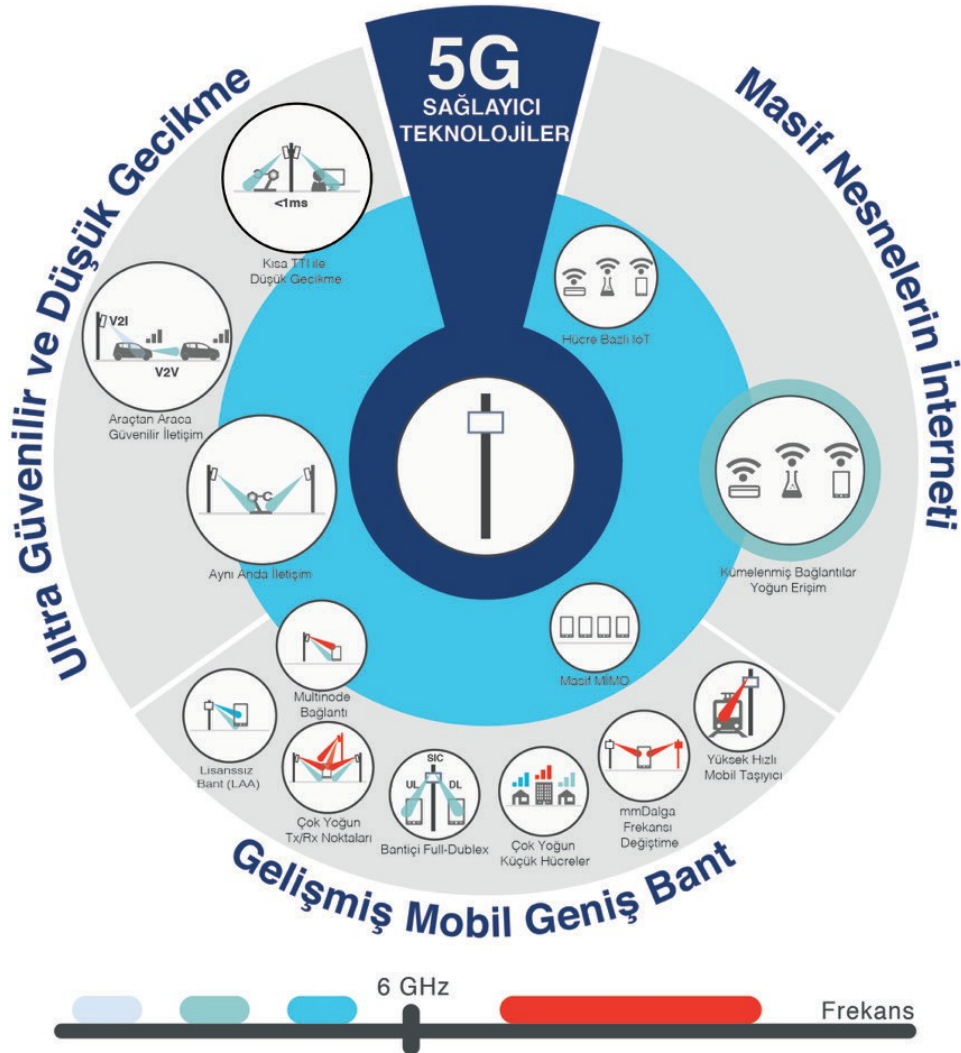




5G

Türk Telekom



Türk Telekom 5G

Künye

Türk Telekom 5G+ Bilgi Notu: 5G^{TT}

Yayın: Ağustos 2018

Proje Direktörü: Muhammed Özhan

Hazırlanmasına Katkı Verenler: Prof.Dr.Mustafa Ergen, Salim Yılmaz, Sezer Erkli, Oktay Namver, Duhan Can Çakı, Mehmet Özdem, Ceyda Bursalı, Beyhan Aygün Akyüz, Alaattin Çetin, Uğur Şahin, İdris Hacıvelioğlu, Hüseyin Fırat Köse, Selami Çiftçi, Mehmet Akçay.

Türk Telekom, gelecek mobil teknolojileri hakkında çözüm ortaklarının katkılarıyla makaleler yayımlamaktadır. Bu bilgi notu, Türk Telekom'un 5G ve ötesi teknolojilerine ilişkin görüşünü ve hazırlıklarını içermektedir. 5G'nin uygulandığı yeni teknolojiler, teknolojide teknik gelişmeler; 5G'nin yönetiminde kilit konular ve karar vericiler olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. 1. ve 3. Bölümler, genel okuyucunun yanı sıra kamu ve özel sektördeki karar vericiler için bilgiler içermektedir; 2. Bölüm, söz konusu teknolojiler hakkında akademik veya sektörel bilgiye sahip aktörlere yöneltilmiştir.

İçeriğe katkı veren çözüm ortaklarımıza teşekkür ederiz.



5G, mobil haberleşme teknolojilerinin gelecek neslidir. 5G ile hem kullanıcı sayısının artırılarak haberleşmenin hayatın her alanına girmesi hem de kullanım alanlarının zenginleştirilmesi istenmektedir; sayısal uçurumun kapanması hedeflenerek dijital nüfusun dünya geneline yayılması yanında sürücüsüz araçlar, sanal gerçeklik, akıllı şehirler, uzaktan ameliyat ve robotlar gibi yeni nesil teknolojiler sayesinde dijital ekonominin hızlanması, sanayi ve bilgi ekonomisinin devamını yaratması beklenmektedir.

Her nesil gibi 5G ile beraber de kablosuz veri gönderme hızı artacak ve şebeke mimarisi daha akıllı hâle gelerek, esnek ve yazılım temelli bir yapıyla kolayca ölçeklenebilecektir. Böylece 5G, zenginleştirilmiş bir deneyim sağlamayı hedeflemektedir. Örneğin, 8K videolar hızla indirilebilecek, artırılmış gerçeklik gözlükleri ile görsel ve hesaplama birleştirilerek yeni bir deneyim sağlanacaktır. Cep telefonu kullanımına ek olarak, milyarlarca sayıda tek yönlü ve az veri gönderen sensör tarzı cihazların bağlanması da sağlanacaktır. Ayrıca bazı kullanımlar için ise veri alışverişinde neredeyse sıfır gecikme sağlamayı ve bağlantının kesilmesini garantilemeyi hedeflemektedir. Örneğin; bir tele-doktor, dünyanın başka yerindeki hastasını uzaktan kontrol edilebilen robotlar sayesinde

ameliyat edebilecek veya aracımızı bir çağrı merkezindeki tele-sürücü sürüyor olabilecek. Bu tip yeni nesil iş planlarını gerçekleştirmek için 5G ile beraber kablosuz yeni bir radyo yanında şebeke yatay düzlemde yazılım katmanları ile tanımlanarak birden fazla çeşit ağ yapısını içine alan heterojen ağ yapısı için çalışılmaktadır. Farklı uygulama türlerini desteklemek için ise dikey olarak birbirinden bağımsız sanal dilimleri tanımlayacak esnek bir yapı tesis edilecektir. Böylece her dilimde farklı kalite gereksinimlerinin garantisi sağlanacaktır.

5G çalışmaları, 2013 yılında Avrupa Birliği'nin kurduğu 5G Kamu Özel Ortaklığı (5G PPP) ile başladı. 5G'nin, 2020 yılıyla beraber kullanıma sokulması hedeflenmektedir. 5G'nin hayatımıza girmesi süreci, dünya çapında kolektif çalışmalar ile ilerlemektedir. Kullanılacak frekansların ülkeler genelinde harmonizasyonu (uyumluluk) ve endüstrinin teknolojiyi ortak konsensüs (uzlaşma) ile fazlandırmasıyla beraber ilk 5G standardı 3GPP altında 2017 yılı sonunda tamamlanarak Uluslararası Telekomünikasyon Birliği'nin onayına sunulmuştur¹.

Bu bilgi notuyla 5G iş planları, teknolojileri ve standardizasyon çalışmaları günümüzdeki durum dikkate alınarak anlatıldı. Ayrıca Türk Telekom'un 5G vizyonu ve bu alana katkılarına da değinildi.

¹ Access, R., Aspects, L., Interface, R. & Aspects, P. 3GPP 5G Study completed by RAN. 3GPP Tech. Rep. 803–805 (2017).

İçindekiler

8	Neden 5G?
8	Kısaca 5G
9	5G Öncesi
11	5G Kullanım Deneyimleri
11	Akıllı Şehir
12	Akıllı Elektrik
13	Akıllı Hareketlilik (V2X)
15	Dron Deneyimi
16	E-Sağlık
16	Medya ve Eğlence
18	Endüstri 4.0
19	Siber Güvenlik
21	5G Kullanım Deneyimleri Kategorileri
22	Operatörler neden 5G'ye geçmelidir?
24	5G Radyo ve Heterojen Ağlar
26	5G Yeni Radyo
27	Milimetre Dalga Haberleşme (mmWave)
27	3GPP NR standardizasyonu için bir örnek
28	Masif Çok Girdili Çok Çıktılı Anten (Massive MIMO)
28	Cihazdan Cihaza İletişim (D2D)
29	Görünür Işıklı İletişim (VLC)
30	5G Baz İstasyonu
30	Küçük Hücre Yönetimi (Small Cell)
31	Sabit Kablosuz Erişim (5G FWA)
31	Yeşil İletişim (Green Communication)
32	5G Bulut Şebeke
32	Yazılım Tanımlı Ağ (SDN)
33	Ağ Fonksiyon Sanallaştırması (NFV)
33	Ağ Dilimi (Network Slicing)
35	5G Ağ Uygulama Pazarı
35	Sis Ağ (Fog Computing)
35	Çoklu Sınır Bilişim (MEC)
36	Özdüzenleyici Şebekeler (SON)
40	5G Nasıl?
40	5G ve Frekans Yönetimi
41	Operatörlerin 5G Stratejisine Örnekler
42	5G ve Açık Kaynak
43	5G ve Sayısal Uçurum
44	5G Ne Zaman?
46	5G teknolojisini kimler tanımlayacak?
46	AB 5G Manifestosu ve Aksiyon Planı
48	AB 5G Planı
49	5G Ötesi
50	5G Vizyonunun Türkiye için Önemi
51	Türkiye 5G ve ötesinde etkili olabilir mi?
52	Yararlanılan Kaynaklar

Türk Telekom, insanları ve nesneleri birbirine bağlayan 5G teknolojilerini kullanıcıları ile buluşturma vizyonuna, Ar-Ge çalışmaları, inovasyon ve girişimcilik yatırımları ile devam etmektedir. Avrupa Birliği'nin 5G'de yol haritasını belirleyen 5G PPP ve Networld2020 gibi uluslararası konsorsiyumlarında ülkemizi temsil eden Türk Telekom, Türkiye'nin dijital dönüşümünü gerçekleştirmeyi, 5G alanında da ülkemize ve Türk Telekom kullanıcılarına en ileri teknolojiyi sunmayı hedef edinmiştir. Türk Telekom yaygın fiber ağı, yaygın hızlı ve sabit mobil internet alt yapısı, uluslararası fiber bağlantıları ve verdiği tüm servisler ile Türkiye'nin 5G ve teknoloji yol haritasının oluşumunda liderlik etmektedir.

Dr. Paul Doany,
CEO



Türk Telekom, yeni nesil sanallaşmış bulut şebeke mimarileri, anten teknolojileri, Nesnelerin İnterneti (*Internet of Things*) konularının yanı sıra, kamu güvenliğine önemli katkılar sağlayacak yeni 5G teknolojilerin geliştirilmesi, denenmesi ve uygulanması konularında önde gelen yerli ve global teknoloji şirketleri ile iş birlikleri kurmakta, bu teknolojilerin hayata geçirilmesi için gerekli iş planlarını ve stratejilerini oluşturmaktadır. Türk Telekom, yapmış olduğu denemeler ve demolarda kullandığı teknolojilerle, yakın gelecekte kamu güvenliği, akıllı şehirler, akıllı araçlar, akıllı ulaşım, e-sağlık ve Endüstri 4.0 uygulamaları başta olmak üzere, hayatın her alanında önemli kolaylıklar sağlayacaktır.

Türk Telekom'un artan mobil trafiği, frekanslarını daha verimli kullanma çabası ve kullanıcı ihtiyaçlarına daha hızlı cevap verme isteği ile daha esnek ve inovatif (yenilikçi) iş planlarını devreye sokma çabası 5G teknolojilerine ilgisini başından beri kuvvetli tutmaktadır. Bu minvalde; sağlık, eğitim, ulaştırma gibi konular yanında kitlelere ulaşarak sayısal uçurumu kapatacak teknolojiler geliştirmek önemli bir stratejisidir. Geliştirilen teknolojileri ticari kullanıma sunmak ve dünyaya ihraç etmek, asırlık şirketimizin her zaman öncelikli hedefleri arasındayer almaktadır.

