DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
FEN VE MÜHENDİSLİK DERGİSİ
Cilt/*Vol.*:18■ No/*Number*:3■Sayı/*Issue*:54■Sayfa/*Page*:606-623■ EYLÜL 2016/*Sep 2016*
DOI Numarası (DOI Number): 10.21205/deufmd.2016185425

Makale Gönderim Tarihi (Paper Received Date): 08.01.2016 Makale Kabul Tarihi (Paper Accepted Date): 29.06.2016

GEÇMİŞTEN GÜNÜMÜZE HÜCRESEL HABERLEŞME TEKNOLOJİLERİNİN GELİŞİMİ

(EVOLUTION OF THE CELLULAR COMMUNICATION TECHNOLOGY FROM PAST TO PRESENT)

Munip GEYLANİ[1], Musa ÇIBUK[2], Hanefi ÇINAR[3], Fikri AĞGÜN[4]

ÖZ

Haberleşme, tarihin ilk dönemlerinden bu yana insanoğlunun temel ihtiyaçları arasında yerini almıştır. 1897 yılında telsiz telgraf ile başlayan kablosuz haberleşmeyi, mobil telefon görüşmeleri takip etmiş ve hücresel haberleşmenin temelleri ortaya atılmaya başlamıştır. Ayrıca, hücresel haberleşmenin düşük maliyet, esneklik, hareketliliğe olanak sağlaması gibi birçok özelliği de bu teknolojinin hızla gelişmesine ve yayılmasına neden olmuştur. Gelişim sürecinin başlarında, iletim ortamı üzerinden yalnızca ses verisi iletilirken son dönemlerde multimedya verilerinin iletilmesi taleplerindeki yoğun artışlarla birlikte hücresel haberleşme teknolojilerindeki gelişim, önemli ölçüde hızlanmıştır.

Bu çalışmada hızla gelişen mobil haberleşme teknolojilerinden olan hücresel haberleşme sistemleri, birinci nesilden beşinci nesle kadar tarihsel bir bakış açısı ile ele alınarak yakın tarihteki teknolojik detayları ile irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: 1G, 2G, 3G, 4G, 5G, IMT-2000, IMT-Advanced, IMT2020, Hücresel Haberleşme Teknolojileri.

ABSTRACT

Communication has taken its place among the basic needs of mankind since the earliest period of history. Starting with wireless telegraph in 1897, wireless communication was followed by mobile phone calls; thus, cellular telecommunication started to be founded. Moreover, many features of wireless (mobile) communication like low cost, flexibility and mobility have led to the expansion and rapid growth of this technology. While only audio data could be transmitted in transmission medium at the very beginning of the development process, the development in the cellular communication has drastically accelerated with the increasing demands for data transmission.

In this paper, cellular telecommunications system which is one of rapidly evolving wireless (mobile) communication technologies has been thoroughly reviewed from a historical viewpoint, from first to fifth generation, with its recent technological details.

Keywords: *1G, 2G, 3G, 4G, 5G, IMT-2000, IMT-Advanced, IMT2020, Cellular Communication Technologies*

[1] Bitlis Eren Üniversitesi, Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, mgeylani@beu.edu.tr (sorumlu yazar)
[2] Bitlis Eren Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, mcibuk@beu.edu.tr
[3] Bitlis Eren Üniversitesi, Enformatik Bölümü, hcinar@beu.edu.tr
[4] Bitlis Eren Üniversitesi, Enformatik Bölümü, faggun@beu.edu.tr

1 GİRİŞ

İnsanoğlunun ilk kablosuz iletişim deneyimi Marconi tarafından 1897 yılında geliştirilen kablosuz telgraf ile başlamıştır[1]. Son yüzyılda hızla gelişen elektronik ve yarı iletken teknolojileri, haberleşmede önemli teknik gelişmeleri de beraberinde getirmiştir. Kablolu iletim ile başlayan telgraf, telefon ve internet haberleşmeleri, gelişen teknolojik imkânlar ile birlikte bazı alanlarda yerini kablosuz haberleşmeye bırakmıştır. Bilhassa telefon görüşmelerinin kablosuz ve hareketli olarak gerçekleştirilmeye başlanması ile birlikte kullanıcılara önemli avantajlar sağlamasından dolayı hızla yayılmış ve ses kalitesi, bant genişliği, kapsama alanı gibi kalite parametrelerine olan talep artmıştır. Bu bağlamda 1G (First Generation) adı ile anılan birinci nesil hücresel teknolojiler, zaman içerisinde 2G, 3G, 4G ve 5G teknolojilerinin gelişmesine öncülük etmiştir.

1975-1990 yılları arasında yaygın olarak kullanılan birinci nesil (1G) teknolojilerde yalnızca mobil telefon görüşmeleri baz alındığı için iletilen veri, temel olarak ses verisiydi. Tamamen analog sistemler olan 1G sistemlerinde Frekans Modülasyonunun (FM) kullanılması ve FDMA (Frequency Division Multiple Access) [2] tekniğinin yanında düşük bant genişlikli kanalların kullanılıyor olması veri aktarımını kısıtlamaktaydı. Teknolojik gelişmelerle birlikte 1990-2000 yılları arasında yaygın olarak kullanılan 2G sistemlerinde sayısal modülasyon tekniklerinin yanında TDMA (Time Division Multiple Access) [2] ve CDMA (Code Division Multiple Access) [2] teknikleri de FDMA tekniği ile birlikte kullanılmaya başlanmıştır. Bunlarla birlikte 1G'ye göre daha geniş frekans kanalları kullanımı gibi değişiklikler sayesinde 2G sistemleriyle daha kaliteli ses iletimi ve Kbps seviyelerinde veri iletimi sağlanmıştır. Mobil telefon kullanıcı sayısının artması ve artan veri aktarımı talepleri doğrultusunda bu teknikler de evrimleşerek üçüncü nesil (3G) teknolojilerinin doğmasına zemin hazırlamışlardır. 2000 yılı sonrası kullanılmaya başlayan 3G sistemlerinde gelişmiş modülasyon ve kodlama teknikleriyle beraber CDMA tekniğinin baskın olarak kullanıldığı görülmektedir. 3G sistemlerde kullanılan kanalların bant genişliği KHz seviyelerinden MHz seviyelerine çıkarılmıştır. Bunun yanında gelişmiş anten tekniklerinin de kullanılması 3G sistemlerinin gelişimine büyük katkı sağlamıştır. 2G sistemlerine nispeten yüksek (Mbps seviyelerinde) veri oranları elde edilerek görüntülü konuşma, video izleme ve müzik dinleme gibi özelliklerin kullanılmasına olanak tanınmıştır. Internet kullanımının yaygınlaşması, görüntülü konuşma, sosyal ağların kullanımındaki büyük artış, mobil veri tüketimine meyilli akıllı cihazların kullanımının yaygınlaşması gibi nedenlerle tüketicilerin kullanım alışkanlıkları ve beklentileri değişime uğramış artık ses trafiği yerine veri trafiği konusu ağırlıklı olarak gündeme gelmeye başlamıştır. 2012 yılı itibariyle kullanılmaya başlayan dördüncü nesil (4G) sistemleriyle daha ileri seviye modülasyon ve kodlama teknikleri, çoklu anten sistemleri ve çok daha geniş frekans kanalları kullanılmaya başlanmıştır. 4G sistemlerinde çoklu erişim teknikleri tamamen değişmiş ve OFDMA (Orthagonal Frequency Division Multiple Access) [3], [4] ve SC-FDMA (Single-Carrier FDMA) [5] gibi spektrum verimliliğine büyük katkısı olan teknikler kullanılmaya başlanmıştır. Mobil iletişimin işletmeciler için yeni iş alanları oluşturması ve kullanıcılar için kablolu iletişimin mekân sınırlamasını ortadan kaldırıyor olması nedeniyle ilerleyen yıllarda ihtiyaç ve uygulamalar da göz önünde bulundurularak gelişimine devam edeceği açıktır. Bununla birlikte kullanılmakta ve gelişimine devam etmekte olan 4G sistemlerinin yanında beşinci nesil (5G) mobil haberleşme teknolojilerinin gereksinim ve standart çalışmaları da sürdürülmektedir.

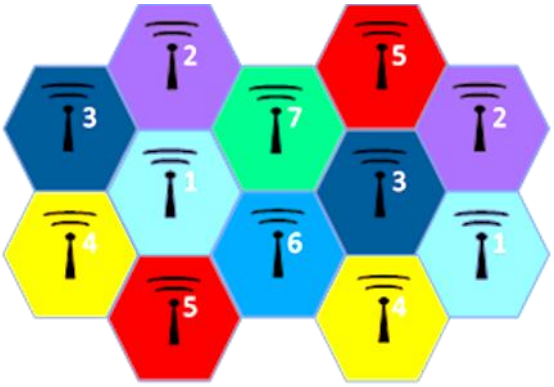
Bu çalışmanın 2. bölümünde yalnızca ses verisi iletebilen 1G (First Generation), 3. bölümde, düşük hızlarda veri iletimi olanağı sağlayabilen 2G ve 4. bölümde, günümüze kadar

yaygın olarak kullanılan 3G teknolojileri tarihsel bir bakışla ele alınacaktır. 5. bölümde, çok hızlı veri iletimine olanak sağlayan 4G teknolojileri detayları ile irdelenecek 6. bölümde, geliştirilmekte olan geleceğin yeni hücresel haberleşme teknolojisi olarak anılan 5G hakkında bilgi verildikten sonra 7. bölümde karşılaştırmalı olarak sonuç ve yorumlara yer verilecektir.

