgesi", 2030'lar için Japonya'nın optik ağlar, uydu ve hava tabanlı ağ sistemleri ile sanallaştırılmış entegre ağ mimarileri gibi alanlara

öncelik verdiğini ortaya koymaktadır. Bu vizyon, ülkenin 6G döneminde hem esnek hem de güvenli bir dijital altyapı oluşturma amacını göstermektedir.

Ar-Ge alanında da Japonya önemli adımlar atmış durumda. Japonya Bilgi İletişim Araştırma Kurumu (NICT), 6G'ye geçişi destekleyecek projeler için "İnovatif Bilgi İletişim Teknolojileri Fonu"nu yürütmektedir. Bu fon, özellikle optik çekirdek ağlar, düşük enerji tüketimli baz istasyonları ve uç-bulut hesaplama (MEC) gibi öncelikli teknoloji alanlarını finanse etmek için kullanılmaktadır. Bu yatırımlar ile Japon Hükümeti hem teknik hem de ekonomik açıdan 6G'de öncü olmasını hedeflemektedir (NCIT, 2021). Buna ek olarak, NICT'nin yayınladığı Beyond 5G / 6G Beyaz Kitap, 2030 sonrası Japon toplumunda olası kullanım senaryolarını değerlendirmektedir. Bu senaryolar arasında "Siber Avatar Toplumu" ve "Dijital İkizler" gibi kavramlar yer almakta ve hangi teknolojilerin bu senaryolarda kritik olacağı tanımlanmaktadır. Bu yaklaşım, Japonya'nın yalnızca altyapıyı geliştirmekle kalmayıp, toplumsal dönüşümü de 5G'den 6G'ye bir "sıçrama" olarak gördüğünü göstermektedir (NCIT, 2023). Frekans kaynaklarının etkin kullanımı da bu vizyonun önemli bir boyutunu oluşturmaktadır. NICT ve ARIB tarafından 2023 yılında düzenlenen "Frekans Kaynak Geliştirme Sempozyumu"nda, 6G döneminde frekans verimliliği ve sürdürülebilirliğin kritik olduğu vurgulanmıştır (NCIT; ARIB, 2023).

Sonuç olarak, Japonya'da 5G sadece güncel iletişim gereksinimlerini karşılayan bir teknoloji değil; 6G'ye geçişin stratejik bir adımıdır. Ülke, 5G altyapısını geliştirerek hem küresel ağ ekosisteminde konumunu güçlendirmeyi hem de geleceğin dijital toplumuna hazırlanmayı hedeflemektedir.

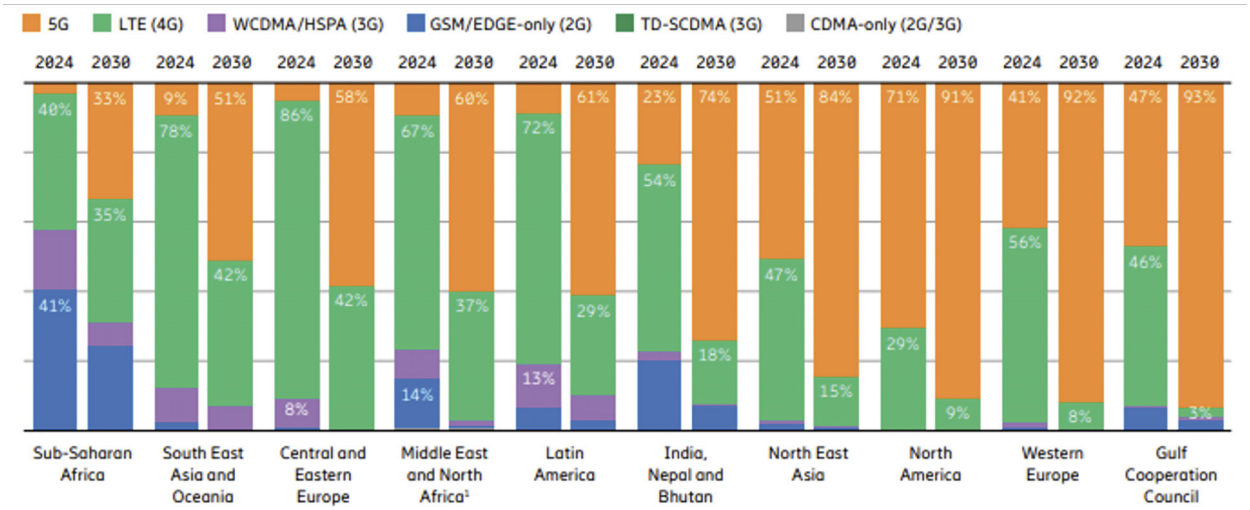
4.5G ADAPTASYONUNDA KARŞILAŞILAN ZORLUKLAR

Günümüz dünyasında dijitalleşme hızla ilerlerken 5G, küresel ölçekte büyük bir dönüşüm potansiyeli taşımaktadır. Yüksek veri hızları, düşük gecikme süreleri ve çok daha fazla cihazın aynı anda bağlantıda kalabilmesi gibi avantajlarıyla 5G; sağlık, ulaşım, eğitim ve sanayi gibi birçok sektörde yeni fırsatlar sağlamaktadır. Ancak bu teknolojinin sunduğu olanaklara rağmen, 5G'nin küresel ölçekte benimsenmesi homojen bir seyir izlememektedir. Farklı bölgelerde karşılaşılan sosyoekonomik, teknolojik ve yapısal engeller, 5G'nin yaygınlaşmasını ciddi ölçüde yavaşlatmaktadır. Bu bağlamda, Avrupa'dan Afrika'ya, Filipinler'den diğer gelişmekte olan ülkelere kadar çeşitli coğrafyalarda 5G'ye geçiş sürecinde kendilerine özgü birtakım zorluklarla karşılaşılmaktadır.

4.1. Avrupa: Düşük Kapsama Oranı ve Engeller

5G teknolojisi, tüm 27 AB üye ülkesinde kullanıma sunulmuştur. AB genelinde, toplamda 460.000 aktif 5G baz istasyonu kurulmuş olup, bu da nüfusun yaklaşık %89'unun 5G kapsama alanına girmesini sağlamaktadır. Tahmini 5G abone sayısı 223 milyon olup, bu da her 100.000 kişi başına 29.893 aboneye karşılık gelmektedir. Bazı AB ülkelerinde 5G SA teknolojisi de kullanılmaktadır. Bu teknolojiyi ilk hayata geçiren işletmeci, 2021 yılında Vodafone Almanya olmuştur (Scaramuzzi, 2025).

Şekil 4.1: Bölgelere Göre Mobil Aboneliklerin Dağılımı



* Sahra Altı Afrika / Güneydoğu Asya ve Okyanusya / Orta ve Doğu Avrupa / Orta Doğu ve Kuzey Afrika / Latin Amerika / Hindistan, Nepal ve Butan / Kuzeydoğu Asya / Kuzey Amerika / Batı Avrupa / Körfez İşbirliği Konseyi
Kaynak: Ericsson, 2024

Şekil 4-1'de Orta ve Doğu Avrupa'daki mobil teknolojilere geçişin Batı Avrupa'ya kıyasla daha yavaş olduğu görülmektedir. Batı Avrupa'da ise, 5G abone sayısı hızla artmasına rağmen, genel penetrasyon oranı bazı gelişmiş ülkelere göre hâlâ nispeten düşük seviyededir (Ericsson, 2024). Bu durum, Avrupa'nın küresel dijital altyapı yarışındaki rekabet gücünü etkileyebilecek önemli bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

Avrupa Komisyonu'nca yayımlanan Mario Draghi'nin Avrupa Rekabetçiliği Raporu, Avrupa ile küresel rakipleri arasındaki dijital altyapıdaki büyük yenilik ve yatırım farkına dikkat çekmektedir. Rapora göre, Avrupa'da her 100.000 kişi başına yaklaşık 100 adet 5G mobil baz istasyonu bulunurken, Çin'de bu sayı 245'e, Güney Kore'de ise neredeyse 600'e ulaşmaktadır. Ayrıca, 5G'nin hız ve düşük gecikme avantajı sunan orta bant kapsama oranı Avrupa'da %45 civarındayken, Kuzey Amerika'da %90 ve Çin'de ise %95 seviyelerine ulaşmaktadır (GSMA, 2025).

Bu durumlara istinaden, AB'nin 2030 Dijital On Yıl hedefleri kapsamında belirlenen fiber altyapı ve 5G yaygınlaştırma planlarının gerisinde olduğu söylenebilir. AB genelinde tam gigabit ve 5G kapsama sağlanabilmesi için yaklaşık 200 milyar Avroluk bir yatırım gerektiği hesaplanmaktadır. Buna rağmen, Avrupa'nın kişi başına yaptığı altyapı yatırımı diğer büyük ekonomilerle kıyaslandığında oldukça düşük seviyededir. Bu durumun temel nedenlerinden biri, Avrupa'daki telekomünikasyon pazarının parçalı yapısıdır. AB'de 450 milyon tüketiciye hizmet veren 34 mobil şebeke işletmecisi bulunurken, ABD ve Çin (ABD'de 3 mobil şebeke işletmecisi ve 70 sanal mobil şebeke işletmecisi, Çin'de ise 4 mobil şebeke işletmecisi ve 16 sanal mobil şebeke işletmecisi) gibi ülkelerde bu sayı çok daha azdır. Avrupa'da birleşmelere genellikle olumsuz yaklaşılması, şirketlerin büyük ölçekli yatırımlar yapmasını zorlaştırmakta ve sabit altyapı maliyetlerini daha ağır hale getirmektedir. Bu parçalı yapı aynı zamanda, Avrupa'nın yeni teknolojileri benimsemesini de geciktirmektedir. Örneğin, Avrupa'nın uç bilişim (edge computing) alanındaki etkisi henüz sınırlı kalırken; şebeke servislerinin üçüncü taraf geliştiricilere açılması konusunda da standartlardaki uyumsuzluk önemli bir zorluk oluşturmaktadır. (European Commission, 2024a; European Commission, 2024b).

Sabit genişbant pazarında da benzer bir dağınıklık söz konusudur. Avrupa'da en büyük üç işletmecinin toplam pazar payı %35 iken, bu oran ABD'de %66, Çin'de ise %95'e kadar çıkmaktadır. Avrupa'da tüketiciler ve işletmeler için düşük fiyatlar kısa vadede avantaj sağlamasına rağmen bu düşük fiyat politikası, uzun vadede sektörün kârlılığını düşür-

müş; dolayısıyla altyapı yatırımlarını ve temel bağlantı hizmetlerinin ötesine geçen yenilikçi teknolojilere yapılan yatırımları sınırlamıştır (European Commission, 2024b).

Avrupa'daki altyapı yatırımlarının düşük seviyede kalmasının bir diğer nedeni ise spektrum ihaleleri olarak gösterilebilir. İtalya'nın 2018 yılında tamamlamış olduğu 5G spektrum ihalesi 4G'den önemli ölçüde farklılıklar içermektedir. İtalya Telekomünikasyon Düzenleme Kurumu AGCOM, ihale öncesi 2,5 milyar Avroluk hedefinin iki katından fazla olan 6,5 milyar Avronun üzerinde gelir elde etmiştir ("The Italian 5G auction", 2018). Söz konusu ihalede 5G özelliklerinin uygulanması için en değerli bant olan bilinen 3.6-3.8 GHz bandı için Vodafone ve Telecom Italia, diğer rakiplerin iki katından fazla yatırım yapmıştır (Fradella ve Sangiovanni, 2019). Bu durum yeni nesil altyapı yatırımlarına büyük bir baskı uygulayabileceği gibi birtakım endişelere de sebebiyet vermiştir. Telecom Italia, 5G harcamalarıyla başa çıkmak için çekirdek dışı varlıklarını satmak zorunda kalabileceğini belirtmiştir (Morris, 2018). Ayrıca Telecom Italia ve Vodafone, yatırımların geri dönüşünü daha uygun hale getirmek için 5G iş modelinin maliyet tarafını yönetmenin bir yolu olarak bir 5G ortak girişimi kurma planlarını duyurmuştur (Fradella ve Sangiovanni, 2019). 2019 yılında Almanya'da gerçekleştirilen 5G frekans ihalesi ise yaklaşık üç ay sürmüş ve 497 turda tamamlanmıştır. İhale başlangıcında 5 milyar Avroyu aşması beklenmeyen ihale geliri, süreç sonunda 6,5 milyar Avroya ulaşmıştır. Yerel ve endüstriyel kullanım amacıyla ayrılan 100 MHz'lik ortabant spektrumun satışa dâhil edilmemesi, mobil şebeke işletmecileri tarafından maliyetleri artıran bir unsur olarak değerlendirilmiştir. Deutsche Telekom, yüksek ihale bedellerinin ağ genişletme yatırımlarını sınırlandırabileceği, spektrum fiyatlarının daha düşük seviyelerde olabileceği, ülkedeki spektrum fiyatlarının diğer Avrupa ülkelerine kıyasla daha yüksek olduğu, bu tutar ile yaklaşık 50.000 yeni mobil istasyon kurulabileceği ve birçok eksikliğin giderilebileceği gibi söz konusu ihaleye ilişkin olarak birtakım açıklamalar yapılmıştır (Morris, 2019).

Ayrıca, 2020 yılında Brüksel'de gerçekleştirilen bir konferansta Avrupa Komisyonu, spektrum atamalarıyla ilgili olarak; üye devletlerin, işletmecilerin ağ kurulum yatırımlarını gerçekleştirebilmeleri için yeterli finansal imkân sağlayacak makul spektrum tahsis prosedürlerini benimsemeleri, yüksek spektrum fiyatlarının, uzun vadede sektöre ek kamu kaynakları aktarılması gerekliliğini doğurabileceği ve bu nedenle sürdürülebilir bir yaklaşım olmayabileceği konularıyla ilgili uyarılarda bulunmuştur (Podbevsek, 2020).

Tüm bu sebeplerden ötürü, Avrupa Birliği'nin 2030 Dijital On Yıl hedeflerine ulaşabilmesi için özel sektörün altyapı yatırımları ve ticari projelere ciddi katkı sağlaması gerektiği söylenebilmektedir. Gigabit hızında internet bağlantısı sunabilen fiber altyapılar, Avrupa'daki hanelerin sadece %56'sına kadar ulaşabilmiştir. Ayrıca, kırsal bölgelerdeki

hanelerin %50'si gelişmiş dijital erişim şebeke altyapısıyla hizmet alamamaktadır. Eski bakır kablo altyapısı ise birçok bölgede kullanılmaya devam etmekte ve bu sistemlerin ne zaman tamamen kaldırılacağına dair somut bir takvim bulunmamaktadır (European Commission, 2024b).

Avrupa genelinde 5G teknolojisinin nüfus kapsama oranı %89 civarındayken, bu oran ABD ve Çin gibi ülkelerde %95'in üzerindedir. Ancak sadece kapsama oranı değil, sunulan hizmet kalitesi de hem kullanıcı beklentilerinin hem de sanayinin ihtiyaçlarının gerisindedir. Bu durum, kent ve kırsal bölgeler arasındaki dijital uçurumu daha da derinleştirmektedir. Tüm bu etkenler bir araya geldiğinde, Avrupa'da 5G'nin yaygın kullanımı; ABD, Güney Kore ve Japonya gibi ülkelerin gerisinde kalmaktadır (Scaramuzzi, 2025; European Commission, 2024b).

AB genelinde tam gigabit internet erişimi ve tüm yerleşim alanlarında bağımsız 5G kapsamasının sağlanabilmesi hedefleri, Avrupa telekomünikasyon sektörünü olumsuz etkileyen dört ana engel ile karşı karşıyadır. Bu faktörler:

- Son yıllarda sabit ve mobil genişbant kullanımı hızla artmış olmasına rağmen, sektörde elde edilen sermaye getirisi uzun süredir sermaye maliyetinin altında seyretmektedir. Bu durum, geleceğe dönük altyapı ve teknoloji yatırımlarını finanse etmeyi her geçen gün daha da zorlaştırmaktadır.
- Avrupa'da mobil frekansların dağıtımı için yapılan spektrum ihaleleri, üye ülkeler arasında uyumlu bir şekilde düzenlenmemiştir. Son 25 yıldır bu ihaleler, 3G, 4G ve 5G için yüksek gelir elde etmeye odaklı tasarlanmış; yatırım taahhütleri, hizmet kalitesi ya da inovasyon gibi kriterlere ise yeterince önem verilmemiştir.
- Genişbant altyapısını tamamlayıcı nitelikteki yenilikçi hizmetler (IoT çözümleri, uç bilişim uygulamaları veya açık yazılım arayüzlerinin (API) ticarileştirilmesi vb.) yüksek başlangıç maliyetleri gerektirmektedir. Ancak günümüzde bu şirketlerin finansal esnekliği sınırlı olduğu için, bu tür yenilikçi projelere kaynak ayırmaları zorlaşmaktadır.
- Ayrıca ağ altyapılarının yazılım tabanlı hale gelmesiyle birlikte, iletişim hizmetleri giderek doğrudan internet üzerinden sunulmakta ve geleneksel telekom işletmecilerinin rolü giderek azalmaktadır. Bu dönüşüm, Avrupa'da konumlanmış olan geleneksel ekipman üreticilerini de zor durumda bırakmakta, sektördeki köklü iş modellerinin sürdürülebilirliğini tehdit etmektedir (European Commission, 2024b).

Avrupa'nın dijital altyapı ihtiyaçlarını karşılamak, telekomünikasyon sektörü için düzenleyici çerçeveyi yeniden şekillendirilmesi ve sektörün rekabetçilik ile ekonomik büyümenin itici gücü haline getirilmesi açısından atılacak önemli bir ilk adımdır. Dijital altyapı-

ya yapılacak iyileştirilmiş yatırımların faydaları yalnızca telekomünikasyon ve teknoloji sektörlerinde değil, diğer tüm endüstrilerde de hissedilecektir. Bu hedef doğrultusunda, Avrupa'nın rekabetçi, güvenli ve sürdürülebilir bir tek pazar oluşturmak için hızlı adımlar atması; ayrıca sınır ötesi hizmetlerin sunulması gibi geleceğe yönelik vizyonları da hayata geçirmesi gerekmektedir. Bunun için cesur ve yeni bir yaklaşım benimsenmeli ve belirli alanlardaki çalışmalar desteklenmelidir. Bu alanlar ise:

- Dijital tek pazarın tamamlanması,
- İnternet değer zincirinde adaleti sağlamak için ek önlemlerin uygulanması,
- Yatırım ve inovasyon etkilerine daha uzun vadeli bir bakış açısıyla yaklaşılması,
- AB spektrum politikalarında yatırım dostu bir yaklaşımın benimsenmesi,
- Mobil işletmecilerin sürdürülebilirlik çabalarının desteklenmesi,
- Altyapı paylaşımlarının teşvik edilmesi olarak ifade edilebilir (European Parliament, 2019; GSMA, 2025).

4.2. Filipinler: Cihaz Fiyatları ve Dijital Okuryazarlık Sorunları

Filipinler, Güneydoğu Asya'da 5G teknolojisini hayata geçiren ilk ülkeler arasında yer almaktadır. Ülkenin önde gelen mobil işletmecilerinden Globe Telecom, Haziran 2019'da Sabit Kablosuz Erişim hizmetiyle 5G teknolojisini belirli bölgelerde devreye almıştır. Bunu takiben, Şubat 2020'de Metro Manila'da 5G güçlendirilmiş Mobil Genişbant hizmetini hayata geçirmiştir. Bu hizmet başlangıçta yalnızca "Globe Platinum" adlı özel müşteri segmentine sunulmuştur (GSMA, 2022). 2024 yılı boyunca Globe, Filipinler genelinde toplam 587 yeni 5G sahası kurarak ülke çapındaki 5G kapsama alanını önemli ölçüde genişletmiştir. Bu genişlemeyle birlikte, 5G kapsama oranı Ulusal Başkent Bölgesi'nde %98,69'a, Visayas ve Mindanao'daki kilit şehirlerde ise %96,95'e ulaşmış; hizmet verilen kasaba sayısı ise yaklaşık 106'ya çıkmıştır (Globe, 2025).

Bir diğer büyük işletmeci olan Smart ise Temmuz 2020'de 5G şebekesini kullanıma açmıştır (GSMA, 2022). İlk etapta bu hizmet, Smart onaylı cihazları bulunan ve 5G aktif SIM kart kullanan faturalı abonelere Metro Manila bölgesinde sunulmuştur. Smart'ın 5G/4G şebekesi, ülke nüfusunun yaklaşık %97'sine hizmet vermektedir ("5G in SEA," 2024). Her iki işletmeci de 3.500 MHz frekans bandını kullanarak hem geniş kapsama alanı hem de yüksek veri kapasitesi sağlamayı hedeflemiştir (GSMA, 2022). 2021 yılında Filipinler pazarına giren Dito Telecommunity Corporation ise, ülkedeki ilk ticari 5G bağımsız ağını

sunmuştur ("5G in SEA," 2024).

Filipinler'de, 5G kapsama alanı genişlemiş olmasına rağmen, veri tüketimi ve penetrasyonun sınırlı olması nedeniyle 5G teknolojisinin benimseme hızı yavaş kalmaktadır (Ericsson, 2024). Bu durumun sebepleri arasında uyumlu cihazların yüksek fiyatları, altyapı eksiklikleri ve dijital okuryazarlık seviyesinin düşük olması gibi faktörler gösterilebilir (Low penetration slows Philippines' 5G adoption, 2025). İstatistikler, Filipinler'deki nüfusun %67'sinin, erişim imkânı bulunsa dâhi mobil interneti kullanmadığını ortaya koymaktadır. Üstelik, bağlantıya ulaşabilenler için dâhi, hizmet maliyetleri çoğu zaman yüksek seviyede kalmaktadır (Galleto, Africa, De Leon ve Culaba, 2023). Ayrıca, ülkenin 7640 adadan oluşan geniş ve parçalı coğrafi yapısı, altyapı yatırımlarının zorluklarını artırarak fiber altyapı gibi hızlı internet çözümlerinin yayılımında engelleyici bir durum teşkil etmektedir (How Many Islands are in the Philippines, t.y.; Page, 2024). Ülkede internet erişiminin kapsamı ve sinyal kalitesi; hücresel istasyonların sayısının komşu ülkelere göre sayıca az olması ve dengesiz bir şekilde konumlandırılması nedenlerine bağlı olarak ülke genelinde farklılık gösterebilmektedir. Merkez adaların çoğunda genişbant internet ve yüksek hızlı mobil bağlantı mevcut olsa da kapsama alanındaki dalgalanmalar ve enerji kesintileri gibi öngörülemeyen faktörler erişimin sürekliliğini olumsuz etkileyebilmektedir (Galleto, Africa, De Leon ve Culaba, 2023). Bu bakımdan, Filipinler'in 5G konusunda diğer ülkelerle aynı seviyeye gelmesi, altyapı geliştirme, tüketici kabulü ve düzenleyici politikaların uyumlu bir şekilde ilerlemesine bağlıdır. Ayrıca, ilgili paydaşların, 5G altyapısının inşasına, 5G cihazlarının daha uygun fiyatlarla erişilebilir hale getirilmesine ve dijital okuryazarlığın artırılmasına öncelik vermeleri durumunda, Filipinler'in bölgesel rakipleriyle aynı seviyeye ulaşabileceği öngörülmektedir (Low penetration slows Philippines' 5G adoption, 2025).

Filipinler Ulusal Fiber Omurga Planı'nın hızlandırılması, ülke genelinde daha hızlı ve güvenilir internet bağlantıları sağlanarak 5G'nin benimsenmesini olumlu yönde etkileyebileceği düşünülmektedir. Bunun yanı sıra, telekomünikasyon şirketlerinin, 5G cihazlarını daha uygun fiyatlarla sunabilmek için üreticilerle iş birliği yaparak esnek finansman çözümleri geliştirmeleri de oldukça önemlidir ("Low penetration slows Philippines", 2025).

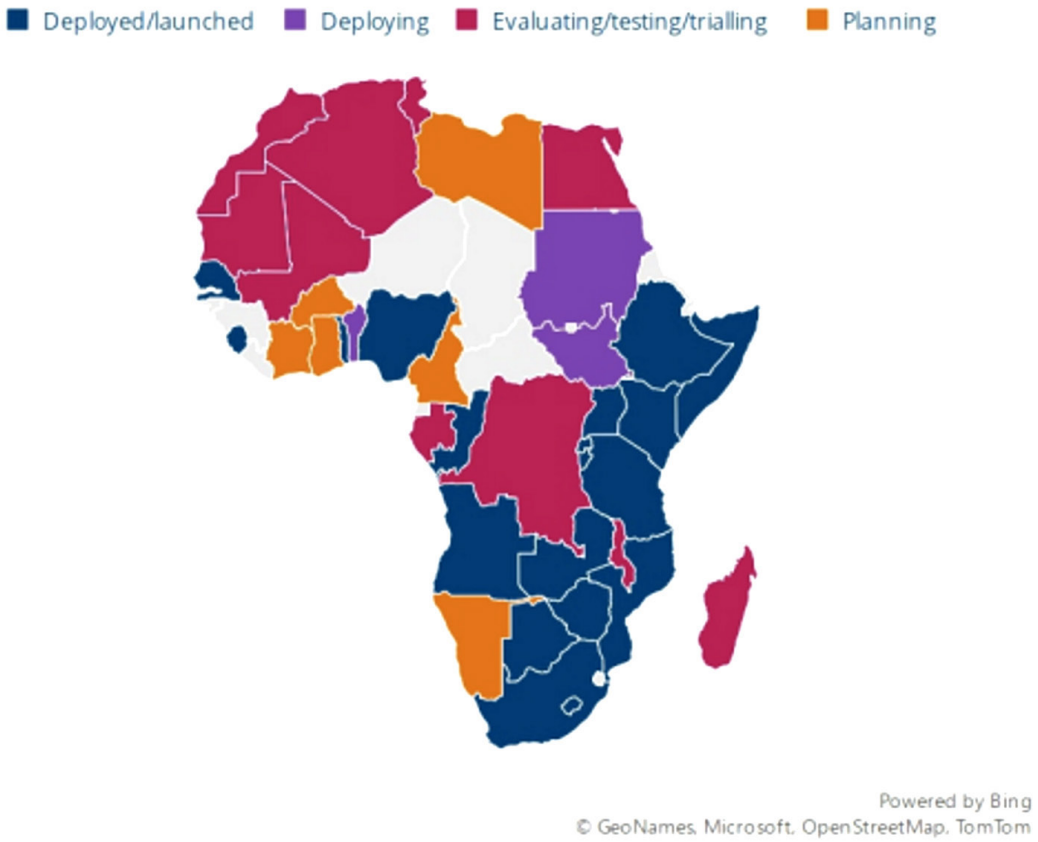
4.3. Afrika: Altyapı ve Erişim Engelleri

Afrika kıtasında 5G teknolojisine yönelik yatırımlar her geçen gün artış göstermektedir. Bugüne kadar 41 ülkede faaliyet gösteren 79 işletmeci, mobil veya sabit kablosuz erişim alanlarında 5G teknolojisine yatırım yapmıştır; bu da dünya genelindeki işletmecilerin

yaklaşık %12'sine tekabül etmektedir (Africa Telecommunications Union-ATU, 2025).

Ancak yapılan yatırımlara rağmen, 5G hizmetlerinin kıta genelinde yaygın biçimde hayata geçirildiğini söylemek mümkün değildir. Şekil 4-2'de, Afrika kıtasında 5G teknolojisinin mevcut durumunun görseli verilmiştir. Buna göre, Eylül 2024 itibarıyla sadece 21 Afrika ülkesinde, 35 işletmeci 5G'yi aktif olarak devreye alabilmiştir. Bu rakam, küresel ölçekte faaliyete geçen 5G'nin yalnızca %10'unu oluşturmaktadır. Bu durum, Afrika'da 5G'nin henüz geniş kapsamda benimsenmediğini ortaya koymaktadır (ATU, 2025).

Şekil 4.2: Afrika Kıtasında 5G Teknolojisinin Mevcut Durumu



*Teknoloji aktif hale getirilmiş, başlatılmış / Teknoloji aktif hale getiriliyor / Test ediliyor / Planlanıyor

Bölgede teknolojinin yaygınlaşma süreci çeşitli yapısal, ekonomik ve düzenleyici zorluklar nedeniyle yavaş ilerlemektedir. Afrika kıtasında düzenleyici merkezi bir denetim yapısının bulunmaması bu sebeplerden biridir. Bunun yerine her ülke kendi Ulusal Düzenleyici Otoritesi aracılığıyla haberleşme sektöründeki denetimlerini gerçekleştirmektedir. Bu durum bölgedeki düzenleyici politikaların, farklı sosyoekonomik koşullar ve siyasi yapılar doğrultusunda büyük ölçüde çeşitlilik göstermesine neden olmaktadır. Bazı ülkel-

er serbest piyasa ekonomisini teşvik eden esnek düzenlemeler benimserken, bazıları ise daha merkeziyetçi ve devlet kontrolünü ön planda tutan bir yaklaşımı tercih etmektedir (Ahmad, Dawodu, Osasona, Akagha, Anyanwu, Onwusinkwue, 2024).

Afrika'da spektrum kaynaklarının tahsisi ve yönetimi, hem bölgesel hem de ulusal düzeydeki faktörlerden etkilenmektedir. Bu durum, sınır ötesi hizmetlerin ve koordinasyonun zorluğunu artırarak, spektrum politikalarının uyumlaştırılmasını güçleştirmektedir. Ülkeler arası spektrum politikalarının uyumlu hâle getirilmesi karmaşık bir süreç olup, bölgesel entegrasyonu ve kesintisiz hizmeti etkileyebilecek bir durumdur. Evrilen teknolojilere ayak uydurabilmek için bazı bölgelerde düzenleyici kapasitenin güçlendirilmesi büyük önem taşımaktadır (Ahmad vd., 2024).

Altyapı eksiklikleri de bazı Afrika ülkelerinde 5G gibi ileri düzey teknolojilerin kurulmasını zorlaştırmakta ve genişleme için ciddi çabalar gerektirmektedir. Ancak mevcut altyapı eksikliklerinin giderilmesi, önemli yatırımlar ve stratejik planlamalar gerektirmektedir. Ayrıca, bazı bölgelerdeki siyasi istikrarsızlıklar ve emtia fiyatlarındaki dalgalanmalar, sürdürülebilir ekonomik büyüme için zorluklar oluşturabilmektedir. Küçük ve orta ölçekli işletmelerin finansmana erişim konusunda yaşadığı sınırlamalar da bu işletmelerin ekonomik potansiyelini tam olarak ortaya koymalarını engellemektedir (Ahmad vd., 2024).

Afrika ülkelerindeki ekonomik yapıların çeşitliliği, yatırım ortamının da ülkelere göre farklılık göstermesine neden olmaktadır. Bu durum, özellikle büyük ölçekli yatırımların güvence altına alınmasında çeşitli zorluklar doğurabilmektedir. Bu zorlukların üstesinden gelebilmek için esnek finansman modellerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Özellikle kamu-özel sektör ortaklıkları yoluyla ortaya çıkan fırsatların doğru şekilde değerlendirilmesi, kapsamlı ve iddialı 5G projelerinin finansmanı açısından kritik bir öneme sahiptir (Ahmad vd., 2024).

Dijital erişim ve bağlantıdaki eşitsizlikler, bazı toplulukların teknolojik gelişmelere tam olarak katılımını engelleyerek 5G'nin yayılımını yavaşlatan bir diğer unsurdur. Dijital kapsayıcılık, Afrika'da önemli bir sosyoekonomik meseleyi oluşturmaktadır. Dijital okuryazarlık eksikliklerinin giderilmesi ve internet erişiminin genişletilmesi de kıtada hâlâ öncelikli hedefler arasında yer almaktadır. Afrika'da gelir eşitsizliği, sosyal hareketlilik ve fırsatlara adil erişim konusunda kaygılar da mevcuttur. Servet birikimindeki farklılıkların azaltılması, daha kapsayıcı bir toplum inşa etmek için kritik bir adım olarak görülmektedir. Afrika, genç bir nüfusa sahip olmasıyla dikkat çekmektedir. Ancak bu durumun, demografik bir avantaj sağlamasına rağmen, yeterli istihdam olanakları sunulmadığı takdirde bir zorluk hâlini alacağı da belirtilmektedir (Ahmad vd., 2024).