Bu amaçla, şirket girişim sermayesini kurmuş ve Türkiye'nin bu teknolojilerde dışa bağımlılığını azaltarak cari açığına ve dolayısıyla Türkiye ekonomisine katkıda bulunmak için ölçeklenebilir teknoloji girişimcilik ekosisteminin yeşermesini amaçlamıştır.

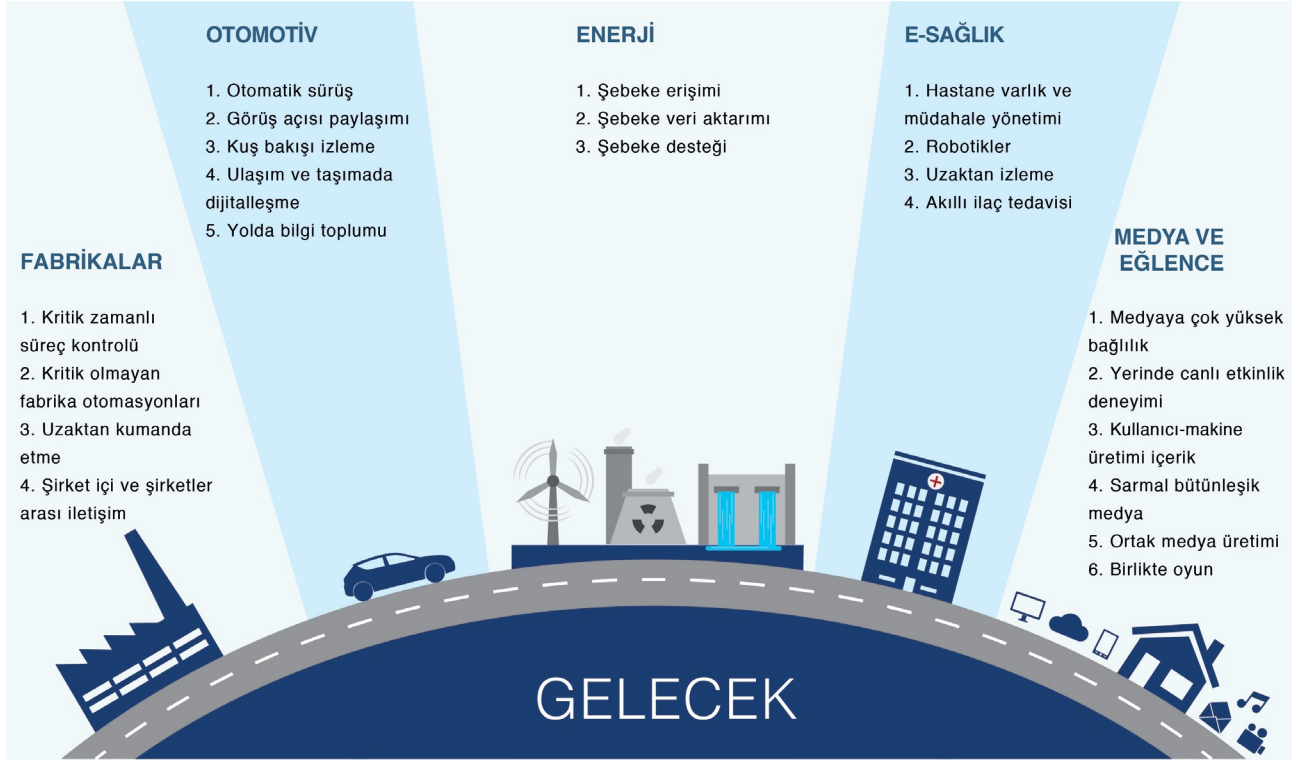
Fırat Yaman Er,
Strateji, Planlama ve İş Geliştirme Genel Müdür
Yardımcısı



I.Bölüm

Neden 5G?

Genel Okuyucu



► **5G'nin temel vaadi mobil ağların yarattığı servis ve uygulamaların artan ihtiyaçlarını karşılamak ve haberleşme teknolojilerini hayatın her alanına genişleterek "her nesneye" haberleşme yeteneğini kazandırmaktır.**

Neden 5G?

Haberleşmenin insan hayatındaki anahtar rolü, dijitalleşmeyi ilerleten her yeni teknolojide daha fazla artmaktadır. 5G (5. Nesil), haberleşme teknolojisinin giderek genişleyen kullanımlarını daha da ileriye götürerek, haberleşmeyi "insandan insana", "insandan makineye" ve "makineden insana" gibi kullanımların ötesine taşımayı hedeflemektedir. Örneğin, elektriğin hayatımıza girmesi ilk olarak aydınlatma ile başlamıştı. Bugün ise elektrik, bu sınırlı amacın çok ötesine taşmış, insanın içinde bulunduğu ve hatta bulunmadığı ama elinin değdiği, tasarladığı her alana yayılmış durumdadır. Bugün de benzer bir dönüşümün evresindeyiz.

Kısaca 5G

5G'nin temel vaadi mobil ağların yarattığı servis ve uygulamaların artan ihtiyaçlarını karşılamak ve haberleşme teknolojilerini hayatın her alanına genişleterek "her nesneye" haberleşme yeteneğini kazandırmaktır. Bu amaçla oluşturulacak sistem, 10 Gbps seviyesinde çok yüksek hız kapasite beklentisinin yanında, 1 milisaniye seviyesinde çok düşük bağlantı gecikme gerekliliğini de içermektedir. Ayrıca, 100 milyarı aşacak sayıda düşük hızda bağlantıyı desteklemesi de beklenmektedir. Bu yenilikler hayatın her alanına iletişimi ulaşılabilir kılacaktır; enerji sektörü, yeni nesil sağlık sistemleri, akıllı ulaşım ve akıllı şehir sistemleri gibi birçok konuda yenilikçi 5G uygulama alanları bulunmaktadır.

5G'yi hayata geçirmek üzere üzerinde çalışılan teknolojiler başlıca olarak kablosuz haberleşme,

yazılım tanımlı ağ mimarisi², ağ fonksiyon sanallaştırması³, milimetre dalga haberleşme⁴, akıllı ve çoklu anten teknolojileri⁵, büyük veri ve yapay zekâ, makineler arası haberleşme⁶ ve yeşil iletişimi⁷ içermektedir. 5G sistemlerinin 2020 ve 2030 yılları arasında yaygın kullanıma geçmesi hedeflenmektedir. 5G'nin geliştirilme sürecinin önceki 2G, 3G ve 4G mobil nesillerine göre farklı bir düzlemde ilerlediğini söylememiz gerekir. Önceki nesiller, ülkelerin ve şirketlerin birbirine teknoloji kabul ettirme yarışı hâlinde ilerlemiştir. Şimdi ise kullanım isteğinin hızla artması ve bu isteğin in-

ternet şirketlerinin iş planlarını alt üst etmesiyle global ölçekte her paydaşın katkı vereceği, bir anlamda herkesin kazanacağı ve hayatın her noktasına haberleşmenin girebileceği ortak bir anlayışın tesisi, 5G çalışmaları ile hedeflenmektedir.

5G Öncesi

Mobil haberleşmenin kitlelere yayılması yaklaşık otuz beş yıl önce 1G diye adlandırılarak Amerika'da başlamıştır. Birinci nesil haberleşme (1G), AMPS (*Advanced Mobile Phone System*) teknolojisi ile ses iletiminde hücre yapısını getirmişti. Yani baz istasyonlarının kapsamı daraltılmasına rağmen, sayısı çoğaltılarak lisanslanan frekansların tekrar tekrar uzak hücrelerde kullanılması sayesinde, aynı anda konuşma kapasitesi hızla artırılmış; ancak iletim altyapısı hâlâ *analogtu*. Diğer yandan, zamanla kurulan ulusal şebekelerin birbiriyle uyumundan bahsetmek neredeyse imkânsızdı. Kısacası, uluslararası standartlar henüz oluşturulamamıştı ve *roaming* (uluslararası dolaşım) sağlanamıyordu. Bundan on yıl sonra ise, 2G ile uluslararası uyumu sağlayan standartlar ve *roaming* altyapısı tesis edilebilmişti. Artık küresel bir mobil şebekeden bahsetmek mümkündü ve bu şebeke, dijital veri iletimi olanakları sayesinde mobil veri iletiminde çığır açmaktaydı. Mobil iletişim altyapısında ve kullanıcı cihazlarında yer alan, sayısal sinyal işleme ve ileri yönlü hata düzeltme teknolojilerinin ucuzlaması, 2G'nin ticarileşmesinin temel katalizörü olmuştu. Bu nesilde, Avrupa'nın kurduğu GSM (*Global System for Mobile Communications*) teknolojisi bütün dünyada liderliği elde etti⁸.

Yeni bin yıl, küreselleşmenin bin yılı olurken, telekomünikasyon, tüm alanlarda olduğu gibi özellikle de mobil iletişim alanında küresel iş birliği ve uyumu artırıyordu. Artık, ses ve veri, dünyanın hemen her yerinde sorunsuz ve uyumlu bir biçimde dolaşabiliyordu. 2001 yılında, 3G ile sağlanan bu küresel başarı Avrupa'nın UMTS (*Universal*

5G Neler Getirecek?

Yüksek hız: *Gigabit* ve üstü hızlar, ultra yüksek çözünürlükteki içeriklere ulaşabilmeyi ve sanal gerçeklik uygulamalarını kullanabilmeyi sağlamakla beraber; 10 Gbps hızlar mobil bulut servislerinin önünü açacaktır.

Düşük gecikme: Ağdaki gecikmelerin 1 milisaniyenin altında tutulması, gerçek zamanlı mobil kontrol ve uzaktan-araca haberleşme uygulamalarının gerçekleşmesine olanak sağlayacaktır.

Yüksek kapasite: 5G ile sağlanan yüksek erişim kapasitesi, yüz milyarlarca aygıtı sürekli olarak ulaşabilmeyi mümkün kılacaktır. Şimdiki kapasiteden 1000 kat fazla kapasiteye sahip birim alana ulaşılacaktır.

Enerji verimliliği: Enerji verimliliğinde ulaşılacak 1000 kata varan iyileştirmeler, cihazların pil sorunlarını hemen hemen ortadan kaldıracaktır. En az 10 yıl pil ömrüne sahip sensör cihazlar hedeflenmektedir.

Yüksek Coğrafi Kapsama ve Erişim: 5G için şart olan coğrafi kapsama ve kesintisiz bağlantı, iş planlarının ve ekonomik getirinin artmasına olanak sağlayacaktır.

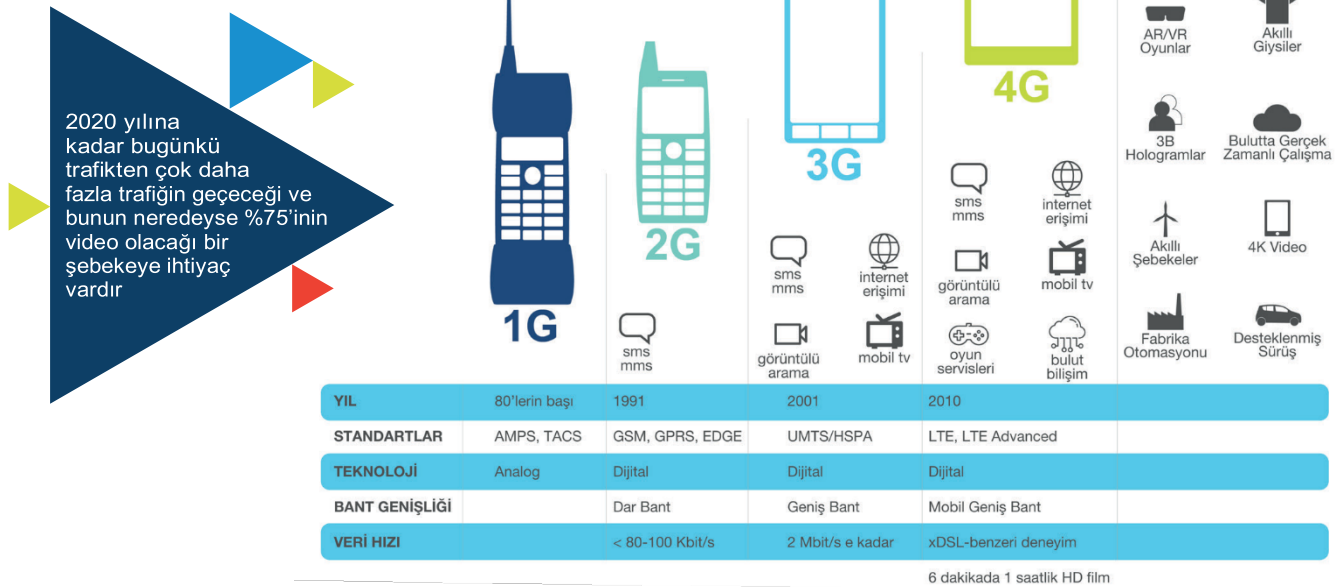
2 SDN: Software Defined Networking
3 NFV: Network Function Virtualization
4 mmWave: Milimeter Wave Communication
5 MIMO: Multiple Input Multiple Output Systems
6 M2M: Machine to Machine Communication
7 Green Communication
8 Misone, Türkiye'nin 5G Vizyonu. *misone.com.tr* (2015).