2 BİRİNCİ NESİL (1G) TEKNOLOJİLER

Hücresel haberleşme sistemleri, spektral verimlilik ve kullanıcı kapasitesinin arttırılması için geliştirilmiş bir tekniktir. Hücresel haberleşmede servis verilecek coğrafik alanı tek ve güçlü bir baz istasyonuyla beslemek yerine, küçük ve kapsama alanı daha düşük olan baz istasyonlarıyla (hücre) beslenmektedir. Her bir baz istasyonuna tüm sistemin mevcut kanallarının bir kısmı tahsis edilmektedir ve tahsis edilen bu kanallar komşu baz istasyonlarına tahsis edilen kanallardan tamamen farklıdır. Bir baz istasyonuna tahsis edilmiş frekans kanalı, kapsama alanının dışına çıkıldığı zaman başka bir baz istasyonuna tahsis edilebilir.

Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.'de her bir hücre grubu 7 baz istasyonundan oluşan hücre yerleşimi ve kanal tahsisi gösterilmiştir. Her bir renk farklı bir frekans kanal veya kanal grubunu temsil etmektedir. Burada aynı renk ve sayıyla gösterilmiş baz istasyonları, birbirine komşu olmadığı için aynı kanal veya kanal gurubunu kullanabilmektedir. Bu sayede tüm sistem için tahsis edilmiş frekans kanalları hücre grupları içerisinde birbirleri ile kesişmeyecek şekilde tekrar tekrar kullanılabilmektedir[6].



Şekil 1. Hücresel haberleşme sistemi örneği

1G hücresel haberleşme sistemlerinin ilk örneklerinden biri Temmuz 1978'de ABD'nin Chicago eyaletinde testlere başlayan ve 1979 yılında 1300 kullanıcı sayısına ulaşan AMPS (Advanced Mobile Phone Service) [7] sistemidir. Bunun dışında İskandinav ülkeleri için Ericsson ve Nokia işbirliği ile geliştirilen NMT (Nordic Mobile Telephone) [8] ile İngiltere için Motorola tarafından geliştirilen TACS (Total Access Communications System) [9] sistemleri 1G hücresel sistemlere örnek verilebilir. 1G sistemler çoklu erişim tekniği olarak FDMA kullanılmaktadır [10]. Kullanılan frekans aralığı ve bant genişlikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. 1G haberleşme teknolojilerine ait teknik özellikler

Nesil	Teknoloji	Max Veri Oranı (Kbps)		Çalışma Frekansı (MHz)	Band genişliği (KHz)	MIMO	Modülasyon	Çoklu Erişim	Dublex Modu
		DL	UL						
1G	AMPS	2.4	2.4	800-900	30	-	FM	FDMA	FDD
	TACS	2.4	2.4	450	25	-	FM	FDMA	FDD
	NMT	1.2	1.2	450	25	-	FM	FDMA	FDD

1G'nin kullanılmaya başlanmasıyla birlikte mobil teknolojiye ait pazar payı yıllık %30-50 oranında büyüme sağlayarak 1990 yılında 20 milyon civarında kullanıcıya ulaşmıştır. Tamamıyla analog sistemler olan birinci nesil mobil haberleşme sistemleri abone kapasitesi düşük, güvenlik ve performans açısından çok zayıf sistemler olarak anılmıştır. Bu teknikler oldukça düşük servis kalitesi ve verimsiz frekans spektrumu kullanımı gibi dezavantajlara sahiptir. 1G teknolojisinin, ses kalitesi, kapasite ve kapsama alanı gibi artan kullanıcı taleplerine cevap verememesi, yarı iletken ve mikrodalga teknolojilerinin gelişmesi ile birlikte 2G teknolojileri kaçınılmaz olarak gündeme gelmiştir[11].

3 İKİNCİ NESİL (2G) TEKNOLOJİLER

Artan abone sayısı, servis ihtiyacı ve yüksek servis kalitesi gibi gereksinimler, 2G teknolojisinin ortaya çıkmasına ön ayak olmuştur. Bunların yanında güvenlik desteği de sağlayan 2G sistemler 90'lı yılların başında sadece ses iletimi için kullanılmaya başlanmış ve daha sonra kısa mesaj servisi (SMS) ve veri iletimi amacı ile de kullanılmıştır. Dahası 2G için temel standart olan GSM (Global System for Mobile Communications) [12] ilk defa 1991 yılında, Finlandiya'da kullanıma sunulmuş [13] ve dünya çapında en yaygın olarak kullanılan 2. nesil hücresel haberleşme sistemi olmuştur [14].

GSM, 1G sistemlerine kıyasla daha yüksek kapasiteli bir sayısal haberleşme sistemidir. GSM, çoklu erişim tekniği olarak FDMA ve TDMA'yı birlikte kullanır. FDMA, maksimum 25 MHz olan GSM spektrumunu her biri diğerinden 200 KHz ile ayrılan 124 adet taşıyıcı frekansına ayırırken, TDMA ise her bir taşıyıcıyı 8 zaman dilimine ayırmaktadır. GSM ilk olarak 900 MHz frekansında çalışmaya başlamış ve sonrasında 1800, 1900 ve 800 MHz frekansları da kullanılmıştır. Bunların yanında Afrika gibi kullanıcı yoğunluğunun düşük olduğu bölgelerde çok büyük hücreli yapılarla kullanılmak üzere 450 MHz frekans bandının tercih edildiği örnekler de mevcuttur[15]. Avrupa'da yaygın olarak kullanılan GSM sistemiyle beraber Kuzey Amerika'da Digital AMPS (D-AMPS) [16], Qualcomm şirketi tarafından tasarlanan cdmaOne [17] ve Japonya'da PDC (Pacific Digital Cellular) [18] isimli benzer sistemler kullanılmıştır. PDC sisteminin düşük hareket kabiliyetine sahip olmasından dolayı çok fazla kabul görmemesi yeni teknoloji arayışlarını da beraberinde getirmiştir. Diğer yandan çoklu ortam servislerine gösterilen yoğun ilgi ve veri aktarımında yaşanan hızlı artış dolayısıyla devre anahtarlamalı ve çok düşük veri hızına sahip 2G sistemleri geliştirilerek HSCSD (High Speed Circuit Switched Data) [19] sistemi ortaya çıkmıştır. Mobil sistemlerde veri iletiminin değişken bir kanal trafiği oluşturması ve devre anahtarlama tekniği kullanılması nedeniyle ağ kaynaklarının verimli kullanımı olanaksız hale gelmiştir. Bundan dolayı 90'lı yılların sonundan itibaren veri trafiğini daha etkin bir şekilde yönetmek amacıyla paket anahtarlama tekniğini kullanan 2.5G sistemler kullanılmaya başlanmıştır. Bu sistemlere örnek olarak GPRS (General

Packet Radio System) [19] ve EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) [19] verilebilir. Bu teknolojilere ait detaylı bilgiler Çizelge 2'de gösterilmektedir.

Çizelge 2. 2G haberleşme teknolojilerine ait teknik özellikler

Nesil	Teknoloji	Max Veri Oranı Kbps		Çalışma Frekansı (MHz)	Band genişliği	MIMO	Modülasyon	Çoklu Erişim	Dublex Modu
		DL	UL						
2G	GSM	9.6	9.6	450, 800, 900, 1800,1900	200 KHz	-	GMSK	TDMA/FDMA	FDD
	D-AMPS	13	13	800, 1500, 1900	30 KHz	-	π/4-DQPSK	TDMA	FDD
	cdma-One	14.4 - 114	14.4-114	800, 1900	1.25 MHz	-	PSK	DS-CDMA	FDD
	PDC	9.6 - 28.8	9.6 - 28.8	800, 1500, 1900	25 KHz	-	π/4-DQPSK	TDMA	FDD
	HSCSD	57.6	57.6	800, 900, 1800,1900	200 KHz	-	GMSK	TDMA/FDMA	FDD
2.5G	GPRS	171,2	171,2	800, 900, 1800,1900	200 KHz	-	GMSK	TDMA/FDMA	FDD
	EDGE	384	384	800, 900, 1800,1900	200 KHz	-	GMSK 8PSK	TDMA/FDMA	FDD

EDGE, kanal koşullarının uygun olması durumunda belirtilen maksimum veri hızı değerlerini sağlamaktadır. EDGE, adaptif modülasyon ve kodlama (Adaptive Modulation and Coding - AMC) [20] kullanan bir teknolojidir. Kullanılacak olan modülasyon türünün GMSK veya 8PSK olması, geri besleme verilerine ve sinyal / gürültü oranına (Signal to Noise Ratio – SNR) göre değişmektedir. EDGE'nin veri artışındaki en büyük etken GMSK'dan 8PSK modülasyonuna geçilmiş olmasıdır. EDGE'de kanal koşulları uygun olduğunda 8PSK [21], gürültülü kanal koşullarında ise GMSK [22] modülasyonu kullanılır. Haberleşmede gecikme kısıtını dikkate alan GPRS ve EDGE gibi sistemler 2G sistemlerinde düşünülen ses iletimine ek olarak veri iletimini de sağlamayı hedefleyerek tasarlanmıştır. 1999 yılsonu itibarı ile dünyada 140 ülkede, 450 milyon mobil telefon kullanıcısının 250 milyonundan fazlasını GSM kullanıcıları teşkil etmekteydi. Artan kullanıcı sayısı ve gelişmiş haberleşme teknolojilerine olan ihtiyacın artması 3G teknolojilere geçişin zeminini hazırlamıştır.