Ayrıca, bu zorlukların daha iyi anlaşılabilmesi için Afrika ülkelerindeki katılımcılara bir anket çalışması yapılmıştır. İlgili anket çalışmasında katılımcılardan, 5G teknolojisi ve hizmetlerinin kurulumu sürecinde yaşanılan sorunları; politika ve düzenlemeler, spektrum, altyapı, hizmetler ve cihazlar gibi konu başlıkları özelinde belirtmeleri istenmiştir. Katılımcılardan gelen geri bildirimler sonucunda bu temel zorlukların bir bölümü sırasıyla aşağıda verilmiştir (ATU, 2025).

- 5G teknolojisinin kurulumu için gereken yüksek maliyet,
- Uygun fiyatlı cihazların bulunmaması nedeniyle 5G hizmetlerinin yaygın olarak benimsenememesi,
- Yapay zekâ, büyük veri ve IoT gibi yeni teknolojilerle entegrasyon sonucu ortaya çıkan kullanım senaryolarının uygulanmasındaki zorluklar,
- 5G kurulumu için yeni finansman modellerinin benimsenmesi gerekliliği,
- 5G için belirlenmiş spektrum bantlarında hâlen eski teknolojilerin kullanılması,
- Fiber altyapı kapasitesinin ve erişilebilirliğinin yetersizliği,
- Cihaz güvenliği açıkları,
- Endüstriler arası işbirliği için yeterli teşviklerin bulunmaması,
- Sınır ötesi veri alışverişine ilişkin standart ve kılavuzların eksikliği.

Bu durumlara istinaden, Afrika ülkelerinde 5G'ye geçiş hazırlıkları farklılık gösterdiği söylenebilmektedir. Ancak, düşük ve orta bant spektrumunun telekom işletmecilerine açılmasıyla birlikte ticari 5G ağlarının sayısının giderek artması beklenmektedir. Pazar talebinin artabilmesi için, işletmelerin ve diğer ekonomik sektörlerin 5G'nin sağlayabileceği operasyonel verimliliklere dair daha fazla farkındalık kazanması önemlidir. Bu durum, özellikle özel şirketlerin sektöre özgü kullanım senaryolarını destekleyebilmesi için bağımsız 5G ağlarının kurulmasına imkân tanıyacak uygun bir düzenleyici çerçeve gerektirmektedir (ATU, 2025).

5G'nin yaygınlaştırılmasındaki engeller yalnızca ICT alanıyla sınırlı değildir. Uygun fiyatlı cihazların geniş kitlelere sunulması, dijital yetkinliklere sahip iş gücünün yetiştirilmesi ve yüksek dağıtım maliyetlerini karşılayacak yeni finansman modellerinin geliştirilmesi gibi unsurlar, devletin farklı sektörlerle iş birliği yapmasını gerektirecektir. Ayrıca, erişilebilirliği artırmak ve maliyetleri düşürmek için cihazların yerel üretiminin desteklenmesi de kritik bir adım olacaktır (ATU, 2025).

5G kullanım alanlarının önemi, her ülkenin ulusal koşulları, pazar yapısı ve kalkınma ön-

celiklerine göre değişiklik göstermektedir. Özellikle temel hizmetlerde 5G'nin kullanımı, anlamlı sosyoekonomik katkı sağlayabilmesi için ulusal dijital dönüşüm stratejileriyle uyumlu ve politika odaklı bir yaklaşımla ele alınmalıdır (ATU, 2025).

5G ağlarının ve kullanım senaryolarının başarılı biçimde hayata geçirilmesi, Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerine ulaşılmasına yönelik önemli katkılar sunmaktadır. Bu çerçevede, ICT sektörü, kapsayıcı kalkınmayı teşvik etmeyi amaçlayan ulusal hükümetler için kilit bir role sahiptir. Etkili politika, düzenleme ve piyasa stratejileriyle desteklenen 5G'nin geniş çapta benimsenmesi, Afrika kıtasında ekonomik büyümenin hızlanmasına ve dijital dönüşümün güçlenmesine büyük ölçüde katkı sunacaktır (ATU, 2025).

Ayrıca; sadece Afrika ve Avrupa ülkeleri ile Filipinler özelinde değil, dünyadaki tüm ülkeler için karşılaşılan zorluklar, her birinin tarihsel, coğrafi, ekonomik ve kültürel bağlamlarına göre farklılıklar gösterse de, bu zorlukların varlığı her bir ülkenin gerçeğidir. Bununla birlikte, söz konusu zorlukların yanı sıra önemli fırsatlar da bulunmaktadır. Bu zorlukları doğrudan ele alarak, engelleri fırsatlara dönüştürmek ve daha bağlantılı, dayanıklı ve sürdürülebilir bir dünya kurmak mümkündür. Stratejik, iş birliğine dayalı bir yaklaşım benimsemek, inovasyon ve sürdürülebilirlik konusunda kararlı bir tutum sergilemek, dönüştürücü ilerlemeler için kapıları aralayabilir. Hükümetler, özel sektör ve toplumlar, birlikte çalışarak insanları birbirine bağlayan, ekonomik kalkınmayı destekleyen ve gelecek nesillere pozitif bir miras bırakan altyapılar inşa etme potansiyeline sahiptir (Ahmad vd., 2024).

5. 5G ADAPTASYONUNU ENGELLEYEN GENEL FAKTÖRLER

5.1. Ekonomik Engeller ve Yatırım Gereksinimi

5G sistemi, mimari tasarımsal özellikleri nedeniyle önceki mobil haberleşme nesillerine kıyasla farklı bir yapıya sahiptir. 5G için gerekli tasarımlar ve testler oldukça karmaşıktır. Bu yüzden bu sistemin adaptasyonunun önünde çeşitli ekonomik engeller ve masraflı yatırım gereksinimleri bulunmaktadır. Ağın gelecekteki uygulamaları için ölçüm ve test zorluklarının yanı sıra radyo kaynaklarının yönetimi önem arz etmektedir. Ağ performansının özellikleri ve esneklikleri yönlü ve trafik modellerinde yapılan stres testleri ile anlaşılmalı ve test işlemleri sırasında kritik konular olan bant bozulması ve maliyet etkinliği göz önünde bulundurulmalıdır (Yaralı, 2017).

3G'den 4G'ye geçiş, pazarda görece sınırlı donanım yükseltmeleriyle gerçekleştirilmiş; buna karşılık 5G'ye geçiş daha yoğun altyapı ve yeni spektrum kullanımını gerektirdiği için daha maliyetli bir dönüşüm yaratmıştır. Buna karşılık, 5G'nin gerektirdiği yatırım miktarları 4G'den farklı olarak günümüzde oldukça belirsizdir.

5G teknolojisi, yeni frekans spektrumlarının kullanımını gerektirmektedir. Bu spektrumların tahsisi kapsamında mobil işletmecilerin, devlet tarafından düzenlenen ihale süreci aracılığıyla lisans ücreti ödemeleri gerekmektedir. Ayrıca, 5G'ye geçiş sürecinde baz istasyonlarında yeni antenlerin kullanılması ve mevcut ekipmanların yenilenmesi ihtiyacı ortaya çıkmakta; bu durum altyapı yatırımlarının maliyetini önemli ölçüde artırmaktadır. Bunun yanı sıra 5G teknolojisinde yüksek frekansların kullanılması sebebiyle kısa mesafe iletilmesinden ötürü çok sayıda küçük baz istasyonu kurulması gerekliliği oluşacaktır. 4G teknolojisinde birkaç kilometrede bir gerekli olan baz istasyonları 5G'ye geçildiğinde birkaç yüz metrede bir konumlandırılmalıdır. Bu durum ek maliyetler doğurmaktadır. Ayrıca, 5G destekli telefonlar 4G'ye kıyasla daha karmaşık teknolojilere ihtiyaç duymaktadır. Dolayısıyla, 5G teknolojisinin yaygınlaştırılması sürecinde ortaya çıkan maliyetlerin bir kısmının mobil işletmeciler tarafından üstlenilmesi gerekecektir.

Telekomünikasyon sektöründe, diğer sektörlerde olduğu gibi kullanıcı başına ortalama gelirin azalması da öngörülebilir bir durumdur. Sektörün görece doygunluğa ulaşması nedeniyle yeni müşteri kazanımından ziyade mevcut müşterilerin işletmeci değiştirdiği

görülmektedir. Bu durum, işletmeciler arasında fiyat rekabetine neden olacak ve zaten azalmış olan kullanıcı başına ortalama geliri daha da azaltacaktır. Kullanıcıların ödemeli tarifelerden faturalıya geçmesi, mobil cihazlar dışında (telefon, tablet gibi) farklı cihazların internet bağlantısı kullanmasına rağmen mobil cihazlara kıyasla daha az kar getirmesi, işletmecilerin kampanyalı katma değerli abonelik hizmetleri sunmasına rağmen işletmecilerin gelirlerinde belirgin bir artış olmamaktadır. Bu hizmetlerde vazgeçme bedeli gibi ücretler de olmadığından dolayı abone kayıpları da artış göstermektedir. Son olarak Wi-Fi hizmetlerinin artması ile de kullanıcılar eskisi kadar hücresel veriye bağlı kalmamaktadır. Tüm bu faktörler bir araya geldiğinde, işletmeciler azalan karlar nedeniyle büyük ölçekli altyapı yatırımlarını ertelemekte ve teknolojik ilerlemeleri ya yavaşlatmakta ya da tamamen vazgeçmek durumunda kalmaktadır (Webb, 2018).

Tüm bunlara ek olarak, COVID-19 pandemisi döneminde yaşanan ekonomik durgunluklar ve küresel krizler de teknolojiyle ilgili kamusal ya da özel yatırımların nispeten de olsa yavaşlamasına sebep olduğu için 5G'ye geçişi de doğal olarak yavaşlatmıştır.

Ulusal Demokrasi Enstitüsü'nün (NDI – National Democratic Institute) 2021 yılında yayımladığı bir rapora göre internet penetrasyonu düşük olan ülkelerin bile 5G tartışmalarına katıldığı belirtilmiştir. Birleşmiş Milletler (BM) içindeki 5G savunucuları, bunu gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler, erkekler ve kadınlar, kırsal ve kentsel alanlar arasındaki dijital uçurumu kapatmanın bir aracı olarak görmekte, 5G'nin, süreçte sosyal ve ekonomik büyümeyi hızlandırması beklenmektedir. Bununla birlikte hükümetlerin ve şirketlerin kapsamlı yatırımları olmadan 5G'nin bu uçurumu daha da genişletebileceği yönünde endişeler olduğu da belirtilmiştir. Ülkeler 5G'nin ekonomik faydaları, riskleri ve kabul edilebilir ödünleri konusunda farklı kararlar alsa da demokrasiyi, bireysel güvenliği ve insan haklarını destekleyen teknolojik altyapıları, standartları ve ortaklıkları önceliklendirmek kritik önem arz etmektedir. Ayrıca 5G'nin öngörülen zorlukları içerisinde güvenli olmayan 5G ağlarının kolayca tehlikeye girebilmesi ve ağa olan bağımlılığın artması nedeniyle zararlı ekonomik dışsallıkların oluşabilmesi ihtimalinin uzun vadeli ekonomik maliyetlere yol açabileceği, istikrarı ve kalkınmayı etkileyebileceği düşünülmektedir (Ahmed vd., 2021).

Ekonominin etkisine müşteri odaklı bir açıdan bakıldığında ise; 5G teknolojisinin piyasaya sürülmesi, ilgili bant genişliği edinimi ve donanım kurulumlarının maliyetinin büyük yatırımlar gerektirmesi, işletmecilerin bu maliyetleri telafi etmek üzere 5G bağlantısı için müşterilerinden büyük meblağlar ödemelerini istemesi nedeniyle müşteriler 5G'nin benimsenmesine daha dirençli hale gelebilir. Katar'da yapılan bir araştırmaya göre müşterilerin 5G hizmetlerini benimsemeyi çoğunlukla 4G'ye kıyasla 5G hizmetleri için ödemesi gereken ek aylık ödeme tutarı nedeniyle erteledikleri sonucuna varılmıştır. Bunun nedeni,

Katar'daki 5G veri paketi fiyatlarının, 4G paketlerinin karşılık gelen fiyatlarından önemli ölçüde daha pahalı olmasıdır. Diğer bir deyişle, tipik bir 5G aboneliği, aynı miktarda veri için 4G aboneliğinin üç katı kadar pahalı olabilmektedir. Veri paketleri için yüksek fiyat ödemek istemeyen müşteriler, 5G'yi kullanmaya daha isteksizdir. Araştırmada yapılan anketlerin sonucuna göre veri hızı ile 5G'yi benimseme istekliliği arasında "orta derecede" pozitif bir korelasyon olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, müşterinin internet uygulamaları için ihtiyaç duyduğu veri hızı ne kadar yüksekse, 5G'ye geçme istekliliği de o kadar artmaktadır. Buna rağmen ankete katılanların %61,3'ü veri planının fiyatının kararlarında en etkili faktör olduğunu belirtmiştir. Fiyatın, 5G kullanımıyla en yüksek korelasyon gösteren faktör olduğu, bunu veri hızının ve gecikme süresinin izlediği sonucuna varılmıştır (Zeedan vd., 2023).

5G teknolojisinin tam potansiyelinden yararlanmak için inovasyonu teşvik etmek ve kamu-özel sektör ortaklıklarını desteklemek büyük önem arz etmektedir. Hükümetler ve sektör liderleri, 5G ile ilgili uygulamalarda Ar-Ge'yi destekleyen bir ortam oluşturmak için işbirliği yapmalıdır. İnovasyon merkezleri, hibeler ve araştırma fonları gibi girişimlerin, toplumsal sorunları çözmek ve iletişim altyapısını iyileştirmek için 5G'yi kullanan yeni çözümlerin geliştirilmesini kolaylaştıracağı öngörülmektedir (Nkrumah, 2023).

5.2. Altyapı Yetersizlikleri ve Spektrum Verimliliği

Mobil işletmecilerin 5G için daha fazla spektrum elde etmeye çalıştığı günümüzde, mevcut spektrumun daha verimli kullanılmasını sağlayan her teknoloji dikkatle incelenmeye değerdir. Bu bağlamda, uzun süredir bilinen ancak son yıllarda yeniden ilgi görmeye başlayan tam çift yönlü (full-duplex) iletişim teknolojisi öne çıkmaktadır. Bazı askeri birimlerin halihazırda büyük boyutlu ekipmanlarla kullandığı bu teknoloji, spektrumun daha etkin kullanılmasını sağlar. Ancak kişisel cihazlarda uygulanabilmesi için, antenin aynı anda veri gönderebilmesini ve alabilmesini sağlayacak özel devrelerin tasarlanması gerekir. Bu durum, radyo dalgalarının karşılıklılık ilkesine dayanan doğası nedeniyle teknik olarak oldukça zordur. Yine de son dönemde yapılan çalışmalar sayesinde, yüksek hızlı anahtar gibi davranabilen silikon transistörlerle bu sorun kısmen aşılmış ve aynı frekansta eş zamanlı veri gönderimi ve alımı mümkün hale gelmiştir. Ancak tam çift yönlü iletişim, özellikle yansımalardan kaynaklanan sinyal girişimi nedeniyle bazı dezavantajlara sahiptir. Çünkü iletilen sinyal, antene dışarıdan gelen sinyallere göre çok daha yakındır ve daha güçlüdür. Bu nedenle, antenin aynı anda veri göndermesi ve alabilmesi ancak özel yansıma önleyici teknolojilerle mümkün olabilmektedir.

Hücresel iletişim sistemleri birinci nesilden günümüzün 4G sistemlerine evrilirken, kullanılan taşıyıcı frekans bantları da kademeli olarak artmıştır. Düşük frekanslı sinyaller, kilometrelerce yol alabilmekte ve binaların içine kolayca nüfuz edebilmektedir. Buna karşılık, 5G teknolojisinin getirdiği milimetre dalga (mmWave) kullanımı, frekans bandını 24 GHz ile 40 GHz arasına çıkararak önemli bir değişim yaratmıştır. Ancak bu yüksek frekanslar sinyal yayılımında ciddi zayıflamalara neden olmakta; sinyaller yalnızca birkaç kilometre, hatta bazı durumlarda daha kısa mesafelere ulaşabilmektedir. Üstelik bu sinyaller, havadaki oksijen molekülleri veya yağmur damlalarıyla karşılaştığında ya da beton gibi fiziksel engellerden geçmeye çalıştığında yüksek oranda iletim kaybına uğramaktadır. Bu nedenle, mmWave teknolojisini desteklemek amacıyla küçük hücre (small cell) mimarisi geliştirilmiştir.

Ancak 5G'nin taleplerini karşılamak için yalnızca baz istasyonu sayısını artırmak yeterli olmayacaktır; altyapıda daha köklü bir teknolojik dönüşüm gereklidir. mmWave boylarına uyumlu olarak geliştirilen küçük hücre antenleri, geleneksel antenlere kıyasla çok daha küçüktür ve düşük enerji tüketimiyle çalışır. Bu hücreler, şehir merkezlerinde birkaç yüz metre aralıklarla yerleştirilecek ve aydınlatma direkleri ya da bina çatıları gibi mevcut yapılar üzerine kurulabilecektir. Baz istasyonu sayısının artmasıyla birlikte, mevcut kanal setleri farklı hücreler arasında yeniden kullanılabilecek ve böylece sistem kapasitesi artırılabilecektir. Sonuç olarak, 5G sistemleri, mevcut baz istasyonlarına kıyasla çok daha fazla sayıda anten kullanımını zorunlu kılacaktır (Turer ve Yilmaz, 2022).

4.5GHz bandında da meydana gelen yol kaybı değerleri çıkarılan ve bu değerlere göre de 5G baz istasyonların konumlandırılmalarına yönelik önermeler yapılan bir araştırmada 5G baz istasyonlarının yerleştirilmesi sürecinde, kullanılan frekans bantlarının yol kaybı üzerindeki etkisi dikkate alınarak mesafeler yeniden değerlendirilmiştir. İlk aşamada kullanılacak olan 5G frekanslarının çoğunluğu 6 GHz altı, özellikle de 3.5 GHz civarındaki bantlarda yer aldığından, bu frekansların yol kaybı değerleri 4G sistemlerinde kullanılan frekanslara göre daha yüksektir. Bu da mevcut 4G baz istasyonu noktalarına yerleştirilecek 5G istasyonlarının yeterli kapsama sağlayamayacağı anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, kullanıcı yoğunluğunu karşılayabilmek adına yeni ve daha sık konumlandırılmış 5G baz istasyonlarının kurulması zorunlu hale gelmektedir. Aynı durum, gelecekte 6 GHz üzerindeki spektrumlarda kullanılacak olan 28 GHz gibi daha yüksek frekans bantları için de geçerlidir. Bu yüksek frekanslar, sinyallerin yayılma mesafesini önemli ölçüde kısıtlar ve yol kayıplarını artırır. Bu nedenle, bu bantlarda hizmet sunulabilmesi için çok daha yoğun bir baz istasyonu altyapısı gereklidir. Yapılan analizler hem düşük hem de yüksek frekanslı 5G uygulamaları için mevcut 4G altyapısının yetersiz kaldığını ve kapsamlı

bir yeniden konumlandırma stratejisi gerektiğini ortaya koymaktadır (Özaslan ve Karan, 2021).

NDI raporuna göre Ericsson, 5G'nin 2030 yılına kadar 5,8 milyar mobil aboneliğe ve 125 milyar IoT cihazına ulaşacağını öngörmektedir. Bu dönemde 5G'nin tüm elektrik tüketiminin beşte birinden sorumlu olabileceği ve küresel olarak sera gazı emisyonlarının %14'ünü oluşturabileceği tahmin edilmektedir. Dolayısıyla enerji verimli sistemler geliştirilmediği takdirde 5G'nin sürdürülebilir bir teknoloji olamayacağı öne sürülmektedir (Ahmed vd., 2021).

5.3. Kapsama Alanı Boşlukları ve Kırsal Bölgelere Etkisi

Kırsal ve uzak bölgelere internet sağlamak aşılması zor bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu bölgelerde bağlantının daha zor olmasının sebepleri; yol ve elektrik altyapısındaki eksiklikler, zorlu iklim koşulları, engebeli coğrafya ve zaten az olan nüfusun dengesiz dağılımıdır. Altyapı eksikliği ve erişim güçlükleri, İspanya ve Almanya gibi Avrupa ülkelerindeki bazı köylerin hala dijital olarak izole kalmasına neden olan faktörler arasında gösterilebilir. İspanya'da nüfusun %99,5'i 4G mobil genişbanta erişim imkanına sahipken, halkın %81'i 100 Mbps'nin üzerinde hızlarda internete bağlanabilmektedir. Ancak bölgelerin yasal, ekonomik ve kültürel açılardan homojen olmaması, daha az nüfuslu kırsal alanlarda internet erişiminin daha büyük zorluklarla karşılaşmasına neden olmaktadır. Latin Amerika'da ise kentsel ve kırsal alanlar arasındaki konut internet erişimi uçurumu daha belirgindir. En büyük farklar Honduras ve Bolivya gibi yoksul ülkelerde görülmekte olup, şehirlerdeki bağlantı kırsal kesime göre beş kat daha fazladır. Brezilya gibi daha gelişmiş ekonomilere sahip ülkelerde bu fark azalmakta, kentsel bağlantı kırsal bağlantıdan üç kat daha yüksek olmaktadır (Armuelles Voinov vd., 2022).

Kırsal bölgeler tarım ve hayvancılıkla ilgili gözlemler, hava durumu ölçümleri ya da hassas tarım gibi aktivitelere ev sahipliği yaptığından, son derece stabil ve güvenilir bir iletişim altyapısına ihtiyaç duyar. Ancak 5G teknolojisinin altyapısı büyük ölçüde şehirlerde kurulmuş olup, kırsal bölgelerde ya hiç bulunmamakta ya da oldukça sınırlı düzeyde kalmaktadır. Bu durum, yüksek hız, düşük gecikme gibi avantajlar sunan 5G altyapısının kırsal alanlara erişememesine yol açarak dijital uçurumu daha da derinleştirmektedir. Kırsal bölgelerde nüfus yoğunluğunun düşük olması, altyapı kurulum maliyetlerinin kar-maliyet dengesi açısından cazip olamamasına neden olmaktadır. Ayrıca 5G teknolojisinin, 4G'ye kıyasla daha sık yoğunluklu baz istasyonlarına ihtiyaç duyması, yatırım

çabalarının bu bölgelerde oldukça sınırlı kalmasına yol açmaktadır.

Kırsal bölgelere sunulan bağlantı hizmetlerini artırmak amacıyla yeni teknolojiler geliştirilmektedir. Bunlardan biri, NTN (Karasal Olmayan Ağlar, Non-terrestrial Networks) teknolojisine dayanan çözümlerdir. NTN uydu teknolojilerini kullanarak çeşitli sebeplerle hücresel şebekelerin kurulamadığı bölgelerde bağlantı hizmetleri sağlayabilmektedir. Uydu bağlantısının yanı sıra çoklu bağlantılar (Multi-Connectivity) sayesinde aynı anda birden fazla işletmeciden alınarak ağ kapsaması ve bağlantı kalitesi artırılabilmektedir. Ayrıca kara tabanı ve uydu tabanlı sistemlerin birlikte kullanılmasıyla güvenilirliğin de artırıldığı sistemler ortaklaşa olarak çalıştırılabilmektedir (Ramírez-Arroyo vd., 2024).

Son istatistiklere göre, 2021 itibariyle dünya nüfusunun yaklaşık %50'si 4G ağlarına erişime sahipken, yalnızca sınırlı sayıda bölge 5G'ye geçiş sürecine başlamıştır (GSMA, 2021 Nkrumah, 2023). ABD, Avrupa ve Asya Pasifik bölgeleri 4G'den 5G'ye geçerken Küresel Güney'in büyük bir kısmı hala ağırlıklı olarak 2G ve 3G ağlarını kullanmaktadır: Sahra Altı Afrika'da bu oranın neredeyse %90, Orta Doğu ve Kuzey Afrika'da %70, Latin Amerika ve Güneydoğu Asya'da ise %52 olduğu belirtilmektedir. Gelişmiş ülkelerde 5G teknolojisi yaygınlaşmaya başlamış olsa da, kırsal ve kentsel bölgeler arasındaki bağlantı farkı belirgin biçimde devam etmektedir. 5G, dijital gelişimi hızlandırma potansiyeli taşırken, dünyanın önemli bir kısmı henüz 4G teknolojisini dahi deneyimleme fırsatına sahip olamamıştır (Ahmed vd., 2021).

Amerika Birleşik Devletleri, geniş yüzölçümü ve büyük arazileri nedeniyle düşük nüfus yoğunluğu, dağlık arazilerin neden olduğu yüksek altyapı maliyetleri ve bazı bölgelerin düşük gelir seviyeleri gibi sorunlarla karşı karşıyadır. Bu sorunları aşmak amacıyla 5G Fonu (5G Fund for Rural America) oluşturulmuştur. Fon kapsamında düzenlenen tersine açık yöntemiyle (satıcıların mal ve hizmetlerini bir alıcıya en düşük fiyatla sunmak için yarıştığı bir açık artırma türü), kapsama alanı dışında kalan kırsal bölgelerde altyapı yatırımları sübvanse edilmektedir. Fonun kurulma kararı 2020'de alınmış ancak FCC (Federal Communications Commission) hizmetin daha iyi verilebilmesi adına Broadband Data Collection (BDC) (Genişbant Veri Derlemesi) talep etmiş ve 5G hizmetinin olmadığı alanların kesin tespitini talep etmiştir. 2023'e gelindiğinde ise FCC ikinci bir rapor -Second Report and Order- yayınlamış ve bu süreç içerisinde uygulanması gereken zorunlu adımları duyurmuştur (Azic vd., 2024). 2024 yılında fonun dağıtılması kararı çıksa da günümüzde fon hala dağıtılmamış ve Coalition of Rural Wireless Carriers ve Rural Wireless Association gibi dernekler süreci yargıya taşıyarak fonun dağıtılması ile ilgili adımların tekrar değerlendirilmesini talep etmişlerdir (Kung ve Glenn, 2025).

Hükümet teşvikleri olmaksızın kırsal bölgelerde 5G'nin geliştirilmesi yüksek maliyetli olmaya devam edecektir. BM'nin öngörülerine göre, 2050 yılı itibarıyla dünya nüfusunun %68'i kentlerde yaşayacaktır. Bu demografik dönüşüm, akıllı şehirlerin gelişiminin kırsal topluluklara kıyasla öncelikli hale gelmesine neden olabilir (Ahmed vd., 2021).

Nkrumah, 5G teknolojisinin dönüştürücü potansiyeli göz önüne alındığında, bu teknolojinin faydalarından eşit bir şekilde yararlanılmasının zorunlu olduğunu belirtmektedir. Bu bağlamda politika yapıcılar ile telekomünikasyon şirketleri, 5G şebeke kapsamını yalnızca şehir merkezleriyle sınırlı tutmayarak, hizmetlerden yeterince yararlanamayan kırsal bölgeler ve dezavantajlı topluluklara erişimi sağlamak amacıyla işbirliği yapmalıdır. Bunu başarmak için, dijital uçurumu kapatmak ve farklı coğrafi bölgelerdeki iletişim altyapısını geliştirmek amacıyla hedefli yatırım stratejileri ve düzenleyici teşvikler geliştirilmelidir (Nkrumah, 2023).

5.4. Sağlık Endişeleri ve Kamu Algısı

5G teknolojisinin yaygınlaşması için mevcut altyapının geliştirilmesi ve antenler, baz istasyonları gibi yeni radyo frekansı cihazlarının kurulması gerekmektedir. Bu teknolojinin kullanılabilmesi amacıyla daha düşük ve daha yüksek bant aralıklarında frekans bantları tahsis edilmiştir. Ancak bu gelişmelerin ardından sosyal medya ve internetin genelinde 5G'nin sağlık üzerindeki olası etkilerine ilişkin çeşitli spekülasyonlar ortaya atılmış, bu durum ise toplumda belirgin bir endişe yaratmıştır. Bilgi çağı olarak tanımlanan günümüzde hızlı, güvenilir ve mobil iletişim elzem hale gelmiş; bunun sağlanabilmesi için radyofrekans gibi farklı veri iletim yöntemlerinin kullanılması ve cihaz sayısının artışı kaçınılmaz bir sonuç olarak ortaya çıkmaktadır (Wersenyi ve Takacs, 2024).

5G teknolojisi 4G'ye kıyasla çok daha yüksek mobil genişbant hızları ve kapsamlı bir veri aktarım kapasitesi sunabilmek için çeşitli yeniliklere ihtiyaç duymaktadır. Bu yenilikler arasında aynı anda birden fazla alıcı ve verici antenin kullanıldığı MIMO (Multiple-Input, Multiple-Output), sinyalleri yönlü olarak iletilmesini sağlayan Beamforming ve mevcut frekanslara ek olarak daha yüksek frekanslarda çalışan yeni frekans bantlarının kullanımı yer almaktadır. AB düzeyinde 5G için belirlenen öncü bantlar olarak belirlenen 700 MHz ve 3.6 GHz (3.4–3.8 GHz) daha önceki teknolojilerde de kullanılan bant aralıklarıdır ve bu bantlara ilişkin çalışmalar bulunmaktadır. Ancak 5G için gereken 26 GHz (24.25–27.5 GHz) bandı üzerine yapılan araştırmalar yetersizdir ve bu alanda daha fazla çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır (European Parliamentary Research Service, 2021).

6. TÜRKİYE'NİN 5G FREKANS İHALESİ VE STRATEJİK ETKİLERİ

6.1. 5G Teknolojisi Bağlamında Türkiye'nin Stratejik Yol Haritası

Türkiye'nin yeni nesil mobil haberleşme altyapısına geçiş süreci, 16 Ekim 2025 tarihinde BTK tarafından gerçekleştirilen 5G yetkilendirme ihalesiyle kritik bir aşamaya ulaşmıştır. Bu ihale, 2015 yılındaki 4.5G yetkilendirmesinden bu yana ülkenin telekomünikasyon sektöründe atılan en önemli regülatif ve stratejik adımını temsil etmektedir. İşletmeciler ticari 5G hizmetlerini ihale takvimine göre hedeflenen 1 Nisan 2026 tarihinden itibaren sunmaya başlamışlardır. (Bloomberg HT, 2025a).

İhale, 5G'yi yalnızca daha yüksek mobil internet hızı sunan bir tüketici teknolojisi olarak değil; aynı zamanda sanayi, ulaştırma, akıllı şehirler ve kritik kamu hizmetleri için dijital dönüşüm altyapısı olarak konumlandırmaktadır. Temel stratejik hedefler arasında; akıllı şehirler, Endüstri 4.0, akıllı fabrikalar, yapay zekâ uygulamaları, otonom sürüş ve uzaktan ameliyat gibi ultra düşük gecikme süresi gerektiren kritik dikey sektörlerin etkinleştirilmesi yer almaktadır (Herkese Bilim Teknoloji, Ekonomist ve Dünya, 2025).

Bu raporun dördüncü bölümünde analiz edildiği gibi, Avrupa'nın parçalı pazar yapısı (34 işletmeci) ve yüksek spektrum ihale bedelleri (örn: İtalya ve Almanya), kıta genelinde 5G adaptasyonunu yavaşlatan başlıca faktörler olmuştur. Türkiye'nin, raporun ikinci bölümünde incelenen Çin ve Güney Kore gibi küresel liderlere kıyasla biraz daha geç bir tarihte 2025 sonu itibarıyla bu adımı atmıştır. Bu durum, Avrupa'daki genel adaptasyon takvimiyle ve 5G teknolojik standartların olgunlaşmasını beklemeye yönelik stratejik tercihlerle de paralellik göstermektedir.