Mobile Telecommunications System) standardı ve uluslararası standartların belirleyiciliği üzerine inşa edildi. Aradan on yıl geçmeden geline yeni aşamada kullanıcılar, kurumlar ve ekosistemin üreticileri, bu yeni mobil dünyaya o kadar hızlı ve kapsamlı bir şekilde taşınmışlardı ki, artık 3G'nin olanakları, bazı uygulamalardaki ihtiyaçları karşılamakta yetersiz kalmaya başlamıştı. Yeni bir nesil olarak 4G'yi belirleyen teknoloji, fiili olarak *Long Term Evolution - LTE* (4G olarak anılıyor) ve onu izleyen *LTE-Advanced* (4.5G) standardı üzerine inşa edilmektedir⁹.

Bugün, mobil haberleşmenin kitlelere yayılması ve beraberindeki ekosistemin hızla büyümesi, kullanıcı isteklerinin de katlanarak büyümesine sebep olmaktadır. 2020 yılına kadar bugünkü trafikten çok daha fazla trafiğin geçeceği ve bunun neredeyse %75'inin video olacağı bir şebekeye ihtiyaç vardır¹⁰.

Mobil haberleşmede standartlaşma ve ticarileştirmede Avrupa'nın baskınlığı, zaman içinde Uzakdoğu'dan çıkan büyük tedarikçiler, Amerika'dan çıkan internet şirketleri ve pazar içindeki daralma

ile sarsılmaya başlamıştır. Avrupa, 5G ile ülkeler veya kıtalar arasında teknoloji yarıştırmaktan öte geleceğin haberleşme teknolojisini ve dijital ekonomisini global ölçekte kurmayı hedeflemektedir. Bu yüzden 5G PPP¹¹ gibi kuruluşlar üzerinden bütün dünyada gerçekleşen 5G çalışmalarını harmonize etmek üzere araştırma fonları hayata geçirildi¹². 5G PPP'nin 2013'teki kuruluşundan beri günümüze geline süreçte, AB komisyonu tarafından kamu-özel ortaklığı ile 5G çalışmaları için toplam 3,5 milyar euroluk bir fon dünyaya açık bir şekilde ayrıldı. Aynı zamanda 5G üzerinde çalışma yapan diğer ülkelerle (Amerika, Çin, Japonya, Güney Kore) yapılan üst düzey çeşitli anlaşmalar vasıtasıyla ortak proje imkânlarının oluşturulması yanında, 5G Deneyim Merkezleri (*5G Experimental Facilities*)¹³ adı altında bütün dünyada bu konuda çalışma yapan araştırma merkezleri bir araya getirildi ve 5G denemeleri harmonize edilerek sinerji yaratıldı^{14 15}.



⁹ Ibid.

¹⁰ Akyildiz, I. F., Nie, S., Lin, S. C. & Chandrasekaran, M. 5G Roadmap: 10 Key Enabling Technologies. *Comput. Networks* (2016).

¹¹ 5G Public Private Association ticari paydaşlar ile Avrupa Komisyonunu bir araya getiren oluşumdur. 5G Infrastructure Association ile yönetilmektedir.

¹² Youngnam, H. A. N. 5G Forum: Status Quo. *2nd Glob. 5G Event* (2016).

¹³ Türk Telekom 5G çalışmalarının devamı olarak 2017 yılında Türkiye'nin ilk 5G deneyim merkezini Ankara'da iştiraki olan Argela şirketinde açmıştır.

¹⁴ 5GPP. Trials Roadmap. *5g-ppp.eu*.

¹⁵ Park, Y. Ecosystems Promotion in Korea. *5G Forum* (2016).

Akıllı şehir çözümleri; güvenlik, verimlilik, ekonomi, çevrenin korunması ve yaşam kalitesi gibi konularda şehirlere önemli katkılar sağlamaktadır.



5G Kullanım Deneyimleri

5G ile kullanıcı deneyiminin her bakımdan zenginleşmesi amaçlanmaktadır¹⁶. Örneğin 4G evresinde kısmi geniş bant deneyimi yanında elektrik sayaçları, atık su arıtma tesisleri ve dijital reklam panoları gibi az sayıda nesneler internete bağlanırken, 5G evresinde zengin içerikli video aktarımı, otonom araçlar ve dron gibi çok daha gelişmiş deneyimler geniş ölçekte mümkün olacaktır. Sanal ve artırılmış gerçeklik, 4G ile sadece oyun ve videolarda denirken, şimdi sağlık ve ameliyat eğitimi için kullanılmaya başlanmıştır. Bunun ötesinde sanal turizm, evden mağaza içi alışveriş deneyimi, sanal otopsi ve ameliyat hazırlığı gibi konularda geniş kullanım alanları da 5G ile gelecektir. Sonraki evrelerde 5G, canlı hologram haberleşmesi ve uzaktan ameliyatı mümkün kılacaktır. 5G'nin mümkün kılacağı deneyimleri birkaç genel kategoride değerlendirebiliriz ¹⁷.

Akıllı Şehir

“Akıllı şehir” tabiri, eldeki kaynakların çeşitli sensörlerle toplanan veriler ışığında, verimli bir şekilde yönetildiği yerleşim yerleri için kullanılmaktadır. Şehir altyapısının daha bütünleşik ve ortak hedefe yönelik çalışmasını sağlayan akıllı şehir

uygulamalarında nesnelerin entegrasyonu, sensörler vasıtasıyla veri toplama ve görüntü çıkarmı ötesinde, kararın uygulama mekanizmalarının oluşturulmasında da 5G'nin sağlayacağı veri akışı gereklidir. Akıllı şehir uygulamaları, ulaşımdan enerjiye pek çok alanda etkili olacaktır. Türk Telekom'un akıllı şehir uygulamalarının hâlihazırda kullanılmaya başlandığı şehirlerde, trafikte bekleme süresi %25 oranında kısılırken, su ve elektrik tasarruf oranı ise % 30'a ulaşmıştır¹⁸.

Akıllı şehir çözümleri; güvenlik, verimlilik, ekonomi, çevrenin korunması ve yaşam kalitesi gibi konularda şehirlere önemli katkılar sağlamaktadır. Akıllı durak, otopark, kavşak, aydınlatma, sulama, atık toplama, geri dönüşüm, güvenlik ve sağlık çözümleri ile belediyelerin işleri kolaylaşmaktadır. Böylece bireylerin daha konforlu bir yaşama ulaşması sağlanırken, belediyelerin de temel giderlerinde önemli miktarlarda tasarrufa gidilmektedir. Sensör iletişiminin akıllı şehirler özelinde pazarı büyüktür, güvenlik kamera sistemlerinin ise orta seviyededir ama 5G'nin getireceği teknolojilere ihtiyacı fazladır. Çünkü, zaman içinde alışlagelmiş kamera sayısının artması¹⁹ yanında sabit 4K ve giyilebilir kameraların artmasıyla elde edilen verilerin buluta aktarılması için, kamera başına en az 20 Mbps veri hızı gerekli olacak. Bu kapasite

¹⁶ Casaccia, L., President, V. & Standards, T. 5G: Advanced Tech as a Platform for Innovators. *Glob. 5G Event* (2016).

¹⁷ Anritsu. Ten 5G Challenges for Engineers to Overcome. *anritsu.com* (2016); GSMA, Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile. *GSMA Intell. Underst. 5G* (2014).

¹⁸ Daily Sabah, *Türk Telekom carries Turkey to a future where cities get smart* (14 Mayıs 2017).

¹⁹ İngiltere 6 milyon kameraya ulaşmıştır. Pekin'de her 1000 kişiye 59 kamera düşmektedir. 2025'de pazarın 21 milyar dolara ulaşması beklenmektedir (Huawei. 5G Unlocks a World of Opportunities. *Huawei.com, Whitepaper* (2017)).

ihtiyacı yanında, 5G ile yapay zekâ destekli görüntü işleme metotlarının servis olarak sunulacağı platformlar geliştirilecektir.

Türk Telekom, akıllı şehir ürün ve servisleriyle ülkemizin birçok ilinde faal servislerin öncüsüdür. Türk Telekom; Türkiye'yi, bilgi teknolojileri ile örülmüş dijital bir merkez hâline getirmeyi ve bölgenin veri üssü olarak konumlandırmayı amaçlayan bir vizyon ile ilerlemektedir. Türk Telekom ilk olarak Karaman'ı, ardından Antalya'yı ve sonrasında Kars ve Bursa'yı akıllı şehir uygulamalarıyla donatmayı amaçlamaktadır. Türk Telekom'un iştiraki olan Innova firmasında geliştirilen Nesnelerin İnterneti (IoT) platformu ile sensörlerden kameralara birçok nesnenin bir arada yönetimini gerçekleştirecek bir ürün ve servis seti üretilmektedir. Örneğin, Bursa'da Türk Telekom, düşük enerji tüketen dar-bant-Nesnelerin İnterneti altyapısı (NB-IoT) ile şehirdeki binaların su sayaçlarını akıllandırma testlerini tamamlamıştır²⁰.

Akıllı Elektrik

Enerji sektörü, akıllı şehirlerin öncelikli olarak yatırım yapacağı alanlardan biridir. Enerji depolanmasının pratik bir yolu olmadığı için, şebekeye sağlanan elektrik kullanılmadığı durumda ziyan olmaktadır. Bununla birlikte, ani talep artışları sebebiyle elektrik kesintilerinin önlenmesi için şebekeye her zaman gerekenden fazla enerji verilmektedir. Çoğu zaman elektrik tüketimini anlık olarak izleyebilen sistemler olmadığı için şebekeye verilen enerji, verimlilik kaygısından uzaktır. Akıllı şehir uygulamalarında sayaçların internete kavuşmasıyla tüketim değerleri merkezi bir yapıya iletilecektir. Bu verileri inceleyen yapay zekâ uygulamaları, enerji verimsizliklerini tespit ederek kullanıcı ya da elektrik üreticilerini yönlendirecektir. Akıllı ağların oluşturulmasıyla enerji dağıtımı yapılarak anlık artışların ve enerji tüketimi merkezlerinin yönlendirilmesi olasıdır. 20 yıllık süreçte 2 trilyon dolarlık bir enerji verimliliği potansiyeli öngörülmüştür²¹.



Kullanıcıların enerji tüketimlerine ek olarak, aydınlatma gibi şehir yönetiminin merkezi kararlarla yönetildiği sistemlerde de önemli değişiklikler beklenmektedir. Alışlagelmiş uygulamalarda belirli bir saatten sonra ışıklar sürekli olarak açık kalmaktadır ve çevresel etkenlere cevap vermemektedir. Örneğin; GE tarafından yapılan geliştirmelerle, akıllı aydınlatma sistemleri ile San Diego'nun yıllık 2.2 milyon dolar enerji tasarrufu sağlayacağı öngörülmüştür²². Bu akıllı aydınlatma sistemleri, o anki hava durumunu ve ortamdaki ışık yoğunluğunu hesaba katabileceği gibi, görüntü işleme algoritmaları ya da hareket sensörlerinin de birleşimiyle gerekli anlarda aydınlatma yapabilecek şekilde yapay zekâ ile yönetilecektir. Akıllı aydınlatma sistemleri, ışığın yönünü de ayarlayarak enerjinin maksimum verimlilikte kullanılmasını sağlayacaktır.

Bunun yanında, üretim tarafında enerji hatlarını besleme mekanizmasının akıllı hâle getirilerek yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji dağıtım sisteminin güvenilir bir parçası yapılması da gündemdedir. 2035 yılında 36 milyar dolar²³ olması beklenen pazar için 5G teknolojilerinin 10ms altında gecikme sağlayan bir kalite sunması beklenmektedir. Ayrıca akıllı elektrik şebekeleri ile yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretiminde getirdiği değişkenlik, hızlı kararlar verilerek tüketim ile dengelenebilir.

²⁰ 3GPP. Standardization of NB-IoT Completed. 3gpp.org (2016).

²¹ Reuters, *U.S. smart grid to cost billions, save trillions* (25 Mayıs 2011).