4 ÜÇÜNCÜ NESİL (3G) TEKNOLOJİLER

Artan kullanıcı talebi doğrultusunda, 2G, GPRS ve EDGE gibi 2.5G sistemlerde istenilen yüksek haberleşme kapasitesini sağlayamamış ve daha gelişmiş veri iletim odaklı iletim mekanizmasına olan ihtiyaç doğrultusunda, üçüncü nesil yeni teknolojiler gündeme gelmeye başlamıştır. ITU (International Telecommunication Union) tarafından ihtiyaç duyulan bu 3G teknolojilerini aynı çatı altında toplamak amacıyla IMT-2000 (International Mobile Telecommunications 2000) standartlarını tanımlama çalışmalarına başlamıştır[23]. IMT-2000, ITU içinden ve ITU dışından (3GPP, 3GPP2, UWCC vb.) birçok kuruluşun işbirliğinin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. IMT-2000, tek bir standarda dayalı, katma değerli hizmetler ve uygulamalar sağlama yeteneği sunmaktadır. Sistem uyumlu, sabit, mobil, ses, veri, internet ve multimedya servislerini dağıtmak için bir platform öngörmektedir. Ana vizyonlarından biri sınır ötesi dolaşımlarda aynı numaranın ve el cihazının kullanılmasına olanak tanıyan, kesintisiz

küresel dolaşımı sağlamaktır. IMT-2000'den hareket halindeki bir düğümde 384 Kbps, sabit veya yürüme hızındaki bir düğümde en az 2 Mbps iletim oranları sağlaması beklenmiştir. IMT-2000 de esneklik, ekonomiklik, uyumluluk ve modüler tasarım gibi ilkeler hedeflenerek çalışmalar bu bağlamda yürütülmüştür. IMT-2000 altında altı tane radyo ara yüzü standardı tanımlanmıştır [24].

- IMT-2000 CDMA Direct Spread (IMT-DS)
- IMT-2000 CDMA Multi Carrier (IMT-MC)
- IMT-2000 CDMA TDD (IMT-TC)
- IMT-2000 TDMA Single Carrier (IMT-SC)
- IMT-2000 FDMA/TDMA (IMT-FT)
- IMT-2000 OFDMA TDD WMAN

1G teknolojilerinde FDMA, 2G teknolojilerinde TDMA baskın olarak kullanılırken, 3G teknolojisinde baskın radyo ara yüzü CDMA'in geniş bant versiyonu olan IMT-DS, IMT-MC ve IMT-TC olmuştur [10], [23], [25]. Yaygın olarak kullanılan iki tane 3G erişim tekniği mevcuttur. Bunlardan ilki Avrupa ve Asya'da kullanılan W-CDMA (Wideband CDMA) [26], [27] olup 3GPP (3rd Generation Partnership Project) tarafından geliştirilmiştir. Diğeri ise, Güney Kore ve Amerika'da kullanılan CDMA2000 [27],[28] olup 3GPP2 (3rd Generation Partnership Project 2) tarafından geliştirilmiştir. Burada bu teknikleri tarihsel gelişim süreçleri ile ele almak faydalı olacaktır.

Dünya genelinde en fazla kullanılan 3G tekniklerinden biri W-CDMA'dir. Bu teknik 3GPP tarafından Release 99 (sürüm 99)'da tanımlanmış olup IMT-2000'in IMT-DS standardına dayanmaktadır. Aslında W-CDMA tekniği, UMTS'nin (Universal Mobile Telecommunications System) bir parçasıdır. UMTS ise, Avrupa'da 3G teknolojisi olarak kullanılması planlanan üçüncü nesil mobil haberleşme sistemine verilen genel bir isimdir. Zaman içerisinde UMTS ve W-CDMA birçok yerde birbirinin yerine kullanılmaya başlanmıştır. 3G sistemleriyle kullanıcıların mobil olarak veri iletimi deneyimleri, kullanıcı sayısı ve beklentilerindeki artış ile beraber 3GPP Rel. 5 ile HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) [29],[30] ve Rel. 6 ile HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) [29],[30] tekniklerini geliştirmiştir. UMTS teknolojisinin gelişiminde en önemli basamak olan HSDPA ve HSUPA teknolojileri birlikte kısaca HSPA (High Speed Packet Access) [29][30] şeklinde isimlendirilmektedir.

3GPP Rel. 7 ile yeni modülasyon teknikleri ve çoklu anten sistemleri desteği gibi yeni özelliklere sahip HSPA+ [31] teknolojisini tanıtmıştır. HSPA+ için veri iletim hızı, bant genişliğinin arttırılması temeline dayanan kanal birleştirme (Channel Aggregation -CA) ya da taşıyıcı birleştirme (Carrier Aggregation-CA) [32],[33] tekniklerin de kullanılmaya başlamasıyla Rel. 8'de 42 Mbps değerine kadar yükselmiştir. Günümüzde Rel. 11'de tanımlanan taşıyıcı birleştirilmesiyle (20 MHz) DL veri oranı 336 Mbps çıkarılabilmiştir. Gelecekteki sürümlerde 4 katlı MIMO ve 8 taşıyıcı desteği ile (40 MHz) DL veri oranının 672 Mbps seviyelerine çıkarılabileceği ön görülmektedir [31]. W-CDMA'ın 2 Mbps veri oranıyla başlayan ve evrilerek HSPA+ Rev. 11 ile 336 Mbps oranında veri hızına ulaşan UMTS teknolojisinin artan kullanıcı talepleri ve gelişen yeni tekniklere paralel olarak evrilmeye devam edeceği açıktır.

Amerika ve Güney Kore'de benimsenen CDMA2000 standardı, 2G standardı olan cdmaOne (IS95)'nın geliştirilmesiyle elde edilmiştir. IMT-2000'nin IMT‑MC radyo ara yüzü standardına dayanmaktadır. Standart zaman içerisinde gelişen 1xRTT (1 times Radio Transmission Technology) ve EV-DO (Evolution-Data Optimized) Rev. 0, EV-DO Rev. A, EV-DO Rev. B, gibi teknikleri kapsamaktadır [34][35].

Bunlara rakip olarak Asya kıtasında, Çin Telekomunikasyon Teknoloji Akademisi (CATT) ve Siemens şirketi tarafından geliştirilmiş TDMA-CDMA tabanlı TD-SCDMA (Time Division Synchronous Code Division Multiple Access) [36] tekniği kullanılmıştır. Bu teknik IMT-TC radyo ara yüzü standardına dayanmaktadır [25][37]. Bunlara paralel olarak, GSM ve GPRS sistemlerinin geliştirilmesi ile EDGE (UWC-136) [38] elde edilmiştir. IMT-SC radyo ara yüzü standardına dayanmaktadır. Mevcut GSM ve IS-136 TDMA şebekeleri üzerinden 3G veri oranlarının sunulmasına olanak tanımaktadır [25]. Bu bölümde bahsi geçen 3G teknolojilerine ait teknik özellikler Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3. 3G haberleşme teknolojilerine ait teknik özellikler

Nesil	Teknoloji	Sürüm	Max Veri Oranı (Mbps)		Çalışma Frekansı (MHz)	Band genişliği (MHz)	MIMO	Modülasyon	Çoklu Erişim	Dublex Modu
			DL	UL						
3G	W-CDMA	Rel.99	2	0.384	1.600-2.500	5	-	BPSK, QPSK	CDMA	FDD
	HSPA	Rel.5-6	14.4	5.76		5	-	QPSK, 16QAM		
	HSPA+	Rel.8	42[5]	11[6]		2xCA=10	Var	QPSK, 16QAM, 64QAM		
		Rel.12	336[7]	70[8]		8xCA=40	Var			
	CDMA2000	1xRTT	0.144	0.144		1.25	-	BPSK, QPSK		
		EV-DO Rev.0	2.4	0.154		1.25	-	QPSK, 8PSK, 16QAM		
		EV-DO Rev.A	3.1	1.8		1.25	-			
		EV-DO Rev.B	4.9	1.8		1.25	-	QPSK, 16QAM, 64QAM		
			73.5	27.6		1.25, 15x1.25= 20	-			
	WiMAX	Rel 1.0	63.36[9]	28.22[9]	700, 2300-2400,2500-2690,3400-3600	5, 8.75, 10	4x2 e kadar	QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDMA	TDD

[5] 2xCA=10 MHz ile ya da 5 MHz'de 2x2 MIMO ve 64QAM ile
[6] 2xCA= 10 MHz ile
[7] 8xCA=40 MHz ve 2x2 MIMO ile
[8] 10 MHz 2x2 MIMO ve 64QAM ile
[9] 10 MHz ve 2x2 MIMO ile

	LTE	Rel.8	100[10]-300	50-75	700,800, 900, 1500, 1600, 1800-3800	1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz	4x4'e kadar	QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDMA SC-FDMA	FDD, TDD

Öte yandan Avrupa'da ETSI (European Telecommunications Standards Institute) tarafından DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications) Gelişmiş Sayısal Kablosuz Telefon Standardı geliştirilmiştir. Kasım 1999'da ITU-R (ITU- Recommendations) tarafından IMT-2000 olarak kabul edilen DECT [39], IMT-FT radyo ara yüzü standardına dayanmaktadır. Avrupa'da kablosuz telefonlara has 12 zaman dilimli TDMA kullanan bir sayısal telsiz standardıdır [25].