Bu ihalenin en önemli çıktısı, spektrum tahsis sürecinin tamamlanmış olduğunu ve Türkiye için 5G yatırım döneminin resmen başladığını göstermesidir. Daha da önemlisi, bu ihale yalnızca bir frekans tahsisi süreci olarak kalmamış, aynı zamanda güçlü bir ulusal sanayi politikası aracı olarak tasarlanmıştır. İhale şartnamesine eklenen %60'a varan yerli ürün ve bulunabilirlik durumuna göre yüzde 30'a varan oranda milli haberleşme ürünlerinin kullanma zorunluluğu, 4.5G'deki %45'lik hedefin daha iddialı bir devamı niteliğindedir (UAB ve Herkese Bilim ve Teknoloji, 2025). Bu durum, BTK ve UAB'nin ihaleyi, stratejik ve jeopolitik boyutun yanı sıra dijital özerklik hedeflerine ulaşmak ve "Uçtan Uca

Yerli ve Milli 5G Haberleşme Şebekesi Projesi"ni desteklemek için kullandığını açık bir şekilde ortaya koymaktadır (UAB, 2021).

6.2. İhale Sonuçları ve Teknik Analiz: Spektrum Dağılımı ve Rekabetçi Konumlandırma

İhalede, üç mevcut mobil şebeke işletmecisinin (Turkcell, TT Mobil ve Vodafone) katılımıyla toplam 400 MHz'lik spektrum 11 paket halinde tahsis edilmiştir. Bu tahsis işlemi, 5G hizmetlerinde kapsama ve kapasite dengesini sağlamak açısından kritik öneme sahip iki frekans bandında yoğunlaşmaktadır:

- **700 MHz (Düşük Bant)**: "**Kapsama bandı**" olarak bilinen bu bant, düşük bantta olması sayesinde sinyallerin coğrafi olarak daha uzağa yayılmasını, kırsal alanlara erişimi ve sinyallerin binaların içine daha iyi nüfuz etmesini sağlar. Bu bantta üç işletmecinin de (A1, A2, A3 paketleri) 2x10 MHz (toplam 20 MHz) pay alarak ulusal kapsama için temel bir yetkinlik kazanması sağlanmıştır.
- **3.5 GHz (Mid-Band)**: "**Kapasite ve Hız bandı**" olarak bilinen bu bant, küresel 5G dağıtımlarının bel kemiğini oluşturmaktadır. Yüksek veri hızlarını, düşük gecikmeyi ve yüksek kapasiteyi kitlesel olarak sunmak için ideal dengeyi sağlar. İhaledeki asıl rekabet ve asimetrik dağılım bu bantta gerçekleşmiştir.

İhale sonucunda işletmecilerin elde ettiği spektrum miktarları, gelecekteki pazar konumlandırmalarını ve hizmet kalitesini doğrudan etkileyecek asimetrik bir yapı ortaya koymaktadır:

- **Turkcell:** Toplamda 160 MHz ile ihaleden en fazla spektrumu elde eden işletmeci, bu sonucu 700 MHz bandındaki 20 MHz'lik kapsama bandına ek olarak kritik öneme sahip 3.5 GHz bandında (B1, B4, B5, B6 paketleri) 140 MHz'lik en geniş kapasite bloğunu alması sayesinde gerçekleştirmiştir.
- **TT Mobil:** 700 MHz bandındaki 20 MHz'lik (A3) payına ek olarak, 3.5 GHz bandında (B2, B7, B8 paketleri) toplam 120 MHz'lik kapasite bandını elde etmiştir.
- **Vodafone:** 700 MHz bandındaki 20 MHz'lik (A2) payına ek olarak, 3.5 GHz bandında (B3 paketi) 80 MHz'lik spektrum almıştır.

İhalede dikkat çeken en önemli stratejik karar, ultra-düşük gecikme ve çoklu gigabit hızlar sunan 26 GHz ve üzeri mmWave frekanslarının bu ihale paketine dahil edilmemesidir. Bu karar, Türkiye'nin 5G stratejisinin iki fazlı bir yaklaşımla kurgulandığını göstermektedir. mmWave teknolojisi, çok kısa menzili ve yüksek kurulum ve yayılım maliyeti nedeniyle,

öncelikle çok yoğun kentsel alanlar (hotspots) ve spesifik endüstriyel kampüsler (özel şebekeler) için uygundur. Bu bandın tahsisinin ertelenmesi, Türkiye'nin 5G stratejisinin ilk etapta önceliği;

- Geniş kitlelere ve kırsal alanlara (700 MHz bandı aracılığıyla) erişimi sağlamaya,
- Ana kentsel kapasiteyi (3.5 GHz bandı aracılığıyla) oluşturmaya

verdiğini göstermektedir. Bu yaklaşım, raporumuzun beşinci bölümünde analiz edilen "dijital uçurum" sorununa öncelik verme niyetini yansıtmaktadır.

Tablo 6-1, 16 Ekim 2025 tarihli BTK 5G ihalesinin spektrum tahsis sonuçlarını ve işletmecilerin maliyetlerini özetlemektedir.

Tablo 6.1: 5G İhalesi Spektrum Tahsis Sonuçları ve İşletmeci Konumlandırması

İşletmeci	700 MHz Bandı (Paket / Genişlik)	3.5 GHz Bandı (Paketler / Genişlik)	Toplam Alınan Spektrum (MHz)	Toplam Maliyet (KDV Hariç - Milyar $)	Spektrum Başına Maliyet (Milyon $/ MHz)
Turkcell	A1 / 20 MHz	B1, B4, B5, B6 / 140 MHz	160 MHz	1,224 $	~7,65 $
TT Mobil	A3 / 20 MHz	B2, B7, B8 / 120 MHz	140 MHz	1,094 $	~7,81 $
Vodafone	A2 / 20 MHz	B3 / 80 MHz	100 MHz	0,627 $	~6,27 $

6.3. Finansal Analiz: Yatırım Maliyeti ve Ekonomik Sürdürülebilirlik

İhale, yaklaşık 2,1 milyar Dolarlık[5] asgari bedelin oldukça üzerinde bir rekabete sahne olmuştur. İşletmecilerin sunduğu toplam teklif tutarı KDV hariç yaklaşık 3 milyar Dolara [6], KDV dahil edildiğinde ise yaklaşık 3,5 milyar Dolarlık [7] toplam ekonomik büyüklüğe ulaşmıştır. Bu tutar, Hazine için önemli bir gelir kalemi oluştururken, işletmeciler açısından ise 2015'te gerçekleştirilen 4.5G ihalesinden bu yana ortaya çıkan en büyük tek seferlik sermaye harcaması niteliğini taşımaktadır. İhale bedelinin 3 eşit taksitte ödenmesi işletmecilere kısmi bir finansal esneklik sağlasa da gecikme durumunda yıllık yüzde 7,93'ün iki katı oranında gecikme faizi gibi ciddi yaptırımlar öngörülmüştür (Bloomberg HT, 2025b). Diğer yandan mevcut yetkilendirmelerin 31 Aralık 2042'ye kadar uzatılması karşılığında her yıl brüt satışlarının %5'i oranında ek ödeme yapma yükümlülüğünü sürdürmektedir (TRT Haber, 2025).

Yatırımın geri dönüşünü etkileyecek bir diğer kritik faktör ise cihaz ekosistemidir. İşletmcilerin bu devasa yatırımı yapmasının temel amacı 5G hizmetlerinden gelir elde etmektir. Ancak bu gelirin elde edilebilmesi için son kullanıcıların 5G uyumlu cihazlara sahip olması gerekmektedir. Analizler, Türkiye pazarında yaklaşık 63 milyon 5G uyumlu olmayan cihaz bulunduğunu göstermektedir. Bu durum, raporun dördüncü bölümünde belirtilen "cihaz fiyatları" engelinin Türkiye için de kritik olduğunu ortaya koymaktadır. İşletmeciler, milyarlarca dolarlık lisans maliyetine ek olarak, bu 63 milyon cihazın yenilenmesini teşvik etmek için dolaylı (kampanyalar) veya doğrudan (cihaz sübvansiyonları) ek bir maliyetle daha karşı karşıya kalabilir.

6.4. İşletmeci Yükümlülükleri: Yerlilik Şartı

16 Ekim 2025 ihalesi, sadece bir frekans tahsisi olmanın ötesinde, Türkiye'nin ulusal teknoloji stratejisinin bir parçası olarak tasarlanmıştır. Bu stratejinin merkezinde, 4.5G yetkilendirmesindeki %45'lik yerli malı kullanım oranının üzerine çıkan, çok daha iddialı yerlilik hedefleri bulunmaktadır:

- **Yerli Malı Kullanım Yükümlülüğü**: İşletmecilere, kademeli olarak %60'a varan oranda yerli malı belgeli ürün kullanma zorunluluğu getirilmiştir.

5 2.125 milyon Dolar.
6 2.945 milyon Dolar.
7 3.534 milyon Dolar.

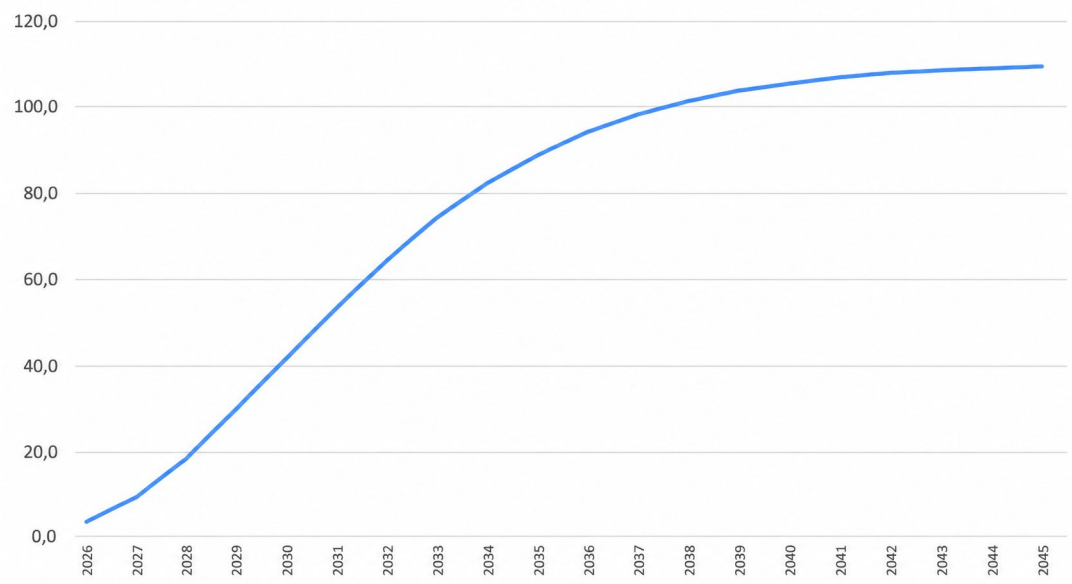
- **Milli Ürün Kullanım Yükümlülüğü**: Daha da stratejik bir adım olarak, ürün tedarik edilebilme durumuna göre kademeli olarak %30'a varan oranlarda milli haberleşme ürünü (fikri, sınai, mülkiyet gibi ürünün tüm haklarının Türkiye'deki üreticilere ait olduğu ürünler) temin etme yükümlülüğü getirilmiştir.

Bu yükümlülükler, UAB'nin ve Haberleşme Teknolojileri Kümelenmesi'nin (HTK) yürüttüğü "Uçtan Uca Yerli ve Milli 5G Haberleşme Şebekesi Projesi" kapsamında geliştirilen yerli çekirdek şebeke, 5G baz istasyonu ve 5G'ye özel yönetim, servis ve operasyon yazılım ürünleri gibi ülkemizde üretilen yerli ve milli ürünler için pazar yaratmayı amaçlamaktadır. Böylece dijital özerklik ve stratejik ve jeopolitik boyut hedeflerinin gözetildiği anlaşılmaktadır.

4.5G ihalesinde yer alan (ve 2024'te süresi dolan) nüfusun %95'ini kapsama zorunluluğu gibi net, şartnameye bağlı yüzdesel hedefler henüz kamuya açıklanmamış olsa da Ulaştırma ve Altyapı Bakanı'nın *"5G'nin bir yıl içinde bütün ülkeyi kapsamasını bekliyoruz"* yönündeki beyanatı, işletmeciler üzerinde hızlı bir yayılım için güçlü bir yönlendirme oluşturmaktadır (Bloomberg HT, 2025c).

Şekil 6-1'de, hizmetin 2026 yılında başlayacağı ve kullanıcılara 5G'ye geçiş zorunluluğu getirilmeyeceği varsayımı altında yapılan bir yayılım eğrisi öngörüsü yer almaktadır[8]. Bu çalışmaya göre Türkiye'de 2030 yılında 5G abone sayısı 40 milyonu aşacaktır.

Şekil 6.1: Türkiye İçin Tahmin Edilen 5G Abone Sayısı Yayılımı (Milyon)



8 M2M abonelikleri hariçtir.

6.5. Gelecek Perspektifi: Düzenleyici İkilem ve Endüstriyel 5G'ye Odaklanma

Türkiye'nin 5G adaptasyonunun gelecek perspektifi, iki temel dinamik etrafında şekillenecektir:

- Birincisi, tüketici pazarından (Business to Consumer, B2C) endüstriyel pazara (Business to Business, B2B) doğru bir odak kaymasıdır. 63 milyon uyumsuz cihaz, yüksek yatırım maliyetleri ve 26 GHz (mmWave) bandının tahsisinin ertelenmesi göz önüne alındığında, tüketici pazarından hızlı bir yatırım geri dönüşü beklenmemektedir. Buna karşın, yerli ve milli projelerde odak noktasının "Akıllı Fabrika" ve "Endüstri 4.0" olduğu görülmektedir. OSTİM'de kurulan "Türkiye'nin İlk Yerli Endüstriyel 5G Özel Şebekesi" ve Arçelik'in uygulamaları, 5G'nin asıl kârlılık ve verimlilik alanının B2B ve özel şebekeler olacağını göstermektedir (HTK ve Herkese Bilim ve Teknoloji, 2024 ve 2025). İşletmecilerin, gelirlerini öncelikle bu dikey sektörlere yönelik çözümlerden elde etmeyi hedefleyeceği öngörülmektedir (Hürriyet, 2025).
- İkincisi, işletmecilerin yönetmesi gereken bir "düzenleyici ikilem" ortaya çıkmaktadır. Takvime göre 1 Nisan 2026'da hizmete başlayan işletmeciler, "1 yıl içinde tam kapsama" beklentisini karşılama baskısı altındadır. Aynı işletmeciler, eş zamanlı olarak, %60 yerlilik ve %30 millilik gibi iddialı bir yerli ürün entegrasyonu zorunluluğu ile de karşı karşıyadır. Küresel tedarikçilerin sunduğu "anahtar teslim" ve sahada kanıtlanmış çözümlerle hızlı yayılım sağlamak, yerli ekosistemin geliştirdiği ve belki de ilk kez bu ölçekte ticari bir şebekeye entegre edilecek yeni ürünleri kullanmaktan teknik olarak daha az riskli ve daha hızlıdır. Bu durum, işletmecileri "hız" ve "dijital egemenlik/yerlilik" arasında zorlu bir denge kurmaya itecektir. Bu düzenleyici ikilemin yönetimi, Türkiye'deki 5G hizmetlerinin ilk yıllarındaki hizmet kalitesini ve şebeke istikrarını doğrudan etkileyecek en kritik faktörlerden biri olacaktır.

7. 6G TEKNOLOJİSİNİN GELİŞİMİ

7.1. 6G ve 6G'ye Geçiş Süreci

5G küresel ölçekte yaygınlaşırken, daha gelişmiş ağ mimarileri ve yeni kullanım senaryolarına yönelik bir sonraki dönemin 6G çerçevesinde şekilleneceği değerlendirilmektedir.

Gelecekteki ağlar hem donanım hem de yazılım alanında çok çeşitli yeni teknolojilere hizmet edecektir. Bu teknolojilere örnek olarak internet üzerinden yüksek çözünürlüklü sürükleyici multimedya, akıllı IoT cihazları, fabrika otomasyonu ve otonom araçlar gösterilebilir. Söz konusu teknolojilerin 2030 yılına kadar hayata geçirilmesi planlanmakta olup, bu teknolojilerin toplumun gelecekteki gereksinimlerini karşılaması beklenmektedir. IoT, önemli ölçüde farklı bir gereksinim kümesine sahip yeni bir paradigma olduğundan, 5G ve ötesi ile 6G'nin temel itici güçlerden birisi olduğu değerlendirilmektedir (Barakat vd., 2021).

Bu teknolojinin uygulanması, Endüstriyel IoT, Tıbbi IoT, Nano-IoT gibi çeşitli alanların bağlantısını ve işlevselliğini geliştirme potansiyeline sahiptir (Raihan, 2023). IoT, zekâ gelişiminin hızlanmasıyla Her Şeyin İnterneti (IoE)'ye doğru evrilmiştir. Gerçek ve sanal dünyaları birbirine bağlayabilen yeni bir paradigma olan IoE ile, veri miktarı çok daha büyük hale gelecektir. Özellikle, uygulama sayılarındaki yükseliş, iletim hızı ve spektrum genişliği gereksinimlerini giderek artıracaktır (Wang vd., 2020)

Uluslararası Mobil Telekomünikasyon (IMT) sistemleri uzman grubu olan ITU-R Çalışma Grubu 5D (WP 5D), Mart 2021'de 2030 ve sonrasına yönelik IMT sistemleri üzerinde çalışmaya (IMT-2030) başlamıştır. 2023 yılı Haziran ayında, Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU) radyo sektörü (ITU-R), Çalışma Grubu 5D'nin 44. toplantısında "2030 ve sonrası için IMT'nin gelecekteki gelişiminin çerçevesi ve genel hedefleri"ni onaylamıştır. Bu belge, 6G için geliştirme hedeflerini, tipik senaryoları ve yetenek göstergelerini ana hatlarıyla ortaya koyarak, sonraki 6G teknolojileri ve standartları araştırmaları için temel bir rehberlik niteliği taşımaktadır. IMT-2030 (6G), altı önemli senaryo tanımlanmıştır bunlar, 5G'deki temel özelliklerin devamı olarak da düşünülebilecek, Immersive/Sürükleyici İletişim, Hiper Güvenilir ve Düşük Gecikmeli İletişim, Masif İletişim'in yanı sıra Entegre Yapay Zeka ve İletişim, Entegre Algılama ve İletişim ile Her Yerde Bağlantıdır. IMT-2020'nin (5G) "demir üçgeni" üzerine inşa edilen IMT-2030 (6G), bir altıgen oluşturmak için dışarı

doğru uzanır. Bu altıgenin en dış çemberinde ise, Sürdürülebilirlik, Her Yerde Bulunan Zekâ, Güvenlik/Gizlilik/Dayanıklılık ve Bağlantısız Olanı Bağlama sürdürülebilirlik, her yerde bulunan zekâ, güvenlik/gizlilik/dayanıklılık ve bağlantısız olanı bağlama gibi tüm senaryolara uygulanabilir dört tasarım ilkesi listelenmiştir (Cui vd., 2025).

IMT-2030'un geliştirilmesinin motivasyonu, sürdürülebilir kalkınmayı desteklerken kapsayıcı bir bilgi toplumu inşa etmeye devam etmektir (Liu vd., 2023). Bu bağlamda, her yerde bulunan zekâ ve bilgi işlem, sürükleyici multimedya ve çok duyulu etkileşimler, dijital ikiz (DT), dijital sağlık, akıllı endüstriler, her yerde bulunan bağlantı, algılama ve iletişimin entegrasyonu, güvenlik ve sürdürülebilirlik dahil olmak üzere bir dizi kullanıcı ve uygulama eğiliminin IMT-2030'un ayrılmaz bir parçası haline gelmesi öngörülmektedir. Bu eğilimler hem özel kullanıcılar hem de dikey endüstriler açısından daha gelişmiş bir ağa olan artan talebi göstermektedir.

Yapay zekâ, hava arayüzleri, gelişmiş taşıyıcı birleştirme, ortogonal olmayan çoklu erişim (NOMA), bant içi tam çift yönlü, yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzey (RIS), ultra yoğun ağ, radyo erişim ağı (RAN) dilimleme ve RAN altyapı paylaşımı dahil olmak üzere yeni teknolojiler ve tasarımlar ön plana çıkmaktadır. Ortaya çıkan yeni teknolojilerin ve tasarımların tüm sistem içinde tutarlı bir şekilde çalışması, birbirini tamamlaması ve muhtemelen geliştirmesi beklenmektedir.

6G için Uluslararası Mobil Telekomünikasyon (IMT), IMT-2030 olarak bilinen 2030 vizyonu kapsamında önerilerde bulunuldu. 6G için yeni öneriler IMT-2020 yeteneklerinin uzantılarını ve bazı yenilikleri kapsar. Genel olarak, yeni öneriler Yapay Zekâ tabanlı ağ sanallaştırma ve kaynak yönetimi, modern uygulamaları desteklemek için Entegre Algılama ve İletişim (ISAC) ve her yerde bağlantı için NTN'lerin ortak kullanımı gibi yenilikçi özelliklerden yararlanmaktadır. Bununla birlikte, karasal ağlar ve NTN'ler arasında spektrum tahsisi/uyumu, küresel standardizasyon ve teknoloji entegrasyonu ve daha da önemlisi veri odaklı AI destekli ağlar altında güvenlik güvencesi şeklinde hala birkaç zorluk bulunmaktadır. Spektrum kıtlığının üstesinden gelmek için THz spektrumunun kullanımı araştırılmaktadır. Ancak 6G için THz spektrumunun kullanımı konusunda küresel bir fikir birliği yoktur. Yine de, THz spektrumunun etkinliğini kanıtlamak için paralel çabalar sarf edilmektedir. Örneğin, Yörünge Açısal Momentum (OAM) çoklama kullanan alt THz iletimi, 6G uygulamaları için potansiyel adaylardan biridir (Singh vd., 2024).

Mevcut IMT sistemleri, çeşitli kullanım durumlarını ve dağıtımları desteklemek için farklı özelliklere sahip birden fazla frekans aralığını kullanmaktadır. Aynı şey, beklenen kapasite ve kapsama gereksinimlerini karşılamak için 1 GHz'den THz bantlarına kadar geniş bir

frekans bandı aralığının potansiyel kullanımıyla IMT-2030 için de beklenmektedir. Geniş alan dağıtımları da dahil olmak üzere çok çeşitli dağıtımlarda IMT-2030 için gelecekteki uygulamaları ve hizmetleri desteklemek için daha geniş kanal bant genişliklerine ihtiyaç duyulacağı öngörülmektedir.

5G ile karşılaştırıldığında, 6G terabit düzeyinde daha yüksek veri hızı, daha düşük gecikme, daha yüksek güvenilirlik ve sürdürülebilirlik sağlamayı, ayrıca daha iyi hareketlilik sunmayı vaat etmektedir. Kısaca, 6G daha iyi veri hızı ve hareketlilik sağlayabilir, daha az gecikmeyle daha fazla cihazı destekleyebilmekte ve daha yüksek güvenilirlik sunabilmektedir. Bu iyileştirmeler, bağlı cihazların artışını desteklemek ve artırılmış gerçeklik, kablosuz beyin-bilgisayar etkileşimleri ve otonom araçlar gibi hıza duyarlı uygulamaları etkinleştirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Telekomünikasyon uygulamalarında sanallaştırmanın artmasıyla birlikte, birçok çalışma bulut-radyo erişim ağları (C-RAN) mimarisinde sanallaştırılmış radyo erişim ağı (V-RAN) veya Sis-RAN (F-RAN) olarak adlandırılan bir sanallaştırma ağına olanak tanımıştır. C-RAN, merkezi bir işleme, işbirlikçi radyo ve gerçek zamanlı bulut tabanlı bir RAN'dır. Bu yapı, birçok RRH'nin merkezi BBU havuzuna bağlanmasına imkan tanır ve herhangi bir BBU, BBU havuzu olmadan çok yüksek bant genişliği (>10Gbit/s) ve düşük gecikme (<10 μs) ile herhangi biriyle konuşabilmektedir. V-RAN, uç aygıtların önemli miktarda hesaplama taşımasını kolaylaştırmaktadır. Bu sistem, baz istasyonlarındaki temel bant birimi (BBU) ile uzak radyo başlığı (RRH) arasını güncellemeyi ve ayrıca farklı tedarikçilerin ürünlerini desteklemektedir (Mahmoad vd., 2021).

6G teknolojisi algılama, depolama, iletişim, kontrol ve hesaplama yeteneğini birleştiren gelişmiş bir iletişim platformudur. Öncekilerle karşılaştırıldığında 6G, yüksek performans, küresel kapsama alanı, gerçek zamanlı veri işleme, yüksek güvenilirlik ve enerji verimliliği gibi üstünlüklere sahiptir. Mobil iletişim teknolojisi her güncellendiğinde, çeşitli performans göstergeleri önceki nesle kıyasla 10 ila 100 kat iyileştirilir. 5G ile karşılaştırıldığında 6G, tepe iletim hızı, güvenilirlik, trafik yoğunluğu, konumlandırma doğruluğu ve bağlantı yoğunluğu açısından teoride 100 kattan fazla iyileştirmeye sahiptir. Örneğin, 6G kablosuz ağları, iletim hızı açısından 1 Tbps tepe hızı ve 1ms'den az ağ gecikmesi olan bir THz bandı kullanır ve bu da kullanıcılar için hizmet kalitesini (QoE) önemli ölçüde iyileştirir. 6G, konumlandırma doğruluğu açısından dış mekanlarda 1m ve iç mekanlarda 10cm'lik bir aktivite aralığında çalışabilir. Ayrıca, kapsama açısından, geleneksel karasal iletişim tesislerinin, uyduların ve insansız hava araçlarının (İHA) bir araya gelmesi, 6G ağlarının kara veya denizde küresel kapsama alanı sağlamasını sağlayacaktır (Chang vd., 2024).

6G, kullanıcılar, aletler, otomobiller ve çevreleyen ortam arasında hızlı iletişimi sağlayan

internet tabanlı sistemlerle entegre olacaktır (Zawish vd., 2024). Güvenlik alanında, geleneksel tak-çalıştır ve yama tipi ağ güvenlik mekanizmalarıyla karşılaştırıldığında, 6G bilinmeyen güvenlik tehditlerine karşı daha güçlü bir direnme yeteneğine sahip olmak için içsel güvenlik teknolojisini benimsemektedir. 6G performans göstergeleri, blokzincir, yapay zekâ, IoT, robotik ve kullanıcı etkileşimi gibi teknoloji endüstrileri için altyapı sağlar. IoT cihazlarının insanların hayatlarına büyük kolaylık getirmesiyle kablosuz ve semantik iletişim teknolojilerinin gelişimini hızlandırabilmektedir.

Şebeke sistemlerinin sürekli gelişimi, mobil genişbant, son derece güvenilir ve düşük gecikmeli iletişimler ve büyük ölçekli makine tipi cihazların birbirine bağlanması alanlarında kesintisiz performans elde etmeyi hedeflemektedir. Hücresel kablosuz ağlar, bağlantıyı geliştirmek için yazılım tanımlı ağlar, heterojen ağlar ve sanallaştırma dahil olmak üzere çeşitli gelişmiş teknikler kullanır. Yapay zekâ teknolojisinin ağ yönetiminde uygulanması, yüksek hızlı bir izleme sisteminin etkili bir şekilde kontrol edilmesini ve denetlenmesini sağlamaktadır. Çeşitli bulut hizmetlerinin, ağ sanallaştırmanın ve diğer ayrı bileşenlerin uygulanması, bazı görevleri kolaylaştırma potansiyeline sahiptir. Ancak, zamanla bu olgu daha fazla bölünmeye ve bu teknolojilerin düzenlenmesi için artan bir gerekliliğe yol açmaktadır. 6G teknolojisinin uygulanması, gelişmiş bir araç setinin geliştirilmesini ve özelleştirilmesini kolaylaştıracaktır. Bir yönetim sisteminde uç AI'nın kullanımı, karmaşık entegrasyonun hiyerarşik bir şekilde ele alınmasını sağlamaktadır (Raihan, 2023).

5G'den farklı olarak, 6G hava, uzay, kara ve deniz entegre iletişimlerini gerçekleştirebilen bir ağ kurabilir. Bu nedenle, 6G teknolojisi gelecekte artık basit ağ kapasitesi ve iletim hızındaki atılımlarla sınırlı kalmayacaktır. Aynı zamanda çeşitli hizmetleri veya dikey alanları destekleyen bir iletişim altyapısı da sağlar. 6G kullanıcıların kişiselleştirilmiş hizmetlerinin yanı sıra IoE, endüstriyel internet, akıllı fabrikalar ve diğer alanlarda geniş uygulama beklentilerine sahiptir. 6G her şeyin birbirine bağlanmasını gerçekleştirebilir ve yer iletişimlerini, uydu iletişimlerini ve deniz iletişimlerini entegre eden tamamen bağlı bir iletişim altyapısı sağlayabilmektedir. 6G'de THz iletişimleri, yapay zekâ ve dağıtılmış akıllı bilgi işlem gibi aday teknolojilerin tümü sistem performansını önemli ölçüde iyileştirmeye çalışır (Ji vd., 2020). Yapay zekâ ve 6G iletişim teknolojisi sayesinde, insan zekasının artırılması, Her Şeyin İnterneti ve deneyimlerin kalitesi ile bağlı nesneler bağlı zekaya dönüşecektir. 6G iletişimi ve yapay zekâ birlikte, teknolojik düşünce yönlerini ve görünümünü değiştirebilmektedir.

6G'de her şeyin, istemcinin herhangi bir sunucuya veya yazılım kurulumuna veya donanım uygulamasına ihtiyacı olmayan "Edge Computing" gibi bulut tabanlı bir mimari olması öngörülmektedir. Bulut teknolojisi, gerçek zamanlı veri odaklı bir ekosistem sağlamak

için tüm ağ bağlantısını ve esnekliğini kullanacaktır. 6G, büyük kapasite, son derece düşük gecikme ve güç tüketimiyle genişletilmiş ağ sistemlerini işleyebilecektir. Hücresel mobil kablosuz ağ, yazılım tanımlı ağ, heterojen ağ ve sanallaştırma gibi bağlantıları optimize etmek için yenilikçi stratejiler kullanılmaktadır. Hızlı izleme sistemini kontrol etmek için AI destekli ağ yönetimi, bulut hizmeti, ağ sanallaştırma ve diğer bireysel bileşenlerin uygulanması bazı faaliyetleri basitleştirebilir. 6G holografik, dokunsal ve su altı teknolojilerini desteklemektedir. AI ile işletmecilere şebekedeki anomalileri ve değişiklikleri bertaraf etmek ve kablosuz ağlar hakkında tahminler sağlamak için yeni bir teknik sunmaktadır. Ancak AI, kablosuz ağlarda eğitim ve doğrulamalar için büyük miktarda veri gerektirmektedir (Ahammed vd., 2022).

6G mimarisi fiziksel katmandan başlayarak güvenli ve otomatik orkestrasyon mimarisiyle birlikte açık, ölçeklenebilir ve öngörülemeyen çalışma zamanı ortamı, veri akışı merkezliliği ve donanım hızlandırma gibi öğeleri içeren ve esasen mimari için altyapı platformunu oluşturan het-bulut (heterojen bulut ortamı) bileşeniyle geniş ölçüde ilişkilendirilebilir. İşlevler bileşeni, işlevsel mimariyi ve RAN-CORE yakınsamasını, hücresiz ve ağ bağlantısı ile bilgi mimarisi ve yapay zekâ temalarını içerir. 6G döneminin büyük dönüşüm teması, gelişmiş ağların ve performans niteliklerinin ortaya çıkmasıdır. Esneklik, ağ dilimleme ve alt ağların mimari etkinleştirici platformları yapı taşının birer parçası olarak gösterilir. 6G mimari değişiminin orkestrasyon bileşeni, açık hizmet etkinleştirmesi ve ekosistem dizaynı, alan kaynağının paraya dönüştürülmesi ve bilişsel kapalı döngü ve otomasyonu garanti altına alan temel iş etkisi açısından önemlidir (Ziegler vd., 2020).

6G ağları ve yapay zekanın bir araya gelmesi, teknoloji paradigmasını yeniden şekillendirme ve modern yaşamda dönüştürücü bir potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, 6G ağ teknolojisi pazarının 2030'dan 2040'a kadar olan dönemde önemli bir büyüme göstereceği öngörülebilir. Çoğu yenilikte olduğu gibi, ticari uygulanabilirliğin gerçekleşmesinin birkaç on yıl gerektireceği öngörülmektedir. 6G ağ teknolojisinde tam yapay zekanın entegrasyonunun gerçekleşmesi beklenmektedir. 6G'nin genişletilmiş Gerçeklik (XR) ve Artırılmış Gerçeklik (AR) teknolojileriyle uyumluluk sağlaması beklenmektedir. Bu teknolojiler, ağ sistemini daha yüksek bir standarda yükseltme yeteneğine sahiptir. 6G teknolojisinin önemli kapasiteye ve minimum gecikmeye sahip olması ve düşük güç tüketimini korurken oldukça genişletilmiş ağ sistemlerini etkili bir şekilde desteklemesini sağlaması beklenmektedir (Raihan, 2023). Mobil teknolojilerin gelişim trendi aşağıdaki resimde betimlenmektedir.