²² Watson, B. From Light to Bright: San Diego Is Building The World's Largest Municipal Internet Of Things. Ge.com (2017)

²³ ABI Research

Akıllı Hareketlilik (V2X)

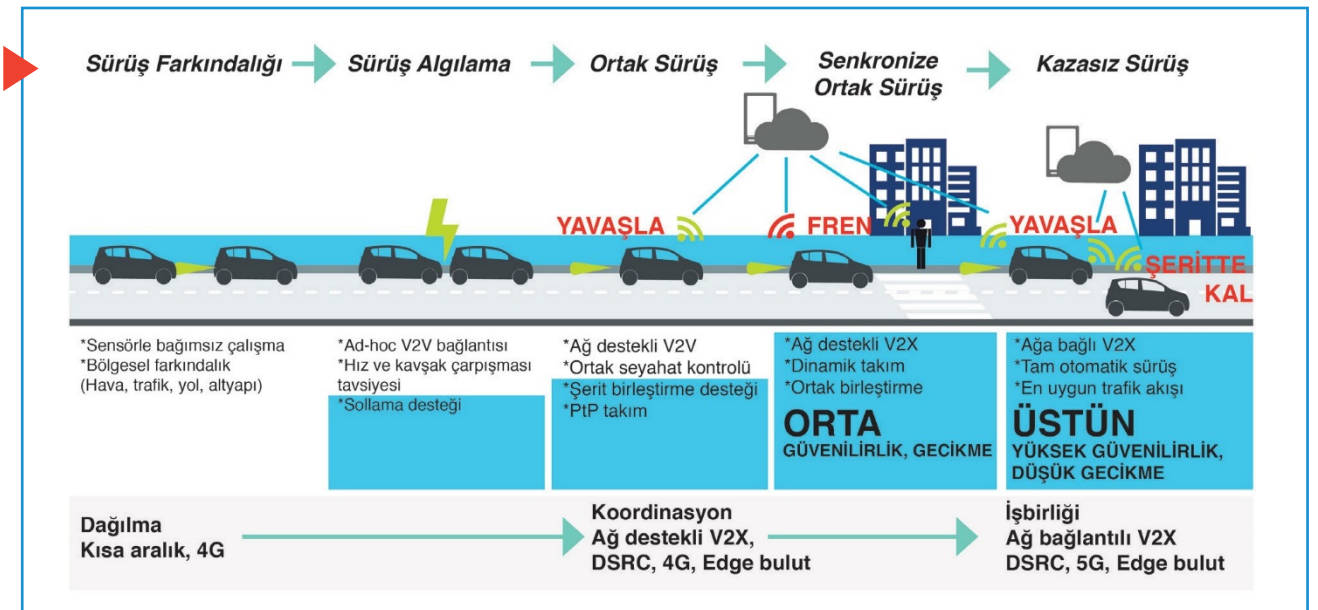
“Akıllı hareketlilik” kavramı akıllı ulaşımı, bağlantılı araçları, sürücüsüz veya uzaktan (tele) sürücülü araçları kapsayan genel bir terimdir²⁴.

Akıllı ulaşım sistemleri toplu ulaşım süresini kısaltmayı hedefler. Toplu taşıma saatlerinin güncellenibilir olması, şeritlerin ihtiyaca göre akış yönünün değiştirilebilmesi ve var olan yollarda uyarlanabilir kısıtlamaların getirilmesi ile toplam ulaşım süresi daha verimli hâle getirilebilir. Toplu taşıma araçlarının optimizasyonu ile kişisel araç kullanımının azaltılması da hedefler arasındadır. 5G sayesinde daha etkili hâle getirilen toplu taşıma sistemleri aynı zamanda akıllı şehirlerin çok önemli bir parçası olacaktır. Akıllı ulaşım sistemlerinde her toplu taşıma aracı aynı zamanda bir sensördür ve çevresi hakkında detaylı bilgileri merkeze iletir. Bu bilgilerin işlenmesi sonucunda, araçlardaki yoğunluğun azaltılması, insanların bu araçları bekleme süresinin kısılması ve yakıt tüketiminde azalma hedeflenmektedir. Benzer şekilde, akıllı trafik ışıkları kullanılarak kavşaklardaki bekleme süresinin optimize edilmesi de önemli çalışmalardandır²⁵.

Akıllı hareketliliğin diğer ayağı “bağlantılı araç” olacaktır. Bunun en önemli bileşeni olacak V2X (“Ve-

hicle to Everything” – “Araçtan Her Şeye”) iletişim sistemleri ile trafik kazalarının azaltılması, sürüş emniyetinin ve konforunun artırılması amaçlanmaktadır. 2016 yılında yayınlanan pazar araştırma raporuna göre, V2X sistemlerinin uygulanması ile yollarda meydana gelen kazalarının %80 oranında azalacağı öngörülmektedir²⁶. V2X sistemleri, beraberinde getireceği servisler ve uygulamalar ile global ve yerel büyük bir pazar oluşturacaktır. Bu nedenle bu alanda en hızlı ve büyük miktarda yatırım ve Ar-Ge çalışmaları araç üreticileri ve mobil operatörler tarafından yapılmaktadır. 2019 yılından itibaren üretilen her arabada V2X iletişim kabiliyetinin standart donanım olması hedeflenmiştir. 2030 yılına kadar tüm araçların %50’sinin, 2035’e kadar ise tamamının V2X kabiliyetli/donanımlı olması öngörülmektedir. Bu noktada, araç modellerinin 7-10 yıl arasında değişmesini göze almalıyız. Ülke olarak, bu pazar içerisinde gerekli yatırımların ve Ar-Ge çalışmalarının yapılması öngörülmüştür ve bu, Ulaştırma Bakanlığı’nın 2023 hedefleri arasındadır.

Araçlara her noktada, her zaman ve aynı servis kalitesinde V2X iletişimi ile hizmet verilebilmesi ancak hücresel ağ servisleri ile sağlanabilecektir. 5G Otomotiv Birliği (5G Automotive Associati-



²⁴ Huawei. 5G : A Technology Vision. Huawei, Whitepaper 1–16 (2014).

²⁵ Mueller, A. 5G for Vertical Industries – The BOSCH Perspective. Bosch, Whitepaper (2016).

²⁶ Visiongain. Automotive Vehicle To Everything (V2X) Communications Market 2016-2026. Visiongain, Report (6 Haziran 2016).

on²⁷) kurularak paydaşlar bir araya getirilmiş, V2X iletişim ve servislerinin, 5G ağları ve teknolojileri kapsamında 3GPP tarafından dikey teknoloji olarak standartlaştırma çalışmaları başlatılmıştır. Sürüm-14 adı verilen standartlaşma süreci ile V2X servislerinin verilmesi amaçlanmaktadır. Haziran 2017’de Sürüm-14 sona ermiş ve ürün geliştirme süreci başlamıştır. Bu nedenle, bu dikey teknoloji alanında ürün ve servisler geliştirmek hem ülkemiz hem de kuruluşlarımız için temel bir hedef olmalıdır. Türk Telekom, bu dikey sektörde verdiği servislere V2X kabiliyetini kazandırmak, milli V2X ürünlerine sahip olmak, gelecekte geliştireceğimiz yol ve yolcu güvenliğine ve sürüş konforuna yönelik V2X uygulamalarına hazır altyapı ile bu alandaki Ar-Ge birikimine sahip olmak üzere çalışmalar yapmaktadır. Türkiye’de ilk olarak, 5G altyapısı ile uçtan uca bağlantıyı sağlayan bir ağ altyapısı oluşturularak, hem emniyete hem de trafik etkinliğine yönelik uygulamalar geliştirilecektir. Araç emniyeti, yolcu emniyeti ve trafik etkinliği- ne yönelik olarak Trafik Yönetim Sistemi (TYS) ve iletişim altyapısı tasarlanmaktadır. V2X iletişimi ve altyapısı ile araçlardan toplanan bilgiler, TYS’de analiz edilecek olup, olağan dışı ve acil durumlar sezilerek sınıflandırılacak, araçların ve yolcuların emniyeti için araçlara tekrar V2X iletişim altyapısı üzerinden iletilecektir. Ayrıca, V2X iletişimini sağlayan radyo gömülü sistemlerin ve yazılımların yerleştirilmesi gündemdedir. Şu ana kadar desteklenen projeler V2X uygulamalarının sürücülere daha güvenli ve verimli bir sürüş tecrübesi yaşattığını göstermiştir. Aşağıdaki proje başlıkları bunlara örnektir:

- Kesişim Noktalarında Kaza Uyarı Sistemi
- Yol Hasar Uyarı Sistemi
- Acil Müdahale Araç Uyarı Sistemi
- Kaza Öncesi/Sonrası Uyarı Sistemi
- Elektronik Fren Uyarı Sistemi
- Yeşil Işık Optimum Hız Danışmanı
- Motosiklet Yaklaşma Uyarı Sistemi
- Kırmızı Işık İhlal Sistemi
- Trafik Yoğunluğu İkaz Sistemi

Sürücüsüz otonom araçlar ise bir diğer önemli 5G uygulamasıdır. Trafik kazalarının önemli bir kısmı, kullanıcı hatasından kaynaklanmaktadır. Küçük çaplı maddi kazalarda bile yaşanan trafik sıkışıklığı, saatlerce yolun kapalı kalmasına sebep olmakta ve önemli maddi kayıplara neden olmaktadır. Sürücüsüz araçlar gelişmiş sensör ve kamera (LIDAR²⁸ vb.) teknolojisi ile etrafını tarayarak nesneleri tespit eder ve olası gelecek hareketlerini öngören algoritmalar ile en güvenli ve ekonomik aksiyonu alır. Sürücüsüz araçlar, birbirine daha yakın hareket ederek konvoy sisteminde öndeki aracın yarattığı hava boşluğundan faydalanarak önemli oranda yakıt tasarrufu elde edebilir. Tüm araçların koordine bir şekilde karar vermesi ile ivmelenme hareketlerine olan gereklilik azalır. Bununla birlikte bu kadar çok bilginin hesaplanması, çok büyük verilerin incelenmesini ve iletilmesini gerekli kılacaktır. 5G çalışmalarının, sürücüsüz araçların iletişimi konusunda özelleşmiş çözümler sunması gerekmektedir. Bu konuda dünyada standartlaşma çalışmaları başlamıştır. Yapay zekânın sürücüsüz araçları yönetmesi hususunda oluşturulan etik kurullar, otonom sürüş kurallarını belirlemeye ve standardize etmeye çalışmaktadır. Kazanın kaçınılmaz olduğu durumda kazanın etkisini azaltacak ya da kazanın şeklini değiştirecek kararlar alacak yapay zekânın belli kurallara bağlı olması gerekmektedir. Sürücüsüz araçların trafikte dolaşmasıyla trafik kurallarının ihlali gibi problemler de ortadan kalkabilecektir. Bunlara ek olarak uzaktan sürüş, 5G’nin gecikmesiz ve aşırı güvenli teknolojilerini bekleyen önemli bir kullanım olacaktır. Araçların, araçların içinde olmayan tele-sürücüler tarafından kullanılmasıyla endüstri makinalarından normal bireysel araçlara kadar birçok yerde hayatın işleyişi ve iş gücünün organizasyonu değişecektir.

Görüldüğü gibi araç endüstrisi giderek daha fazla aracın internete bağlanması sebebiyle kilit dönüşümlere girmiştir. Karışık yol durumları ve otonom hâle getirilmiş cihazlar sebebiyle, sürücüsüz araçlar kendi kendine karar vermek yerine merkezi karar vermek amacıyla sadece kendi sensörleriyle

²⁷ <http://5gaa.org/>

²⁸ Laser Imaging Detection and Ranging

değil, diğer araçların da sensörleriyle iletişim kurmak zorundadır. Bu teknolojiler şu anki kablosuz iletişim teknolojilerinin üstünde, kısa sürede karşı tarafa güvenilir bir şekilde veri ulaştırma ihtiyacı sebebiyle kritik değişiklikler gerektirmektedir. 5G, mobil teknolojilerde, azaltılmış gecikme, arttırılmış güvenilirlik, daha yüksek veri aktarımı, yüksek hareketlilik ve yoğunluk durumlarında performans iyileştirmeleri getirecektir. Böylece otonom sürüş, konvoy oluşturma ve uzaktan sürüş gibi yeni kullanımlar başlayacaktır.

Dron Deneyimi

5G teknolojisine geçişle birlikte en çok etkilenecek ve gelişecek alanlardan biri havacılıktır. Bu gelişme pilotların kontrol ettiği uçak ve diğer hava araçlarından oluşan büyük ölçekli havacılık yerine, “Dron” olarak adlandırılan insansız hava araçları (İHA) üzerinden olacaktır. Günümüzde, İHA'nın geniş ve sabit kanatlı olanları askeri amaçlarda kullanılmakta; bunlara kıyasla oldukça ucuz, küçük ve genellikle dört pervaneli olan modeller ise ticari alanlarda faaliyet göstermektedir.

5G'nin gelişmesi ve yerleşmesiyle dron teknolojisi ve uygulamalarında çok büyük atılımlar gerçekleşecektir. Dronların önemi, alçak irtifada uçabilmelerinden ve düşük maliyetlerinden kaynaklanmaktadır. 5G teknolojisi sayesinde anlık veri aktarımı yapabilen, yerde ve havadaki diğer araçlarla da-

ima koordinasyon içinde çalışan dronlar; tarım, hayvancılık, meteoroloji, arama-kurtarma, harita-cılık ve güvenlik gibi birçok farklı alanda çeşitli uygulamalara olanak tanıyacaktır. Fazla ağır olmayan kargoların dronlar sayesinde taşınması, hem taşımacılık ve ticaretin genelinde kolaylık ve büyüme imkânı sağlayacak hem de trafikteki araç sayısını azaltarak kara ulaşımında iyileştirme sağlayacaktır.