Ekim 2007 de ITU-R'nin yayınladığı ITU–R M.1457 tavsiyesiyle OFDMA tabanlı teknolojileri IMT-2000 portföyüne eklemiştir. Bu kapsamda 3G standartlarına eklenen WiMAX 802.16e [40], WiMAX teknolojisinin bir alt kümesidir. Bu standart ile OFDMA TDD WMAN radyo ara yüzünün IMT-2000 standartları arasına eklenmesiyle 5 olan radyo ara yüzü sayısı 6 ya çıkarılmıştır [24].

3GPP Rel. 8 ile GSM ve UMTS den tamamen farklı radyo ara yüzüne sahip olan LTE (Long Term Evolution) [41] teknolojisini tanımlamıştır. LTE'de gelişmiş farklı modülasyon türlerinin kullanılmasıyla mevcut 3G sistemlerinin veri iletim hızı ve kapasitesi artmıştır. LTE ilk olarak Aralık 2009'da Norveç ve İsveç'te servise başlamıştır. LTE teknolojisi veri indirme (DL-Down Link) için OFDMA tekniği ve veri gönderme (UL- Up Link) için SC-FDMA kullanmaktadır. 3G teknoloji şartlarının çok üstünde performans ve kapasiteye sahip olan LTE, 4G sistemlerinin geliştirilmesinde büyük katkı sağlamıştır [41].

5 DÖRDÜNCÜ NESİL (4G) TEKNOLOJİLER

4G teknolojileri iletişimde birçok yeniliği beraberinde getirmiştir. Kapasite ve hız konularında yaşanabilecek darboğazların önüne geçilmesi için, 4G teknolojileri sahip olduğu güçlü altyapısıyla elektronik haberleşme sektörünün gelişimine önemli katkılarda bulunmuştur. 4G tarafından sağlanması gereken hedeflerin genel çerçevesi, ITU tarafından IMT-Advanced olarak belirlenmiştir. ITU, IMT-Advanced olmaya aday olan teknolojilerin taşıması gereken özellikleri;

- İleri seviyeli hizmet ve uygulamaları desteklemek için veri iletim hızını artırmak (Yüksek hareketlilik gerektiren uygulamalar için 100Mbps, düşük hareketlilik gerektiren uygulamalar için 1Gbps'lik veri iletişim hızları düşünülmektedir),
- Yüksek seviyeli hizmet ve uygulamaların fiyat performans açısından kabul edilebilir düzeyde sunulması ile mobil uygulamaların herkes tarafından uygun fiyatlarla yaygın kullanılmasını sağlamak,
- IMT ailesinde yer alan mobil şebekeler ile sabit şebekeler için tanımlanmış servislerle tam uyumlu olmak,
- Telsiz erişim sistemleri ile birlikte çalışabilme kabiliyetine sahip olmak,
- Yüksek kaliteli mobil hizmetler sunmak,
- Kullanıcı terminallerinin dünya çapında kullanıma uygun olmasını sağlamak,
- Kullanımı kolay uygulamalar, hizmetler ve cihazlar sunmak,
- Dünya genelinde dolaşım yapabilme yeteneğine sahip olmak,

[10] DL 100 Mbps ve UL 50 Mbps 20 MHz ile

şeklinde tanımlanmaktadır[42]. 4G'ye geçiş için belirlenen yol haritasında 3GPP'nin standartlaştırdığı LTE ve IEEE'nin (Institute of Electrical and Electronics Engineers) standartlaştırdığı Mobil WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) teknolojileri başı çekmektedir. IMT-Advanced olabilmek için 3GPP, LTE-Advanced [41][43] ile IEEE ise WiMAX 802.16m [44] ile ITU'ya adaylık başvurusu yapmıştır. Her iki teknolojide ITU tarafından IMT-Advanced olarak kabul edilmiştir [45].

IMT-Advanced şartlarını sağlamak için 3 ayrı grup tarafından standardizasyon çalışmaları yapılmaya başlanmıştır. Bu çalışma grupları mevcut 3G teknolojilerini geliştirerek IMT-Adv olmaya çalışmışlardır.

- 3GPP, LTE'nin geliştirilmiş sürümü olan LTE-Advanced ile yoluna devam etmiştir. LTE-Adv, LTE-A ve LTE Rel.10 diye de adlandırılır [43].

- IEEE ise Mobil WiMAX (802.16m) standartlarını geliştirmektedir. Mobil WiMAX 2, Wireless-MAN-Advanced, IEEE 802.16m diye de adlandırılmaktadır [44].

- 3GPP2'nin CDMA2000 temeline dayalı EV-DO standartlarının yeni sürümü olan EV-DO Rev.C'yi geliştirmeye başlamıştır. UMB (Ultra Mobile Broadband) diye de adlandırılan standardın geliştirilme çalışmaları, 2008 yılında 3GPP2'nin ana destekçisi olan Qualcomm firmasının LTE ile yoluna devam edeceğini açıklaması üzerine durdurulmuştur. Grubun diğer üyeleri ise ya WiMAX ya da LTE ile yoluna devam etmişlerdir.

LTE Advanced ve Mobil WiMAX gibi 4G teknolojilerinde sönümlemelere karşı sağlam ve çoklu anten yapılarına daha uygun olmasından dolayı OFDM (Orthagonal Frequency Division Multiplexing) [46] temeline dayalı OFDMA [3][4] çoklu erişim tekniği tercih edilmiştir. Böylece frekans spektrumu çok daha verimli kullanılmış ve veri iletim hızında önemli artışlar sağlanmıştır. OFDM, mevcut frekans spektrumunu bir dizi halinde birbirine dik alt taşıyıcılara bölen çok taşıyıcılı bir iletim tekniğidir. OFDM tekniğini diğer çoklama türlerinden ayıran temel özellik, alt taşıyıcıların birbirine dik oluşudur. Alt taşıyıcıların birbirine dik oluşu hem taşıyıcılar arası girişim (ICI: Inter Carrier interference) oluşumunu engellerken hem de iletim bandının daha verimli kullanılmasını sağlamaktadır [45]. OFDMA tekniğinde ise farklı olarak alt taşıyıcılar, alt taşıyıcı gruplarına (alt kümelere) bölünür ve her bir alt taşıyıcı grubu farklı kullanıcılara tahsis edilebilmektedir. Yüksek bit oranına sahip veriler, birden fazla alt diziye bölündükten sonra her bir alt dizi ayrı alt taşıyıcı grupları üzerine bindirilerek iletilir. Burada her bir alt taşıyıcı grubu düşük sembol oranlarında QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) [21][47], 16QAM (16 Qadrature Amplitude Modulation) [21][47] veya 64QAM konvansiyonel modülasyon teknikleri kullanılarak modüle edilmektedir. Diğer taraftan LTE- Advanced, UL için SC-FDMA tekniğini kullanmaktadır. SC-FDMA frekans bölgesinde tek taşıyıcılı modülasyonun çok kullanıcılı uyarlamasıdır. OFDMA'da veri ayrı alt taşıyıcılarda paralel olarak iletilirken SC-FDMA'da alt taşıyıcıları gruplandırarak tek bir taşıyıcıymış gibi verinin seri iletilmesini sağlamaktadır. SC-FDMA teknolojisini ana amacı, OFDM teknolojisine göre düşük PAPR (Peak-to- Average Power Ratio - Tepe güç/Ortalama Güç Oranı) ile iletimi sağlamaktır. Böylelikle kullanıcı tarafında enerji verimliliğine büyük katkılar sağlanmış olur. LTE-Advanced, DL için OFDMA tekniğini kullanmaktadır. Mobile WiMAX'de ise hem DL hem de UL için OFDMA tekniği kullanılmaktadır.