Tablo 7.1: Mobil Haberleşme Teknolojisi

Network / Features	1G	2G	3G	4G	5G	6G
Start	1970	1980	1998	2000	2010	2020
Deployment	1984	1999	2001	2010	2019	2030 *
Technology	AMPS, NMT, TACS	GSM, GPRS, EDGE	WCDMA, UMTS	LTE, WiMAX	MIMO, mm Waves	THz communications, VLC
Frequency	30 KHz	1.8 GHz	1.6–2 GHz	2–8 GHz	3–30 GHz	95 GHz–3 THz
Multiplexing	FDMA	TDMA/CDMA	CDMA	OFDMA	OFDM	OFDM
Switching	Circuit	Circuit, packet	Packet	All packet	All packet	All packet
Core network	PSTN	PSTN	Packet Network	Internet	Internet	Internet
Primary services (in addition to previous generations)	Voice calls	International roaming voice calls, conference calls, SMS, MMS, WAP, WWW, and emails	Video conferencing, GPS	Mobile web access, IP telephony, 3D videos, HD mobile TV	Machine vision, connected cars, smart homes, AR	Tactile and haptic internet, connected autonomous systems, holographic society
Peak data rate	NA	50 Kbps (GPRS) 1 Mbps (EDGE)	21 Mbps	100 Mb/s	20 Gb/s	≥1 Tb/s
Mobility support	NA	NA	NA	350 km/h	500 km/h	≥1000 km/h
Latency	NA	300 ms	100 ms	10 ms	1 ms	10–100 µs
Network energy efficiency (compared to 4G)	NA	0.01x	0.1x	1x	≥10x	≥100x
Spectral efficiency (compared to 4G)	NA	NA	0.6x	1x	3x	≥15x
Area traffic capacity	NA	NA	1 Kbps/m^2	0.1 Mbps/m^2	10 Mbps/m^2	1 Gbps/m^2
Connection density (devices/km^2)	NA	NA	10^4	10^5	10^6	10^7

Kaynak: Ismail ve Buyya, 2022

Akıllı giyilebilir cihazlar, implantlar, XR sistemleri, dokunsal geri bildirimler ve uçan araçlar gibi yeni eğilimler bugüne kadar telekomünikasyonda kullanılmamıştır ve 6G'de kullanılması beklenmektedir. Ayrıca ağ izleme, veriye dayalı iş kararları, önleyici bakım ve dolandırıcılığın tespiti gibi yapay zekâ algoritmaları ile veri doğrulaması için blokzincir gibi güvenlik sistemleri de 6G'de kullanılabilecek önemli unsurlardır (Mahmoud vd., 2021). Eş zamanlı ve etkileşimli iletişime sahip uygulamaları ifade eden yüksek doğruluklu holografik toplumun sağlanması hedeflenmektedir. Holografik tele-presence, uzak katılımcıların holografik varlıklar olarak bir konuma yansıtıldığı ve yerel kullanıcıları uzaktan sorun giderme için uzak konuma taşıdığı holografik tip iletişimlerin (HTC) bir örneğidir. HTC, videodan farklı olarak, yalnızca renk derinliğine, çözünürlüğe ve kare hızına bağlı değildir. Aynı zamanda çok daha yüksek hacimli veri gerektirmektedir. Gelecekteki iletişimler, yalnızca video ve sesi değil, dokunsal internet gibi dokunmayı da içeren uygulamaları da içerebilmektedir (Barakat vd., 2021).

6G ağlarının ultra yüksek veri hızları, ultra düşük gecikme süresi, gelişmiş güvenlik ve sürükleyici kullanıcı deneyimleri sunması öngörülmektedir. Veri hızları saniyede terabit seviyelerine ulaştığında ve gecikme milisaniyenin altındaki aralıklara düştüğünde, 6G ağları artırılmış gerçeklik, sanal gerçeklik, akıllı şehirler ve otonom sistemler gibi uygulamaları gerçekleştirme potansiyeline sahiptir.

Bant genişliğine olan sürekli artan talep, spektrum tahsisi ve kullanımında yenilikçi yaklaşımları gerektirdiğinden, spektrum kıtlığı önemli bir endişe olmaya devam etmektedir.

Bağlı cihazların ve veri trafiğinin üssel büyümesi enerji kaynaklarını zorlayabileceğinden, enerji verimliliği dikkat gerektiren bir diğer kritik husustur. Küçük hücreler ve büyük çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO) gibi teknolojileri kullanan ağ yoğunlaştırma, dağıtım, girişim yönetimi ve geri yol bağlantısı açısından zorluklar oluşturmaktadır. Dahası, mmWave frekanslarının kullanımı, yüksek veri hızlarını sağlamaktadır. Akıllı ağ yönetimi ve kaynak tahsisi, ağ performansını optimize etmek, hizmet kalitesini sağlamak ve çok sayıda bağlı cihazı etkili bir şekilde yönetmek için kritik hale gelir. Ayrıca, iletilen ve depolanan çok miktarda hassas bilgi göz önüne alındığında, 6G ağlarında kullanıcı verilerinin güvenliğini ve gizliliğini sağlamak zorunlu hale gelmektedir.

Birden fazla hizmetin bir arada var olmasını sağlayan dinamik spektrum paylaşımı, uyku modları ve uyarlanabilir güç kontrolü gibi teknikleri içeren enerji açısından verimli ağ tasarımları, enerji tüketimini azaltmayı amaçlayan yöntemler üzerine düşünülmektedir. Hüzme oluşturma ve ışın izleme gibi gelişmiş anten teknolojileri, mm Wave iletişimlerinde kapsama alanını ve kapasiteyi iyileştirmektedir. 6G'de makine öğrenimi ve yapay zekâ odaklı ağ optimizasyon teknikleri, akıllı ve kendi kendini optimize eden ağlar, blokzincir tabanlı güvenlik mekanizmaları potansiyel alanlardır. THz iletişimleri, uydu ağları, yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzeyler, uç bilgi işlem ve yapay zekâ odaklı ağ optimizasyonu gibi teknolojiler ana odaktadır (Charu vd., 2023).

6G, "Her Şeyin İnterneti"ni, yüksek veri hızı, yüksek enerji verimliliği, büyük düşük gecikme süresi kontrolü, yüksek güvenilirlik, Makine Öğrenimi (Machine learning, ML) ve Derin Öğrenme (Deep learning, DL) ile bağlantılı zekâ ve çok geniş frekans bantları açısından daha sıkı gereksinimlere sahip bir "Her Şeyin Akıllı İnterneti"ne dönüştürmek için öngörülmüştür (Ismail ve Buyya, 2022). Önemli uygulamaları desteklemek için 6G'nin, akıllı şehirlerde çok daha düşük gecikmeyle büyük miktarda veri iletimini gerçekleştirmesi planlanmaktadır. 6G teknolojisi, ultra güvenilir ve düşük gecikmeli iletişimler için daha yüksek veri hızları sağlamak amacıyla birçok son teknoloji trendi ve teknolojiyi bir araya getirmektedir. 6G'nin sürekli talebe bağlı olarak ağ kapasitesinin sürekli 1000 kat artırılmasını zorunlu kılması beklenmektedir (Mahmoud vd., 2021). 6G ağlarının, aşırı yoğunluk, çeşitli hareketlilik ve enerjik ortamlar gibi senaryolar altında, çok sayıda bağlı cihazla yüksek performanslı bağlantı sağlaması planlanmaktadır (Banafaa vd., 2022).

6G ağları için potansiyel uygulamalar arasında bağlantılı robotik ve kendi kendini yöneten sistemler, kablosuz beyin-bilgisayar arayüzleri, blokzincir gelişmeleri, sürükleyici çok duyulu gerçeklikler, uzay ve derin deniz keşfi, dokunsal internet yetenekleri ve endüstriyel ağlar yer almaktadır. Yapay zekayı ağ mimarisinin her katmanına entegre etmesi planlanan 6G ağları, yukarıdaki sayılanlar haricinde THz iletişimi, ultra büyük MIMO, ku-

antum iletişimi, mmWave, yeniden yapılandırılabilir akıllı yüzeyler gibi son teknolojileri içerecektir. 6G'nin önerilen ağ gereksinimleri;

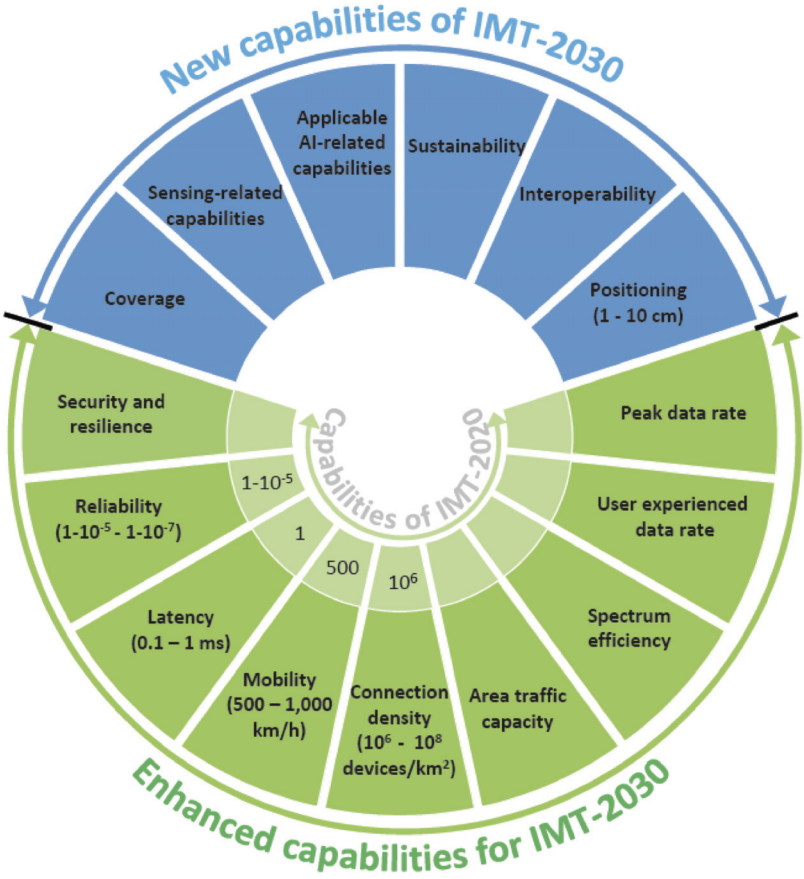
- 1 Tbps kadar yüksek ultra hızlı veri hızları,
- 1 ms'den daha düşük ultra düşük gecikme süresi,
- Artan hareketlilik ve kapsama alanı,
- Trilyonlarca nesnenin bağlantısı,
- 60 b/s/Hz'lik spektral verimlilik,
- Çok yüksek sistem güvenilirliği ve iyileştirilmiş ağ güvenliğidir.

6G'nin 100 Gbit/sn–1 Tbit/sn aralığında yüksek bir veri hızına ve 1 ms'den düşük gecikmeye sahip olması beklenmektedir. Böylece holografik iletişim (HC), dokunsal (tactile) internet, genişletilmiş gerçeklik ve daha fazlası anlamına gelmektedir (Imoize vd., 2021). Çoklu giriş ve çoklu çıkış (MIMO) ve girişim yönetimi gibi teknolojilerdeki daha fazla ilerleme göz önünde bulundurulduğunda, spektrum verimliliğinin birkaç kat iyileştirilmesi beklenmektedir. AI ve algılama gibi yeni kullanım senaryolarıyla; ilgili yeni yetenekler ve sürdürülebilirlik, kapsama, konumlandırma ve birlikte çalışabilirlik hususları belirlenmiştir. IMT-2030 sisteminin, ağ destekli navigasyon ve işbirlikçi robotların çalışması için dağıtılmış AI modeli çıkarımını etkinleştirmek için menzil/hız/açı tahmini gibi AI ve algılamayla ilgili uygulamaları kolaylaştırmak için iletişim ötesi işlevleri desteklemesi beklenmektedir (Liu vd., 2023).

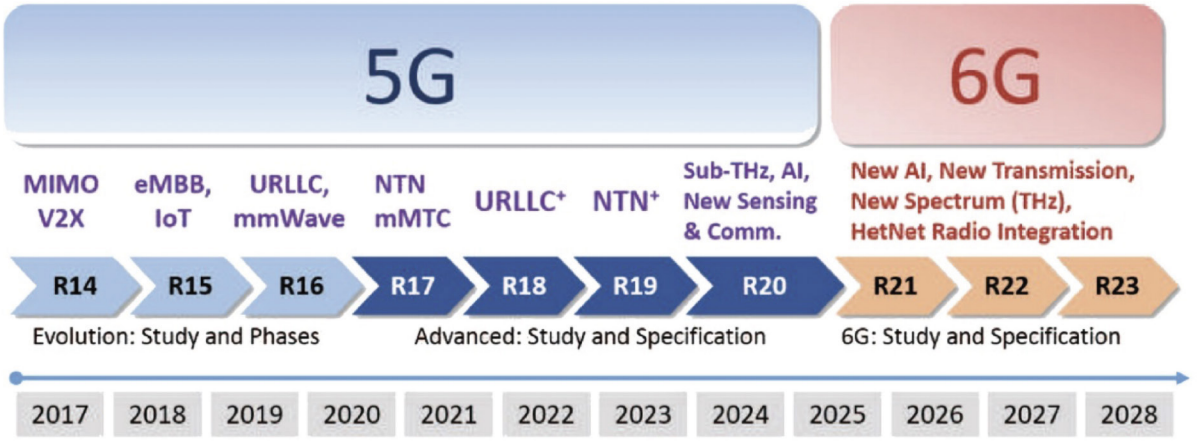
6G'nin km2 başına 100 bağlantı ile Her Şeyin İnterneti'nin (IoE) desteklemesi öngörülmektedir. Bunun için 6G, 5G için benimsenen 30-300 GHz mmWave spektrumuna kıyasla daha yüksek bir frekans spektrumu sağlayan THz altı ve 300 GHz ila 10 THz arasındaki THz spektrumundan yararlanacaktır. 6 GHz altı aralığı zaten kalabalık olduğundan daha yüksek bir frekans spektrumunu kullanmak gereklidir. Daha fazla spektruma yer açmanın yanı sıra, THz spektrumu 6G ağlarında istenen daha yüksek veri hızlarını sağlar. Ancak, daha yüksek bir frekans spektrumunda iletim yapmak yüksek yol kaybına maruz kalabilir ve bu da iletim için mesafeyi sınırlamaktadır. Ek olarak, Görünür Işık İletişimi (VLC) ve Serbest Uzay Optik iletişimi gibi optik kablosuz teknolojileri de 6G'de tartışılmaktadır (Imoize vd., 2021).

3GPP'de 5G ve ötesi ile 6G'nin zaman çizelgesi ve temel teknolojiler Şekil 7-1, Şekil 7-2 ve Şekil 7-3'te verilmektedir.

Şekil 7.1: ITU Varsayımsal Palet Diyagramı

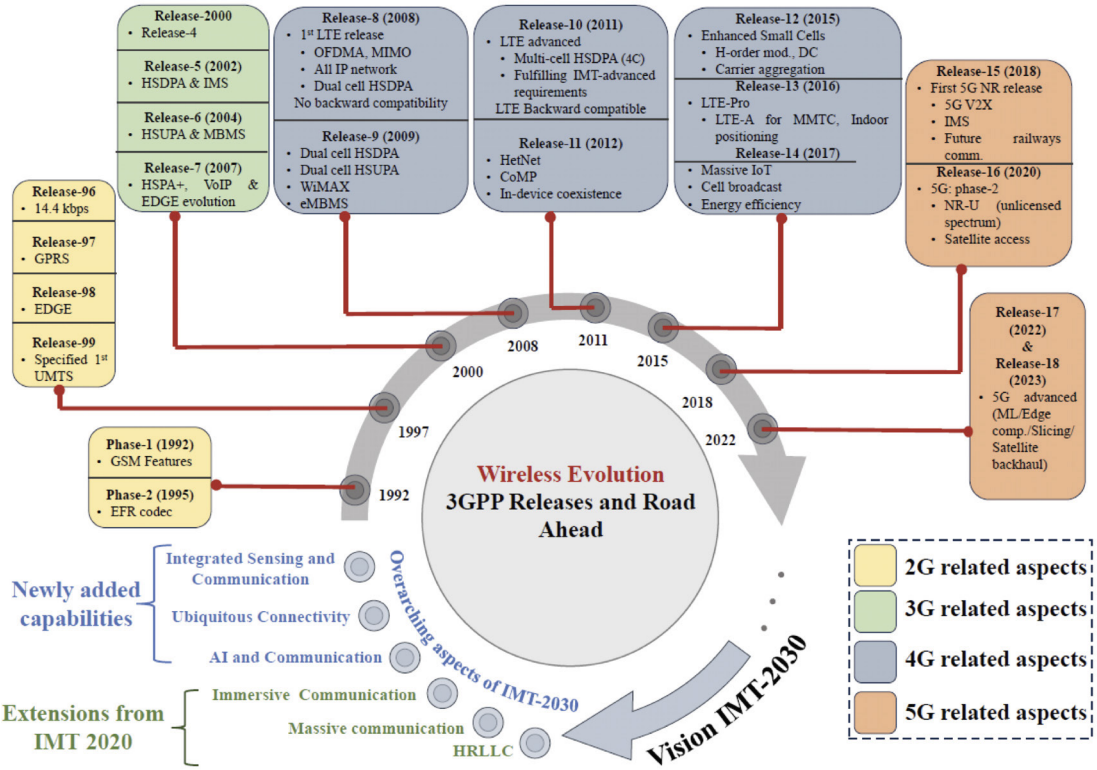


Şekil 7.2: 5G ve 6G Zaman Çizelgesi



Kaynak: Shen vd., 2023

Şekil 7.3: Mobil Haberleşme Teknolojilerinin Evrimi



Kaynak: Singh vd., 2024

Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU) ve Üçüncü Nesil Ortaklık Projesi (3GPP) gibi telekomünikasyon kuruluşları, kablosuz teknolojilerin ilerlemesinde önemli bir rol oynamıştır. Özellikle, ITU'nun radyo iletişim bölümü (ITU-R), küresel bir sistem geliştirmek için ülkeler ve endüstriler arasındaki iş birliği çabalarını koordine etmede etkili olmuştur. IMT-2030 (6G) önerileri üç 5G ayağının genişletilmesini kapsamaktadır.

- 5G'deki Ultra Güvenilir Düşük Gecikmeli İletişim (URLLC) → 6G'de Hiper Güvenilir Düşük Gecikmeli İletişime (HRLLC),
- 5G'deki Gelişmiş Mobil Geniş Bant (eMBB) → 6G'de sürükleyici iletişime ve
- 5G'deki Büyük Makine Tipi İletişimi (mMTC) → 6G'de büyük iletişime

genişletilmektedir. Bunun yanında, sağlam bir iletişim omurgası sağlamak için yeni yetenekler önerilmektedir. Bunlar;

- Entegre Algılama ve İletişim (ISAC),
- Her Yerde bağlantı ve
- Entegre Yapay Zekâ ve İletişimdir (IAAC).

Bunları incelemek gerekirse; **AI Entegrasyonu** 5G'ye benzer şekilde, 5G ve ötesi ağları AI'yı daha kapsamlı bir şekilde kullanmaya çalışır ve iletişim sürecinin çeşitli yönlerini 5G ağına karşı optimize eder. Örneğin, makine öğrenimi algoritmaları gerçek zamanlı kanal koşullarını veya ışın yönlerini tahmin etmek ve bunlara uyum sağlamak için dinamik olarak uyarlanır ve 6G iletiminin güvenilirliğini artırır. 6G güvenliğine doğru, AI gelişmiş şifreleme ve şifre çözme tekniklerine katkıda bulunur ve ortaya çıkan siber tehditlere karşı sürekli olarak gelişir. AI ayrıca iletişim kaynaklarını dinamik olarak yöneterek 6G ağlarında kaynak optimizasyonunda önemli bir rol oynayabilir. Yapay zekanın (AI) 6G'de merkezi rol üstlenmesi beklenmekte, bu kapsamda ağ performansını, yönetimini ve enerji verimliliğini artıran yani "ağ için yapay zeka" yaklaşımının yanı sıra büyük dil modelleri ve akıllı aracılar için hizmet sağlayan ağ yani "yapay zeka için ağ" yaklaşımı ile iki yönlü bir sinerji sağlaması öngörülmektedir.

Entegre Uydu İletişimi ise mobil ve IoT ağları için paradigmayı değiştirme potansiyeline sahip olan bir alan da uydu entegrasyonudur. 3GPP, NTN başlığı altında uydu iletişim teknolojilerinin5G Yeni Radyo (NR) teknikleriyle entegrasyonuna yönelik araştırmayı başlatmıştır. Uyduların fiziksel sınırların ötesini kapsaması muhtemel olduğundan, ITU gibi kuruluşlar NTN'nin spektrum uyumlaştırması üzerinde çalışmaktadır. 3GPP hem mevcut spektrum Frekans Aralığı'nda (FR1) hem de Frekans Aralığı'nda (FR2) NTN için spektrumu etkili bir şekilde yönetmek için çalışmaktadır.

Her Yerde Bağlantı, çeşitli sektörlerde güvenilir bağlantı sağlayan geleneksel sınırların çok ötesinde bir ağ altyapısı öngörür. Endüstriyel alanda, her yerde bağlantı, kullanıcıların konumlarından veya hareketliliklerinden bağımsız olarak kesintisiz bir bağlantı deneyimi yaşamasını sağlayarak çeşitli operasyonel ortamlarda kesintisiz ve sorunsuz iletişim sunar. Her yerde bağlantının ortaya çıkışı yalnızca üretim sürecini etkilemekle kalmaz ve aynı zamanda sensörlerin ve cihazların kesintisiz bağlantısı yoluyla hassas çiftçilik teknikleri aracılığıyla tarım deneyimini de geliştirir. Ayrıca, 6G, gelişmiş güvenilirlik ve azaltılmış enterferans sağlamak için birden fazla erişim noktasının iş birliği yapması da dahil olmak üzere hücresiz mimariler sunmaktadır.

ISAC, gerçek zamanlı veri toplama, işleme ve alışverişi yoluyla gelişmiş algılama teknolojilerinin ve sağlam iletişim sistemlerinin kesintisiz bir şekilde bir araya geldiği B5G için bir başka dönüştürücü yetenektir. Özellikle, algılama ve iletişimin sinerjisi, sensör verilerinin entegrasyonunu, iyileştirilmiş kaynak kullanımını ve daha birbirine bağlı ve duyarlı bir ekosistemi talep eden uygulamalar için bir omurga hazırlamaktadır. Örneğin, ISAC destekli yaklaşımlar, eş zamanlı kanal tahmini ve ışın oluşturma için kullanıcıların yerelleştirilmesinde kullanılır ve bu da gelişmiş iletişim performansına yol açmaktadır.

Ayrıca, iletişim ve algılamanın bir arada bulunması, üretim hatları, ekipman izleme ve lojistik koordinasyonu gibi yeni endüstriyel özellikleri desteklemek de dahil olmak üzere çeşitli endüstriyel fırsatlara giden yolu açmaktadır.

IAAC, 6G için yapay zekâ ve iletişimin birleştirilmesi, akıllı, uyarlanabilir ve güvenli bir kablosuz çerçeveye doğru çığır açan bir adımı ifade etmektedir. Yapay zekâ odaklı öngörücü algoritmaların dahil edilmesi, daha optimize edilmiş kaynak yönetimini, öngörücü bant genişliği taleplerini ve spektrum kullanımının optimize edilmesini kolaylaştırmakta ve daha güvenilir bir iletişim altyapısına yol açmaktadır. Entegrasyon ağın kenarına kadar uzanır ve AR ve otonom sistemler gibi uygulamalarda daha hızlı yanıt süreleri için akıllı kenar bilişimini mümkün kılmaktadır. Ayrıca yapay zekâ, proaktif bir şekilde tespit ettiği olası tehditlere yanıt vererek ağ güvenliğini artırır ve iletişim altyapısını siber saldırılara karşı güçlendirmektedir (Singh vd., 2024).

6G hücresel sistemlerinin, operasyonel ve çevresel yönlerden aşırı bant genişliği (THz) ve işleme gereksinimleri gerektiren alışılmadık teknolojileri desteklemek için bir kapsam sağlaması beklenmektedir. ML, AI, derin öğrenme ve veri analitiği ile veri madenciliği ve veri biliminin gelecekteki 6G'nin baskın teknolojileri olacağı tahmin edilmektedir. Bu teknolojilerin fiziksel, ortam erişim kontrolü, ağlar ve uygulama katmanlarında etki uyandırması beklenmektedir. Daha fazla bit için kanal kodlamasının tahmini, 6G gereksinimlerini desteklemek için sağlam senkronizasyon, görüş hattı dışı (NLoS) çoklu yollar için mobil konumlandırma, doğrusal olmayan ve durağan olmayan kanal tahmini ve uyarlanabilir ve gerçek zamanlı büyük MIMO ışın oluşturma, fiziksel katmandaki temel ML uygulamalarıdır. Ek olarak, optimum güç kontrolü ile verimi maksimize etme, çok taşıyıcılı sistemlerde çok kullanıcılı spektrum optimizasyonu, bilişsel radyolar için spektrum algılamanın optimizasyonu ve toplam güç yoluyla toplam oran maksimizasyonu problemi olarak optimum ışın oluşturma formülasyonu gibi fiziksel katmanda birçok optimizasyon problemi gerçekleştirilebilimekedir. Tahmini kaynak tahsisi, tahmini güç yönetimi ve asimetrik trafik düzenlemesi, ortam erişim kontrol katmanındaki temel ML uygulamalarıdır. İletim sırasında verilerin güvenliğini sağlamak, ağ katmanındaki temel uygulamadır. Ağ performans yönetimi otomasyonu, destekli insansız hava araçları (İHA) kontrolü ve araçlardaki fırsatçı veri aktarım ağları, uygulama katmanındaki temel uygulamalardır. Ancak, IoT cihazları ve iletişim ağlarının çeşitli katmanlarındaki uygulamaların çoğu için 6G'de kullanım potansiyeli henüz doğrulanmamıştır (Mahmoud vd., 2021).

6G'de Yeniden Yapılandırılabilir Akıllı Yüzeyler (RIS), hücresiz büyük MIMO ve Yapay Zekâ gibi teknolojilerin gerçekleştirilmesi beklenmektedir. RIS, alınan sinyali parazitsiz yansıtmak için binaların kapılarına ve pencerelerine yerleştirilecek olan bir uygulamadır. Ayrıca,

RIS teknolojisinin mevcut rölelere göre tercih edilebilir olup olmadığı araştırılmaktadır. Esasında büyük MIMO teknolojisi, daha yoğun bir erişim noktası (Access Point) ağıyla 5G'de tanıtılmıştı. Bu, hücresi olmayan (hücresiz) bir ağı içerecek şekilde 6G'de daha da geliştirilmektedir. İletişim ağlarında spektral verimliliği artırdığı için faydaları vardır. Ancak, kanal bilgisi edinme konusunda zorluklar ve bu kadar yoğun bir AP ağıyla ilişkili sağlık riskleri konusunda bazı endişeler de vardır. Ayrıca, Pervasive AI'nın 6G'yi gerçekleştirmede kritik olduğu düşünülmektedir. Yapay Sinir Ağları ve Derin Sinir Ağları da akıllı ağları etkinleştirmek için önerilmiştir (Imoize vd., 2021).

7.2. 6G Teknolojisinin Getireceği Yenilikler

Önceki mobil iletişim sistemlerinde uygulanan teknolojilere dayanarak, 6G ağı esas olarak 5G mimarisine göre inşa edilecek ve 5G'de elde edilen avantajlardan yararlanılacaktır. 6G sistemi çeşitli teknolojileri içerecek, bazıları 5G mimarisinin geliştirilmiş versiyonları iken, diğerleri tamamen yenilikçi olacaktır. (Banafaa vd., 2022) 6G iletişim teknolojisi için temel gereksinimler, yüksek veri hızı, yüksek çalışma frekansı, düşük uçtan uca gecikme, güvenilir yüksek hizmet kalitesi, yüksek düzeyde hareketlilik ve geniş bir frekans aralığı dahil olmak üzere birkaç temel faktörü kapsar. 6G ağ sisteminin her yerde bulunması ve tamamen entegre olması beklenmektedir. (Raihan, 2023) 6G'nin;

- Büyük ölçekli dağıtımda çeşitli akıllı hizmetleri birbirine bağlamak,
- Birden fazla kaynak türünü bir araya getiren tek bir ağ ağı kurmak,
- Çevresel, ekonomik ve sosyal perspektiflerden sürdürülebilirliği artırmak,
- Küresel hizmet kapsamı sağlamak,
- Ultra yüksek performansla hizmetlerin aşırı deneyimlerini etkinleştirmek ve
- Hizmetlerde garantili bir güvenilirliği sağlamak

ana hedefleri bulunmaktadır (Han vd., 2023).

7.2.1. 6G'de Etkinleştirici Temel Teknolojiler

6G'de etkinleştirici temel teknolojiler olarak mmWave, THz bandı, görsel ve optik haberleşme, masif MIMO, Yapay Zekâ ve Makine Öğrenmesi (ML), NTN, kuantum haberleşme, sanal/artırılmış/karma/genişletilmiş gerçeklik (AR/VR/MR/XR), HC, DT, dokunsal (tactile) iletişim, dokunsal internet ve haptik uygulamalar, insan-makine arayüzü (HMI) ve beyin-bilgisayar arayüzü (BCI), insan merkezli hizmetler (HCS), blokzincir ve dağıtık defter teknolojileri (DLT) gibi teknolojiler kabul edilmektedir.

7.2.1.1. Milimetre Dalga, Terahertz Bandı, Görsel ve Optik Haberleşme

6G, daha yüksek veri hızları daha yüksek spektrum bantlarını kullanmayı gerektirmektedir. Bu durum, mmWave teknolojileri ve THz bandına kadar kullanımı gerektirebilmektedir (Sharma vd., 2024). 6 GHz'in altındaki spektrum ve kapasite eksikliğini gidermek için, daha yüksek frekans bantlarının kullanılması, öncelikle 24 ila 48 GHz arasındaki frekanslar için 5G ağlarında standartlaştırılmıştır ve bu da yeni çok yüksek hızlı hizmetlerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır (Polymeni vd., 2023). 6G, gelecekteki iletişimlerin artan taleplerini karşılamak için frekans sınırlarını THz'e genişletmeyi amaçlamaktadır (Qadira vd., 2023). Gelecekteki 6G ağlarının THz frekans aralığında 100 GHz'in üzerindeki frekansları kullanması beklenmektedir (Polymeni vd., 2023). THz İletişimi 0,1 ila 10 THz frekans bandını kullanır. 1 Tbit/sn'ye kadar ultra yüksek veri hızlarına ve genişbant genişliğine ulaşma yeteneği sağlamaktadır (Sharma vd., 2024). THz bandında daha yüksek frekansların kullanılmasıyla, 6G'nin baz istasyonlarının kapsama açısından daha küçük hücrelere dönüşmesi beklenmektedir (Mahmoud vd., 2021). Görünür Işık İletişimi (VLC) ise enerji verimliliği, maliyet etkinliği ve lisanssız spektrum gibi bazı avantajlar sunmaktadır (Sharma vd., 2024).