5G evresinde, dronların kesintisiz olarak yerdeki merkezlerle ve diğer araçlarla bağlantılı olması ve anlık veri aktarımı yapabilmelerinin yanı sıra, bu alanda ilerleme sağlayacak en önemli teknoloji, şu anda başlangıç aşamasında olan “sürü” (swarm) teknolojisidir. Bu teknolojiye birbiriyle senkronize hareket eden kalabalık bir grup dron içinde bir tanesi “lider” seçilmekte, diğerleri onu takip etmekte ve dronlar arasında otomatik görev paylaşımı yapılmaktadır.

Dronlar, bunun gibi ilerlemeler ve araştırma alanlarıyla beraber genel anlamda 5G teknolojisinin gelişimi ile gündeme gelecek ve yüksek hız ve gecikmesiz iletişim yanında, hızlı mobilite ve kapsama teknolojileriyle de katkı sağlayacaktır. ABI tarafından yapılan araştırmaya göre, bu pazarın 2025 yılında 4.6 milyar dolar olması beklenmektedir²⁹.

Bunlara ek olarak, dronların şebekeye destek amaçlı kullanılmasına da başlanmıştır. Dronların taşıdıkları erişim noktaları ile anlık haberleşme ihtiyacı karşılanabilmektedir.



²⁹ ABI Research. Consumer Drone Shipments to Exceed 90 Million Units and Generate \$4.6 Billion in Revenue by 2025. *ABI Research Press* (19 Ocak 2016).

Mobil şebeke, dronlara özgü bir performans kriteriyle sanal bir şebekeyi tesis edecektir. İş planı olarak hava kontrol ve trafik sistemleri, otonom uçuş gibi katmanların yanında arka planda bulut düzleminde veri işleme, karar verme, haritalama, izleme gibi fonksiyonları da sunabilecektir.

Kısaca dronlar, ölçeklenebilir bir destek mekanizması olarak gündeme girecektir. İnşaat, ticaret, enerji ve tarım gibi birçok konuda kullanım alanları olacaktır. Türk Telekom'un, mobil şebekeyi ve ötesindeki platformu kullanıma sokarak bir uygulama ekosistemi yaratma hedefi bulunmaktadır.

E-Sağlık

Mobil haberleşme ve internetin hızla yayılması ile tüm dünyada, hastalar ve doktorlar birbirine bağlanmaya başlamıştır. Bunun yanında daha fazla tıbbi cihazın internete bağlanması ile de doktorlar, hastaları daha uzun süreli izleyebilmektedirler. Bunlara ek olarak, dijital verilerin dünyanın herhangi bir yerine analiz için gönderilmesi sağlanarak, sağlık hizmetleri coğrafi açıdan genişletilmektedir. Giyilebilir cihazlar, çok önemli hayati verileri doktorlara ileterek, kritik değişikliklerde uyarı vermektedir. Türk Telekom örneğin mobil EKG³⁰ ile hasta üzerindeki veriyi buluta taşımaktadır. 5G ile ise uzaktan teşhisin gündeme

gelmesi beklenmektedir³¹. Gecikmesinin sebebi düşük internet olan teşhis koyma işlemi uzaktan yapılabilecek ve akabinde yapay zekâ ile bunu destekleyen iş gücü daha da azalacaktır. Daha da ötesinde, 5G'nin getireceği yüksek güvenilirli- ğe sahip iletişim sayesinde, uzaktan ameliyat da gündeme gelerek kısıtlı olan sağlık personeli bütün dünyaya coğrafyadan bağımsız hizmet verir hâle gelecektir. 2025 yılında 536.6 milyar dolar olması beklenen pazarda³² bulut tabanlı veri işleme, yapay zekâ temelli asistanlar, 5G bağlantılı ambulanslar yanında uzaktan teşhisin önde giden uygulamalar olması beklenmektedir.

Medya ve Eğlence

5G, son kullanıcıların medya ve eğlence deneyimini en üst düzeye çıkarmak amacıyla entegre ve optimize edilmiş bir çözüm sunacaktır. 5G ile, birçok medya ve eğlence kullanımının oluşturulması ve geliştirilmesi beklenmektedir.

Ev içinde ultra-yüksek çözünürlüklü televizyon deneyimi başlamıştır. 4K ile başlayan süreç 8K TV yayınlarına doğru ilerlemektedir. 8K TV yüksek veri akışı hızı gerektirir. Bunun yanında ev içinde güvenlik kameralarından bulut tabanlı oyun konsollarına kadar birçok video yayını uygulamasına 5G teknolojisi, kablosuz çözüm önermektedir. Oyun

Mobil haberleşme ve internetin hızla yayılması ile tüm dünyada, hastalar ve doktorlar birbirine bağlanmaya başlamıştır



30 Elektrokardiyografi

31 Fengyi, Y. 5G for Verticals in the New Economy. *China Telecom* (2016).

32 Transparency Market Research (TMR), Digital Health Market (Product- Health Care Information Systems and Wearable Devices; Component- Hardware, Software, and Services; End User- B2C and B2B)- Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast, 2017 – 2025 *Transparency Market Research, Report*(2017).



oyunların, daha gerçekçi bir deneyimi sağlayan çoklu sensör ortamına entegre olması ve kullanıcıların oyunda daha fazla iş birliği yapabilmeleri ile daha da genişlemesi beklenmektedir. Oyunlar, kullanıcıların gerçek konumlarına dayalı, hem fiziksel dünyada hem de artırılmış gerçeklikte kullanıcı iş birliğine dayanan bir anlayış sayesinde, her yerde yaşanabilecek bir tecrübeye dönüşmektedir. Bu noktada 5G'nin yüksek hız sunması gereklidir. 8K TV için veri kapasitesi 5G'den beklenirken, oyun için belli kriterleri kesintisiz sağlayan bir şebeke sistemi gerekmektedir.

Artırılmış³³ ve sanal gerçeklik³⁴ (AR/VR) ise 5G teknolojilerinde hem hız hem minimum gecikme hem de kesintisiz kalite aramaktadır. AR/VR ile bir anlamda içerik tüketimini yeniden tanımlamaktadır. Cihaz üzerindeki işlemin buluta taşınması ile cihaz fiyatlarının ucuzlaması ve kitlelere yayılması mümkün olacaktır. AR/VR ile sinema ve stadyum gibi etkinlik alanlarının sanal yansıması ile kullanıcılara daha iyi bir deneyim kazandırma şansı doğacaktır. Etkinliği yeniden oynatabilmek, belli bir kamerayı seçebilmek ve artırılmış gerçeklikle ek bilgi sağlamak gibi özellikler mümkün olacaktır. ABI araştırmasına göre AR/VR pazarının 2025 yılında 292 milyon doları bulması bekleniyor³⁵. Sosyal medyada video paylaşmanın ötesinde canlı yayına geçmek de 5G'yi bekleyen yegâne kullanımlardan biridir. Bugün sınırlı olarak yapılan bu kullanım, zaman içinde 4K ve 360° ile

zenginleşerek yaygınlaşacaktır. Hem *uplink* yayını olması hem de hareketli zamanlarda da yapılabilmesinin şebekeye getireceği yük, en az düşük gecikme istemesi kadar fazla olacaktır. Yayın yapan her kullanıcının *uplink*te de yüksek hıza ihtiyacı olacaktır. Bu, bireysel kullanım olabileceği gibi, herhangi bir etkinlikte sanatçıların, futbolcuların, araçların üzerinden de yayın yapılarak birden fazla açıdan izleme gerçekleştirilebilecektir. Gelişmiş ülkelerde hâlihazırda %50'ye varmış video yayın pazarının 2021 yılında 70,05 milyar doları geçmesi bekleniyor³⁶.

Buna benzer şekilde kişiselleşmiş yapay zekâ destekli asistanlarda da bağlantı ihtiyacı mobilitayı, düşük gecikmeyi ve belli performans kriterlerini sağlar nitelikte olacaktır. Giyilebilir teknolojiler pazarının her yıl %16 büyümesi beklenmektedir³⁷. 5G ile beraber uçtan uca gecikmenin 10 milisaniyenin altına düşmesi beklenmektedir.

Türk Telekom, Sebit ve Sobee firmalarıyla eğitim ve oyun içeriği konusunda son on yıldır içerik geliştirmektedir. Sebit firmasının geliştirdiği VİTAMİN, okullarda dijital içerik kaynağı olarak kullanılmaktadır. İçerik yayınlama platformu olarak TİVİBU, IPTV dâhil birçok kanal üzerinden kullanıcılara ulaştırılmaktadır. Bu yıl yayımlanan sosyal medya ve mesajlaşma platformu TAMBU klavyesi ile akıllı telefon içeriğini yapay zekâ ile bir üst düzeye taşınmış ve ülkemize özgü dijital klavye kullanıma sokulmuştur.

³³ AR: Augmented Reality

³⁴ VR: Virtual Reality

³⁵ Huawei. 5G Unlocks a World of Opportunities. *Huawei, Whitepaper* (2017).

³⁶ PRNewswire, Video Streaming Market 70.05 Billion USD by 2021, *PRNewswire.com* (5 Mayıs 2016).

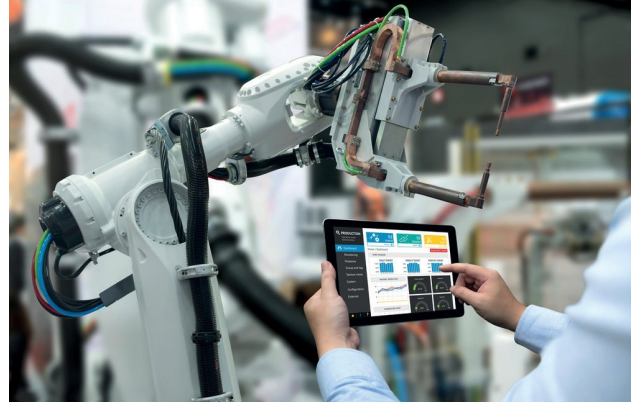
³⁷ Market Research Future. Wearable Technology Market Research Report- Forecast 2022. *Market Research Future, Report* (2018).

Endüstri 4.0

5G ile gelen Nesnelerin İnterneti içeriği, sanayi- de kullanılan ve kullanılacak olan milyarlarca irili ufaklı ekipmanı da içermektedir. Günlük hayatta kullanılan cihazların akıllı ve çevresiyle entegre bir yapı oluşturması düşünülürken, büyük üre- tim tesislerindeki küçük aletlerin de bu özelliklere kavuşması mümkündür. 2020 yılına gelindiğinde sanayinin GSMH'deki³⁸ payının %20 olacağı ön- görülmektedir³⁹. Bu kapsamda, üretim tesislerin- deki küçük bir iyileştirmenin bile büyük ekonomik katkıları olacaktır. Akıllı üretim tesislerine farklı isimler verilmiştir. Ülkemizde bu çalışmalar daha çok Endüstri 4.0 başlığı altında geçmektedir. Kısaca, şu anki veri sağlayıcılara ek olarak, çok sayıda veri üreten cihazın anlık olarak takip edilmesi ve incelenmesi sonucunda toplam verimliliği artırarak çözümleri içermektedir. Bu verimlilik artışının yanı sıra, bu kadar çok cihazın olduğu durumda kablosuz haberleşmenin gerçek anlamda kullanılması büyük kolaylıklar sağlayacaktır.

Günümüz ekonomik trendlerinde gelişmeden ve itici gücü oluşturmadan, üretim sektöründe kararlı ve uzun vadeli bir büyümenin pek mümkün olmadığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, hammaddelerin azalması ve artan rekabet ile sanayi üretimindeki kâr marjı azalmaktadır. Gittikçe azalan bu marjın tekrar yükselmesi için yakın vadedeki çözümün, verimi arttıracak Endüstri 4.0 çalışmalarında olduğu öngörülmektedir. Akıllı üretim tesisleri, ham maddenin optimum yollardan elde edilmesinden üretim sırasındaki kayıpların azaltılmasına ve sonuçta aynı miktar ürünü daha ucuza mal edilmiş şekliyle müşteriye ulaştırılmasına kadar pek çok adımı içermektedir. Dolayısıyla karışık üretim tesislerinde her bir parçanın bütünleşik sistemin davranışlarına olan etkisini tespit edecek algoritmaların tasarlanması gereklidir.