Çoklu anten sistemleri (Multi Input Multi Output - MIMO) [48], [49] ile spektral verimlilik önemli oranda arttırılmıştır. Örneğin UMTS sistemlerinde 4 seviye MIMO kullanılmasıyla spektral verimlilik 4 katına kadar artmaktadır ve W-CDMA teknolojisinden 10 kat daha fazla kullanıcıya hizmet verebilmektedir. MIMO ile kullanılan anten sayısı arttıkça veri hızları da buna paralel olarak artış göstermektedir. MIMO, LTE-Advanced ve Mobil WiMAX gibi 4G teknolojilerinde kullanılan ve ileri nesil standartlarda üzerinde yoğun çalışmalar yapılacak önemli temel tekniklerden biridir.

LTE-Advanced Rel. 10 ile 8X8 MIMO tekniklerini desteklemektedir. Mobil WiMAX'te çok kullanıcılı MIMO üzerinde genişletilmiş ve geliştirilmiş MIMO modlarıyla DL için 8, UL için de 4 (8x4) veri akışı desteklenmiştir. WiMAX Release 2.1 ile 2017 yılı için 8x8 MIMO, 256 QAM ve taşıyıcı birleştirme tekniklerini temel özellikler olarak belirlemiştir [50].

Kablosuz haberleşme sistemlerinde mobil kullanıcılar ile, erişim şebekesi arasında veri iletimi tek yönlü ya da çift yönlü olarak gerçekleşmektedir. Çift yönlü haberleşme Zaman Bölmeli (Time Division Duplexing - TDD) [51] ve Frekans Bölmeli (Frequency Division Duplexing- FDD) [51] olmak üzere iki farklı şekilde yapılabilmektedir. TDD modunda gönderme ve alma işlemi bir frekans bandı üzerinden paylaşımlı olarak yapılırken FDD modunda ise gönderim ve alım işlemi için farklı frekans bantları kullanılmaktadır. Her iki iletim modunun da kendine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. FDD, TDD'ye göre büyük veri iletimi, yüksek mobilite, düşük gecikme, kapsama alanı gibi konularda üstün iken maliyet, karmaşıklık, MIMO antenlerle çalışabilme ve dinamik bant genişliği tahsis edememe yönüyle dezavantajlıdır. LTE-Advanced ve Mobile WiMAX, TDD ve FDD'nin her ikisini de kullanabilmektedir. Fakat sektörde TDD modunun Mobile WiMAX'le FDD modunun ise LTE-Advanced ile özdeşleştirilmiş durumda olduğu görülmektedir. Her iki teknolojinin sonraki sürümlerinde desteklemediği modu desteklemeye başlaması piyasada rekabeti arttırmıştır. Teknolojiler arasındaki farklıkların azalması, spektrum kullanım hakkını elinde bulunduran veya kullanım hakkını yeni elde edecek olan işletmecilerin teknoloji tercihlerini zorlaştıracak gibi görünmektedir [45].

IMT-Adv için önemli gereksinimlerden biri azami frekans genişliği 100 MHz olacak şekilde farklı frekans genişliklerinde hizmet sağlanmasıdır. Bu nedenle IMT-Advanced teknolojileri beklenen veri hızını sağlamak için farklı frekans bantlarının birleştirilmesi yoluna gitmişlerdir. Bu gözlemlere dayanarak LTE-Adv ve Mobil WiMAX standartları IMT-Adv'nin 4G gereklerini karşılama adına planladıkları yol haritalarının en önemli özelliklerinden birisi CA tekniklerini kullanıyor olmasıdır [32], [33]. LTE-Adv. teknolojisi UL ve DL için esnek frekans bantları kullanmaktadır (1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz). Böylece eskiye dönük uyumluluk sağlanmakta, yeni LTE networkü ve eski network şebekesinin (HSPA, GSM gibi) her ikisi üzerinden veri iletebilmektedir. Taşıyıcı birleştirmeyle 100 MHz'e kadar bant genişliği kullanabilmektedir. Mobil WiMAX, genel olarak çalıştığı frekans bantları 2.3 GHz, 2.6 GHz ve 3.5 GHz şeklindedir[52]. 5, 7, 8.75, 10 ve 20 MHz band genişliğine sahip kanallar kullanılmaktadır[53]. IEEE 802.16m, 100 MHz'e kadar etkin bir bant genişliği sağlamak için komşu ya da komşu olmayan kanallarda, kanal birleşimini desteklemektedir. Kanallar, aynı bant genişliğinde veya aynı frekans bandında olmak zorunda değildir. Bu özellik operatörlere, çoklu kanallara veya lisanslara erişebilmesine olanak sağlayarak tekli kanallarla elde edilemeyecek kadar çok yüksek veri hızlarına imkân sağlamaktadır. Örneğin birkaç 20 MHz'lik kanal birleşimiyle 1Gbps'lik veri hızı elde edilebilecektir[54].

4G sistemlerinde taahhüt edilen veri oranlarını elde edebilmek için çok seviyeli modülasyon tekniklerinin kullanılması önemli kilometre taşlarından biridir. Spektral verimliliği, Polarizasyon-Bölmeli Çoğullama (Polarization - Division Multiplexing, PDM) kullanmadan 1bit/s/Hz üstüne çıkarabilmek için çok düzeyli sinyalizasyon tekniklerinin kullanılması şarttır[55]. LTE-Adv. Rel. 10 ve Mobil WiMAX 2.0 UL ve DL için QPSK, 16QAM, 64QAM modülasyon tekniklerini kullanmaktadırlar [53], [56] [57]. ITU'nun 4G teknolojileri olarak kabul ettiği LTE-Adv ve Mobil WiMAX teknolojileri taahhüt ettikleri mobil DL hızlarını karşılayabilmek ve ötesine erişebilmek için yeni teknikleri araştırmakta ve uygulamaktadırlar. LTE-Adv Rel.12 ile 256QAM modülasyon tekniğinin desteklemeye başlamıştır [58], Mobil WiMAX ise 2017 yılı için 8x8 MIMO, 256 QAM ve taşıyıcı birleştirme tekniklerini temel özellikler olarak belirlemiştir[50]. LTE-Advanced ve Mobil WiMAX'e ait teknik detaylar Çizelge 4'de paylaşılmıştır.

Çizelge 4. 4G haberleşme teknolojilerine ait teknik özellikler

Nesil	Teknoloji	Sürüm	Max Veri Oranı (Gbps)		Çalışma Frekansı (MHz)	Band genişliği (MHz)	MIMO	Modülasyon	Çoklu Erişim		Dublex Modu
			DL	UL					DL	UL	
4G	Mobil WiMAX	Rel. 2.0 ve üstü sürümlerde tanımlanmıştır.	1-4[11]	0.5	450,700, 1700, 2300, 2600, 3500 ve 5800 lisansız bandı	5, 7, 8.75, 10, 20 100 (CA ile)	8x8	QPSK 16QAM 64QAM	OFDMA	OFDMA	TDD FDD
	LTE Advanced	Rel. 10 ve üstü sürümlerde tanımlanmıştır.	1	0.5	700, 900, 1800, 2100, 2600,3500 gibi 700-3800	1.4, 3, 5, 10, 15, 20 100 (CA ile)	8x8, FD-MIMO	QPSK 16QAM 64QAM 256QAM (Rel.12)	OFDMA	SC-FDMA	

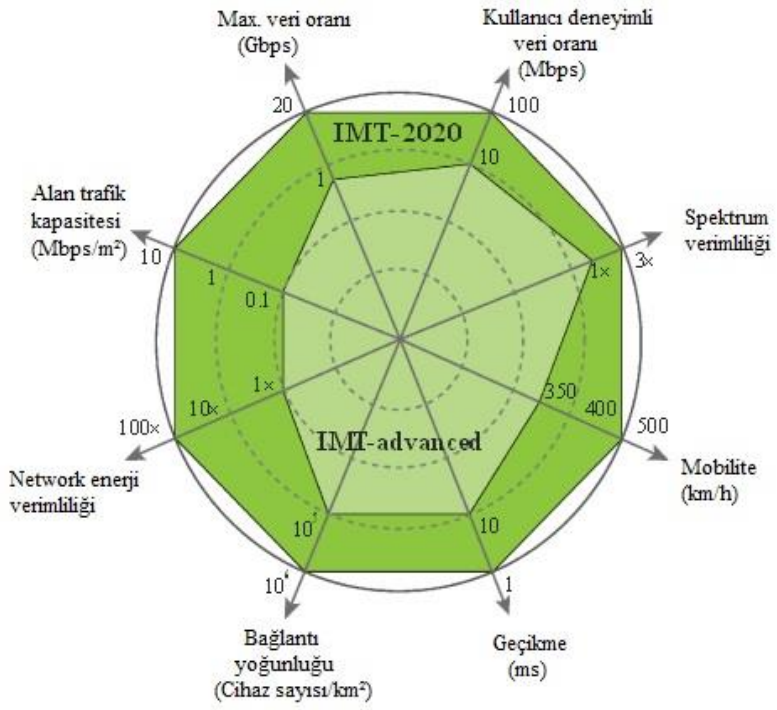
6 BEŞİNCİ NESİL (5G) TEKNOLOJİLER

Son yıllardaki sosyo-teknik gelişmeler mobil iletişimin de evrimini beraberinde getirmiş hem gelişmiş, hem de gelişmekte olan ülkelerin ekonomik ve sosyal kalkınmasına büyük katkıda bulunmuştur. Mobil iletişim tüm toplumun günlük yaşamına iyice entegre olmuş durumdadır. Sosyo-teknik eğilimler ve mobil iletişim sistemlerinin gelişimi birbirine sıkıca bağlı kalacak ve gelecek yıllardaki toplum için temel oluşturacak olması öngörülmektedir. 1G sistemleriyle birlikte kablosuz mobil iletişim deneyimini yaşayan ve sonrasında ses iletiminin yanında veri iletimine de müsaade eden 2G, 3G ve 4G sistemleriyle birlikte toplumun eğilimi değişmiş ve mobil iletişimden beklentileri artmış durumdadır. ITU-R tarafından 3G sitemleri için IMT-2000, 4G sistemleri için IMT-Advanced standartları tanımlanmıştı. Günümüzde 5G