6GHz'in altındaki RF frekans bandı azalmıştır ve daha yüksek spektrumda uygun alanlar bulunmaktadır. Spektral verimlilik, büyük MIMO uygulanırken bant genişliğini artırarak artırılabilmektedir. Bu durum, mmWave, THz ve Serbest Uzay Optikleri gibi daha yüksek frekans bantlarındadır. Saniyede terabit veri hızları, yüksek enerji verimliliği ve minyatür alıcı-verici boyutu, daha yüksek bant genişliğinde iletim yapma, çok yüksek veri hızı gerektiren HC gibi uygulamalar üzerine düşünülmektedir. Makro-skala, mikro-skala ve nano-skalada elde edilebilir bazı THz iletişim uygulamaları, THz bant iletimi için çip üzerinde çip kablosuz ağı (WNoC) gibi yenilikçi alanlara da odaklanılmaktadır (Imoize vd., 2021).

İletişim ağlarını geliştirmek için kablosuz iletişim sistemlerinde yüksek frekanslar ve genişbant genişlikleri kullanmak gerekmektedir. THz iletişim, yüksek veri hızları sağlayabilir. THz iletişimi, iç mekân kablosuz mobil ağlar, nano-ölçekli iletişim ve uzay iletişim uygulamaları gibi çeşitli teknolojik alanlarda kullanılabilmektedir. 6G'nin temel amacı, daha yüksek MIMO teknolojilerini kullanarak spektral verimliliği artırmak ve 5G'nin ötesine geçen Tb/s düzeyinde veri iletim hızı elde etmektir. 6G, bağlı makineler ve cihaz miktarlarındaki artış açısından ultra yoğun bir ağ olacaktır ve THz iletişimi bu kapasite gereksinimini karşılayabilmektedir (Banafaa vd., 2022).

Spektral verimlilik, bant genişliklerinin genişletilmesi ve gelişmiş MIMO teknolojilerinin

uygulamalarının etkinleştirilmesiyle artırılabilir. THz bandı, RF bandı tükendiği ve 6G ağlarının daha yüksek gereksinimlerini karşılamak için neredeyse yetersiz olduğu için 6G iletişiminin önemli bir bileşenini oluşturacaktır. Hücresel iletişimler için 275 GHz–3 THz bant aralığı, ITU Radyo İletişim Sektörü (ITU-R) tarafından THz bandının ana kısmı olarak tanımlanmıştır. Mevcut mmWave bandına (30–300 GHz) THz bandının (275 GHz–3THz) eklenmesi, 6G ağları için kapasiteyi çok artıracaktır. 300 GHz–3 THz, optik bandın bir parçasıdır. THz'nin en kritik iki özelliği, yüksek veri hızlarına ulaşmak için daha geniş uygulanabilirliği ve esas olarak daha yüksek bir frekans nedeniyle yüksek yol kaybıdır. Ek olarak, THz bandının kullanımı, mobil ultra genişbant (uMUB), düşük gecikmeli ultra yüksek hızlı iletişim (uHSLLC) ve ultra yüksek veri yoğunluğu (uHDD) dahil olmak üzere 6G'de çeşitli hizmetlerin hızlı ve verimli bir şekilde sağlanmasına olanak tanıyacaktır (Qadira vd., 2023).

Görsel Işık İletişimi (VLC) sistemi, fiber optik benzeri iletim sağlayabildiği için vurgulanması gereken bir diğer önemli teknolojidir. Optik fiber, veri iletimi için ışık kullanan çok esnek ve ince silika bazlı bir ortamdır. Her fiber tipi için iletim hızı 1 Gbps seviyesini aşar. VLC teknolojisi görünür ışığı kullanır ve THz seviyesinde bant genişliği sağlar. VLC 6G için terabit hızında veri iletimini mümkün kılabilir. (Banafaa vd., 2022) Yapay zekâ destekli ışın oluşturma teknikleri, spektral verimliliği artırır ve kesintisiz bağlantı ile güvenilirlik sağlar. (Chataut vd., 2024) VLC, optik kamera iletişimi ve optik bant tabanlı iletişim dahil olmak üzere bazı teknolojiler, V2X iletişimi, iç mekan mobil robot konumlandırma ve AR/VR/XR gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Qadira vd., 2023).

7.2.1.2. Telsiz Erişim Teknolojileri ve Masif MIMO

Büyük MIMO ve hücresiz MIMO gibi yeni telsiz erişim teknolojileri ile mmWave ve alt-THz'deki iletişim yüksek verimli ve düşük gecikmeli bir veri hattı sağlar. Bu yeni spektrum bantlarındaki kısa dalga boyları, daha küçük antenler kullanılmasına ve tek bir cihaz içinde daha büyük anten dizileri uygulanmasına olanak tanır ve bu da ekstra büyük ölçekli büyük MIMO (mMIMO) dağıtarak aşırı dar bir ışın genişliğine ulaşmayı gerçekçi hale getirir. Bu sayede, ışın oluşturmanın mekansal doğruluğu artırılır ve bu siber güvenlik, gizlilik sağlar ve enerji verimliliğinde iyileştirmeye yol açar. Bu kazanım, mükemmel ışın oluşturmaya dayanan ve birden fazla erişim noktasının aynı anda aynı mobil cihaza hizmet vermesine olanak tanıyan hücresiz mMIMO ile artırılabilir (Han vd., 2023).

TDMA ve FDMA şemalarında zaman veya frekans kaynaklarının paylaşılması nedeniyle eski nesillerde düşen büyük miktardaki kapasite göz önüne alındığında, tüm kaynakların diğerlerini etkilemeden her kullanıcı için kullanılabilir olduğu bir çözüm oluşturulabilir.

Bu, spektral verimlilik ve verimde büyük bir artışa yol açar. Büyük MIMO, uzaysal çoklama yoluyla sistem kapasitesini artırabildiği ve hüzmelemeyi kullanarak yol kaybını azaltabildiği için yeni iletişim sistemlerinde kritik bir role sahiptir. 6G'nin süper dar huzmelere sahip çok fazla anten kullanması ve bunun yüksek spektrum verimliliğine ve yüksek frekanslı sinyaller için azaltılmış yayılma kaybına yol açması beklenmektedir. (Banafaa vd., 2022) mMIMO ile akıllı yüzey birleştirmeleri, heterojen ağlarda daha yüksek veri hızları sağlamak için entegre edilebilir. Bu teknikten yararlanılarak, holografik radyo frekansı ve holografik MIMO gibi yeni iletişim yöntemleri uygulanabilir (Mahmoud vd., 2021).

Kablosuz iletişim verimliliğini artırmak için bir alana çok sayıda anten yerleştirmeyle karakterize edilen hücresiz büyük MIMO, çeşitli önemli görevler için yapay zekayı kullanır. Yapay zekâ algoritmaları, ağ kapasitesini en üst düzeye çıkarmak ve enterferansı etkili bir şekilde azaltmak için kaynak tahsisi ve kullanıcı planlaması için kullanılır. Yapay zekâ algoritmaları anten yapılandırmalarını dinamik olarak ayarlar ve kullanıcı talep modellerini tahmin ederek spektral verimliliği ve kullanıcı verimini en üst düzeye çıkarmaya çalışır. Yapay zekâ ile ultra-büyük MIMO arasındaki bu ilişki, ağ kapsamasını ve güvenilirliğini artırırken, hizmet kalitesini iyileştirmek için de enterferansı azaltır (Chataut vd., 2024).

7.2.1.3. 6G'de Derin Öğrenme, Makine Öğrenmesi ve Yapay Zekâ

ML (Machine Learning – Makine Öğrenmesi), kendi kendini öğrenme ve karar alma söz konusu olduğunda en önemli teknolojilerden biridir. Yapay zekâ tabanlı bu teknoloji, sistem davranışlarını ve özelliklerini tanıyarak matematiksel modeller geliştiren ve makinelerin programlamadan öğrenmesini sağlayan bir hesaplama sistemidir. ML algoritmaları, birçok farklı kaynaktan toplanan verilere ihtiyaç duyar. ML, cihazın karar alma ve tahmin özelliklerinden öğrenerek veri gizliliğini ve güvenliğini artırmayı öğrenmesini sağlar. Yapay sinir ağı yöntemine dayanan derin öğrenme ise, büyük miktarda bilgi içeren kaynaklara ulaşarak hesaplama sorunlarını hızla çözebilen bir uygulamadır. Hızlı yinelemeli işlemleri nedeniyle 6G'nin fiziksel katmanı için güçlü bir tekniktir. Yapay zekâ ile birleştirilen ML teknolojisi, 6G için önemli haline gelecektir. ML dinamik mobil ağlar için otomasyon yönetimini etkinleştirecek ve bu da güç kullanımını, işlemi, ağ yapılandırmasını ve ağ performansını artıracaktır. 6G, farklı endüstri seviyelerindeki çok sayıda kullanıcıyı birbirine bağlayan ve büyüyen iletişim ihtiyaçlarına yeterli şekilde yanıt veren kablosuz standart olacaktır. Kablolu veya kablosuz iletişim kanallarını kullanan cihazlar arasındaki doğrudan iletişime makine tipi iletişim (MTC) denir. MTC uygulamasının zorlukları düşük gecikme süresi ve yüksek güvenilirlik gereksinimleridir. Ağ işlevi sanallaştırma (NFV)

ve yazılım tanımlı ağlar (SDN'ler), MTC'de kullanılan dikeylerin gereksinimlerini karşılayan teknolojilerden bazılarıdır. NFV, sanallaştırma tekniklerini kullanarak ağ yapı taşlarını birbirine bağlayarak bir iletişim ağı oluşturan bir ağ mimarisi konseptidir. SDN ise, ağ performansını ve güvenliğini artırmak için bulut bilişim benzeri ağ yapıları oluşturan bir ağ yönetim teknolojisidir. Farklı dikey sektörlerin geniş kapsamlı ihtiyaçlarını karşılamak için esnek, dinamik, basit ve birleşik bir sisteme sahip bir çekirdek ağ tasarlamak, 6G yapısı için gerekli olacaktır (Banafaa vd., 2022).

Veri, yapay zekâyı çalıştıran yakıt olduğu için yeni petrol olarak kabul edilir. (Chang vd., 2022) Yapay zekâ alanındaki ilerleme, derin öğrenme ve uygulanmasındaki kolaylık nedeniyle günümüzde hızlanmıştır. Bu gelişmeler, yapay zekâ'nın veri işleme ve karar alma yeteneğiyle birleştiğinde, onu kablosuz iletişim gibi çeşitli alanlarda popüler bir araç haline getirmiştir. 6G'nin temel vizyonlarından biri, milyarlarca heterojen cihazın ağa bağlanmasını desteklemektir. Bu gereklilik, geleneksel matematiksel modeller ve algoritmaların karmaşık ve veri odaklı makine öğrenme teknikleriyle değiştirilmesini gerektirecektir (Imoize vd., 2021).

ITU'nun 6G vizyonu, iletişim yetenekleri 5G'yi aşan bir dizi hizmet ve senaryoyu kapsamaktadır. Bu yetenekler arasında, uygulanabilir yapay zekâ ile ilgili yetenekler en fazla ilgiyi çekmiştir. 6G ağlarının yapay zekâ ile ilgili yeteneklere sahip olması çeşitli yönlerden anlaşılabilir. Ağ yapay zekâ aracılığıyla kendi performansını optimize edebilir ve çalışması için destek sağlayabilir. Ağ iletişim bağlantıları sağladığı gibi kullanıcılara ve ekipmanlara yapay zekâ hizmetleri sunabilir (Cui vd., 2025). Yapay zekâ, kaynakları analiz etmek, yönetmek ve optimize etmek ve 6G ağlarını verimli bir şekilde desteklemek için kullanılabilir. Yapay zekâ, verimli kanal tahmini, enerji verimliliği, modülasyon tanıma, veri önbelleğe alma, trafik tahmini ve hareketlilik yönetimi gibi görevler için kullanılabilir (Sharma vd., 2024). Başka bir örnek olarak, bulut bilişim ve yapay zekâ, şirketlerin daha akıllı olmaları ve müşterilerine akıllı bir şekilde, yani hızlı, verimli ve uygun fiyatlı bir şekilde hizmet sunmaları için akıllı dönüşüm teknolojileri olarak yer alan teknolojilerdir (Ahmad vd., 2024).

Günümüzün teknolojik trendi olan yapay zekâ, 6G gelişimi için çeşitli faydalar sağlar. Yapay zekâ, mimari, bilgi işlem ve depolama gibi birçok alan için 6G'nin uygulamaları ve özelliklerinin sunduğu akıllı kullanım nedeniyle 6G ağ yapısının ilerlemesinde önemli bir rol oynayacaktır. Yapay zekâ kullanan akıllı analiz teknikleri 6G ağında uygulanabilir (Banafaa vd., 2022).

6G'nin ultra düşük gecikme, önemli ölçüde daha yüksek veri iletim hızları, artan güveni-

lirlik ve her yerde bağlantı da dahil olmak üzere dönüştürücü değişiklikler getireceği öngörülmektedir. Bu gelişmeler arasında, yapay zekanın 6G ağlarına entegre edilmesinin, birden fazla alanda yeni paradigmalar ve fırsatlar sağlayarak oyunun kurallarını değiştirmesi beklenmektedir (Cui vd., 2025).

Mobil akıllı cihazların yaygınlaşması ve robotlar, akıllı arabalar, dronlar ve VR gözlükleri gibi yeni tarz bağlantılı ekipmanların ortaya çıkmasıyla, bazı akıllı hizmetlerin yaygınlaşması beklenmektedir. Mobil cihazlardaki hesaplama, depolama, güç ve gizlilik kısıtlamalarının üstesinden gelmek için, 6G ağları bulut, mobil uç ve uç cihazlarda dağıtılmış bilgi işlem kaynaklarını kullanarak ve iletişim açısından verimli ML eğitimi ve müdahale mekanizmaları geliştirerek AI-as-a-Service tarzında yaygın zekâ sunacaktır. Hesaplama yoğunluklu görevlere ek olarak, yaygın zekâ, hızlı kararlar veya koşullara yanıtlar gerektiğinde bulut bilişimin gecikme kısıtlamasından kaçınmak için zamana duyarlı yapay zekâ görevlerini de kolaylaştırır (Jiang vd., 2021).

6G ağları, radyo sinyallerinin tam potansiyelini sunacak olan yapay zekâ aracılığıyla tam otomasyonu sağlayacak ve ayrıca bilişsel radyonun akıllı radyo tabanlı dönüşümlere izin verecektir. 6G gerçek zamanlı iletişimler için makine öğrenimi ve yapay zekâ prosedürlerindeki ilerlemeler, gerçek zamanlı veri iletimini iyileştirecek ve basitleştirecektir. Yapay zekâ teknikleri, verimliliği artırma, gecikmeleri azaltma, karmaşık sorunları verimli bir şekilde çözme ve ağ seçimi gibi çok sayıda fayda göstermektedir. Meta-malzemeler, akıllı yapılar, akıllı ağlar, akıllı cihazlar, akıllı bilişsel radyo, kendi kendini idame ettiren kablosuz ağlar ve makine öğrenimi gibi örnekler, yapay zekaya dayalı iletişim sistemleri için destek sağlayacaktır. Bu nedenle, yapay zekâ tabanlı teknolojinin uygulanması, çeşitli 6G hizmetlerinin hedeflerine ulaşılmasına yardımcı olacaktır. Makine öğrenimi yaklaşımlarındaki son gelişmeler, RF sinyal işleme, spektrum madenciliği ve spektrum haritalamasına uygulanmasına olanak tanır (Qadira vd., 2023).

6G, uçlardan buluta ve çekirdek altyapıya kadar entegre bir iletişim, bilgi işlem ve depolama altyapısında tasarımına bağlı zekayı gerektirir. Düşük gecikme, yüksek güvenilirlik ve güvenlik açısından çeşitli uygulamaları desteklemek, 6G için yapay zekâ destekli bir optimizasyon gerektirir (Ismail ve Buyya, 2022).

Müşteri uygulamalarını desteklemek için yapay zekâ yapı taşlarını sağlamak amacıyla bulut sağlayıcıları tarafından giderek daha fazla Yapay Zeka Hizmeti (AIaaS) sunulmaktadır. Bu hizmetlerin Yazılım Tanımlı Altyapı (SDI) üzerinde sağlanması amaçlanmıştır ve yazılımlaştırma ve sanallaştırma ağ mimarisinin temel bir eğilimi olduğundan AIaaS'yi 6G ağında sağlamak gerekir. Yapay zekâ modellerini hedeflerine daha yakın olan ke-

narda işlemek, yapay zekâ modellerini yerel ortama uyarlama teknikleri olan ince ayar ve transfer öğrenimiyle birleştirildiğinde daha etkilidir. Federe öğrenme, merkezi olmayan verilerden derin bir öğrenme modeli eğitmek için bir çerçevedir ve kişisel bilgilerin gizliliğini ve güvenliğini sağlamak için kullanılabilir. Yapay zekâ, ağlara yönelik saldırıları tanımlamak, azaltmak ve önlemek için kullanılabilir. Güvenlik talebinin artması beklendiğinden, yapay zekanın bu alanda kullanımı daha yaygın hale gelecektir. Hata önleme, hata tespiti ve temel neden analizi içeren hata yönetimi ve kaynak konsolidasyonu, planlama, iş yükü tahmini gibi kaynak sağlama maksadıyla da kullanılabilir. Yine, ağ işletimi, iletişim hizmeti sağlayıcıları için kritik bir görev olduğundan ve tüm ağların dağıtımı için gerekli olduğundan, yapay zekâ ve ağ altyapısının entegrasyonunu sağlamak için de iyi bir uygulamadır (Tagami vd., 2023).

Güçlü veri analizi ve öğrenme yetenekleri sayesinde yapay zekâ, kablosuz iletişim ağlarında büyük miktarda veriyi yönetip, ağın akıllı yönetimini ve optimizasyonunu gerçekleştirebilir. Yapay zekâ, ağ optimizasyonu, trafik tahmini ve hata tespiti gibi kablosuz ağların çeşitli yönlerine uygulanmış ve ağ performansını ve kullanıcı deneyimlerini iyileştirmiştir. Yapay zekâ sayesinde daha az bant genişliğiyle daha fazla veri iletmek için sıkıştırılmış semantik bilgileri kullanarak kodlama verimliliğini artırılabilir. Bu da ağ tıkanıklığını hafifletmeye ve veri iletim hızını iyileştirmeye yardımcı olur. Ancak yapay zekâ algoritmaları, model parametreleri, eğitim verileri ve gerçek zamanlı geri bildirim gibi iletilmesi gereken ek veriler üretir. Yüksek verimlilik arayışında, ağların sürdürülebilir gelişimini sağlamak için yapay zekâ uygulamalarında enerji verimliliğini optimize etmek önemlidir. Algılama, iletişim, bilgi işlem, yapay zekâ ve güvenliği entegre etme yönündeki büyük eğilimi takiben, 6G geleneksel tek işlevli yeteneklerden algılama, bilgi işlem, yapay zekâ ve güvenlik gibi yeni ağ yeteneklerine doğru genişleyecektir. 6G yalnızca yapay zekâ teknolojilerinden yararlanmakla kalmaz ve aynı zamanda bunların gelişimini de olumlu etkiler (Cui vd., 2025).

6G'nin yapay zekâ ve robotik üzerindeki uygulamasının, 6G ağlarının artan yetenekleri ve gelişmiş bağlantısı nedeniyle önemli ve etkili olması beklenmektedir. 6G ile yapay zekâ algoritmaları doğruluk ve hızda bir artış görecekken, otonom robotlar ve dronlar gerçek zamanlı iletişim ve kontrol özellikleriyle ön plana çıkacaktır. Otonom araçlar, akıllı fabrikalar ve akıllı evler gibi gelişmiş yapay zekâ destekli sistemler daha karmaşık hale gelecektir. 6G, tehlikeli ortamlarda yapay zekâ ve robotik sistemlerin uzaktan kontrolünü ve izlenmesini sağlayacak ve yapay zekâ, endüstriyel ortamlarda öngörücü bakım ve izleme için kullanılacaktır. 6G ağlarının artan bağlantısı ve yetenekleri, yenilikçi yapay zekâ destekli uygulamaların ve hizmetlerin oluşturulmasını teşvik edecektir (Chataut vd., 2024).

7.2.1.4. Karasal Olmayan Ağlar

Karasal olmayan ağlar (NTN), insansız hava araçları ve uyduları kapsar; karasal baz istasyonlarının kapsama alanını genişletmek ve yoğun kentsel sıcak noktalarda ek kapasite sağlamak amacıyla kullanılır. Ayrıca afet kurtarma ve uzak veya kırsal alanlarda kullanılır (Sharma vd., 2024).

Karasal, hava ve uydu ağlarının entegre ve bağlantılı hale getirilmesi, ağın bağlantısını geliştirmek ve kör noktaları ve kapsanmayan alanları kapsamak için düşünülmekteydi. Alçak yörüngeli uydular (LEO) ve Küp Uydular (CubeSat) içeren uydu ağları, sürekli bağlantı için geri taşıma desteği, dronlar ve yer baz istasyonları için geniş alan kapsaması sağlamak için gereklidir (Mahmoud vd., 2021).

İnsansız Hava Araçları (İHA'lar), kendi kendini yöneten dron sürüsü olarak da bilinir ve bir insan pilotu olmayan hava araçlarıdır. Bu nedenle adı bir kontrol sistemi ve onu uzaktan kontrol eden bir insan tarafından desteklenir. Genellikle savunma alanı, trafik izleme, yangın algılama, denizcilik hizmetleri, film yapımcılığı, gazetecilik, akıllı çiftçilik, uzaktan gözetleme, iş ve endüstri gibi uygulamaları vardır. İHA'ların gelecekteki kablosuz ağları gerçekleştirmede önemli olduğu düşünülmektedir. (Imoize vd., 2021) İHA/uydu haberleşmesi, yapay zekâ destekli yörünge ve kaynak tahsisi optimizasyonundan yararlanarak, kullanıcı talep modellerini tahmin ederek ve kaynakları dinamik olarak tahsis ederek uzak bölgelerde kesintisiz bağlantı sağlar. Yüksek hızlı internet ve veri hizmetlerine daha iyi erişim için ağ kapsamını ve güvenilirliğini artırır (Chataut vd., 2024).

Küp Uydular ve İHA'lar, 6G ve ötesi için önemli teknolojilerdir. Küp Uydular daha düşük bir birim maliyetine sahiptirler. Çünkü daha az ağırlığa sahiptirler ve çoğu durumda daha büyük bir uyduyla bir roketi paylaşırlar. CubeSat'lar mevcutta dünya algılama, konumlandırma ve M2M/IoT iletişim alanlarında kullanılmaktadır. (Imoize vd., 2021) 6G iletişim ağlarının temel bir bileşeni İHA'lar/drone'lardır. Birçok durumda İHA'lar çok yüksek bir veri hızı ve kablosuz bağlantı sağlamayı amaçlar. İHA'lar hücresel bağlantı sağlama yeteneği gösterir. Karasal iletişimlere dayalı altyapıların uygulanması, acil durum veya doğal afet durumlarında hizmet sağlamak neredeyse imkânsız olduğundan sınırlı pratikliğe ve ekonomik fizibiliteye sahiptir. İHA'lar bu tür durumlarla başa çıkabilir. Bu nedenle, İHA'lar 6G mobil ağların bazı gereksinimlere kolaylık sağladığı için bir çözümdür. İHA'lar, ağ bağlantısını güçlendirmekten yangın algılamaya, acil servislere, afet yönetimine, kirliliği, park etmeyi ve kazaları izlemeye, güvenliğe ve gözetlemeye kadar uzanan daha geniş bir uygulanabilirlik göstermektedir (Qadira vd., 2023).

Uydu iletişiminde alçak yörünge (Low earth orbit, LEO) sistemi, tüm dünya yüzeyinin kap-

samını destekleyerek frekansın yeniden kullanımını ve verimlilik sağlayabilir. Dünyadaki altyapı ve hava platformlarının uygulanmasıyla üç boyutlu kapsama, 6G teknolojisi için bir başka araştırma alanıdır. Uydu iletişiminin mmWave'i desteklemesi ilk olarak 3GPP ve uydu dağıtım senaryolarında kullanımıyla ortaya çıkmıştır. Uydu ile dünya yüzeyi arasındaki büyük mesafe nedeniyle gecikme ve mmWave yol kaybı yüksek olur. Bu dezavantajlara rağmen mmWave, noktadan noktaya uydu bağlantılarıyla yüksek bant genişliği sağlar. Uydu iletişim mimarileri, daha iyi kapsama için maliyeti en aza indirme ve heterojen uydu ağı yapıları açısından çeşitli gelişmeler sunar. Karasal terminallerde, ağ dilimleme, SDN ve NFV, farklı teknolojilerin aynı platforma entegrasyonunu kolaylaştırmak için bir araya getirilerek esneklik, otomasyon ve çeviklik sağlanır. Karasal ve karasal olmayan teknolojilerin hücresel iletişimde entegrasyonu, iletişim dayanıklılığı, kaynak optimizasyonu, verimli yayın ve aktarımı, uç bilişim yoluyla QoS iyileştirme ve iletişim hareketliliği gibi çeşitli faydalar sağlar. mmWave'deki yüksek yönlü uydu iletişiminin, özellikle geniş kapsama alanı için yüksek kapasitesi sayesindeki avantajları nedeniyle 6G iletişimi için önemli bir teknoloji olduğu düşünülmektedir (Banafaa vd., 2022).

Karasal ve uzay ağlarının sorunsuz entegrasyonu internet erişimi için bir senaryo sunmaktadır. Uzaydan büyük LEO uydu grubu (takımyıldızları) kullanarak internet sağlama çözümü önem kazanmıştır. Bunların temel faydaları, uçak ve gemi gibi hareketli platformlar da dahil olmak üzere küresel ölçekte her yerde internet erişimi, karasal internete göre etki alanları genelinde zenginleştirilmiş internet yolları ve her yerde uç önbelleğe alma ve bilgi işlemdir. Bu entegre sistemler için mobil cihazlar, kara tabanlı altyapılara ihtiyaç duymadan uydu erişimine sahip olabilecektir (Tataria vd., 2021).

7.2.1.5. 6G'de Kuantum Haberleşme

Yüksek hassasiyetli bilgi akış güvenliği şifreleme teknikleri ve güçlü anahtarların ortak kullanımını gerektirir. Kuantum bilişim alanındaki gelişmeler ve mevcut anahtar değişim algoritmalarının gerçek zamanlı kırılma olasılığı nedeniyle, hesaplama gücündeki gelişmelere karşı güvenli yeni anahtar değişim tekniklerini kullanmak önemlidir. Kuantum kriptografik sisteminin en büyük avantajı, iletişim kuran kullanıcıların herhangi bir üçüncü tarafın varlığını tespit etmesine olanak tanımasıdır. Bu durum, sistemde aktarılan mesaj için gizlilik sağlar (Mahmoud vd., 2021).

Kuantum bilişim yüksek veri hızları ve güvenlik sağlar. Kuantum iletişimi 6G'de daha iyi bir çözüme yol açan bilgi işleme hızını artırma potansiyeline sahip olduğu için 6G'de etkinleştirici mimari olarak tartışılmaktadır. Kuantum iletişimi ayrıca gelişmiş kuantum bilişimi ve kuantum iletişimi aracılığıyla siber saldırılara karşı bir kalkan sağlayabilir. Ku-

antum tabanlı uydu iletişimine ve 6G için kuantum makine öğrenimi ve derin öğrenmeye de ilgi vardır. Kuantum bilişim, büyük veri ve yapay zekâ algoritmalarını önemli ölçüde hızlandırabilir ve geliştirebilir. Kuantum optik iletişim kavramı ise, telekomünikasyon ve BİT'te yeniliğe kapı aralamakta ve optik sinyallerin iletimi ve kontrolünün etkinliğini artırır (Imoize vd., 2021).

Hızlı, güvenilir, akıllı ve güvenli iletişime olan talep, 6G ile gerçekleştirilebilen yüksek bilgi işleme gücüne olan ihtiyacı ortaya çıkarmıştır. (Banafaa vd., 2022) 6G ağlarındaki kuantum iletişimi, yapay zekanın kuantum anahtar dağıtım protokollerini ve ağ yönetim sistemlerini optimize etmesiyle geliştirilir. Yapay zekâ algoritmaları kodlama stratejilerini optimize eder ve anahtar dağıtım görevlerini otomatikleştirerek kuantum iletişim kanalları üzerinden güvenli ve güvenilir veri iletimi sağlar (Chataut vd., 2024).

7.2.1.6. Sanal/Artırılmış/Karma/Genişletilmiş Gerçeklik (AR/VR/MR/XR)

Artırılmış, sanal ve karma gerçeklikleri birleştiren XR, 5G'de pratik uygulamalara olanak sağlamakla birlikte, mobil internetin başlangıcındaki video hizmetine benzer şekilde henüz başlangıç aşamasındadır. Aynı görüntü kalitesi seviyesine ulaşmak için, 360 derece görüş alanına sahip XR cihazlarının 2D video akışına kıyasla çok daha yüksek veri çıkışına ihtiyacı vardır. Daha yüksek çözünürlüklü, daha yüksek kare hızına, daha fazla renk derinliğine ve yüksek dinamik aralığa sahip video kalitesi gerekir ve bu da cihaz başına 1.6 Gbps'nin üzerinde bir bant genişliği gerektirir. Bu cihazların yaygınlaşması, özellikle hücre kenarında 20 Gbps'lik tepe hızına sahip 5G'nin sınırlı kapasitesi ile sağlanamaz. Bant genişliğine ek olarak, sürükleyici oyun, uzaktan cerrahi ve uzaktan endüstriyel kontrol gibi etkileşimli uygulamalar, düşük gecikme süresi ve yüksek güvenilirlik gerektirmektedir (Jiang vd., 2021).

6G'nin gerçek zamanlı yetenekleri, sanal ve fiziksel alanların sorunsuz bir şekilde birleştirilmesini sağlayarak kullanıcılara daha sürükleyici ve etkileşimli bir deneyim sunmaktadır. 6G tarafından etkinleştirilen yüksek çözünürlüklü sanal ve artırılmış gerçeklik verilerinin iletimi, karma gerçeklik uygulamalarında iyileştirilmiş görsel ve duyusal deneyimler sağlayabilir. Bu durum, eğitim, eğlence ve ürün görselleştirmesi için yeni olanaklar sunar. Ek olarak, 6G'nin bireyleri sanal ortamlarda birbirine bağlama yeteneği, uzaktan çalışma, sosyal etkileşim ve oyun oynamanın gerçekleşmesi için yeni yollara yol açabilir. 6G'nin gelişmiş ağ güvenlik önlemleri, hassas bilgileri ve kullanıcı verilerini siber tehditlerden koruyabilir. 6G ve karma gerçeklik teknolojisinin birleştirilmesi, sürükleyici deneyimler üretme konusunda önemli bir potansiyele sahiptir ve bunu 6G teknolojisinin

bir uygulaması haline getirir. (Chataut vd., 2024) Genişletilmiş gerçeklik (XR) teknolojileri, sanal gerçeklik (VR), artırılmış gerçeklik (AR) ve karma gerçeklik (MR) içerir. Tıp, eğitim, eğlence ve yaşamın diğer alanlarında uygulaması bulunmaktadır (Imoize vd., 2021).

7.2.1.7. Holografik İletişim

Holografik İletişim (HC), ultra düşük gecikme süresiyle son derece yüksek veri hızları gerektiren 3D video ve görüntülerden oluşan insan boyutunda sürükleyici ve etkileşimli hologramların iletilmesinde kullanılan bir uygulamadır. (Sharma vd., 2024) Holografik ekranlar, bir veya birden fazla kaynaktan bir veya birden fazla hedefe 3D görüntüler sunarak, son kullanıcıya deneyim sağlayan multimedya deneyimidir. Ağdaki etkileşimli holografik yetenek, çok yüksek veri hızları ve ultra düşük gecikmenin bir kombinasyonunu gerektirecektir. Birincisi bir hologramın birden fazla 3D görüntüden oluşması nedeniyle ortaya çıkarken, ikincisi kullanıcının görüntüyle etkileşime girebilmesi gerçeğine dayanır ve bu da izleyicinin konumuna göre değişir. Bu durum, kullanıcıya sürükleyici bir 3D deneyim sağlamada kritik öneme sahiptir (Tataria vd., 2021).