Akıllı fabrikaların ekonomik katkılarının yanında, güvenlik açısından da önemli etkileri olacaktır. Karışık sistemlerde bazı değişkenlerin öngörü-



meyen davranışları kartopu etkisiyle büyük hasarlara sebep olabilmektedir. Akıllı fabrikaların değişkenler arasındaki ilişkileri ortaya çıkararak bu tarz durumları öngörmesi ve bu durumlara karşı önlem alması gerekmektedir. Dolayısıyla 5G çalışmalarının bu cihazlar arasındaki kesintisiz bilgi akışını sağlayacak zemini oluşturması, bu projelerin hayata geçmesi için ön şarttır.

Endüstri kameraları ve sensörleri, uzaktan kontrol ve veri işleme, 5G'nin geniş bant teknolojisini gerektirirken, uzaktan izleme ve takip, 5G'nin nesnelerin interneti platformuna ihtiyaç duymaktadır. Buna karşın, senkron robotlar ve bulut üzerinden programlanan gömülü işlemciler ise 5G'nin düşük gecikmeli ve aşırı güvenilir teknolojisini gerektirmektedir.

Üreticiler, akıllı sistemlere bir anlamda, kaliteli ürünleri hızla pazara sunmak için geçmek istemektedirler. Üretim hatlarında robotların ve AG (artırılmış gerçeklik) gözlüklerinin kullanımı ile oluşan koordinasyon ve senkronizasyon sayesinde ulaşılan verim ve hız bu konuda motive edici bir etkidir. Bunun yanında, fabrikaların işlevsiz kalmasını engelleyen yapay zekâ temelli moni- tör sistemleri, bakım ve onarımı planlayarak zaman kaybını önler. Ayrıca bağlantılı yapılanma ve tedarik zincirinin anlık optimizasyonu ile üretim planlaması yapılır. 2025'e gelindiğinde 88 milyon ötesinde üretim hattı bağlantısının olması ve endüstri robotlarının sayısının ise 1 milyonu geçmesi beklenmektedir.⁴⁰

³⁸ Gayri Safi Milli Hasıla

³⁹ European Commission. Commission calls for immediate action for a European Industrial Renaissance. *European Commission, Press Release* (22 Ocak 2014).

⁴⁰ European Parliament. Industry 4.0 Digitalisation for productivity and growth. *European Parliament, Briefing* (2015)

Türk Telekom, çözüm ortakları ile Türkiye’deki sanayi şirketlerine dijital dönüşüm ve danışmanlık hizmeti sunmaktadır. Türk Telekom, şirketlerin dijitalleşme seviyelerini tespit etmek ve dijital dönüşümleri için en kısa sürede en yüksek değeri sağlayabilecekleri stratejileri ve yol haritalarını belirleyebilecekleri gelişmiş teknolojik çözümler sunmak üzere ortak servisler sağlayacaktır. Bu şekilde detaylı planın oluşturulması sonrasında sanayi şirketlerinin, Akıllı Fabrika, Varlık Performans Yönetimi ve Veri Bilimi çözümleri ile altyapı, mobilite, veri merkezi ve bulut servisleri ile dijitalleşmesine katkı vererek şirketleri rekabet içinde öne geçirmeyi amaçlamaktadır.

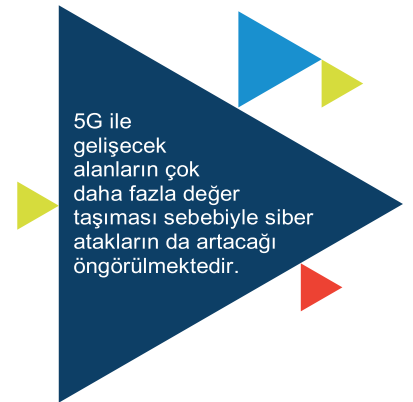
Siber Güvenlik

5G ile beraber güvenlik kriterlerinin değişeceğini öngörülmektedir. Yeni servisler, gelişmiş siber saldırılar ve kişisel bilgilerin korunmasındaki farkındalık artışı, 5G’de kullanım deneyimlerinin değişeceğini göstermektedir. Bunlara ek olarak, “güven” tanımının da değişeceği söylenebilir. Önceki nesillere göre yatay düzlemde birden fazla teknolojiyi içinde barındıran ve dikey alanda birden fazla uygulamayı sunarak genişleyecek olan 5G’de güvenliğin, 4G’nin birebir kopyası olacağı

söylenemez. Şebekeye bağlı cihazlardaki farklılıkların getireceği güvenlik tehditleri farklı olacaktır ve 5G ile bu güven tanımı cihaza ve uygulamaya bağlı olarak değişecektir⁴¹.

Yeni servis modelleri: Bulut ve sanallaştırmanın kullanımı güvenli yazılımın önemini vurgulamakta ve güvenlik üzerinde pek çok etkiye neden olmaktadır. 3G çalışmalarındaki referans noktaları ve fonksiyonel düğüm spesifikasyonları sanallaştırma için iyi bir başlangıç noktası oluşturmaktadır. Şimdiye kadar güvenlik yazılımları, bu düğümler ve ara yüzler için kullanılmıştır. Yazılım ve donanımın ayrılması, yazılımın artık donanım odaklı güvenlik protokollerinden bağımsız hareket etmesine olanak sağlayacaktır.

Evrimleşmiş alan yönetimi: Bugünün ağ sahipleri pek çok değerli veri barındırır. Bu değerli verilere erişim, şu an bile pek çok kötü niyetli kullanıcıyı çekmektedir. 5G ile gelişecek alanların çok daha fazla değer taşıması sebebiyle siber saldırıların da artacağı öngörülmektedir. Saldırıların olası sonuçları düşünülünce, kişisel ya da iş odaklı olmanın ötesinde toplumsal sonuçları olacaktır. Bu toplumsal sonuçlar can kayıplarından uluslararası krizlere kadar çok çeşitli şekillerde gerçekleşebilir.



⁴¹ PG, I.-2020 (5G). Activities of IMT-2020 (5G) Promotion Group. 2nd Glob. 5G Event 2020 (2016); Huawei Technologies Co. 5G Security: Forward Thinking, Huawei, Whitepaper (2015).

Bu da farklı alan ve uygulamalar için çeşitli güvenlik alanlarını güçlendirmeyi gerektirir. 5G protokolleri tanımlanırken, bu alanların dizayn kriterlerinin tanımlanması gereklidir. Daha temelde, varlığı doğrulayan, doğruluk ve yeterlilik güvenlik fonksiyonları tanımlanmalıdır. Bunu yapan 5G uygulamaları bazı sorulara cevap verebilmelidir: Ağ ile entegre edilmiş bir toplumun temel bileşeni veri olacaktır. Şu anda verinin oynadığı karar verme ve değer yaratma mekanizması değişmektedir. Kişisel verinin kontrolüne sahip olma, operasyonel sebeplerle kritik olacaktır; fakat rekabetçi avantajlar da yaratacaktır. Şebekeler de bunları güvenli bir şekilde taşımak için gerekli altyapıyı sağlayacaktır.

Gizlilik kriterleri: Verinin işlenmesi gerekliliği ile birlikte güvenlik ve kişisel veri güvenliği, AB çerçevesinde tartışılmaktadır. Ek olarak, standartlaşması için farklı platformlar altında incelenmektedir. 5G'de siber güvenliği tanımlanan güvenlik protokollerinin sayısı ile ölçmek yanlış bir yakla-

şım olacaktır⁴². Aksine, tüm bileşenlerin güvenlik mekanizmalarını kontrol etmeye çalışmak zararlı olabilir ya da yönetmesi zor bir güvenlik protokolü ile sonuçlanabilir. İlk ihtiyaç, iyi tanımlanmış esnek bir altyapıdır. Bunun uygulanabilir olması temel kriterdir. 5G ile birlikte daha hızlı gerçekleşecek dijital dönüşümün sonucu olarak, veri analizi ve verinin en etkin şekilde kullanımı oldukça önemli hâle gelmektedir. Veri ve verinin doğru işlenmesi gerek özel sektör gerekse kamu kurum ve kuruluşlarının günlük işleyişinde önemli bir süreç hâline gelmektedir. Önümüzdeki dönemde, gelişen IoT hizmetleri ve sanayide dijital dönüşüm ile kişisel verinin korunması ile ilgili alınacak güvenlik önlemleri sayesinde verinin daha esnek bir şekilde paylaşabilmesi/işlenebilmesi ve cihazlar arasında verinin paylaşımına/analizine olanak tanıyan bir ekosistem oluşturulması da ön plana çıkmaktadır. Verinin etkin kullanımı, dijital dönüşüm ve IoT ile kullanılacak teknolojiler (bulut, büyük veri)'den de hedeflenen ekonomik faydanın oluşmasını sağlayacaktır⁴³.



⁴² SIMalliance. An analysis of the security needs of the 5G market. *SIMalliance, Whitepaper* (2016).

⁴³ Belcher, S. The Future of Connectivity in Transportation From 5.9 GHz to 5G. *TIA Work*. (2016); Ergen, M. 5G ve Açık Kaynak. *Ict Media* (2016).

5G Kullanım Deneyimleri Kategorileri

1. Gelişmiş Geniş Bant: Evolved Mobile Broadband (eMBB) olarak anılan kategoride hız (1-10 Gbps max – 50-100 Mbps ortalama) öne çıkmakta, gecikme (50-100 milisaniye), hareketlilik (2-120 km/s) ve yoğunluk (km²'de 200-150000 cihaz) ikinci planda kalmaktadır. Video içeriğinin oranının uygulamalarda artışı, bu ihtiyacın ana kaynağıdır. Aşağıdaki uygulamalar, yukarıda değindiklerimize ek olarak örnek verilebilir.

- >> Telefonla 4K Video Yansıtabilme
- >> Yüksek Kalitede Canlı Yayın
- >> Araç içinde Hızlı Bağlantı
- >> Sanal ve Artırılmış Gerçeklik ile Eğitim ve Oyun
- >> Yerel Bilgisayardaki İşlemleri Buluttan Yapabilme
- >> Araç Camlarında Zenginleştirilmiş Kadran
- >> Yoğun Yerlerde Kesintisiz İletişim

2. Ultra Güvenilir ve Düşük Gecikme: Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC) olarak tanımlanan kategoride gecikme (1-10 milisaniye) ve kesintisizlik (%99.999) öne çıkarken, hız (<<10 Mbps ortalama), hareketlilik (<200 Km/s) ve yoğunluk (km²'de 10-1000 cihaz) ikinci plandadır. Anında ve kesintisiz bağlantı gerektiren sistemler, ihtiyacın kaynağıdır. Aşağıdaki uygulamalar örnek verilebilir.

- >> Hızlı Borsa Alış ve Satışları
- >> Uzaktan Canlı Komuta Sistemleri

- >> Göz ve Baş Hareketlerinin Hızlıca İletilmesi
- >> Fabrikaların Otomasyonu
- >> Uzaktan Araç Sürülebilirlik
- >> Uzaktan Ameliyat Yapabilme
- >> Akıllı Enerji Şebekelerinde Anlık Karar Verebilme
- >> Otonom Sürüş
- >> İstenilince Kesintisiz Acil Haberleşme
- >> Bulut Merkezli İndirme Gerektirmeyen Uygulamalar

3. Masif Nesnelerin Haberleşmesi: Massive Machine-Type Communications (mMTC) olarak daha çok kapsamayı (en az 160dB sinyal gücü ile kapsama), pil ömrünü (cihaz başına 10 yıl yaşam süresi) ve yoğunluğu (km²'de bir milyon cihaz) öne çıkarırken hız (<1 Mbps ortalama), gecikme ve hareketlilik ikinci planda kalmaktadır. Uygulamaların başlıca olanları aşağıda sıralanmıştır⁴⁴.

- >> Taşıma Hizmetleri
- >> Taşıtların Servis ve Bakım Optimizasyonu
- >> Otoyol Geçiş Ücretlerinin Tahsilatı
- >> Akıllı Ev
- >> Trafik Düzenleme
- >> Atık Düzenleme
- >> Takip Sistemleri
- >> Giyilebilir Tekstil

Gelişmiş Mobil Yayın (eMBB)	Ultra Güvenilir Düşük Gecikmeli İletişimler (URLLC)	Masif Makine Tipi İletişimler (mMTC)
 4K video projektör  Yüksek çözünürlüklü video akışı  3B hologram  Yolculukta çalışma ve oyun  VR uzaktan kontrollü eğitim  Bulutta gerçek zamanlı çalışma  AR/VR oyunları  Artırılmış gösterge panosu	 Gerçek zamanlı uzaktan kontrol  Fabrika otomasyonu  Desteklenmiş sürüş  Uzaktan ameliyat  Akıllı şebekeler  Güvenilir acil durum iletişimi  Kendi kendini süren araçlar	 Lojistik  Bakım optimizasyonu  Geçiş ücreti toplama  Bağlı ev  Trafik yönetim ve yönlendirme  Atık yönetimi  Envanter takibi  Akıllı giysiler
1-10 Gbps (peak tput) 50-100 Mbps (Avg. tput) 50-100 ms (Latency) 3-120 km/s (Mobility) 200-150000 /km ² (Subs Density)	<10 Mbps (Avg. tput) 99.999% (Reliability) 1-10 ms (Latency) Static-200 km/s (Mobility) 10-1000 /km ² (Subs Density)	<1 Mbps (Avg. tput) 160 dB (Covrage) 10 years Battery life Mobility on demand (Mobility) up to 1 million /km ² (Subs Density)

Operatörler neden 5G'ye geçmelidir?