[11] 256QAM 8x8 MIMO ve 100 MHz bant genişliği ile

sistemlerinden bahsedilmektedir ve 5G standartlarını belirlemek üzere ITU-R tarafından IMT-2020 ve ilerisi (IMT-2020 and beyond) adı altında çalışma grubu kurulmuştur. Bu grup gelişen teknoloji, mevcut sistemlerin eksikleri, toplumun eğilim ve beklentileri, artan veri trafiği talepleri vb. doğrultusunda yapılan gözlemlere dayalı olarak 5G standartlarını belirlemek üzere çalışmalarına başlamıştır. IMT-2020 standart çalışmalarını 2020 yılına kadar bitirmeyi planlamaktadır. 5G teknolojilerinin kullanımı ve yayılması 2020 yılı ve sonrası olarak öngörülmektedir.

ITU-R tarafından IMT-2020 vizyonu Eylül 2015'te Recommendation ITU-R M.2083-0 [59]'da yayınlanmıştır. Bu rapora göre IMT-2020'nin IMT-Advanced'a göre gelişecek temel kapasiteleri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. IMT-2020'nin IMT-Advanced'a kıyasla geliştirilecek yetenekleri [59]

IMT-2020 ve ilerisi, gelişmiş mobil geniş bant, ultra güvenilir ve düşük gecikmeli iletişim, çok büyük miktarda cihaz tipi iletişimi kullanım senaryolarıyla büyük veri trafiği gerektiren yeni teknoloji ve uygulamaları destekleyecek, çok büyük sayıdaki cihaz ve kullanıcıları her yerde ve her zaman iletişim halinde tutacak yapıda olacaktır. IMT-2020 maksimum veri oranı 10 Gbps'e ulaşması beklenmektedir ancak belirli koşul ve senaryolar altında 20 Gbps'e kadar destekleyecektir. IMT-2020 gelişmiş mobil geniş bant ortam çeşitliliğiyle farklı kullanıcı veri hızları deneyimi sağlayacaktır. Örneğin kent ve kırsal alanlarda gerçek bir ağ ortamındaki kullanıcılar en az 100 Mbps, şehir merkezlerinde bina içi olarak en az 1 Gbps veri oranı deneyimi yaşayacaklardır[60]. IMT-Advanced ile kıyasla spektrum verimliliği üç kat daha yüksek olması beklenmektedir. Radyo ara yüzünü geliştirmek için gelişmiş dalga formları, modülasyon ve kodlama, filtrelenmiş OFDM (FOFDM), FBMC (Filter Bank Multi-Carrier modulation) [61] gibi yeni ve geliştirilecek olan çoklu erişim tekniklerinin kullanılması spektral verimliliği arttıracaktır. 3D-beamforming (3D-BF), masif MIMO [62], aktif anten sistemleri gibi gelişmiş anten teknolojileri ile yine spektral verimlilik arttırılabilecektir[63].

Günümüzde mobil iletişim için kullanılan frekans bantları ve bunların bant genişlikleri ülkeler ve bölgelere göre değişiklik göstermektedir. Bu durum cihaz karmaşıklığı ve olası girişim sorunları ile birlikte birçok soruna yol açmaktadır. Gelecekteki teknik gelişmelerle uyumlu, bitişik, geniş ve harmonize frekans bantlarının kullanılması bu sorununun çözümünü kolaylaştıracaktır. IMT-2020, kullanım senaryolarını gerçekleyebilmek için birkaç 100 MHz den en az 1 GHz'e kadar bant genişliği gerekecektir. Bunun için IMT-2020, 6 GHz'in üzerinde bitişik geniş bant spektrumuna odaklanmış ve ITU, Report ITU-R M.2376 [64]'de IMT'nin 6GHz ile 100 GHz arasındaki frekanslarda kullanılabilirliği üzerine teknik fizibilitesini yayınlamıştır[59].

IMT-2020 ile alana göre trafik kapasitesi, metrekare başına saniyede 10Mbit olması beklenmektedir. IMT-2020 radyo erişim ağları için enerji tüketimi, bugün IMT-Advanced ağlarında tüketilenden fazla olmamalıdır. Bit başına harcanan enerji maliyeti 100 katına kadar düşürülecektir. Geleneksel insandan-insana veya insandan makineye iletişimin yanı sıra, IMT 2020 insan müdahalesi olmadan akıllı cihazlar, makineler ve diğer nesneleri geniş bir yelpazede birbirine bağlayarak "Nesnelerin internetini" (Internet of Things - IoF) gerçekleştirecektir. Çok büyük miktarda cihazın bağlantı halinde olmasını sağlayabilmesi için bağlantı yoğunluğu kapasitesini metrekare başına 1 cihaz olacak şekilde arttırmaktadır. Son olarak IMT-2020, 500km/s hızlarında kabul edilebilir QoS değerleriyle bağlantı imkânı sağlayabilecektir. Bu özellik yüksek hızlı trenler için özel olarak düşünülmüştür[59].

ITU, IMT-2020 için yayınladığı yol haritasında 2016 yılına kadar vizyonu belirleme, 2017 yılı ortalarına kadar gereksinimleri belirleme, 2020 yılına kadar standartların geliştirilmesi ve sonrası için ise standartların yayılması ve genişletilmesi olarak belirlemiştir. 2020 yılı itibariyle 5G teknolojisinin kullanım örneklerini görülebilecektir.

7 SONUÇ

Gelişen teknolojik imkânlar ve kullanıcıların artan talepleri doğrultusunda mobil hücresel haberleşme teknolojilerinin çok hızlı bir şekilde evrimleştiği şu günlerde bu teknolojilerin tarihsel bir bakış açısı ile ele alınarak irdelenmesi, konunun anlaşılması açısından önemli bir gerekliliktir. İlgili alanda tüm sistemleri bir bütün olarak ele almak ve bunları karşılaştırmalı olarak analiz etmek bu çalışmayı tetikleyen ana unsurları oluşturmaktadır.

Bu çalışmada hücresel haberleşme teknolojilerinin gelişim süreci, birinci nesilden başlanarak beşinci nesle kadar irdelenmiştir. Bu kapsamda teknolojilere ait standartlar ve teknikler karşılaştırmalı olarak ele alınıp, okuyucuya konu hakkında detaylı bilgiler sunulmaya çalışılmıştır. Teknolojiler incelendiğinde birinci nesilden beşinci nesle kadar teknik anlamda önemli gelişmelerin olduğu gözlemlenmektedir. Tüm standartlar incelendiğinde, geliştirmelerin temelinde kısıtlı olan frekans spektrumunun daha verimli kullanılabilirliğinin yattığı gözlemlenmektedir.

Konu çoklu erişim teknikleri yönünden ele alındığında 1G sistemlerde yalnızca FDMA kullanılırken, 2G'de FDMA ile TDMA teknikleri birlikte kullanılarak kanalların verimli kullanımı sağlanmış ve bunun yanında girişim de önemli ölçüde azaltılmıştır. 3G sistemlerde ağırlıklı olarak kullanılan CDMA ile kanallarda daha güvenli veri aktarımına olanak sağlamış ve girişim parametresinde de iyileştirmeler sağlanmıştır. 3G'nin son teknolojileri ve 4G sistemlerde kullanılan OFDMA ile taşıyıcı sinyaller birbirine dik seçilerek frekans spektrumu daha verimli kullanılabilmektedir. Böylece daha fazla kullanıcıya servis verme ve daha hızlı veri iletebilme olanağı sunulmuştur. Teknolojilerin gelişim süreci incelendiğinde, başlarda

FDD yönlü iletim tekniği kullanıldığı gözlemlenmektedir. 3. neslin son dönemlerinde FDD ile birlikte TDD iletim tekniği de kullanılmıştır. 4G sistemleri de her iki metodu desteklemesiyle TDD ve FDD için tahsis edilmiş tüm frekans kanallarını kullanabilme yeteneği kazanmıştır. Böylece yeni nesil hücresel teknolojiler FDD veya TDD iletim tekniklerinin avantajlarından faydalanabilmektedirler.