Gerçek zamanlı olarak tam hareketli 3D görüntüleri yansıtabilen HC'leri ifade eder. Bu teknoloji, insanların ve nesnelerin görüntülerini yakalar, gerçekte veya uzak bir konumda sunar ve bu görüntüleri ve ilgili sesleri alıcıya iletir. Bu şekilde, nesneleri veya insanları gerçek zamanlı ses bilgileriyle birlikte farklı bir konumda sunar ve kullanıcıların tam önünde görünür hale getirir. Holografik tip iletişimler endüstride, tarımda, eğitimde, eğlencede ve diğer birçok alanda büyük bir rol oynayacaktır. İletilecek zengin ayrıntılar nedeniyle, holografik medyayı yayınlamak için gereken veri miktarı, bu tür yetenekleri desteklemek için saniyede yüzlerce gigabit veya hatta saniyede terabit aralığında çok yüksek bir verim gerektiren sıkıştırmadan sonra bile çok büyük olabilir. HC'lerin gereksinimi, düşük gecikme ve yüksek veri hızlarını garantilemek için URLLC ve eMBB'nin bir karışımıdır (Guo vd., 2021).

HC, birden fazla kaynaktan veri yakalayacak ve son kullanıcılara 3D deneyimi sağlayacak video ve görüntülerin bir sonraki aşamasıdır ve çok yüksek veri hızları ve ultra düşük gecikme süresi gerektirir. Veri sıkıştırma işleminden sonra insan boyutunda bir hologram için bantgenişliği gereksinimleri onlarca Mbps ile 4,3 Tbps arasında değişmektedir. 3D deneyime sahip olmak için hologramların milisaniyenin altında bir gecikme süresine ihtiyacı vardır (Ismail ve Buyya, 2022).

Binoküler paralaks kullanan geleneksel 3D videolarla karşılaştırıldığında, gerçek hologramlar çıplak gözle 3D nesneleri gözlemlemenin tüm görsel isterlerini karşılayabilir. Mobil bir ağ üzerinden yüksek çözünürlüklü hologramların uzaktan işlenmesi uygulamaya

geçmek üzeredir. Örneğin, holografik tele-varlık, uzak katılımcıların bir toplantı odasına hologramlar olarak yansıtılmasına veya çevrimiçi eğitim veya öğretime katılanların ultra gerçekçi nesnelerle etkileşime girmesine olanak tanımaktadır. Ancak, HTC, görüntü sıkıştırma ile bile saniyede terabit mertebesinde büyük bant genişliği gerektirir. İki boyutlu (2D) videoda kare hızı, çözünürlük ve renk derinliğini dikkate almanın yanı sıra, hologram kalitesi ayrıca eğim, açı ve konum gibi hacimsel verileri de içerir. HTC, hologramları yeniden oluşturmak için gerçek sürükleyicilik ve büyük miktarda birbiriyle ilişkili akış demetleri arasında yüksek hassasiyetli senkronizasyon için ultra düşük gecikme süresi gerektirir (Jiang vd., 2021).

Hologramlar 3D görüntüler aracılığıyla ince havada insan iletişimini mümkün kılar. Gecikme ve yüksek bant genişlikleri, HC ile ilgili zorluklardan bazılarıdır ve 6G'nin bu zorlukları çözmesi beklenmektedir. Holografi, görüntü üretmek için bir lazer ışını kullanır. Bu kavram, renkli hareket holografisinde, meta-yüzey holografisinde, 3D holografik görüntülemede ve holografik tip iletişimde (HTC) kullanılmıştır. Çok akışlı holografik uygulamalarda bir mikrosaniyeden daha az iletim titremesi için zamanlama senkronizasyon ayarı gereklidir. Daha güvenilir uzaktan cerrahi, mevcut 5G sistemlerinde elde edilmesi son derece zor olan 1 ms'den daha az gecikme gerektirir. 5G araştırmalarında bazı ümit verici sonuçlar olsa da 6,5 km mesafede 1 Gbps elde edilmiştir. Bu, 26 GHz aralığında denenmiştir. Ancak bu, 1 Tbps mertebesinde tam holografik desteği etkinleştirmek için gereken gereksinimlerin altındadır. Bu nedenle, HC'deki en büyük zorluk yüksek veri hızı ve düşük gecikmedir. Sorunsuz HC elde etmek için, 5G sistemlerinde elde edilebilenden yüzlerce kat daha fazla olan son derece yüksek veri iletimi gereklidir (Imoize vd., 2021).

Holografik video göndermek gibi bazı yenilikçi uygulamalar, mmWave spektrumunda mevcut olmayan farklı bir spektrum bant genişliği gerektirmektedir. Bu nedenle, daha geniş bir frekans spektrum bant genişliği kullanmak zorunlu hale gelmiştir ve bu, THz ve alt bantları kullanılarak elde edilebilir. Yapay zekâ ve uç bilgi işleme (edge computing) algoritmaları tarafından desteklenen çeşitli mobil uygulamaların son zamanlardaki artışı, kablosuz iletişimin gelişimi hakkında potansiyel sunmaktadır (Mahmoud vd., 2021).

1 Tbps mertebesinde bir veri hızına ve ultra düşük veya sıfır gecikmeye sahip olması önerilen 6G ağlarıyla, HC ütopik bir teknoloji olmaktan çıkacaktır. Frekans spektrumunda daha yükseğe çıktıkça ve VLC gibi teknolojilerle daha yüksek veri hızlarına ulaşılacaktır. Gerçek zamanlı hologramlarla güçlendirilen bir ortamda, akıllı cihazların at arabaları gibi görünmesini sağlayabilir. En yüksek veri hızları 2030'larda Tbit/s'ye ulaşacak ve bu da muazzam bant genişliği kullanılabilirliği gerektirecektir. Büyük veri hızı, holografik ekranlar için gereken 240 Hz yenileme hızıyla 360 derecede 16K video çözünürlüğüne ola-

nak tanıyacaktır. 6G'nin, gerçek zamanlı verilerin havadan büyük miktarda iletilmesini desteklemek için bu gereksinimleri karşılaması beklenmektedir. Ayrıca, gelişmiş yapay zekâ teknikleriyle desteklenen 6G destekli XR teknolojileri ve hologramlar, uzaktan cerrahiyi ilerletmek için zaman ve mekân engellerini ortadan kaldırmaya yardımcı olacaktır (Imoize vd., 2021).

Holografik Işın Oluşturma (HBF) adı verilen yeni bir dinamik ışın oluşturma yaklaşımı, yazılım tanımlı anten ve enerji verimli mimariyi kullanır. MIMO sistemleri veya geleneksel faz dizileriyle karşılaştırıldığında önemli ölçüde farklılık gösterir. HBF'ler, dahili olarak aktif amplifikasyon kullanmayan pasif elektronik olarak yönlendirilen antenlerdir (Ahmad vd., 2024).

7.2.1.8. Dijital İkiz

Dijital İkiz terimi, verilerin mevcut bir varlık ile bir nesne arasında sorunsuz bir şekilde ileri geri aktarıldığı referansı ifade eder. Dijital İkiz, IoT ve gelişmiş veri analitiği tarafından mümkün kılınan Endüstri 4.0 kavramına öncülük eder ve üretim, sağlık ve akıllı şehirler gibi farklı sektörlerde kullanılır. IoT'nin zengin ortamı, tıbbi bakım, trafik yönetimi ve hata tespiti gibi birçok gelecek alandaki anormallikleri belirlemeye yardımcı olur. Bu sanal ikiz veya DT, esas olarak veri analitiği ve IoT olmak üzere iki mevcut alan arasındaki sorunsuz entegrasyon zorluğunun üstesinden gelinmesine yardımcı olabilir. Dijital İkiz ortamında, hızlı analiz için hassas veriler kullanılarak gerçek zamanlı kararlar alınabilir (Ahmad vd., 2024).

Sensörler, yapay zekâ ve iletişim teknolojileri kullanarak insanların, nesnelerin, yerlerin sanal bir kopyası üretilir ve sistemler taklit edilir. Kullanıcılar, holografik ekran ve VR cihazları aracılığıyla dijital kopyayla etkileşim kurabilirler. Turizmde, turistik yerlerin uzaktan deneyimi cerrahi ve eğitim alanında kullanım alanları olabilir. Cerrahlar organların dijital kopyalarını oluşturacak ve cerrahi simülasyonları gerçekleştirecektir. DT sistemleri ayrıca iş performansını artırabilir. Yapay zekâ, dijital kopyayla kendi kendini idame ettiren bir sistem oluşturabilir. Kuantum optik iletişimi ayrıca dijital kopyanın gerçekleştirilmesi için önemli bir etkinleştirme teknolojisi olabilir (Imoize vd., 2021).

DT, kendisine bağlı olan ve ilişkili bilgi içeriğini erişilebilir ve eyleme geçirilebilir hale getirebilen fiziksel bir sistemin dijital (sanal) bir kopyasını oluşturmaktır. Bir DT, bir sistemin yaşam döngüsünün birçok aşamasında kullanılabilir. Prototipleme aşamasında, sistemin fiziksel temsilini tanımlamak ve ardından üretmek veya geliştirmek için gerekli bilgileri sağlayarak yardımcı olabilir. Daha yaygın olarak, fiziksel sistemin sanal bir örneği olarak hareket eder ve ona bağlı kalır. Diğerlerinin yanı sıra, sistemin şeklini ve yapısını tasvir

eden 3D modeller, bileşenleri ve bunların çalışması hakkında bilgi ve gömülü algılama mekanizmaları aracılığıyla toplanan geçmiş, güncel ve tahmin edilen verileri içerebilir. DT'ler genellikle izleme, teşhis ve tanı amaçları için kullanılır. Ayrıca herhangi bir üretim ve iş sürecinin tasarım, geliştirme, test ve doğrulama aşamalarını da destekleyebilir (Han vd., 2023).

DT teknolojisinin kullanımıyla, mühendisler üretimden önce kavramları test etmek ve doğrulamak için fiziksel nesnelerin veya sistemlerin sanal kopyalarını oluşturabilirler. Dijital bir ikiz gerçek zamanlı olarak kullanılabilir ve gerçek karşılığıyla düzenli olarak veri senkronize ederek ve değiştirerek sistemlerle entegrasyonunu büyük ölçüde kolaylaştırabilir. Ayrıca, DT'ler geçmiş verileri kullanan ve büyük veri ve yapay zekâ teknolojisinden yararlanan teşhis veya tanı prosedürlerinde kullanılabilir. Yeni kavramları, tasarımları ve hizmetleri değerlendirme gerekliliği, 6G-IoT ağlarında DT'lerin konuşlandırılmasını güdüler (Polymeni vd., 2023).

İkizleme, tele-varlık, robotlardan ko-botlara (işbirlikçi robotlar), hiper bağlantılı esnek ağ altyapıları ve güvenilir gömülü ağlara kadar birçok alan odağa alınmış durumdadır. Bu yeni kullanım senaryolarıyla, 6G'nin fiziksel, dijital ve insan dünyalarını birbirine bağlaması ve siber-fiziksel sistemlerin bir sonraki gelişimini yönlendirmesi beklenmektedir. Üç dünyanın birleşmesi, yalnızca her yerde bağlantı ve güvenilir kontrol yoluyla fiziksel ve dijital dünyalar arasındaki bağlantıyı daha da sıkılaştıracaktır. İnsanlar ve ilişkileri dijital dünya tarafından tanınacak ve anlaşılacak, aynı zamanda fiziksel dünyada gerçek zamanlı etki yeteneğine sahip olacaktır (Han vd., 2023).

I4.0, siber-fiziksel sistemlerin, IoT ve bulut bilişimin üretim süreçlerine entegrasyonudur. Davranışlarını ve performanslarını simüle etmek, izlemek ve optimize etmek için kullanılabilen fiziksel varlıkların veya sistemlerin sanal kopyaları olan dijital ikizler, önemli potansiyele sahiptir. 6G kablosuz iletişim ağlarının, I4.0 ve DT'lerle ilgili olanlar da dahil olmak üzere çok çeşitli yeni uygulama ve hizmetleri desteklemesi beklenmektedir. I4.0, DT teknolojisinin ve 6G ağının yeteneklerinden faydalanabilirken, DT'ler ve 6G, performanslarını ve etkinliklerini iyileştirmek için I4.0 uygulamaları tarafından üretilen verileri kullanabilir. Endüstri hala DT'ler için birincil uygulama alanı olsa da giderek artan sayıda alanda şehir yönetimi, inşaat, sağlık ve otomotiv gibi alanlar ve siber-fiziksel sistemlerin ötesine geçerek insanların dijital kopyalarını oluşturmaya kadar uzanır. DT teknolojilerinin uygulanması, 6G ağının performansını ve gelişimini farklı yollarla da artırabilir. Daha spesifik olarak hem ortamların hem de ağ durumunun verimli gerçek zamanlı izlenmesini ve analizini sağlar, dinamik ağ işletimini ve yönetimini destekler ve 6G sistemlerinde kullanılabilen yapay zekâ modellerinin eğitimini iyileştirir (Han vd., 2023).

6G ağları, fiziksel ve sanal dünyaları entegre eden iletişim hizmetleri sağlayarak, insan toplumu, fiziksel dünya ve sanal dünya arasında kesintisiz etkileşimi mümkün kılarak yakından birbirine bağlı bir ağ alanı oluşturacaktır. 2030 ve sonrasında, mobil iletişim uygulama senaryoları DT dünyası ve yaygın zekâ bağlamında tamamen yeni özellikler sergileyecektir. Bu senaryolar, her yerde bulunan kablosuz bağlantıyı, büyük verileri ve yapay zekâ gibi yeni teknolojileri destekleyerek akıllı yaşam, akıllı üretim ve akıllı toplum gibi üç ana uygulama alanına yol açacaktır. Bu alanlar entegre hava-uzay-kara-deniz ağlarını, iletişim ve algılama bağlantısını ve akıllı etkileşimi kapsayacaktır. 6G ağları yalnızca iletişim işlevleri sağlamakla sınırlı kalmayacaktır (Cui vd., 2025).

7.2.1.9. Dokunsal (Tactile) İletişim (Dokunsal İnternet) ve Haptik Uygulamalar

IoT'nin geliştirilmesiyle akıllı cihazlar arasındaki etkileşim kurulmuştur. Bir sonraki adım, H2M etkileşimlerinin dokunsal sensörlerin yardımıyla gerçek zamanlı olarak gerçekleştirildiği "Dokunsal İnternet" olarak adlandırılır. Bu iletişim, insanların cihazları uzaktan algılamasını ve kontrol etmesini sağlar. Dokunsal internetin temel zorluklarından biri, herhangi bir fiziksel nesne olmadan cilt üzerinde basınç oluşturmaktır. Bu dokunma hissini üretmenin bir yolu, yoğun basınçlı ses dalgalarıdır. Dokunsal İnternet, askeri uygulamalarda yararlı olabilir. Çünkü dokunma hissi, çevrenin farkındalığını artırır ve düşük gecikmeli bir sistemle daha hızlı tepki sürelerine olanak tanır (Banafaa vd., 2022).

Yaralı bir hastanın duygularını yalnızca zihninde canlandırarak ifade edebildiği akıllı bir sağlık sisteminde, akıllı bir kafa bandı beyin sinyallerini yeniden yapılandırabilir ve bunu hastanın hayal gücünün 3D bir videosu olarak sunabilir ve mobil ağlar aracılığıyla bakıcıya gerçek zamanlı olarak iletişim kurabilir. Ayrıca, iletişim kurmak için ortak bir dili olmayan bir grup insan hayal güçlerini kullanabilir ve engelli kişiler aygıtları kontrol etmek için dokunsal iletişimi kullanabilir. Bu dokunsal iletişim yolları, onların bilgileri dokunma duyusuyla ifade etmelerini sağlayacaktır. Dokunsal iletişimin diğer senaryoları arasında, insanların çevreleriyle dokunsal iletişim yoluyla etkileşime girdiği ve insan duygularına yanıt veren beyne gömülü kablosuz çip gibi dijital aygıtlar aracılığıyla ortamı kontrol ettiği beyin kontrollü bilgisayar etkileşimleri yer alır (Bhat & Alqahtani, 2021).

Dokunsal ve haptik uygulamalar insan-makine etkileşimlerini ve makine-makine etkileşimlerini mümkün kılar. Dokunsal internet, makinelerle dokunsal etkileşimi mümkün kılarak görsel geri bildirim ve robotik kontrol sağlar. Bu, endüstri, robotik ve tele-varlık, sanal gerçeklik, artırılmış gerçeklik, sağlık hizmetleri, yol trafiği, eğitim ve kültür ve akıllı şebekede bulunan temel örneklerle verimli insan-makine etkileşimini ve makine-maki-

ne etkileşimini kolaylaştırır. Bu teknoloji, bir görevi yerine getirmek için insan varlığının gerekli olduğu yerlerde faydalıdır. Dokunsal internetin değerli bir uygulaması, cerrahların uzaktan ameliyat yapmasına olanak tanıyan tele-cerrahidir. Dokunsal internet ile ilgili en büyük zorluk, kesintisiz bir ağa ve minimum bir gecikmeye sahip olmaktır. Bunu başarmak için 1 ms'lik düşük gecikme gerekir ve bu durum dokunsal internet için birincil gerekliliktir. Bunun 5G'de elde edilebileceği öngörülmekle birlikte, mevcut 5G ağlarının 10-16 ms'lik bir gecikmeye sahip olması nedeniyle, 1 ms'den daha az gecikme süresine sahip olması önerilen 6G kablosuz ağlarının dokunsal internet ve dokunsal iletişimi mümkün kılması olasıdır. Ek olarak çok yüksek doğrulukla hassasiyet arzu edilir. Dokunsal internetin bir diğer arzu edilen özelliği de güvenliktir. 6G için önerilen bir etkinleştirme teknolojisi olan blok zinciri, emniyetli ve güvenilir bir dokunsal internet mimarisine olanak sağlayabilir (Imoize vd., 2021).

Dokunsal internet, dokunma duyusu aracılığıyla yeni bir insan-makine etkileşimi biçimi ortaya çıkarmayı amaçlayan yeni bir alandır. 6G teknolojisinin dokunsal internete uygulanması, yeteneklerini ve potansiyel uygulamalarını önemli ölçüde artırabilir. 6G, dokunmaya dayalı verilerin gerçek zamanlı, yüksek doğrulukta iletilmesini mümkün kılar. 6G ile, sanal ve artırılmış gerçeklik uygulamaları da dahil olmak üzere nesnelerin uzaktan kontrolüne ve yönetilmesine olanak tanıyan, gerçekçi bir dokunma simülasyonu sağlayabilen daha gelişmiş ve duyarlı dokunsal sistemler geliştirmek mümkün olabilir. 6G ayrıca, robotların ve diğer uzaktan kumandalı cihazların gerçek zamanlı tele-operasyonunu desteklemek için gereken yüksek hızlı ve düşük gecikmeli bağlantıyı sağlayarak daha hassas ve etkili kontrole olanak tanır. Ek olarak, 6G'nin uç (edge) bilişim ve THz iletişimi gibi gelişmiş iletişim teknolojileri, kompakt ve hassas dokunsal cihazların geliştirilmesini sağlayabilir. 6G teknolojisinin dokunsal internete entegre edilmesi, insan-makine etkileşimi için yeni olasılıklar çıkarabilir ve sağlık, oyun ve üretim endüstrileri için geniş kapsamlı etkilere sahip olabilir (Chataut vd., 2024).

6G ağlarında, çeşitli cihazlar arasındaki bağlantı gerçek zamanlı olarak oldukça etkileşimli (duyarlı) olacak ve buna dokunma duyusuyla gerçek zamanlı veri aktarımı, kontrol ve geri bildirim de dahil olacaktır. Burada, iletişim kurulan bilgiyle sanal olarak ilgili şeylerin canlı bir deneyimini sunmak için dokunma, duyu ve bilgiler iletilebilir. Daha spesifik olmak gerekirse, dokunsal internet bağlantısı, bir ses, video veya diğer yanıt biçimleriyle birlikte bir dokunma veya tat hissini içermektedir. Örneğin, astronotlara uzay tesislerinde eğitim vermek, su altı gemilerine erişmek ve sanallaştırılmış holografik modellerin yardımıyla uzaktan ameliyatlar yapmak, uzaktan eğitim ve ultra düşük gecikmeyle onarımlar yapmak için bir dokunma duyusuna ihtiyaç duyar. Dahası, kullanıcıların deneyimini geliş-

tirmek için koku ve tat iletimi, kullanıcıların gıdaya erişim deneyimlerini dijitalleştirmek için gıda endüstrisinin önemli bir hedefi olabilir. Örnek olarak, belirli bir yiyecek türünün reklamını iletirken, kokusu, dokusu ve tadı, yiyeceğin gerçek hissini vermek için gelişmiş sensör teknolojisi ve uygulamaların yardımıyla birlikte iletilebilir. 6G ağı, ultra yüksek veri hızı ve düşük gecikme süresi nedeniyle dikey endüstrilerin ihtiyacını karşılayabilir. Holografik dokunsal internet iletişimi ele alındığında, uzaktan iletim durumunda hologramın farklı yönleri, insan duyularına senkronize bir sürükleyici etki sağlamak için 6G ağları tarafından karşılanması gereken değişen miktarda gecikme (minimum ve maksimum gecikme gereksinimleri), güvenilirlik ve kullanıcı deneyimi gerektirebilir (Bhat & Alqahtani, 2021).

Robotik ve endüstriyel otomasyon uygulamaları, insanlar arasındaki ve siber-fiziksel sistemlerdeki insanlar ve makineler arasındaki iletişimi kolaylaştıran ağlar sayesinde olanaklı hale gelir. Endüstri 4.0 ve uzaktan endüstriyel yönetim, endüstriyel sistemlerin gerçek zamanlı yönetimi ve kontrolüne dayanır. Robotik, salınımlı hareketleri önlemek için gerçek zamanlı garantili kontrole ihtiyaç duyar. Üretimdeki gelişmiş robotik senaryoları, 100 µs'lik bir iletişim bağlantısında maksimum gecikme hedefine ve 1 ms'lik gidiş-dönüş tepki sürelerine ihtiyaç duyar. İnsan operatörler, uzaktaki makineleri VR veya holografik tip iletişimlerle izleyebilir ve kinestetik geri bildirim yoluyla harekete geçirme ve kontrolü de içerebilen dokunsal sensörler tarafından desteklenir (Tataria vd., 2021).

Diğer bir uygulama olan otonom sürüş, araçtan araca (V2V) veya araçtan altyapıya (V2I) iletişim ve koordinasyonla etkinleştirilir. Yol kazalarında ve trafik sıkışıklığında büyük bir azalmaya neden olabilir. Ancak, çarpışmadan kaçınma ve uzaktan sürüş için birkaç ms mertebesinde gecikme gerekir. Böylece, gelişmiş sürücü yardımı, araç konvoyu ve tam otonom sürüş, 6G'nin desteklemeyi ve olgunlaşmayı hedeflediği temel uygulama alanlarıdır. Henüz tam işlevli otonom araçlar olmadığından, önümüzdeki on yılda bu alanda daha fazla gereksinim ve uygulama ortaya çıkacaktır (Tataria vd., 2021).

Diğer bir uygulama alanı olan sağlık bakımı, tele-tanı, uzaktan cerrahi ve tele-rehabilitasyon, sağlık hizmetlerindeki birçok potansiyel uygulamadan birkaçıdır. Gelişmiş tele-tanı araçların yardımıyla, tıbbi uzmanlık ve danışmanlık, hastanın ve tıp uygulayıcısının konumundan bağımsız olarak her yerde ve her zaman mevcut olabilir. Uzaktan ve robotik cerrahi, bir cerrahın uzak bir konumda ameliyat edilen hastanın gerçek zamanlı ses-görüntü beslemelerini aldığı bir uygulamadır. Cerrah daha sonra robota ve robottan iletilen gerçek zamanlı görsel beslemeleri ve dokunsal bilgileri kullanarak ameliyat eder. Dokunsal İnternet, böyle bir iş birliğinin merkezinde yer alır (Tataria vd., 2021).

7.2.1.10. İnsan-Makine (Beyin-Bilgisayar) Arayüzü (HMI/BCI) ve İnsan Merkezli Hizmetler (HCS)

Beyin-bilgisayar etkileşimi (BCI), beyin ile bilgisayar arasında doğrudan bir bağlantı kurmayı ve bireylerin düşünceleri aracılığıyla makineleri yönetmeyi sağlamayı amaçlar. Fare veya klavye gibi geleneksel giriş cihazlarının aksine, bir BCI beyin sinyallerini çözer, yorumlar ve bunları bilgisayarın yürütebileceği kontrol komutlarına dönüştürür. BCI'lerin amacı, bireylere düşünceleriyle makineleri kontrol etme, örneğin protez bir uzuv veya tekerlekli sandalye kullanma yetkisi vermektir. 6G ağlarının daha yüksek veri aktarım hızları ve daha kısa gecikmeler sunması ve beyin sinyallerinin gerçek zamanlı olarak işlenmesini mümkün kılması öngörülmektedir. Bu, BCI'lerin etkinliği için çok önemlidir. Çünkü beyin sinyallerinin gerçek zamanlı işlenmesi ve analizi önem arz etmektedir. BCI'leri IoT ve yapay zekâ gibi diğer son teknolojilerle entegre etmek ve kişiselleştirilmiş BCI tabanlı çözümler de dahil olmak üzere BCI uygulamaları geliştirmek için yeni yaklaşımlar sunabilir (Chataut vd., 2024).

İnsanın dış çevreyi algılamak için görme, duyma, dokunma, koku alma ve tat alma olan beş duyusu vardır. Mevcut iletişimler metin, görüntü ve video gibi yalnızca optik ve ses ve müzik akustiğine odaklanır. Tat ve koku duyularının dahil edilmesi, gıda ve doku endüstrilerinde bazı yeni hizmetler getirebilecek bir deneyim sunabilir. Dokunsal iletişimin uygulanması daha önemli bir rol oynayacak ve uzaktan cerrahi, uzaktan kontrol ve sürükleyici oyun gibi çok çeşitli uygulamaları ortaya çıkaracaktır. Bu kullanım durumu, düşük gecikme konusunda katı bir gereklilik getirir (Jiang vd., 2021).

Dokunsal iletim ile birlikte beş duyu aracına görme, duyma, dokunma, koku ve tat dahil olmak üzere tüm insan duyu bilgileri entegre edilecektir. Bu teknoloji insan vücudundan ve çevreden gelen duyumları algılar ve duyumları nörolojik süreci kullanarak bütünleştirir. Daha sonra bilgi uzak bir konumdaki alıcıya aktarılır ve uzak bir ortama daha gerçek bir dalış sağlanır. Bu tür uzaktan ameliyat gibi çok duyulu uygulamalar, AR/VR veya HC'lerle birleştirildiğinde, 6G için yeni hizmetler oluşturacaktır. Bu sadece kablosuz, bilgi işlem ve depolama gibi mühendislik gereksinimlerini değil, aynı zamanda hizmet performansını birlikte belirleyen insan duyuları, biliş ve fizyoloji gibi algısal gereksinimleri de dikkate alan ortak bir tasarım gerektirir. BCI, önce belirli sayıda elektrotla insan zihninde üretilen sinir sinyallerini okur ve ardından bu edinilen sinyalleri bir makinenin anlayabileceği komutlara çevirir. Böylece kontrol veya diğer işlevler elde eder. BCI, beyin ile harici çevresel aygıtlar arasındaki bir iletişim yoludur ve akıllı şehirlerde, evlerde ve tıbbi sistemlerde günlük olarak kullanılan cihazları daha basit ve akıllı bir şekilde kontrol etmek için sunulan bir yaklaşımdır. Sağlık hizmetleri ve akıllı şehirler ve ev senaryoları-

nın ötesinde, BCI'nin son zamanlardaki gelişimi yeni kullanım senaryoları sunar. Dokunsal İnternet veya haptik iletişim ve duygu odaklı cihazların işlevlerinin kullanıcıların ruh hallerine uyabildiği ilgili fikirlerle birleştirildiğinde, BCI önemli 6G kullanım durumlarını oluşturacaktır. BCI, yüksek veri hızları, çok düşük gecikme süresi ve yüksek güvenilirlik gerektirir (Guo vd., 2021).

Akıllı vücut implantları ve BCI, 6G'de uygulanabilir. Mevcut sağlık uygulamaları protez uzuvları kontrol etmek veya beyin implantları kullanarak bir şeyi kontrol etmek gibi biyometrik implant cihazlarını kontrol etmekle sınırlıdır. 6G'de, kablosuz BCI ve akıllı vücut implantlarıyla arayüz, sağlık sisteminde değişiklik yapacak ve 6G özelliklerine ihtiyaç duyan yeni kullanım senaryoları sunacaktır. BCI, akıllı telefonlar yerine vücut implantları ve biyometrik cihazlar sayesinde bireylerin jestler, empati ve dokunsal etkileşim yoluyla çevreleri üzerinde kontrol kazanacaklarını gösterdi. Bu uygulamalar yüksek veri hızları, ultra düşük gecikme süresi ve yüksek güvenilirlik gereksinimleri gerektirir (Mahmoud vd., 2021).

BCI uygulamaları akıllı vücut implantları, akıllı gömülü cihazlar ve akıllı giyilebilir kulaklıkları içerir. BCI teknolojisinin yardımıyla beyin sinyallerini analiz etmek ve cihazlarla arayüz oluşturmak mümkün olabilir. BCI ve beş duyu bilgisinin aktarımı, insanın beş duyusu tarafından üretilen verileri çevreyle etkileşime olanak sağlamak için göndermek üzere 6G teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilecektir (Ahmad vd., 2024).

Modern sensörler tarafından doğrudan ölçülebilen konum, hız ve sıcaklık gibi fiziksel nesnelerin ve insan vücudunun fiziksel durumuna ek olarak, insan merkezli çalışma nedeniyle insanın zihinsel durumunu bilme ihtiyacı duyabilir. BCI konuşma sesi, yüz ifadeleri, tepki sinyali, göz hareketleri ve biyoelektrik sinyaller de dahil doğrudan gözlemlenebilir fiziksel özelliklerden kavrama, konsantrasyon, yorgunluk ve duygu gibi zihinsel durumu tespit etmeye yarar. Bu tür zihinsel durum bilgilerinin entegre edilmesiyle, insan davranışları tahmin edilebilecek şekilde geliştirilebilir. İnsan makine arayüzü (HMI) sayesinde, insanın bilgiyi algılaması için de yeni olasılıklar ortaya çıkar. Görme ve işitme en önemli insan duyuları olduğundan, görsel ve işitsel kullanıcı arayüzleri bilgiyi insanlara gönderen endüstriyel sistemler için önemli bir yaklaşım olmaya devam eder (Han vd., 2023).

7.2.1.11. Blokzincir ve Dağıtık Defter Teknolojileri (DLT)

Blokzincir, merkezi bir üçüncü tarafa olan ihtiyacı ortadan kaldıran merkezi olmayan bir eşler arası teknolojidir. Ağdaki her olay, tüm ağ katılımcıları arasında çoğaltılan ve senkronize edilen bir deftere kaydedilir. Ağdaki bir katılımcı, kimlik doğrulamayı etkinleştiren ve işlem doğrulamasını sağlayan bir genel-özel anahtar çiftine sahiptir. Blokzincirin

kriptografi ve kesinlik özellikleri güvenlik, gizlilik, değiştirilemezlik, şeffaflık ve izlenebilirlik sağlar. Blokzincir, sağlık, ulaşım, enerji, eğitim ve yönetişim de dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda potansiyel göstermiştir. Otonom sürüş, bilgi-eğlence ve gerçek zamanlı navigasyon gibi farklı araç uygulamalarına ilişkin olaylar, defterde işlem olarak kaydedilir (Ismail ve Buyya, 2022).

Başka bir tanımla blokzincir, karmaşık heterojen mimaride güvenliği, gizliliği, ölçeklenebilirliği ve güvenilirliği sağlamak için bir tür dağıtılmış defter teknolojisidir (Sharma vd., 2024). Blokzincir ve DLT teknolojisi birçok sektör için gelişme aşamasındadır. Verileri doğrulama boyutuyla merkezileştirmeden dağıtım sistemlerine geçiş açısından bu teknolojide potansiyel bulunmaktadır. Düşük gecikmeli ve güvenilir bağlantı, URLLC ve mMTC sinerjik bir karışımını gerektirir. 6G hizmetleri klasik URLLC, eMBB ve mMTC'yi dönüştürerek ve yeni hizmetler sunarak 5G'de olan isterleri yeniden tanımlayacaktır (Mahmoud vd., 2021).