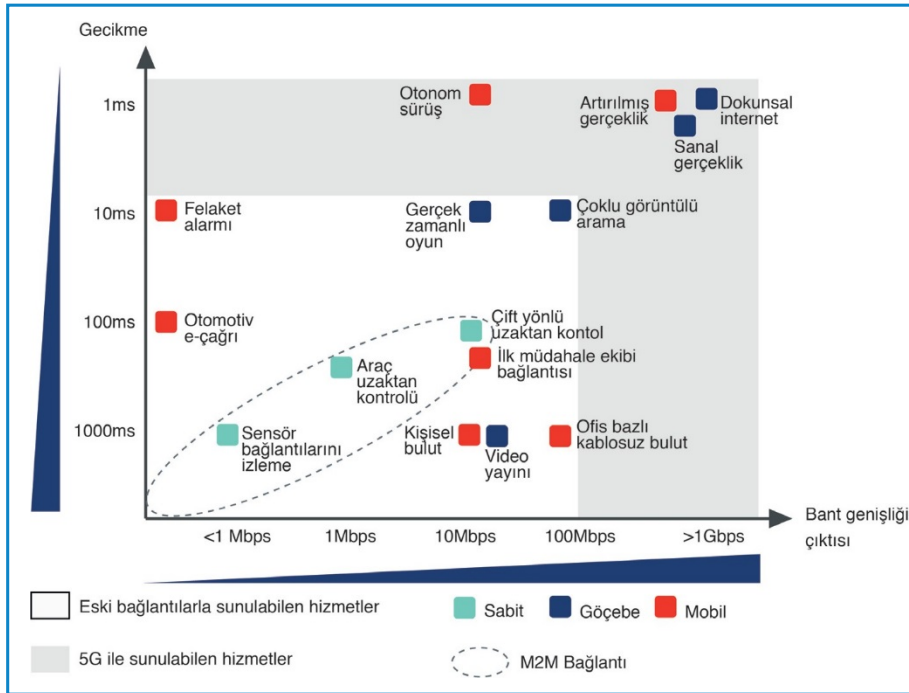
Gün geçtikçe internete bağlı ve kişilere bağlantılı cihazların sayıca artması veri, ihtiyacını ve tüketimini artırmaktadır. Gelişen teknoloji ile değişen bakış açısı, IoT kavramının günlük hayata günden güne inmesi, veri ihtiyacını ve veri hızına olan gereksinimi süratle arttırabilecektir. 5G, yüksek kapasite ve veri hızı ile bu gelişmeleri destekleyecek ve düşük veri gecikmesi ile birçok yenilikçi teknolojinin de gelişmesine olanak sağlayacaktır. 5G, hem gelişim sürecinde hem de tam anlamıyla hayata geçtikten sonra, gelecek neslin teknoloji ve dijital topluluğunu çatısı altına alan global bir platform oluşturacaktır. Dünyada tüm mesleki alanlara dokunarak yaşanan sorunlara ve zorluklara aydınlık getirecek, onlara çözüm bulmaya yardımcı olacaktır. Dünyayı 5G değişimine iten, şirketlerin ve sistemlerin dijital ortamdaki yoğunluğunu dönüşümsel bir işlemde hafifletmek, önemli ihtiyaçlar için yer açılmasını sağlamak ve yaşanan verimsizlikleri ortadan kaldırmaktır⁴⁵.

Artan veri trafiği, mobil operatörler için kârlı olmakla beraber, kendileri için aynı zamanda ciddi sıkıntılar yaratmaktadır. 5G, operatörlere birçok farklı alanda kendilerini geliştirebilecekleri olanaklar sunmaktadır. Bağlantıda yaşanan gecikmenin milisaniye seviyesine düşürülmesi, şirketlere yeni servis fırsatları ortaya çıkarmaktadır. Bu sayede, aynı anda bağlantı hâlinde olabilecek çeşitli cihazlara büyük miktarda yer açılacak ve daha fazla cihazın aynı anda bağlantıya geçmesine olanak sağlanacaktır. “Nesnelerin İnterneti” (IoT) içinde makinalar arası iletişim teknolojileri daha etkin bir şekilde kullanılabilir hâle gelecektir. Yeni dikey iş modeli olanaklarına, yeni müşteri segmentlerinin oluşturulmasına ve birbirinden farklı müşterilerin ihtiyaçlarının tek bir çatıda daha uygun maliyetle yürütülmesine yardımcı olacaktır. Ölçeklenebilen, programlanabilen esnek bir ağ yaratarak, geleceğin hizmet sektörüne büyük katkılar sağlayacaktır⁴⁶.

Operatörler, değer zincirinin basamaklarından birine odaklı gelir elde etmelerinin yanı sıra, 5G sayesinde zincirin her bir basamağını benimseyerek daha fazla büyüyebilir, fazladan gelir akışı sağlamak adına, ağ geliştiricileri

servis sağlayıcıları ve hat-ta servis yaratıcıları olabilirler. Şebeke altyapısı, operasyonel beceri ve müşteri güvenine yatırım sonucunda operatör şirketlerinin standart pazar paylarının ötesinde daha değerli bir alana yayılabileceklerdir.

5G'nin uygulandığı teknolojiler; otomasyondan, akıllı şehirlere, sanal gerçekliğe kadar hayat standartlarımızı geliştirecektir. Global seviyede ekonominin büyümesine katkı sağlayarak, yeni iş alanlarının açılmasına yarayacaktır.



Kaynak: Bass, M., Berg, M. and Dhingra, V. Drivers and path to 5G. *Bell Labs Consulting* (2017).

⁴⁵ Färjh, J. The Road to 5G Industry and Ecosystem. *Ericsson* (2013).

⁴⁶ Al-Falahy, N. & Alani, O. Y. Technologies for 5G Networks: Challenges and Opportunities. *IT Prof.* 19, (2017); Pan European Networks. The Future of IoT. *paneuropeannetworks.com* (2017).



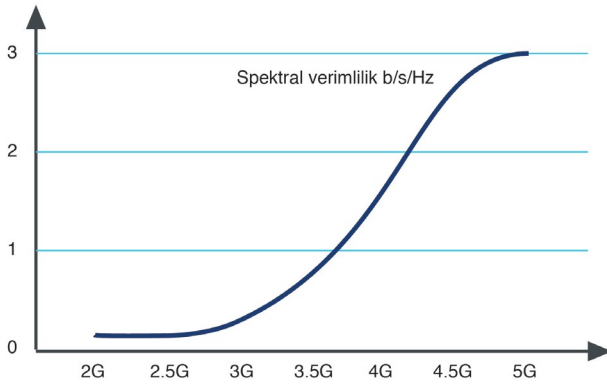
II.Bölüm

5G Nedir?

Teknik Okuyucu

5G Radyo ve Heterojen Ağlar

5G teknolojileri iki dinamizm üzerinden ilerlemektedir. Bir taraftan kablosuz teknolojilerde fiziğin sınırları ilerletilerek birim alanda (hertz başına bit sayısı) daha fazla veri gönderilmeye çalışılırken, diğer taraftan ise bu zamana kadar donanım ve yazılım ile birlikte tasarlanmış kapalı şebeke yapısı yazılım tanımlı olarak tasarlanmaktadır. Yazılım tanımlı olması için herhangi bir programlama dilinde olduğu gibi katmanlaştırma (*abstraction*) gerekmektedir. Alt katmandaki fiziksel cihazlardan üst katmanlardaki uygulamalara kadar birçok katmanın soyutlanarak tanımlanması gerekmektedir. Yatay düzlemde katmanlaşma gerçekleşirken, dikey düzlemde ise sanallaştırma ile ağlar dilimlere bölünerek farklı kriterlere göre istenildiğinde yapılandırılacaktır. Bu tip birden fazla ağın ve teknolojilerin bir arada harmonize edileceği bir heterojen ağ mimarisi⁴⁷ 5G’de hedeflenen yapıdır. Ayrıca, bu süreci hızla oluşturabilmek için katılımcı bir anlayış ile açık kaynak yazılım geliştirme metotları kullanılmaktadır⁴⁸.



5G şebekesine aşamalı bir ilerlemeyle geçilecektir. Operatörlerin nasıl bir geçiş planlaması yapacağı, geliştireceği ürün ve pazar stratejisiyle doğrudan ilişkili olacaktır. Mobil trafiğin artış hızı ve hâlihazırdaki şebekenin bunu kaldırma gücü ve ihtiyaç duyulan frekans miktarı oluşturulacak stratejiyi belirleyecektir⁴⁹.

Örneğin, 2010 başlarında dağıtılmış baz istasyonu mimari kullanımına geçildi ve bu mimari yaygınlaşarak devam etti. Bu modüler mimari, bir Ana Bant Ünitesi (Baseband Unit - BBU) ve bazı Uzak Tel-siz Üniteleri'nden (Remote Radio Units - RRU'lar) meydana gelmişti. BBU'lar ve RRU'lardan oluşan basit yapı çok az sayıda yedek parça gerektirir ve bakım maliyetlerini azaltır. RRU'lar kuleler/plat-formlar üzerine dağıtılmış olarak monte edilerek, besleyici maliyetleri ve besleme kaybı azaltılır ve sistem kazancı 3 dB ile 5 dB artırılır. RRU ile ana bant ünitelerini birleştiren CPRI (Common Public Radio Interface) optik fiberdir. RRU'lar ile merkezi havuzda bulunan anabant üniteleri, CPRI ve gelişmiş CPRI destekleyici yeni fiber optik altyapı teknolojilerini kullanılarak bağlanırlar. Bu tip teknolojiler ile veri aktarımı yaklaşık 15-20 kilometreye kadar uzanmaktadır. BBU ise (veri bağlantılarını yapar ve trafiği yönlendirir) internet ile şebekeye (core network) bağlıdır⁵⁰.

Bu mimari, 5G'ye geçişte önemli safhalardan olan "Merkezileştirilmiş Radyo Erişim Şebekesi (Centralized-RAN) teknolojisi ve bir sonraki fazı olan Bulut Radyo Erişim Ağı (Cloud-RAN) teknolojilerine dönüşüm için kolaylık sağlamaktadır.

Merkezileştirilmiş Radyo Erişim Şebekesi (Centralized-RAN) Teknolojisi'nde, ayrı noktalarda bulunan baz istasyonlarının kontrol üniteleri, merkezi bir noktada toplanır. Böylece istasyonlar arasındaki koordinasyon ve senkronizasyon kabiliyetleri en üst seviyeye çıkarılır. Bu kabiliyetler ile baz istasyonları arasında kullanımı mümkün hâle gelen, dinamik girişim (enterferans) azaltma, çoklu taşıyıcı birleştirme ve çok noktadan veri iletimi özellikleri sayesinde kapsama alanı ve kapasite, dinamik ve etkileşimli olarak artırılıyor. Centralized-RAN Teknolojisi ile böylece mobil kullanıcılara daha az gecikme süresi, daha yüksek mobil iletişim hızı sunuyor.

Centralized-RAN teknolojisi, 5G hazırlıklarının en önemli aşaması olan sanallaştırma ve bulut tekno-

⁴⁷ HetNet: Heterogen Networks

⁴⁸ Flore, D. LTE evolution and 5G. 3GPP (2016).

⁴⁹ Lee, J. Paving the way for 5G. 2nd Glob. 5G Event (2016); Kim, T. Smarter Network for 5G Era. 2nd 5G Glob. event (2016); Färh, J. The Road to 5G Industry and Ecosystem. Ericsson (2013).

⁵⁰ Nakamura, T. & Committee, T. Research Progress of the Fifth Generation Mobile Communications Promotion Forum-SIM2nd Glob. 5G Event (2016).