Teknolojilerdeki önemli gelişmelerden bir diğeri ise tek anten kullanımının zaman içerisinde yerini çoklu anten kullanımına bırakmasıdır. 1G ve 2G sistemlerinde kullanılan tekil anten yapısından farklı olarak 3G'in son teknolojileri ve 4G teknolojilerinde MIMO anten sistemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Böylece, bir kullanıcıya birden çok antenin aynı anda hizmet vererek daha hızlı veri iletimine katkı sağlanmıştır.

Modülasyon tekniklerinde de zaman içerisinde önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Analog modülasyonda tek bir taşıyıcı frekansında 1 adet bilgi iletilebilirken 256QAM'de 8 adet bilgi iletilebilmektedir. 1G'de analog modülasyon teknikleri kullanılırken gelişen teknoloji ile 4G'de QPSK, 16QAM, 256QAM gibi çok seviyeli modülasyon tekniklerinin kullanılması da yine spektral verimliliğe ve veri iletim hızına önemli katkılar sağlamıştır.

Kullanılan kanalların 30 KHz seviyelerinden 100 MHz oranlarına çıkması da bant genişliğini artırması açısından çok önemli bir gelişmedir. Bant genişliğinin 100 MHz seviyelerine yükseltilmesi ve geriye dönük uyumluluk için CA teknikleri de kullanılmıştır. Ayrıca, CA ile boşta duran kanalların servis alanındaki kullanıcılara hizmet vermesi sağlanarak iletişim kanallarının verimli kullanılması ve daha yüksek veri hızlarının elde edilmesini sağlanmıştır.

Yeni çoklu erişim, çoklu anten ve modülasyon teknikleri, artan bant genişliği değerleri teknolojinin baş döndürücü bir hızda ilerlediğini göstermektedir. Bununla birlikte hattın verimli kullanımı ve iş çıkarma oranı önemli oranda artmıştır. Böylece veri aktarım hızlarında çok önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Gelişmekte olan yarı iletken teknolojileri ve iletim teknikleri ile birlikte yakın zamanda gündeme yerleşen 5G teknolojilerinin, 4G teknolojilerine oranla çok daha yüksek performans değerlerini elde etmeleri beklenmektedir.

8 GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada 4G'ye kadar olan teknikler karşılaştırmalı olarak irdeleniştir. Fakat yerli çalışmalarda 4G teknolojilerinin detayları ile irdelendiği yayınların azlığı dikkat çekmektedir. Yeni çalışmalarda Mobile WiMAX ve LTE Advanced teknolojilerinin etraflıca incelenerek karşılaştırmalı olarak ele alınması bir gereksinim olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca hızla gelişen kablosuz teknolojiler hakkında farkındalık oluşturulması amacı ile yeni yeni gündeme gelen 5G teknolojilerinin de tüm yönleri ile irdelendiği çalışmaların yapılması da bir gereklilik olarak görülmektedir.

9 KAYNAKLAR

[1] Bondyopadhyay PK. *Sir JC Bose diode detector received Marconi's first transatlantic wireless signal of December 1901 (the "Italian Navy Coherer" Scandal Revisited)*. Proceedings of the IEEE, Cilt.86, 1998, s.259-285.

[2] Schiller JH. *Mobile communications*. Essex: Pearson Education, 2003.

[3] Hussain I, Hussain S, Khokhar I, Iqbal R. *OFDMA as the Technology for the Next Generation Mobile Wireless Internet*. Proceedings of the Third International Conference on Wireless and Mobile Communications. IEEE Computer Society, 2007, s.14.

[4] Srikanth S, Pandian P, Fernando X. *Orthogonal frequency division multiple access in WiMAX and LTE: a comparison*. Communications Magazine, IEEE, Cilt.50, 2012, s.153-161.
[5] Myung HG, Lim J, Goodman DJ. *Single carrier FDMA for uplink wireless transmission.* Vehicular Technology Magazine, IEEE, Cilt.1, 2006, s30-38.
[6] Rappaport, Theodore S. *Wireless Communications: Principles and Practice, 2nd Edition Chapter 3: The Cellular Concept— System Design Fundamentals,* New Jersey: Prentice Hall, 2002, s.57-96
[7] Blecher FH. *Advanced mobile phone service*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, Cilt.29, 1980, s.238-244.
[8] Lehenkari J, Miettinen R. *Standardisation in the construction of a large technological system—the case of the Nordic mobile telephone system.Telecommunications policy*, Cilt.26, 2002, s.109-127.
[9] Hughes CJ, Appleby MS. *Definition of a cellular mobile radio system.* Communications, Radar and Signal Processing, IEEE Proceedings F, Cilt.132, 1985, s.416-424.
[10] Fan P. *Multiple access technologies for next generation mobile communications.* 2006 6th International Conference on ITS Telecommunications Proceedings, IEEE. 2006, s.10-11
[11] Alkan M, Genç Ö, Tekedere H. *Bilgi ve İletişim Teknolojilerinin Eğitimde Kullanımı İçin Altyapı İhtiyaçları ve Yeni İletişim Teknolojileri*, Elektrik, Elektronik, Bilgisayar Mühendislikleri Eğitimi 1. Ulusal Sempozyumu, Ankara ODTÜ-KKM, 2003, s.177-181,
[12] Zaki Y. *Future mobile communications: LTE optimization and mobile network virtualization*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012,
[13] Huurdeman, AA. *The worldwide history of telecommunications*. John Wiley & Sons, 2003.
[14] Datta P, Kaushal S. *Exploration and comparison of different 4G technologies implementations: a survey.* 2014 Recent Advances In Engineering and Computational Sciences (RAECS), IEEE, 2014, s.1-6
[15] Rhee MY. Mobile communication systems and security. John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, 2009.
[16] Harte LJ, Jacobs CA, Smith AD. *IS-136 TDMA technology, economics, and services*. Boston: Artech House Inc, 1998.
[17] Terasawa D, Tiedemann EG. *CDMAOne (R)(IS-95) technology overview and evolution*. In Radio Frequency Integrated Circuits (RFIC) Symposium, IEEE, 1999, s. 213-216
[18] Stüber GL. *Principles of mobile communication*. USA: Springer Science & Business Media, 2011.
[19] Halonen T, Romero J, Melero J. *GSM, GPRS and EDGE performance: evolution towards 3G/UMTS*. New York: John Wiley & Sons, 2004.
[20] Yang J, Tin N, Khandani AK. *Adaptive modulation and coding in 3G wireless systems.* In Vehicular Technology Conference, 2002 IEEE 56th Vehicular Technology Conference Proceedings, Cilt.1, 2002, s.544-548.
[21] Tomasi W. *Elektronik iletişim teknikleri*, çev: Atakay M, Ankara: MEB, 2002.
[22] Murota K, Hirade K. *GMSK modulation for digital mobile radio telephony*. Transactions on Communications, IEEE, Cilt.29, 1981, s.1044-1050.
[23] ITU, *About mobile technology and IMT-2000: Cellular Standards for the Third Generation: The ITU's IMT-2000 family*, https://www.itu.int/osg/spu/imt-2000/technology.html
[24] Gozalvez J. Senior Editor *MOBILE RADIO*. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2007, s.53-59.
[25] Darıcı A. *3. Nesil Mobil Haberleşme Sistemleri*, Telekomünikasyon Kurumu Sektörel Araştırma ve Stratejileri Dairesi Başkanlığı, 2002.

[26] Dahlman E, Beming P, Knutsson J, Ovesjö F, Persson M, & Roobol C. *WCDMA-the radio interface for future mobile multimedia communications*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, IEEE, Cilt.47, 1998, s1105-1118.

[27] Holma H, Toskala A. *Wcdma for umts: Radio Access For Third Generation Mobile Communications,* Chichester: John Wiley & Sons, 2004

[28] Rao YS, Kripalani A. (1999). c*dma2000 mobile radio access for IMT 2000*. 1999 IEEE International Conference on Personal Wireless Communication, IEEE, 1999, s.6-15.

[29] Holma H, Toskala, A. *HSDPA/HSUPA for UMTS: high speed radio access for mobile communications*. Chichester: John Wiley & Sons, 2007

[30] UMTS Forum, *HSPA: High Speed Wireless Broadband From HSDPA to HSUPA and beyond,* http://www.umts-forum.org/component/option,com_docman/task,doc_download/gid,1632/Itemid,214/

[31] 4G Americas, *4G Mobile Broadband Evolution: 3GPP Release 11 & Release 12 and Beyond*, 2014

[32] Iwamura M, Etemad K, Fong MH, Nory R, Love R. *Carrier aggregation framework in 3GPP LTE-advanced [WiMAX/LTE Update]*. Communications Magazine, IEEE, Cilt.48, 2010, s.60-67.

[33] Ntouni GD, Boulogeorgos AA, Karas DS, Tsiftsis T, Foukalas F, Kapinas VM, Karagiannidis GK. *Inter-band carrier aggregation in heterogeneous networks: Design and assessment.* 2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS), IEEE, 2014, s.842-847.

[34] Bhushan N, Lott C, Black P, Attar R, Jou YC, Fan M, Au J. *CDMA2000 1× EV-DO revision a: a physical layer and MAC layer overview*. Communications Magazine, IEEE, Cilt.44, 2006, s.37-49.