Blokzincir teknolojisindeki veriler, birbirine bağlı kriptografik olarak korunan dağıtılmış bloklar halindedir. Blokzincir, 6G ağında büyük miktarda veriyi ve büyük ağları yönetmek için kullanılabilir. Ayrıca spektrum paylaşımına da uygulanabilir ve kullanıcıların aynı spektrumu kullanmasını sağlayarak 6G'deki büyük spektrum gereksinimlerini güvenilir, düşük maliyetli ve etkili biçimde karşılayabilir. Sıfıra yakın gecikme gereksinimi, mevcut 5G teknolojisi yerine 6G mobil teknolojisi tarafından karşılanabilir (Banafaa vd., 2022).

Blokzincir teknolojisi dağıtılmış bir güven sisteminin oluşturulmasını sağlar. Blokzincir, bilgi depolama, yönetme ve aktarma ve elektronik işlemleri yürütme konusundaki dağıtılmış ve güvenli yöntemi nedeniyle geleneksel yazılı sözleşme anlaşmalarıyla aynı düzeyde güven sağlar. Blokzincir, dağıtılmış IoT ortamında güvenlik sağlamak için yararlı olsa da, kullanımı yapay zekâ yöntemlerinin bir kombinasyonu ile daha da geliştirilecektir. Blokzincirin dijital kaydının, yapay zekâ tahminlerinin arkasındaki mantığı izlemek ve böylece insanların bunlara güvenmesini sağlamak için kullanılması, 6G sistemlerinde yapay zekâ ve Blokzincir kombinasyonunun bir faydası olacaktır. Yapay zekâ öğrenme modellerini arşivlemek ve dağıtmak için Blokzincir teknolojisini benimsemek, güvenliği artıracak bir denetim kaydı sağlayacaktır. Blokzincir ayrıca, yapay zekanın büyük miktarda doğrulanabilir veriye erişim sağlayarak yapay zekanın gelişimini kolaylaştırır ve böylece verdiği kararların güvenilirliğini artırır (Polymeni vd., 2023).

Blokzincir, dijital işlemlerin merkezi olmayan bir şekilde güvenli ve şeffaf bir şekilde kaydedilmesine olanak tanıyan bir sistemdir. 6G ağlarını blokzincir teknolojisiyle entegre etmek, bir dizi avantaj ve potansiyel uygulama sunar. Veri aktarım hızlarında öngörülen

iyileştirmeleri, daha düşük gecikme süresi ve artan şebeke kapasitesiyle 6G, karmaşık işlemlerin ve uygulamaların gerçek zamanlı işlenmesini destekleyebilir. 6G'de blokzincir teknolojisinin potansiyel kullanımlarından biri, iletişim ve işlemlerde güvenliği ve gizliliği iyileştirmektir. 6G ağlarının artan hızı ve kapasitesi, veri güvenliğini artırmak, siber saldırılara ve veri ihlallerine karşı koruma sağlamak için blokzincir tabanlı çözümlerin uygulanmasını sağlayabilir. Başka bir uygulama, blokzincir teknolojisini 6G ile entegre ederek merkezi olmayan platformların ve ağların geliştirilmesidir. 6G'nin gelişmiş hızı ve kapasitesi, finansal işlemler veya tıbbi kayıtlar gibi büyük miktarda hassas veriyi güvenli bir şekilde depolayan ve yöneten merkezi olmayan ağların oluşturulmasını destekleyebilir. Bu merkezi olmayan sistemler, merkezi sistemlere kıyasla gelişmiş güvenlik ve gizlilik sunabilir ve yeni hizmetlerin ve uygulamaların geliştirilmesini sağlayabilir. 6G hala gelişiminin erken aşamalarında olsa da blokzincir teknolojisinin 6G'deki potansiyel uygulamaları çok geniştir ve verileri iletme, depolama ve yönetme şeklini önemli ölçüde değiştirme potansiyeline sahiptir (Chataut vd., 2024).

7.3. 6G'de Yeni İsterler

6G, geliştirme hedefleri açısından, kapsayıcılık, her yerde bağlantı, sürdürülebilirlik, yenilikçilik, güvenlik, gizlilik, dayanıklılık, standardizasyon ve birlikte çalışabilirlik ve erişilebilirlik olarak bazı önemli hedeflere ulaşmayı amaçlamaktadır. Fiziksel ve sanal dünyaları daha iyi bağlayan, yeni kullanıcıları destekleyen ve yeni uygulamaları güçlendiren yeni bir dijital altyapı haline gelebilir. Performans göstergeleri açısından, kullanıcı deneyimi oranı, spektrum verimliliği, bölgesel trafik yoğunluğu, bağlantı yoğunluğu, hareketlilik, gecikme, güvenilirlik ve güvenlik/gizlilik/dayanıklılık performansı dahil olmak üzere geliştirilmiş yeteneklere odaklanır. Kapsama, algılama, yapay zekâ, sürdürülebilirlik, birlikte çalışabilirlik ve konumlandırmayı kapsayan kullanım durumlarını genişletmek için yeni işlevleri destekler (Cui vd., 2025).

5G için, önemli bant genişliği ve daha yüksek veri hızları, kapsamlı cihaz bağlantısı, olağanüstü güvenilirlikle minimum gecikme gibi belirli yüksek talep gereksinimlerini karşılamak üzere tasarlanmış eMBB, uRLLC ve mMTC'yi içeren esas olarak üç uygulama senaryosu vardı. 6G uygulamalarında daha fazla geliştirilmiş mobil geniş bant (feMBB), ultra büyük makine tipi iletişimler (umMTC) ve geliştirilmiş ultra güvenilir düşük gecikmeli iletişimler (euRLLC) yer almaktadır. 5G temeline dayanan üç senaryonun ötesinde, 6G'nin esas olarak meMBB, muRLLC ve MBRLLC'yi içeren birkaç yeni uygulama geliştirmesi sunması beklenmektedir (Ishteyaq vd., 2024).

7.3.1. Büyük Gelişmiş Mobil Genişbant

Büyük Gelişmiş Mobil Genişbant (meMBB), 6G ağları bağlamında, gelecekteki kablosuz iletişim sistemleri için öngörülen önemli bir ister ve yeteneği ifade eder. meMBB, önceki nesillere kıyasla önemli ölçüde daha yüksek veri hızları sağlamayı amaçlamaktadır. Ultra hızlı internet erişimi ve veri aktarımı sağlamayı, yüksek çözünürlüklü içerik akışı sağlamayı ve veri yoğun uygulamalarda sorunsuz bir şekilde çalışma amaçlamaktadır. Yüksek veri hızlarına ulaşmak için meMBB, spektrumun geniş ve önemli bir bölümüne erişim gerektirir. Daha önce kullanılmamış frekans bantlarının kullanımını veya veri iletimi için yeterli bant genişliği sağlamak üzere birden fazla frekans bandının bir araya getirilmesini içerebilir. meMBB'nin giderek daha fazla bağlantılı hale gelen bir dünyada cihazların yaygınlaşmasına uyum sağlayarak çok sayıda eşzamanlı bağlantıyı desteklemesi beklenmektedir. Buna yalnızca akıllı telefonlar ve tabletler değil, aynı zamanda çok çeşitli IoT cihazları ve sensörleri de dahildir. Yoğun sahne iletişim senaryosu, çok sayıda cihazın yüksek hızlı veri bağlantısına ihtiyaç duyduğu kalabalık veya yoğun nüfuslu alanlarda özellikle önemlidir. meMBB, olağanüstü veri hızları, önemli bant genişliği ve aynı anda bağlı çok sayıda cihazı destekleme kapasitesi sağlayarak kablosuz iletişimi ilerletme hedefiyle 6G ağları için öngörülen bir isterdir. meMBB uygulamaları, gerçek zamanlı yüksek çözünürlüklü video konferansı etkinleştirmeyi, otonom araçları ve dronları desteklemeyi ve gelişmiş bulut tabanlı oyun ve eğlence hizmetlerini kolaylaştırmayı kapsamaktadır (Ishteyaq vd., 2024).

7.3.2. Büyük Ultra Güvenilir Düşük Gecikmeli Haberleşme

Ultra Güvenilir Düşük Gecikmeli Haberleşme (uRLLC), ultra güvenilir, düşük gecikmeli iletişime öncelik veren bir iletişim hizmetleri kategorisidir. Son derece düşük gecikme ve yüksek güvenilirliğin kritik olduğu uygulamalar için tasarlanmıştır. Buna, veri iletiminde ufak bir gecikme veya hatanın bile ciddi sonuçlara yol açabileceği otonom araçlar, uzaktan cerrahi ve endüstriyel otomasyon gibi uygulamalar dahildir. (Ishteyaq vd., 2024) URLLC kullanımı, verilerin bağlantısı sırasında güvenilirliği ve gecikmeyi korumayı amaçlamaktadır. Öte yandan, 6G geleneksel URLLC'yi geliştirmeli ve eski mMTC ile 5G URLLC'yi karşılayabilen yeni bir büyük URLLC (mURLLC) hizmetine yol açan yeni bir boyut getirmeyi tasarlamaktadır. mURLLC'nin güvenilirlik gecikmesi-ölçeklenebilirlik dengesini bir sonraki seviyeye taşıması beklenmektedir (Mahmoud vd., 2021).

7.3.3. Mobil Geniş Bant Güvenilir ve Düşük Gecikmeli Haberleşme

Mobil Geniş Bant Güvenilir ve Düşük Gecikmeli Haberleşme (MBRLLC), mobil iletişimde güvenilirlik ve düşük gecikme özelliklerini birleştiren bir terimdir. Mobil genişbant, kullanıcıların hareket halindeyken internete erişmesini, medya akışı yapmasını ve çeşitli çevrimiçi hizmetleri kullanmasını sağlar. Düşük gecikme, çevrimiçi oyun, otonom araçlar, video konferans ve gerçek zamanlı endüstriyel otomasyon gibi uygulamalar için çok önemlidir. MBRLLC teknolojisi, çeşitli uygulamalar ve kullanım durumları için güvenilir ve duyarlı bir bağlantı sağlayarak hem güvenilirliği hem de düşük gecikmeyi vurgular (Ishteyaq vd., 2024). 6G uygulamaları XR, BCI ve CRAS gibi eMBB ve URLLC tarafından sunulamaz. Bunun nedeni, bu teknolojinin yüksek güvenilirlik, düşük gecikme ve son derece yüksek veri hızları gerektirmesidir. Mobil genişbant güvenilir düşük gecikmeli iletişim (MBRLLC) adı verilen yeni bir hizmet, 6G ağlarının hız-güvenilirlik-gecikme alanı içinde gerekli performansı sağlamasına olanak tanır (Mahmoud vd., 2021).

7.3.4. Diğer Bazı İsterler ve Tanımlamalar

Akıllı cihazlar, ultra güvenilir düşük gecikmeli iletişim (URLLC) ile karakterize edilen yüksek hızlı bağlantı gerektirir. 6G ağ iletişiminin temel gereksinimleri 1 THz'lik bir çalışma frekansı, 1 Tbit/sn'lik bir veri çıkışı, 300 μm'lik bir dalga boyu ve 1000 km'lik birçok yönlülük aralığını kapsar. 6G'nin tasarımı, zaman, mekân ve frekansı kapsayan üç boyutlu yönleri içerir. 6G iletişiminin gecikme bileşenleri, yani uçtan uca gecikme, yalnızca radyo gecikmesi ve işlemci gecikmeleri, sırasıyla 1ms, 10ns ve 10ns aralığındadır. 6G iletişim teknolojisi, yapay zekaya olan bağımlılığıyla karakterize edilir. Büyük genişbantlı makine tipi iletişim (mBBMT) ve hassas düşük gecikmeli makine tipi (mLLMT) iletişim uygulamaları hem geniş bir mobil bant genişliği ve hem de düşük gecikme süresi gerektirir. Çok geliştirilmiş mobil genişbant (FeMBB), son derece güvenilir ve düşük gecikmeli iletişimler (ERLLC), ultra büyük makine tipi iletişimler (umMTC), uzun mesafeli ve yüksek hareketlilikli iletişimler (LDHMC) ve çok düşük güç iletişim konuları önem arz etmeye başlamıştır (Raihan, 2023).

6G'de yeni performans ölçütleri klasik eMBB, uRLLC ve mMTC'yi dönüştürerek uygulama türlerini yeniden tanımlamak için yeni kullanım örnekleri, yani hizmet sınıfları sunacaktır. Mobil genişbant güvenilir düşük gecikmeli iletişim (MBRLLC), büyük URLLC (mURLLC), insan merkezli hizmet (HCS) ve çok amaçlı iletişim, bilgi işlem, kontrol, yerelleştirme ve algılama (3CLS) ve enerji hizmeti (MPS) tanımlamıştır. MBRLLC, eMBB ve uRLLC'yi bir-

leştiren oran-güvenilirlik-gecikme alanı içinde herhangi bir performans gerektiren hizmetler sağlar. Uygulama örnekleri AR/VR ve BCI'dir. mURLLC, 5G uRLLC'yi eski mMTC ile genelleştiren cihaz boyutunda klasik uRLLC'yi ölçeklendirir ve bu da güvenilirlik, gecikme ve ölçeklenebilirlik arasında bir takas ortaya çıkarır. mURLLC örnekleri klasik IoT, blokzincir ve otonom robotlardır. HCS, performansı büyük ölçüde ham oran-güvenilirlik gecikme ölçümlerinden ziyade insan kullanıcıların fizyolojisine ve eylemlerine bağlı olan insanlarla sıkı bir şekilde bağlantılıdır. Daha yüksek veri hızı sağlamak için daha fazla eMBB (FeMBB), daha düşük gecikme talebini karşılamak için aşırı URLLC (eURLLC), cihaz miktarını daha da ölçeklendirmek için ultra mMTC (umMTC), derin deniz gezilerini ve uzay seyahatlerini desteklemek için uzun mesafeli ve yüksek hareketlilikli iletişimler (LDHMC) ve e-sağlık ve nano-robotları etkinleştirmek için aşırı düşük güçlü iletişimler (ELPC) sunulmaktadır. 6G için döndürülmüş temel gereksinimler, her yerde bulunan mobil ultra genişbant (uMUB), ultra yüksek veri yoğunluğu (uHDD) ve düşük gecikmeli ultra yüksek hızlı iletişimlere (uHSLLC) yol açacaktır. uMUB, uzay ve karasal ağları entegre ederek her yerde ultra yüksek veri hızı ve ultra düşük gecikme sağlamayı amaçlamaktadır. uHDD büyük kablosuz kapasite ve yüksek güvenilirlik gerektirirken, uHSLLC ultra yüksek hızları ve ultra düşük gecikmeyi hedefler. Yeni hizmet sınıfları, birden fazla tek kısıtlamaya bağlı olan ve değişen ayrıntı düzeylerine sahip olan bileşik hizmetler sağlamayı ve yerelleştirme, haritalama, bilgi işlem ve gizlilik gibi yeni işlevleri desteklemeyi amaçlamaktadır (Guo vd., 2021).

6G ağı Ultra Mobil Genişbant (feUMBB), ultra Yüksek Algılama Düşük Gecikmeli İletişimler (uHSLLC), ultra Yüksek Yoğunluklu Veri (uHDD) hizmetleri, ultra Yüksek Enerji Verimliliği (uHEE), ultra Yüksek Güvenilirlik ve Algılama (uHRS), ultra Yüksek Güvenilirlik ve Kullanıcı deneyimi (uHRUx), ultra Düşük Gecikmeli Güvenilirlik ve Güvenlik (uLLRS), ultra Yüksek Güvenlik (uHS), ultra Yüksek Algılama ve Yerelleştirme (uHSLo) ve kullanım örneklerinin birkaç başka kombinasyonunu daha da geliştirecektir. Farklı dikeyler için 6G'nin farklı kullanım örnek ve alanları olacaktır. Bu durum, belirli dikeylerin kesişim noktasında kullanım örneklerinin bir kombinasyonunu gerektirir. Örneğin, uzaktan robotik cerrahi düşük gecikme (uRLLC) ve verilerin yüksek güvenliğini (uHS) gerektirecektir. Birden fazla kullanım durumu arasındaki bu karşılıklı bağımlılık, uLLRS (düşük gecikme, güvenilirlik ve güvenlik) olarak gösterilir. Benzer şekilde, birden fazla kullanım durumunun kesişimindeki (uHRS ve uHRUx gibi) durumlar da olasıdır (Bhat & Alqahtani, 2021).

Hesaplama Odaklı İletişimler (COC), Bağlamsal Olarak Çevik eMBB İletişimleri (CAeC) ve Olay Tanımlı uRLLC (EDuRLLC) isterleri gibi bazı öngörüler bulunmaktadır. COC, öğrenme yaklaşımları için belirli bir düzeyde hesaplama doğruluğu elde etmek üzere mevcut

iletişim kaynaklarına bağlı olarak hız-gecikme-güvenilirlik alanından kaynakların esnek bir şekilde seçilmesini sağlayacaktır. CAeC, ağ tıkanıklığına, trafiğe, topolojiye, kullanıcıların hareketliliğine ve sosyal ağ bağlamına uyarlanabilir eMBB hizmetleri sağlayacaktır. EDuRLLC, mekânsal-zamansal cihaz yoğunluklarının, trafik düzenlerinin ve altyapı kullanılabilirliğinin olduğu acil veya aşırı durumlarda çalışacak olan URLLC uygulamalarını hedeflemektedir (Ismail & Buyya, 2022).

7.4. 6G'nin Dikey Sektörlerde Yenilikçi Uygulamaları ve Bazı Kullanım Senaryoları

Yeni kullanım senaryoları genel olarak her yerde bağlantı, yapay zekâ ve iletişim ile entegre algılama ve iletişim tabanlı olacaktır. Her yerde bağlantı senaryosu, dijital uçurumu kapatmak amacıyla bağlantıyı geliştirmeyi amaçlamaktadır. Yapay zekâ ve iletişim senaryosu, dağıtılmış hesaplama ve yapay zekâ destekli uygulamaları destekleyecek ve yapay zekâ ile ilgili işlevselliklerden yararlanarak gelişmiş kullanım durumlarını mümkün kılacaktır. Entegre algılama ve iletişim senaryosu, bağlantısız nesneler ve bağlı cihazlar ve bunların hareketleri ve çevreleri hakkında mekânsal bilgi sağlayan geniş alanlı çok boyutlu algılama sunarak yeni uygulamaları ve hizmetleri kolaylaştıracaktır (Liu vd., 2023).

6G, güvenilir bir uzaktan izleme sistemi, uzaktan teşhis, uzaktan rehberlik ve uzaktan cerrahinin 6G tarafından kolaylaştırılabileceği akıllı sağlık hizmetleri sistemlerinin oluşturulmasına yardımcı olabilir. Yüksek veri hızına, düşük gecikme süresine, doğru yerelleştirmeye ve ultra güvenilirliğe sahip 6G, hem bakıma erişimi hem de bakım kalitesini iyileştirebilecek büyük miktarda tıbbi beş duyu verisinin hızlı ve güvenilir bir şekilde taşınmasına yardımcı olacaktır. Yapay zekâ ile iş birliği yapıldığında, veriler doktorlar tarafından doğru teşhis koymak için daha iyi analiz edilebilir. Blokzincir ile kişisel veriler, tıp alanındaki gelişmelere katkıda bulunmak için özel ve güvenli bir şekilde paylaşılabilir (Guo vd., 2021).

Akıllı eğitim ve öğretim, 6G kablosuz sistemlerinden faydalanacaktır. Zira HC'ler, beş duyu iletişimleri, yüksek kaliteli AR/VR, mobil uç bilişim ve yapay zekâ gibi yenilikler akıllı eğitim ve öğretim sistemlerinin oluşturulmasına yardımcı olacaktır. Öğrencilerin yapıları ve modelleri 3D biçimde görüntülemelerine ve hatta uzak bir konumda bir öğretmen tarafından eğitim görmelerine olanak tanır. Böylece etkileşimli ve sürükleyici bir çevrimiçi eğitim elde edilir. Eğitim için, holografide süreçleri göstererek ve nesnelerle veya diğer eğitmenlerle etkileşim kurarak, öğrencilerin daha fazla bilgiyi hatırlamalarına, yüksek

maliyetleri azaltmalarına ve geleneksel eğitim yöntemlerine göre tehlikeli ortamlarda bulunmaktan kaçınmalarına yardımcı olur. 6G ayrıca, verilerin sensörler tarafından toplandığı ve analiz edilmek üzere bulutlara veya uç bulutlara gönderildiği akıllı sınıflar oluşturulmasına da yardımcı olabilir. Daha sonra sonuçlar, öğrencilerle daha iyi etkileşim kurmak için eğitim kalitesini artırmak amacıyla kullanılabilir (Guo vd., 2021).

6G, elektrik, üretim, teslimat ve limanlar gibi çeşitli dikey endüstrileri kolaylaştıracaktır. Yapay zekaya dayalı olarak, 6G, ultra büyük bağlantı kabiliyeti ve ultra güvenilirliğiyle tam otomasyon sağlayacaktır. Bu durum, süreçlerin, cihazların ve sistemlerin otomatik kontrolünün 6G tarafından etkinleştirildiği anlamına gelir. Verileri bulutlara veya uç bulutlara ileterek ve verileri analiz ederek, otomatik üretimi elde etmek için akıllıca kararlar alınır. Bu süreçte, 6G tarafından hatasız veri aktarımı sağlanır. AR/VR/MR/XR/HC'lerin yardımıyla, 6G tarafından uzaktan bakım etkinleştirilebilir. Başka bir hizmet, çalışanların güvenliğini sağlamak ve maliyetleri azaltmak için makineleri uzaktan kontrol eden uzaktan kontrol anlamına gelir. 6G'nin titiz, düşük gecikmeli, geniş bantlı ve güvenilir iletimini gerektirir (Guo vd., 2021).

6G'nin üstün özellikleri, süper akıllı şehirlerin ve evlerin inşasını hızlandırmak için yaşam kalitesinde, akıllı izlemede ve otomasyonda önemli iyileştirmelere yol açacaktır. Bir şehir, şehir planlamasından çöp toplamaya kadar çok çeşitli endüstrilerden büyük miktarda veri toplayarak ve analiz ederek akıllı ve otonom bir şekilde çalışabildiğinde akıllı olarak kabul edilir. Böylece kamu kaynakları daha iyi kullanılabilir, vatandaşlara sunulan hizmetlerin kalitesini artırılabilir ve kamu yönetimlerinin operasyonel maliyetleri azaltılabilir. Akıllı mobil cihazların ve otonom araçların kullanımı şehirleri 6G'de daha akıllı hale getirecektir. Akıllı bir ev, insanların mobil cihazlardan bir dizi cihazı ve sistemi yönetmesine ve izlemesine yardımcı olmak için internet bağlantılı akıllı cihazlarla donatılmış bir konut veya bina değil, aynı zamanda anında ve dağıtıcı karar alma yeteneklerine sahip akıllı bir varlıktır. Ayrıca, insanlar ışığı, ısıyı veya multimedya eğlencesini sesle veya sadece zihinle, beyin-bilgisayar arayüzleri (BCI) ile kontrol edebilir veya bunların hepsini insanların hayatlarını daha güvenli ve kolay hale getirmek için davranışları analiz edebilen yapay zekaya bırakabilir. 6G, akıllı evi gerçeğe dönüştürebilir. Akıllı şehir/ev elde etmek için, çok sayıda sensör ve akıllı terminal gereklidir (Guo vd., 2021).

2030 ve sonrasında milyonlarca otonom araç ve dron, insanların ve malların güvenli, verimli ve yeşil bir şekilde hareket etmesini sağlar. Bağlantılı otonom araçlar, yolcuların ve yayaların güvenliğini garanti altına almak için güvenilirlik ve gecikme konusunda katı gereksinimlere sahiptir. İnsansız hava araçları, özellikle dron sürüsü, mobil ağlar için yıkıcı gereksinimler getirirken, çok çeşitli uygulamalar için olasılık sunar (Jiang vd., 2021).

Ekonominin gelişmesiyle birlikte, insanların faaliyet alanı ve hareketlerinin sıklığı önümüzdeki on yılda hızla artacaktır. Ticari uçaklar, helikopterler, yüksek hızlı trenler, yolcu gemileri ve diğer araçlarla seyahat eden yolcu sayısı çok büyük olacak ve gemide yüksek kaliteli iletişim hizmetlerine olan talep hızla artacaktır. 5G'ye kadar önceki nesillerdeki çabalara rağmen, yüksek hareketlilik, sık devir teslim, karasal ağların seyrek kapsamı ve sınırlı bant genişliği ve uydu iletişimlerinin yüksek maliyeti nedeniyle gemideki bağlantının çoğu durumda tatmin edici olmaktan uzak olduğu yadsınamaz. Yeniden kullanılabilir uzay fırlatma teknolojilerine ve uyduların büyük ölçekli üretimine güvenerek, büyük ölçekli uydu grubu veya takımyıldızlarının konuşlandırılması bir gerçeklik haline gelerek maliyet açısından verimli ve yüksek verimli küresel kapsama alanı sağlamaktadır. 6G'nin kesintisiz 3D kapsama alanı sağlamak için karasal ağlar, uydu takımyıldızları ve diğer hava platformlarının entegre bir sistemi olması beklenmektedir (Jiang vd., 2021).

Önceki nesil mobil iletişim sistemleri, özellikle iç mekan senaryoları olmak üzere yoğun metropol alanlarına odaklanmıştır. Ancak, uzak, seyrek ve kırsal alanlarda yaşayan büyük bir nüfusun temel BT hizmetlerine erişimi olmayabilir. Dahası, Dünya yüzeyinin %70'inden fazlası suyla kaplıdır ve denizcilik uygulamalarının büyümesi hem su yüzeyi hem de su altı için ağ kapsamını gerekli kılmaktadır. Bununla birlikte, yeterli kapasite, kabul edilebilir hizmet kalitesi (QoS) ve uygun maliyetle tüm gezegende kesintisiz kapsama sağlamak günümüzde gerçeklikten uzaktır. Bir yandan, karasal ağların okyanus, çöl ve yüksek dağlık bölgeler gibi uzak alanları ve zorlu topografyaları kapsaması teknik olarak imkansızdır. Seyrek nüfuslu bölgelerde karasal iletişim hizmeti sunmak ise oldukça maliyetlidir. Öte yandan, sabit yörünge (GEO) uydularının konuşlandırılması pahalıdır ve kapasiteleri uydu başına birkaç Gbps ile sınırlıdır. Bu nedenle GEO uyduları genellikle denizcilik ve havacılık endüstrileri gibi kullanıcı grupları için ayrılmıştır. Buna karşılık, büyük ölçekli alçak yörünge (LEO) uydularının konuşlandırılması, düşük maliyetli ve yüksek verimli küresel iletişim hizmetlerinin sunulmasına olanak tanıyacaktır. 6G sisteminin, küresel MBB kullanıcıları ve geniş alan IoT uygulamaları için her yerde bağlanabilirliği gerçekleştirmek amacıyla karasal ağlar, uydu takımyıldızları ve diğer hava platformlarının sinerjisinden yararlanması öngörülmektedir (Jiang vd., 2021).

8. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

21. yüzyılın ilk çeyreğini geride bırakırken, küresel haberleşme ekosistemi, sadece veri aktarım hızlarının arttığı teknik bir ilerleme sürecinden değil, toplumların üretim, yönetim ve iletişim biçimlerini kökten değiştiren tarihsel bir dönüşümden geçmektedir. 5G mobil haberleşme teknolojisi ve ufukta beliren 6G vizyonu üzerine inşa edilen bu rapor boyunca detaylandırılan bulgular, bu teknolojilerin birer lüks değil, ulusal rekabet gücünün, ekonomik egemenliğin ve toplumsal refahın temel belirleyicisi haline geldiğini ortaya koymaktadır. 5G teknolojisinin küresel benimsenme sürecine mercek tutulduğunda karşılaşılan tablo, homojen bir adaptasyondan ziyade stratejik vizyona sahip ülkeler ile tereddütlü politikalar izleyenler arasında giderek açılan bir makası işaret etmektedir. 4G LTE teknolojisinin yayılım hızına kıyasla dört kat daha hızlı bir benimsenme oranı yakalayarak 2024 sonu itibarıyla 2,25 milyar kullanıcıyı aşan 5G ekosistemi, Kuzey Amerika'dan Doğu Asya'ya, Körfez ülkelerinden Avrupa'ya kadar farklı hızlarda şekillenmektedir. Bu çerçevede, 5G'de başarı elde eden ülkelerin teknolojik altyapı yatırımı, yanında bu altyapıyı destekleyen düzenleyici çerçeveler, endüstriyel teşvikler vb. politikalarla bütüncül bir yaklaşım sergiledikleri görülmektedir.

Küresel arenadaki bu yarışta, Çin Halk Cumhuriyeti'nin uyguladığı devlet güdümlü model, önemli deneyimler sunmaktadır. "Made in China 2025" vizyonuyla uyumlu olarak 5G'yi yalnızca bireysel tüketiciler için hızlı internet sağlayan bir araç değil, aynı zamanda Endüstri 4.0'ın omurgası olarak konumlandıran Çin; 3 milyonu aşan baz istasyonu ve 750 milyonun üzerindeki kullanıcı tabanıyla, teknolojinin ölçek ekonomisine ulaştığında nasıl bir kaldıraç etkisi oluşturabileceğini kanıtlamıştır. Buna karşılık, serbest piyasa dinamiklerinin ve tüketici talebinin yön verdiği Kuzey Amerika pazarında işletmecilerin, fiber altyapının yetersiz kaldığı bölgelerde 5G'yi "Sabit Kablosuz Erişim" gibi ikame teknolojilerle kullanma başarısı, teknolojinin farklı coğrafi ihtiyaçlara göre nasıl esneklik gösterebileceğinin somut bir örneğini sunmaktadır. Ancak küresel tablo yalnızca bu başarı hikayelerinden ibaret değildir. Raporun analiz ettiği Avrupa Birliği örneği, 5G'ye geçiş aşamasındaki ülkeler için kritik uyarılar içermektedir. 450 milyonluk bir pazarda 30'dan fazla mobil şebeke işletmecisinin faaliyet gösterdiği, pazarın aşırı parçalı yapısı ve düzenleyici kurumların spektrum ihalelerini kısa vadeli birer "hazine geliri" kapısı olarak görme eğilimi, Avrupa'nın teknolojik liderliği ABD ve Asya'ya kaptırmasına neden olmuştur. Yatırımcıyı

cezalandıran, birleşmeleri engelleyen ve sadece tüketici fiyatlarını düşürmeye odaklanan miyopik düzenleme anlayışı, uzun vadede şebeke kalitesinin gerilemesine ve kıtanın sayısal altyapıda dışa bağımlı hale gelmesine yol açmıştır. Bu durum, altyapı yatırımlarının sürdürülebilirliği için işletmecilerin kârlılığını ve yatırım iştahını koruyacak "yatırım dostu" bir ekosistemin ne denli hayati olduğunu göstermektedir.

Gelişmekte olan ülkeler perspektifinden bakıldığında ise 5G, beraberinde getirdiği yüksek yatırım maliyetleri ve yoğun baz istasyonu gereksinimi nedeniyle "sayısal uçurumu" derinleştirme riski taşımaktadır. Raporda incelenen Filipinler örneği, altyapı mevcut olsa dahi, halkın alım gücünün ve sayısal okuryazarlık seviyesinin yetersiz olduğu durumlarda teknolojinin âtıl kapasiteye dönüşebileceğini göstermiştir. Bu durum, 5G'nin sadece bir mühendislik projesi olarak değil, aynı zamanda bir sosyo-ekonomik kalkınma projesi olarak ele alınması gerektiğini hatırlatmaktadır. Kırsal bölgelerin kapsama alanı dışında kalması, tarım teknolojilerinin ve uzaktan eğitim/sağlık hizmetlerinin bu bölgelere ulaşmasını engelleyerek, ülke içi gelir adaletsizliğini teknolojik bir boyuta taşıma riski barındırmaktadır. Dolayısıyla, 5G stratejileri belirlenirken sadece metropollerin değil, tüm ülke coğrafyasının kapsanmasını sağlayacak Evrensel Hizmet Fonu benzeri mekanizmaların ve işletmeciler arası aktif/pasif altyapı paylaşım modellerinin zorunlu kılınması, kapsayıcı bir kalkınma için faydalı olabileceği düşünülmektedir.

Türkiye'nin bu küresel denklemdeki konumu ise hem büyük fırsatları hem de yönetilmesi gereken hassas dengeleri barındıran özgün bir "kavşak noktası" olarak nitelendirilebilir. Ticari 5G hizmetlerinin belirlenen takvim içerisinde başlaması "Bağımsız Mimari" gibi daha gelişmiş standartlarla pazara girmek adına önemli bir avantaja dönüştürülebilir. Ancak bu avantajın kalıcı bir kazanım haline gelmesi, yerli üretim kabiliyetlerinin etkin kullanımına bağlıdır. Küresel tedarikçilerin hazır çözümleri kısa vadede kolay bir yol gibi görünse de, Türkiye'nin 'teknolojik bağımsızlık' hedefi, ulusal çözümlerin merkeze alınmasını gerektirmektedir. Bu noktada, ULAK Haberleşme'nin geliştirdiği uçtan uca yerli şebeke teknolojileri ve yerli ekosistemin sağladığı yetkinlikler, sadece birer alternatif değil, şebeke güvenliği ve sürdürülebilir ekonomik kalkınma için vazgeçilmez birer yapı taşıdır. Dolayısıyla ULAK ve yerli ekosistemin şebeke kurulumlarına entegrasyonu, teknik bir zorunluluktan öte, Türkiye'nin dijital geleceğini güvence altına alan stratejik bir öncelik olarak değerlendirilmelidir.

Türkiye'nin 5G stratejisinin odağı, doygunluğa ulaşmış ve bireysel tüketici pazarından ziyade, katma değerin asıl kaynağı olan kurumsal pazara ve endüstriyel uygulamalara kaydırılması daha iyi olabilir. Türkiye'nin güçlü üretim sanayisi, otomotiv sektörü ve tekstil kapasitesi, 5G'nin sunacağı düşük gecikme ve yüksek güvenilirlik özellikleri için ideal

bir uygulama alanı oluşturmaktadır. OSTİM ve Arçelik gibi öncü kuruluşlarda başlatılan özel endüstriyel ağ denemeleri, bu teknolojinin verimlilik üzerindeki çarpan etkisini göstermesi açısından umut vericidir. Almanya'nın sanayi devlerine kendi kampüs ağlarını kurma izni vererek elde ettiği verimlilik artışı, Türkiye için önemli bir referans noktası olmalıdır.

Raporun geleceğe yönelik olarak ele aldığı kritik başlıklardan biri, 5G yaygınlaşması sürerken eşzamanlı biçimde şekillenmeye başlayan 6G gündemi ve bunun doğuracağı yeni ağ paradigmasıdır. 2030'lu yıllarda ticarileşmesi beklenen 6G, 5G'nin yalnızca bir devamı değil; fiziksel ve dijital sistemlerin daha ileri seviyede bütünleşmesini hedefleyen yeni bir ağ evresi olarak görülmelidir. THz frekans bantlarının kullanımı, yapay zekânın şebekenin "beyni" haline gelerek kendi kendini yöneten ve onaran ağların ortaya çıkışı ve NTN'lerin (uydular, İHA'lar) sisteme entegrasyonu, iletişimi insan odaklı olmaktan çıkarıp "nesnelerin ve zekânın" iletişimine dönüştürecektir. Türkiye'nin 6G sürecinde yalnızca teknoloji uygulayıcısı değil, standart katkısı sunan ve fikri mülkiyet üreten bir aktör olabilmesi için hazırlıklarını bugünden hızlandırması stratejik önem taşımaktadır. Bu kapsamda, üniversiteler ve araştırma merkezleri bünyesinde 6G'nin temel yapı taşları olan yapay zekâ, kuantum haberleşme ve yeni nesil anten teknolojilerine yönelik Ar-Ge çalışmaları, kamu tarafından özel fonlarla desteklenmelidir. Çin, Güney Kore ve ABD'nin şimdiden 6G patent yarışına girdiği bir ortamda, Türkiye'nin uluslararası standart kuruluşlarında (ITU, 3GPP) daha aktif rol alması, teknik komitelere daha fazla uzman göndermesi ve fikri mülkiyet hakları konusunda agresif bir strateji izlemesi gerekmektedir. 6G vizyonu, sadece mühendislik fakültelerinin değil, sosyologların, hukukçuların ve ekonomistlerin de dahil olduğu çok disiplinli bir çalışma alanını gerektirmektedir; zira "Holografik İletişim" ve " Duyuların İnterneti" gibi kavramlar, mahremiyet, güvenlik ve etik alanlarında yepyeni tartışmaları beraberinde getirecektir.

Sonuç olarak, Türkiye'nin ve dünyanın önünde duran bu teknolojik eşik, sadece daha hızlı video izlemek veya daha hızlı dosya indirmekten ibaret değildir. Bu, otonom araçların güvenle trafiğe çıkabildiği, cerrahların kilometrelerce öteden ameliyat yapabildiği, fabrikaların karanlıkta kendi kendine üretim yapabildiği ve tarım arazilerinin sensörlerle konuşarak verimliliği maksimize ettiği yeni bir yaşam düzenine geçiş anlamına gelmektedir. Bu raporda sunulan analizler ışığında, Türkiye'nin 5G'yi başarılı bir şekilde yaygınlaştırması ve güçlü bir 6G hazırlığı için atması gereken adımlar, bütüncül bir "Milli Teknoloji Hamlesi"nin en kritik sütununu oluşturmaktadır. Kamu idaresi, yatırımı teşvik eden ve öngörülebilirliği sağlayan bir düzenleyici iklim oluşturmalı; özel sektör, kısa vadeli kâr baskısından sıyrılarak teknolojik inovasyona ve dikey sektör çözümlerine odaklanmalı; akademi

ise bu dönüşümü besleyecek nitelikli insan kaynağını ve yerli teknolojiyi üretmelidir. Önümüzdeki on yıl, bağlantı teknolojilerini sadece tüketen ülkeler ile bu teknolojileri üreten ve yöneten ülkeler arasındaki farkın, ekonomik refah açısından belirleyici olduğu bir dönem olacaktır. Türkiye, sahip olduğu genç nüfus, dinamik girişimcilik ekosistemi ve stratejik coğrafi konumuyla bu dönüşümün kazananları arasında yer alma potansiyeline fazlasıyla sahiptir. İhtiyaç duyulan tek şey, bu potansiyeli harekete geçirecek ortak akıl, kararlı irade ve stratejik iş birliğidir. Gelecek, ona bugünden altyapı kuranların olacaktır.

KAYNAKLAR

5G Americas. (2025a). 5G subscriber growth soars globally and in North America in Q1 2025. https://www.5gamericas.org/5g-subscriber-growth-soars-globally-and-in-north-america-in-q1-2025/#:~:text=As%20of%20Q1%202025%2C%20North,times%20higher%20than%20some%20regions.

5G Americas. (2025b). Global 5G Adoption Skyrockets to 2.25 Billion, Four Times Faster Than 4G. https://www.5gamericas.org/global-5g-adoption-skyrockets-to-2-25-billion-four-times-faster-than-4g/

5G in SEA: Regional Trends, Challenges and Outlook. (2024, 28 Kasım). https://southeastasiainfra.com/5g-in-sea-regional-trends-challenges-and-outlook/

Ahmad, I. A. I., Dawodu, S. O., Osasona, F., Akagha, O. V., Anyanwu, A. C. ve Onwusinkwue, S. (2024). 5G deployment strategies: Challenges and opportunities: A comparative review for Africa and the USA. World Journal of Advanced Research and Reviews, 21(01), 2428–2439.

Armuelles Voinov, I., Chung, J., Kettimuthu, R., Bordel, B., Alcarria, R., & Robles, T. (2022). A Review of the Solutions Ecosystem for 5G Systems on Rural and Remote Environments. 2022 17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), Information Systems and Technologies (CISTI), 2022 17th Iberian Conference On, 1–6. https://doi.org/10.23919/CISTI54924.2022.9820492

Ahmad, W., Batool, U., Aslam, MK. & Younas, W. (2024). Unveiling 6G Networks: Innovations, Challenges, and Future Research. Journal of Computing & Biomedical Informatics, 08(02). https://doi.org/10.56979/802/2025

ATU. (2025). ATU-R Report. https://atuuat.africa/wp-content/uploads/2025/01/ATU-R-Report-005-0-Report-on-5G-Preparedness-and-Relevant-Use-Cases-in-Africa.pdf

Azic, M., Bauer, J. M., Kauffman, S., Kwerel, E., LaFontaine, P., Ocker, J., Schwarz, M., & Stancill, M. (2024). Economics at the FCC 2023–24: Thirty Years of Spectrum Auctions, Open Internet Safeguards, Deployment of Advanced Telecommunications Capability, and Advancing Rural 5G Coverage. Review of Industrial Organization, 65(4), 831-874. https://doi.org/10.1007/s11151-024-10002-0

Banafaa, M., Shayea, I., Din, J., Azmi, MA, Alashbi, A., Daradkeh, YI. & Alhammadi, A. (2023). 6G Mobile Communication Technology: Requirements, Targets, Applications, Challenges, Advantages, and Opportunities. Alexandria Engineering Journal, 64, 245–274.

Bhat, JR. & Alqahtani, SA. (2021). 6G Ecosystem: Current Status and Future Perspective. IEEE.

Bloomberg HT. (2025a). 5G ihalesi 16 Ekim'de | Son dakika ekonomi haberleri. https://www.bloomberght.com/5g-ihalesi-16-ekim-de-3756043

Bloomberg HT. (2025b). 5G ihalesi tamamlandı | Son dakika ekonomi haberleri. https://www.bloomberght.com/5g-ihalesi-sonuclari-belli-oldu-3759382

Bloomberg HT. (2025c). Uraloğlu: 5G'nin bir yıl içinde bütün ülkeyi kapsamasını bekliyoruz. https://www.bloomberght.com/uraloglu-5g-nin-bir-yil-icinde-butun-ulkeyi-kapsamasini-bekliyoruz-3759273

Chang, L., Zhang, Z., Li, P., Xi, S., Guo, W., Shen, Y., Xiong, Z., Kang, J., Niyato, D., Qiao, X. & Wu, Y. (2022). 6G-Enabled Edge AI for Metaverse: Challenges, Methods, and Future Research Directions. Journal of Communications and Information Networks, 7(2).

Chataut, R., Nankya, M. & Akl, R. (2024). 6G Networks and the AI Revolution - Exploring Technologies, Applications, and Emerging Challenges. Sensors, 24, 1888. https://doi.org/10.3390/s24061888

China Mobile. (2023). Annual report 2023. https://www.chinamobileltd.com/en/ir/reports/ar2023.pdf

Chief Technology Officer (CTO). (2020). DoD 5G strategy implementation plan. U.S. Department of Defense. https://www.cto.mil/wp-content/uploads/2020/12/DOD-5G-Strategy-Implementation-Plan.pdf?

CMS. (t.y.). 5G regulation and law in South Korea. https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-5g-regulation-and-law/south-korea

CTIA. (2024). 2024 Annual Survey Report. https://www.ctia.org/news/2024-annual-survey-highlights

Cui, Q. M., You, X. H., Wei, N., et al. (2025). Overview of AI and Communication for 6G Network: Fundamentals, Challenges, and Future Research Opportunities. Sci China Inf Sci, 68(7): 171301. https://doi.org/10.1007/s11432-024-4337-1

D'Silva, M. H., Swer, R. T., Anbalagan, J., & Rajesh, B. (2017). Effect of radiofrequency radiation emitted from 2G and 3G cell phone on developing liver of chick embryo–a comparative study. Journal of clinical and diagnostic research: JCDR, 11(7), 5-9. https://doi.org/10.7860/JCDR/2017/26360.10275

Defense.gov. (2021). Department of Defense successfully demonstrates a 5G network for smart warehouse. https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/2650242/department-of-defense-successfully-demonstrates-a-5g-network-for-smart-warehous/?

Department of Defense (DoD). (2020). DoD 5G strategy implementation plan. U.S. Department of Defense. https://www.cto.mil/wp-content/uploads/2020/12/DOD-5G-Strategy-Implementation-Plan.pdf?

Dünya. (2025). 5G ihalesi başlıyor: 400 MHz için Turkcell, Türk Telekom ve Vodafone yarışacak. https://www.dunya.com/sektorler/teknoloji/5g-ihalesi-basliyor-400-mhz-icin-turkcell-turk-telekom-ve-vodafone-yarisacak-haberi-798697

Ekonomist. (2025). 5G uyumlu olmayan yaklaşık 63 milyon cihaz var: Gözler yerli üreticilerde. https://www.ekonomist.com.tr/teknoloji/5g-uyumlu-olmayan-yaklasik-63-milyon-cihaz-var-gozler-yerli-ureticilerde--66507

Ericsson. (2022). What do next wave 5G consumers want?. https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/consumerlab/reports/5g-next-wave

Ericsson. (2024). Ericsson Mobility Report. https://www.ericsson.com/4adb7e/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2024/ericsson-mobility-report-november-2024.pdf

Ericsson. (2024). North America: A closer look – Ericsson Mobility Report. https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/closer-look/north-america

Ericsson. (2025a). Mobile subscriptions outlook– Ericsson Mobility Report. https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/dataforecasts/mobile-subscriptions-outlook

Ericsson. (2025b). Regional subscriptions outlook - Ericsson Mobility Report. https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/dataforecasts/regional-subscriptions-outlook

Ericsson. (2025c). 5G network coverage outlook - Ericsson Mobility Report. https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/dataforecasts/network-coverage

European Commission. (2024a). The future of European competitiveness Part A | A competitiveness strategy for Europe. https://commission.europa.eu/document/download/97e481fd-2dc3-412d-be4c-f152a8232961_en?filename=The%20future%20of%20European%20competitiveness%20_%20A%20competitiveness%20strategy%20for%20Europe.pdf

European Commission. (2024b). The future of European competitiveness Part B | In-depth analysis and recommendations. https://commission.europa.eu/document/download/ec1409c1-d4b4-4882-8bdd-3519f86bbb92_en?filename=The%20future%20of%20European%20competitiveness_%20In-depth%20analysis%20and%20recommendations_0.pdf

European Parliamentary Research Service. (2021, Temmuz). Health impact of 5G. https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/690012/EPRS_STU(2021)690012_EN.pdf

European Parliament. (2019). 5G Deployment. Erişim adresi https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2019/631060/IPOL_IDA(2019)631060_EN.pdf

Federal Communications Commission (FCC). (2023). 5G FAST plan. https://www.fcc.gov/5G

Fradella, F. ve Sangiovanni, A. (2019, Nisan). Iliad's market entry and the 5G spectrum auction outcome could split the Italian mobile market in two. Erişim adresi https://www.analysysmason.com/globalassets/x_migrated-media/media/analysys-mason-quarterly---italian-mobile-market----apr2019.pdf

Galleto, F. A., Jr., Africa, A. D. M., De Leon, F. G., & Culaba, A. B. (2023). Fifth-generation networks: The adoption of technology in a developing country. *Science Engineering Journal (SciEnggJ), 16*(2), 310–320. https://doi.org/10.54645/2023162MIH-35

Globe. (2025). Globe Expands High-Speed Connectivity with 587 New 5G Sites in 2024. https://www.globe.com.ph/about-us/newsroom/corporate/587-new-5g-sites#gref

GSMA. (2022, 4 Temmuz). The Philippines is a Duopoly No More: Assessing DITO's Impact on 4G and 5G Performance. https://www.gsma.com/get-involved/gsma-membership/gsma_resources/the-philippines-is-a-duopoly-no-more-assessing-ditos-impact-on-4g-and-5g-performance/

GSMA. (2025). The Mobile Economy Europe 2025. https://www.gsma.com/solutions-and-impact/connectivity-for-good/mobile-economy/wp-content/uploads/2025/01/0125-Mobile-Economy-Europe-2025-web.pdf

GSMA Intelligence. (2024). The Mobile Economy: Global and Regional Reports (China, South Korea, USA, Japan). https://www.gsma.com/mobileeconomy

Guo, F., Yu, FR., Zhang, H., Li, X., Ji, H., & Leung, VCM. (2021). Enabling Massive IoT Toward 6G: A Comprehensive Survey. IEEE Internet of Things Journal. DOI:10.1109/JIOT.2021.3063686

Han, B., Habibi, MA., Richerzhagen, B., Schindhelm, K., Zeiger, F., Lamberti, F., Pratticò, FG., Upadhya, K., Korovesis, C., Belikaidis, IP., Demestichas, P., Yuan, S. & Schotten, HD. (2023). Digital Twins for Industry 4.0 in the 6G Era. IEEE Vehicular Technology.

Herkese Bilim Teknoloji. (2025). Türkiye'nin devlerinden Sanayi 4.0 için 5G iş birliği. https://www.herkesebilimteknoloji.com/haberler/teknoyasam/turkiyenin-devlerinden-sanayi-4-0-icin-5g-is-birligi

HTK. (2024). Türkiye'nin İlk Yerli Endüstriyel 5G Şebekesi OSTİM'de Kuruldu. https://www.htk.org.tr/turkiyenin-ilk-yerli-endustriyel-5g-sebekesi-ostimde-kuruldu-haberi-10333

How Many Islands are in the Philippines? (t.y.). Erişim adresi https://worldpopulationreview.com/metrics/how-many-islands-in-the-philippines

Huawei. (2024). The 5G Dynamics: Massive Adoption Drives Massive Monetization Opportunities. https://carrier.huawei.com/en/winwin/42/Perspectives/item1

Huawei Technologies. (2023). 5G+ Smart Manufacturing: White paper. https://www-file.huawei.com

Hürriyet. (2025). Türkiye prepares to launch 5G era. https://www.hurriyetdailynews.com/turkiye-prepares-to-launch-5g-era-214696

I. Armuelles Voinov, J. Chung, R. Kettimuthu, B. Bordel, R. Alcarria and T. Robles. (2022). A Review of the Solutions Ecosystem for 5G Systems on Rural and Remote Environments. 2022 17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), Madrid, Spain, 1-6. https://doi.org/10.23919/CISTI54924.2022.9820492

Information Technology and Innovation Foundation (ITIF). (2020, 27 Nisan). US national strategy for 5G and future wireless innovation. https://itif.org/publications/2020/04/27/us-national-strategy-5g-and-future-wireless-innovation/?utm

Imoize, AL., Adedeji, O., Tandiya, N. & Shetty, S. (2021). 6G Enabled Smart Infrastructure for Sustainable Society: Opportunities, Challenges, and Research Roadmap. Sensors, 21, 1709. https://doi.org/10.3390/s21051709

Iotinsider. (2025). Ericsson Mobility Report: GCC countries projected to have highest 5G penetration in 2030. https://www.iotinsider.com/industries/communications/ericsson-mobility-report-gcc-countries-projected-to-have-highest-5g-penetration-in-2030/

IPlytics. (2024). Who is leading the 5G patent race? https://www.iplytics.com/5g-patent-landscape/

Ishteyaq, I., Muzaffar, K., Shafi, N. & Alathbah, MA. (2024). Unleashing the Power of Tomorrow: Exploration of Next Frontier With 6G Networks and Cutting Edge Technologies. IEEE.

Ismail, L. & Buyya, R. (2022). Artificial Intelligence Applications and Self-Learning 6G Networks for Smart Cities Digital Ecosystems: Taxonomy, Challenges, and Future Directions. Sensors, 22, 5750. https://doi.org/10.3390/s22155750

ITU. (2022). 5G network security: Policy and regulatory frameworks. https://www.itu.int/en/ITU-D/Cybersecurity

ITU. (2023). Measuring digital development: Facts and figures 2023. https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics/Pages/facts/default.aspx

ITU. (2025). Press Release. https://www.itu.int/en/mediacentre/Pages/PR-2024-11-27-facts-and-figures.aspx

Japonya Ekonomi ve Sanayi Bakanlığı (METI). (2020a). Özel Yüksek İletişim Teknolojileri Sistemlerinin Geliştirilmesi, Tedariki ve Kurulumunun Teşvik Edilmesine İlişkin Kanun. https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/laws/5g_drone.html

Japonya Ekonomi ve Sanayi Bakanlığı (METI). (2020b). Ulusal 5G Geliştirme ve Tedarik Planı. https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/laws/5g_drone/deployment_plan_nationwide.html

Japonya Ulusal Bilgi İletişim Araştırma Kurumu (NICT). (2021). 5G/6G ve Kuantum Ağlar Hakkında Beyaz Kitap. https://www.nict.go.jp/press/2021/04/01-3.html

Japonya Ulusal Bilgi İletişim Araştırma Kurumu (NICT). (2023). 5G/6G Beyaz Kitap v3.0. https://beyond5g.nict.go.jp/download/index.html

Japonya Ulusal Bilgi İletişim Araştırma Kurumu (NICT) & Japon Radyo Endüstrisi Birliği (ARIB). (2023). Frekans Kaynak Geliştirme Sempozyumu 2023 – Beyond 5G / 6G Döneminde Kablosuz Sistemler ve Dijital İkizler. https://www2.nict.go.jp/wireless/fds/

Jiang, W., Han, B., Habibi, MA., & Schotten, HD. (2021). The Road Towards 6G: A Comprehensive Survey. IEEE ComSoc.

Kim, H., & Kim, Y. (2020). Spectrum policy and 5G deployment in South Korea: Lessons for global 5G leadership. Telecommunications Policy, 44(8), 102002. https://doi.org/10.1016/j.telpol.2020.102002

Korea Times. (2023). Korea's 5G users top 30 mil. in April: data. The Korea Times. https://www.koreatimes.co.kr/business/tech-science/20230606/koreas-5g-users-top-30-mil-in-april-data

Kung, A. Y., & Glenn, C. B. (2025, 2 Nisan). What's New in Wireless. Medya. https://www.mintz.com/insights-center/viewpoints/2776/2025-04-02-whats-new-wireless-april-2025?utm_source=chatgpt.com

Linebaugh, C. D. (2019). Overview of legal challenges to the FCC's 5G order on small cell siting (CRS Legal Sidebar No. LSB10265). Congressional Research Service. https://www.congress.gov/crs-product/LSB10265

Liu, R., Lin, H., Lee, H., Chaves, F., Lim, H. & Sköld, J. (2023). Beginning of the Journey toward 6G: Vision and Framework. IEEE Communications Magazine.

Low penetration slows Philippines' 5G adoption. (2025, 9 Ocak). https://www.bworldonline.com/technology/2025/01/09/645384/low-penetration-slows-philippines-5g-adoption/#google_vignette

Mahmoud, HH., Amer, AA. & Ismail, T. (2021). 6G: A Comprehensive Survey on Technologies, Applications, Challenges, and Research Problems. Trans Emerging Tel Tech., 32. John Wiley & Sons, Ltd. DOI: 10.1002/ett.4233

Manufacturing Institute. (2025). How 5G is Transforming the Manufacturing Landscape. https://www.themanufacturinginstitute.org/wp-content/uploads/2021/03/Manufacturing-Institute-5G-study.pdf

Market Research Store. (2025). AWS Marketplace: Global 5G Technology Market Size, Share 2032. https://aws.amazon.com/marketplace/pp/prodview-uoperjuvjzg34

Market.us. (2024). 5G Services Market Size, Share, Trends | CAGR of 43.6%. https://market.us/report/5g-services-market/

Ministry of Industry and Information Technology. (2024). National communication industry economic operation report. https://www.cnnic.com.cn/IDR/ReportDownloads/202505/P020250514564119130448.pdf

Ministry of Science and ICT. (2018, 18 Haziran). Korea successfully completes 5G frequency auction. https://english.msit.go.kr

Ministry of Science and ICT. (2019). Korea to Announce 5G+ Strategy Pledging to Provide World's Best 5G Service Based on World's First 5G Commercialization (Science, Technology & ICT Newsletter No. 41). https://www.msit.go.kr/eng/newsLetter/view.do?newsLetterSeqNo=41&searchOpt=

Ministry of Science and ICT, Republic of Korea. (2023). 5G implementation and policy update. https://english.msit.go.kr

National Telecommunications and Information Administration (NTIA). (2021). National strategy to secure 5G implementation plan and annexes. U.S. Department of Commerce. https://www.ntia.gov/other-publication/2021/national-strategy-secure-5g-implementation-plan?utm

Morris, A. (2018, Eylül). Italy 5G Auction Bids Top €4.4B in Worrying Sign for Telcos. Erişim adresi https://www.lightreading.com/mobile-core/italy-5g-auction-bids-top-4-4b-in-worrying-sign-for-telcos

Morris, A. (2019, Haziran). Germany raids telcos for €6.5B in epic 5G auction. Erişim adresi https://www.lightreading.com/mobile-core/germany-raids-telcos-for-6-5b-in-epic-5g-auction

NTT Docomo. (2023). Annual report 2023. https://www.nttdocomo.co.jp/english/corporate/ir/library/annual/

OECD. (2021a). China's efforts in technology self-reliance and global standards competition. https://www.oecd.org/digital/china-tech-competition.htm

OECD. (2021b). The Road to 5G Networks: Experiences and policy challenges (OECD Digital Economy Papers, No. 308). OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/3f4d0f50-en

OECD. (2024). OECD Digital Economy Outlook 2024. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/a1689dc5-en

Ookla. (2024). Speedtest Global Index. https://www.speedtest.net/global-index

Özaslan, M. A., & Karan, Y. (2021). 5G Baz İstasyonlarının Kapsama Alanına Yönelik Yol Kaybı Analizleri ve Konumlandırılması. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 4(1), 6-13. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1015580

Page, B. (2024, 26 Eylül). The Philippines' broadband market faces a shake-up as fixed wireless 5G surges. https://www.opensignal.com/2024/09/26/the-philippines-broadband-market-faces-a-shake-up-as-fixed-wireless-5g-surges

Park, S. (2021). International harmonization of 5G spectrum: South Korea's experience and implications. International Journal of Communication, 15, 2331–2354.

Polyeni, S., Plastras, S., Skoutas, DN., Kormentzas G. & Skianis, C. (2023). The Impact of 6G-IoT Technologies on the Development of Agriculture 5.0: A Review. Electronics, 12, 2651. https://doi.org/10.3390/electronics12122651

Podbevsek, M. (2020, Şubat). Challenges for 5G: spectrum assignment, investment, security and EMF at a conference in Brussels. Erişim adresi https://www.cullen-international.com/client/site/documents/FLTEEP20200006

Qadira, Z., Lea, KN., Saeedb, N. & Munawarc, HS. (2023). Towards 6G Internet of Things: Recent Advances, Use Cases, and Open Challenges. ICT Express, 9, 296–312.

Qualcomm Technologies Inc. (2023). 5G spectrum and use case leadership. https://www.qualcomm.com

Raihan, A. (2023). An Overview of the Implications of Artificial Intelligence (AI) in Sixth Generation (6G) Communication Network. Research Briefs on Information & Communication Technology Evolution (ReBICTE), 9(08). https://doi.org/10.56801/rebicte.v9i.164

Ramírez-Arroyo, A., López, M., Rodríguez, I., Damsgaard, S. B., & Mogensen, P. (2024). Multi-connectivity solutions for rural areas: Integrating terrestrial 5G and satellite networks to support innovative IoT use cases. Smart Agricultural Technology, 12, 101260. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101260

Scaramuzzi, E. (2025). 5G and beyond. https://www.cullen-international.com/client/site/documents/CTGTGO20250005

Sharma, S., Popli, R., Singh, S., Chhabra, G., Saini, G.S., Singh, M., Sandhu, A., Sharma, A. & Kumar, R. (2024). The Role of 6G Technologies in Advancing Smart City Applications: Opportunities and Challenges. Sustainability, 16, 7039. https://doi.org/10.3390/su16167039

SK Telecom. (2023). Sustainability report 2023. https://www.sktelecom.com/en/ir/financialInformation/annualReport.do

State Council of the People's Republic of China. (2021). The 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development of the People's Republic of China (2021–2025). http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm

Straits Research. (2025). 5G Devices Market Trends, Growth Drivers, and Future Outlook. https://straitsresearch.com/report/5g-devices-market

Tagami, A., Miyasaka, T., Suzuki, M. & Sasaki, C. (2023). Integration of Network and Artificial Intelligence toward the Beyond 5G/6G Networks. IEICE Trans. Commun., E106–B(12).

Tataria, H., Shafi, M., Molisch, AF., Dohler, M., Sjöland, H. & Tufvesson, F. (2021). 6G Wireless Systems: Vision, Requirements, Challenges, Insights, and Opportunities. IEEE.

Telecom Review. (2024). Regulatory Perspectives and Policies Influencing 5G Adoption in the Asia Pacific. https://telecomreviewasia.com/news/featured-articles/4085-regulatory-perspectives-and-policies-influencing-5g-adoption-in-the-asia-pacific

The Italian 5G auction: Why so expensive. (2018, 05 Kasım). Erişim adresi https://www.aethaconsulting.com/the-italian-5g-auction-why-so-expensive/

Tomás, J. P. (2023). South Korea ends 2022 with over 28 million 5G subscribers. RCR Wireless News. https://www.rcrwireless.com/20230207/5g/south-korea-ends-2022-over-28-million-5g-subscribers

TRT Haber. (2025). İşte "5G teknolojisi" ile ilgili merak edilenler. https://www.trthaber.com/haber/bilim-teknoloji/iste-5g-teknolojisi-ile-ilgili-merak-edilenler-922987.html

Turer, B., Yilmaz, M. (2022). Emerging Technologies in 5G Cellular Communication Systems. European Journal of Science and Technology, 36, 128-133. https://doi.org/10.31590/ejosat.1111312

UAB. (2021). Bilişim ve İletişim Sektörlerinde Yerli ve Milli Atılım Tüm Hızıyla Sürüyor. https://www.uab.gov.tr/haberler/bilisim-ve-iletisim-sektorlerinde-yerli-ve-milli-atilim-tum-hiziyla-suruyor

UAB. (2025). 5G'DEN HAZİNEYE DEV KATKI. https://www.uab.gov.tr/haberler/5g-den-hazineye-dev-katki

Verizon Communications. (2023). Annual report 2023. https://www.verizon.com/about/investors

Webb, W. (2018). The 5G Myth: When Vision Decoupled From Reality. De|G Press. https://books.google.co.uk/books?id=2Rl-DwAAQBAJ

Wen Zhou. (2025). Sanayi ve Bilişim Teknolojileri Bakanlığı: Çin'de 2024 sonu itibarıyla 5G baz istasyonu sayısı 4,251 milyon adede ulaştı. IT Home. https://www.ithome.com/0/827/387.htm

Wersényi, G. & Takács, O. (2024). Measurement Setup Considerations for Investigating Health Effects of 5G Exposure. 2024 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas, Biomedical Engineering and Electronic Systems (COMCAS), Israel, 1-5. https://doi.org/10.1109/COMCAS58210.2024.10666173

World Bank Group Korea Office. (2021). Entering the 5G Era: Lessons from Korea (Innovation and Technology Note Series No. 5). World Bank. https://documents1.worldbank.org/curated/en/852791623927787358/pdf/Entering-the-5G-Era-Lessons-from-Korea.pdf

Wübbeke, J., Meissner, M., Zenglein, M. J., Ives, J., & Conrad, B. (2016). Made in China 2025: The making of a high-tech superpower and consequences for industrial countries (MERICS Papers on China, No. 2). https://merics.org/en/report/made-china-2025

Yaralı, A. (2017). 5G Mobile: From Research and Innovations to Deployment Aspects. Nova Science Publishers. https://novapublishers.com/shop/5g-mobile-from-research-and-innovations-to-deployment-aspects/

Yu, G., Tang, Z., Chen, H., Chen, Z., Wang, L., Cao, H., Wang, G., Xing, J., Shen, H., Cheng, Q., Li, D., Wang, G., Xiang, Y., Guan, Y., Zhu, Y., Liu, Z. & Bai, Z. (2020). Long-term exposure to 4G smartphone radiofrequency electromagnetic radiation diminished male reproductive potential by directly disrupting Spock3–MMP2-BTB axis in the testes of adult rats. Science of The Total Environment, 698, 133860. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133860

Zeedan, A., Alsalemi, A., Allahham, E., Hussein, E., Hashem, S. and Choe, P. (2023). "Identifying Customer-Related Barriers to Widespread 5G Adoption in Qatar Using Correlation Analysis", ICTAR, V. 1, 59–61. https://as-proceeding.com/index.php/ictar/article/view/182/133