[35] Schulz, Donhauser, Bowne, *1xEV-DO Revision A + B*, White Paper, Rohde&Schwarz, October 2013 -1MA213_0e, 2013.

[36] Fan CX, Chen HH, Lu WW. *China's perspectives on 3G mobile communications and beyond: TD-SCDMA technology*. IEEE Wireless Communications, Cilt.9, 2002, s.48-59.

[37] Soy H, Özdemir Ö, Bayrak M. *Gelecek Nesil Mobil Haberleşme Sistemleri: 3G, 4G ve Ötesi.* Akademik Bilişim '12 XIV. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri Uşak Üniversitesi, 1 - 3 Şubat 2012, s.211-218

[38] Yallapragada R, Kripalani V, Kripalani A. *EDGE: a technology assessment.* 2002 IEEE International Conference on Personal Wireless Communications, IEEE, 2002, s.35-40,

[39] Gyasi-Agyei A, Halme SJ. *Mobile IP based DECT multimedia architectures for IMT-2000*. 52nd Vehicular Technology Conference - VTC 2000, IEEE, Cilt.2, 2000, s.963-970.

[40] IEEE 802.16 Working Group. *IEEE 802.16 e-2005 IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems Amendment for Physical and Medium Access Control Layers for combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands [S]*. standards. ieee. org/getieee802/download/802.16 e-2005. pdf.], 2005

[41] Stefania S, Issam T, Matthew B. *LTE, the UMTS long term evolution: from theory to practice*. Chichester: John Wiley & Sons, 2011

[42] Report ITU-R M.2134-0, *Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s),* http://www.itu.int/pub/R-REP-M.2134-2008/en, 2008

[43] Akyildiz IF, Gutierrez-Estevez DM, Reyes EC. *The evolution to 4G cellular systems: LTE-Advanced.* Physical Communication, USA: Elsevier, Cilt.3, 2010, s.217-244.

[44] Ahmadi S. *Mobile WiMAX: A systems approach to understanding IEEE 802.16 m radio access technology*. USA: Academic Press. 2010

[45] Urfalıoğlu R. *4. Nesil Mobil Haberleşmenin Standartlaşma Sürecinde Aday Teknolojileri LTE ve Mobil WiMAX'in Karşılaştırmalı Analizi, Türkiye için Geçiş Stratejisi Önerileri*, Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu, Ankara, 2011

[46] Prasad R. *OFDM for wireless communications systems*. Boston: Artech House, 2004

[47] Ertürk S. *Sayısal haberleşme*. İstanbul: Birsen Yayınevi, 2010

[48] Mietzner J, Schober R, Lampe L, Gerstacker WH, Hoeher P. *Multiple-antenna techniques for wireless communications-a comprehensive literature survey*. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, Cilt.11, 2009, s.87-105.

[49] Çıbuk M. *WiMAX/IEEE 802.16 Ağları Üzerinden WEB Tabanlı Bio-Telemetri Uygulamaları İçin Protokol Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi*, Doktora tezi, Elazığ:Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009

[50] WiMAX Forum ® Newsletter – November 2013, Available: http://www.wimaxforum.org/LiteratureRetrieve.aspx?ID=194526

[51] Garg V. *Wireless Communications & Networking*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2007.

[52] WiMAX Forum®, *WiMAX Advanced: Deployment Scenarios Based on Input from WiMAX Operators and Vendors*, TSC Approved, 2014.

[53] WiMAX Forum®, *Air Interface Specifications*, WMF-T23-001-R022v02, 2014.

[54] WiMAX Forum®, *WiMAX and the IEEE 802.16m AirInterface Standard*, 2010.

[55] Ho KP. *Phase-modulated optical communication systems*. USA: Springer Science & Business Media, 2005.

[56] Abdullah MFL, Yonis AZ. *Impact of modulation techniques on aggregated LTE-Advanced.* 2013 IEEE International Conference on Space Science and Communication (IconSpace), IEEE, 2013, s.267-271.

[57] Baker M. *LTE-Advanced physical layer*. REV-090003r1 IMT-Advanced Evaluation Workshop, Beijing, 2009.

[58] 3GPP TS 36.211 v.12.5.0, *Physical Channels and Modulation for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA)(Release 12)*. Available:www.3gpp.org, 2015

[59] Recommendation ITU-R M.2083-0, *IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*, https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2083-0-201509-I/en, 2015

[60] IMT-2020 (5G) Promotion Group, *"IMT vision towards 2020 and beyond"*, 2014.

[61] Premnath S, Wasden D, Kasera SK, Patwari N, Farhang-Boroujeny B. *Beyond OFDM: best-effort dynamic spectrum access using filterbank multicarrier.* IEEE/ACM Transactions on Networking, IEEE, Cilt.21, 2013, s.869-882.

[62] Larsson E, Edfors O, Tufvesson F, Marzetta T. *Massive MIMO for next generation wireless systems*. Communications Magazine, IEEE, Cilt.52, 2014, s.186-195.

[63] Gupta A, Jha RK. *A survey of 5g network: Architecture and emerging technologies. Access*, IEEE, Cilt.3, 2015, s.1206-1232.

[64] Report ITU-R M.2376, *Technical feasibility of IMT in bands above 6 GHz*, https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2376, 2015

ÖZGEÇMİŞ / CV

Munip GEYLANİ; Uzman (Specialist)

Lisans derecesini 2008'de Ondokuz Mayıs Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden aldı. 2008-2013 yılları arasında Türk Telekom A.Ş. de Uzman Yardımcısı olarak çalıştı. 2013 Aralık ayında Bitlis Eren Üniversitesi Bilgi İşlem Daire Başkanlığında Uzman olarak göreve başladı. 2014'te Bitlis Eren Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Eğitimine başladı. Halen Bitlis Eren Üniversitesi Bilgi İşlem Daire Başkanlığında Uzman olarak görev yapmaktadır. Temel çalışma alanları: Network Sistemleri, Kablosuz Ağlar, Telefon Santral Sistemleri üzerinedir.

He received his bachelor's degree from Ondokuz Mayıs University, Department of Electrical-Electronic Engineering in Samsun, Turkey in 2008. Between the years 2008-2013 he worked as an Assistant Specialist at Turk Telekom A.Ş. In August 2013 he started working as a specialist in the Information Technology Department of Bitlis Eren University. He began his Master education at Bitlis Eren University Department of Electrical and Electronic Engineering in 2014. He is still a specialist in the Information Technology Department of Bitlis Eren University. His major areas of interests are: Network Systems, Wireless Networks and Telephone Switchboard.

Musa ÇIBUK; Yrd. Doç. Dr. (Asst. Prof. Dr.)
Lisans derecesini 1997'de Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden, Yüksek Lisans derecesini 2002'de Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden, Doktora derecesini 2009 yılında Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden aldı. Halen Bitlis Eren Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Temel çalışma alanları: Kablosuz Haberleşme, Internet, Sunucu Sistemleri, Algılayıcı Ağlar üzerinedir.

He got his bachelors' degree in the Electrical-Electronic Engineering Department at Fırat University, Elazığ/Turkey in 1997, his master degree in the Electrical-Electronic Engineering Department at Fırat University, Elazığ/Turkey in 2002 and PhD degree in the Electrical-Electronic Engineering Department at Fırat University, Elazığ/Turkey in 2009. He is still an academic member of the Computer Engineering Department at Bitlis Eren University. His major areas of interests are: Wireless Communication, Internet, Server Systems and Sensor Networks.

Hanefi ÇINAR; Öğr. Gör. (Instructor)
Lisans ve yüksek lisansını Fırat üniversitesinde tamamladı. Doktora çalışmaları üçüncü yılında, Turgut Özal Üniversitesi, Elektrik – Bilgisayar Mühendisliği ana bilim dalında devam etmektedir. Bitlis Eren Üniversitesi, Enformatik bölümünde görev yapmaktadır. Çalışma Alanları: Kablosuz ağlar, kablosuz algılayıcı ağlar, mobil ağ teknolojileri konuları üzerinedir.

He got his bachelor and master degrees at Fırat University. He is a third year doctoral student in electrical and computer science department at Turgut Özal University. He is still working in Informatics department at Bitlis Eren University. His research interests include wireless networks, wireless sensor networks, mobile network technologies.

Fikri AĞGÜN; Öğr. Gör. (Instructor)
Lisans derecesini 2001'de Konya Selçuk Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nden, Yüksek Lisans derecesini 2011'de Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Biyometri ve genetik Anabilim dalından aldı. Doktora süreci devam etmektedir. Halen Bitlis Eren Üniversitesi Enformatik Bölümü'nde öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır. Temel çalışma alanları: Bilgisayar Ağları, Kablosuz sensör ağları, Araçlar arası atlamalı ağlar üzerinedir.

He got his bachelors' degree in the Computer Engineering Department at Selçuk University, Konya/Turkey in 2001, his master degree in the Biometry and Genetic Department at Yüzüncü Yıl University, Van/Turkey in 2011, Phd Study is resuming. He is still an academic member of the Informatics Department at Bitlis Eren University. His major areas of interests are: Computer Networks, Wireless Sensor Networks and Vehicular Adhoc Networks.