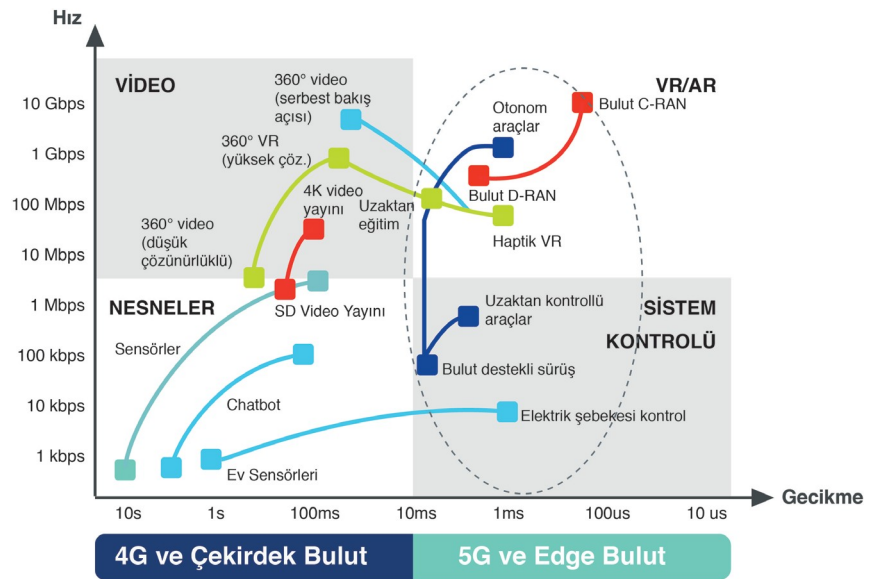
lojilerinin de önünü açmaktadır. Merkezileştirilmiş kontrol üniteleri bulut ortamına taşındığı duruma Cloud-RAN olarak adlandırılmaktadır. Cloud-RAN (Bulut Radyo Erişim Ağı), 5G ve Ötesi mobil şebeke altyapısı için merkezi bir bulut bilgi işlem tabanlı telsiz erişim ağı mimarisidir. Cloud-RAN ile ise baz istasyonlarının bir kısım modülleri buluta taşındığından, baz istasyonu kapasitelerinin gerektiği yerlerde, ihtiyaç duyulduğu oranda dinamik ve paylaşımlı olarak kullanılması sağlanmaktadır.

Cloud-RAN gibi bulut tabanlı bir mimari, çoklu Radyo Erişim Teknolojileri arasındaki ağ koordinasyonunun temelini oluşturur⁵¹. Bulut tabanlı 5G Şebeke mimarilerine dayalı veri merkezleri, ekipman salonları ve iletim ağları operatörlerin gelecek planlarında yer almaktadır.

Kablosuz iletişim teknolojileri 5G yolunda ilerledikçe, servis sağlayıcılar hizmetlerini maliyet verimliliği yaparak sürdürülebilir kılmalıdır. Radyo erişim teknolojisinin de benzer bir yol izleyeceği tahmin edilmektedir. Bu yolda, baz istasyonu fonksiyonunun sanallaştırılarak bulut odaklı radyo erişim ağı (Cloud-

RAN) tasarlanarak merkezi RAN'ın ötesinde mimariler oluşturulacaktır. Bu ağ devrimi, maliyet ve ağ verimliliğini yöneterek diğer hizmetler üzerinde üstün kılacaktır⁵².

Türk Telekom, 5G teknolojilerine şebekesini yakınsatmak üzere çalışmalara başlamış, kendi bünyesinde kurduğu 5G laboratuvarı yanında, Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu öncülüğünde Ankara'da kurulan 5G Vadisi - Açık Test Sahası konsorsiyumunun parçası olmuştur.



Source: Bass, M., Berg, M. and Dhingra, V. Drivers and path to 5G. Bell Labs Consulting (2017).

⁵¹ Bureau, C. R. and Regulation, R. Consideration on spectrum for 5G. 2nd Glob. 5G Event (2016).

⁵² Tong, W. Jointly Build the Bridge to 5G. Huawei, Whitepaper (2016); Mademann, F. 3GPP's flexible 5G System Architecture. Second Glob. 5G Event (2016); Bienaimé, J.-P. 5G roadmap for mobile broadband and beyond. 2nd Glob. 5G Event (2016).

5G Yeni Radyo⁵³

5G yeni bir radyo ile gelecektir. Yeni radyo tasarlanırken, aşağıdaki özellikler dikkate alınmaktadır. Geniş frekans aralıklarında yüksek veri aktarımını yönetme önemli bir kriterdir. OFDM⁵⁴ ve OFDMA⁵⁵ ile geniş frekansın dar bantlara bölünerek (*subcarrier*) ölçeklendirebilme, 4G'de uygulanmıştır⁵⁶. Bir nevi frekans ve zaman düzleminde bir çerçeve yaratılarak bu çerçevenin belli kısımlarının kullanıcılara istedikleri veri miktarı ve kanal kalitesine ayrılması baz istasyonunda koordine edilerek haberleşme sağlanmıştır.

Bunun yanında düşük gecikmeli kısa ve uzun mesafe iletişimi sağlamak, baz istasyonundan cihaza veri aktarırken⁵⁷, cihazdan baz istasyonuna⁵⁸ veri göndermeye hızlı geçiş yapabilmek, cihazların açık kalma sürelerini minimum tutarak enerji verimliliğini arttırmak da önemli kriterlerdendir. Bunun yanında *full-duplex* teknolojisi ile aynı anda cihaz-baz istasyonu ve baz istasyonu-cihaz haberleşmesinin aynı frekans ve zaman diliminde gerçekleştirilebilmesi 5G'de önemli atılımlardan biri olacaktır. Ayrıca, kutuplu (*polar*) kodlama⁵⁹ gibi yeni kodlama tekniklerinin kullanıma sokulması ile 5G alıcı-verici yapısının verimliliğinin artırılmasına çalışılmaktadır. Bu minvalde, özellikle OFDMA türevlerinin üzerinde en çok durulanlarına kısaca değinebiliriz. Filtre Bankası Çoklu Taşıyıcı (Filter Bank Multi-Carrier - FBMC): Entegre devrelerle filtre bankası yaratılır ve her *subcarrier* filtrelenir. Bu OFDM'e göre yan lobları azaltılmış bir *subcarrier* oluşturur ve karışım oranını büyük ölçüde engeller⁶⁰.

- Evrensel Filtrelenmiş Çoklu Taşıyıcı (Universal Filtered Multi-Carrier - UFMC): FBMC'nin aksine çok küçük bant aralıklarını filtrelemek yerine kanalı göreceli olarak daha büyük bantlara böler ve filtrelemeyi yapar.

- Genel Frekans Bölmeli Çoğullama (Generalized Frequency Division Multiplexing - GFDM): GFDM OFDM'e kıyasla daha esnek bir şebekeyayın yöntemi. OFDM'den temel farkı, alt taşıyıcıların birbirine dik olmamasıdır. Bununla filtre bankası kullanılarak baş edebilmektedir. GFDM bant dışı yayınlarının daha iyi yönetimini sağlar ve OFDM'in zayıf yönü olan maksimum gücün ortalama güce oranını⁶¹ azaltır.
- Filtrelenmiş OFDM (Filtered OFDM - F-OFDM): Adından da belli olduğu gibi, OFDM'i filtreleme yaparak kullanan bir yaklaşımdır. Yayın için uygun olan kanal genişliği, çeşitli alt ve küçük bantlara ayrılır. Farklı bant aralıklarında en uygun modülasyon yaklaşımları kullanılır. Varolan bant aralığının daha iyi kullanılmasını sağlar.
- Orthogonal Olmayan Çoklu Erişim (Non-Orthogonal Multiple Access – NOMA) Bir *subcarrier*'i birden fazla kullanıcıya kullandırarak kapasite verimliliği sağlar.
- Seyrek Kodla Çoklu Erişim (Sparse Code Multiple Access – SCMA) ise OFDM ve CDMA'yi bir arada kullanarak aynı kaynağı birden fazla kullanıcıya kullandırır.

2017'nin son günlerinde (21 Aralık) 3GPP 5G NR standardının ilk fazını tamamladı. Bu 5G yeni radyosu, kurulumu hızlandırmak için yeni bir 5G şebekesi olmadan hâlihazırdaki LTE şebekesine bağlı çalışacak şekilde standartlaştı. Sürüm 15'in bir parçası olan bu radyo, zaman içinde kendi şebekesi ile beraber bağımsız olarak çalışacaktır⁶². LTE'deki gibi OFDM temelli yapı LTE'ye göre frekans verimliliğini %90' dan %98'e çıkarmaktadır. Yani 100 MHz kanalın 98.31 MHz'i kullanılırken, LTE'de 20 MHz kanalın sadece 18 MHz kullanıla-

⁵³ 5G NR: 5G New Radio

⁵⁴ OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing

⁵⁵ OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access

⁵⁶ Gigabit LTE ile 256QAM ve 4x4 MIMO teknolojisi ile gigabit (Category 16: 1 Gbps, Category 18: 1.2 Gbps, Category 19: 1.6 Gbps) hızlar yakalanmıştır.

⁵⁷ Downlink

⁵⁸ Uplink

⁵⁹ Arikan, E. On the Origin of Polar Coding, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 34, No. 2, 209-223 (Şubat 2016).

⁶⁰ RF Wireless World. OFDM vs FBMC-Similarity and difference between OFDM and FBMC modulation. rfwireless-world.com

⁶¹ PAPR: Peak to Average Power Ratio

⁶² 3GPP. NR first specs & 5G system progress in Release 15, 3gpp.org (2017)

biliyordu. Ayrıca *subcarrier* aralıkları LTE'de 15 KHz'de sabitlenmişken, 5G de esnek bir mimari ile değişken ($2^k \times 15$ KHz, $k = -2, 0, 1, 2, 3$) yapılmıştır. Bu sürüm ile zenginleştirilmiş geniş bant (eMBB) adreslenir, masif bağlantı (mMTC) ve ultra güvenilir ve gecikmesiz (URLLC) Sürüm 16'ya (Aralık 2019) ve ötesine bırakılmıştır. Ayrıca milimetre dalga kullanımı da tanımlanmıştır.

3GPP NR standardizasyonu için bir örnek

Frekans bandı (spectrum band)	3.5 GHz
Taşıyıcı bant genişliği (Carrier Bandwidth)	200 MHz
Dalga şekli (Waveform)	Filtered-OFDM / Wide Band-OFDM
Alt Taşıyıcı Aralığı (Subcarrier Spacing)	15 kHz /60 kHz
TTI başına düşen semboller (Transmission Time Interval)	7
Aralık uzunluğu (Slot length)	0.5 ms /0.125 ms
Modülasyon (Modulation)	256 QAM

MIMO [T x R]	8 x 8
Akış Numarası (Stream number)	8
Dairesel alan kodu türü (Cyclic Prefix Type)	Normal CP
Veri Kanal Kodlama (Data Channel Coding)	QC-LDPC
Kontrol Kanal Kodlama (Control Channel Coding)	Polar
Zayıf Taşıyıcı Tasarım (Lean Carrier Design)	Evet
Çoklu alt çerçeve zamanlaması (Multi-subframe scheduling)	Evet

Kaynak : Mediatek

Milimetre Dalga Haberleşme (mmWave)

5G ile 6 GHz ötesinde haberleşme gündemimize girecektir. Bundan dolayı yüksek frekanslarda haberleşme çalışmaları ağırlık kazanmış ve 20-300 GHz aralıklarında saniyede *Gigabit* hıza ulaşabileceği öngörülmüştür. Yüksek frekansta veri aktarımının temel problemi, uzun mesafelerde yada basit engellerde bile sinyal sönümlenmesi yaşanmasıdır. Açık hava koşullarında, yağmur ya da kar gibi etkenler bile sinyal bozulmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, açık görüş (LOS) haberleşmesi gerekmektedir. Her ne kadar milimetre dalga da açık görüş gerektirmeyen (nLOS) bir yapı akıllı antenlerle yaratılabilir ise de baz istasyonlarının cihazlara açık ortamda ulaşması beklenebilir. Hâlihazırda ise LOS haberleşmesinde kapalı mekânda birden fazla mini baz istasyonu ile milimetredalga

haberleşmesi üzerinde çalışılmaktadır. Kullanıcının baz istasyonuna açısına göre bir mekânda sürekli bir *handover* durumu söz konusudur ve akıllı yazılımlarla bağlantı kesintisizliği sağlanabilir.

Şu anki çalışmalara göre 28 GHz ve 39 GHz bantlarının 5G için öncelikli frekanslar olması muhtemeldir. 60 GHz frekanslarının IEEE 802.11ad çalışmalarında kullanılması sonucunda özellikle kapalı alan uygulamalarında büyük başarılar elde edilmiştir. Benzer bir şekilde 61-71 GHz aralığının da kullanılması beklenmektedir.

60 GHz yayını 15dB/km sinyal sönümlenme hızı ile sadece kısa mesafelerde veri aktarımı için uygundur⁶³. 28 GHz gibi daha düşük frekanslar ise sadece vericinin direkt olarak görüldüğü LOS durumlarında kabul edilebilir sonuçlar vermiştir.

Sinyal sönümlenmesindeki problemler sebebiyle 5G çalışmalarının belirli bir yöne daha güçlü

63 Smulders, P.F.M. 60 GHz radio: prospects and future directions. *Proceedings Symposium IEEE Benelux Chapter on Communications and Vehicular Technology* (2003).

sinyal yollayan faz dizi anten yapısını geliştirmesi beklenmektedir. Küçük antenlerin birleşiminden oluşan büyük antenin her bir parçasının aynı anda farklı kullanıcılara hizmet vermesi ile çoklu kullanıcı desteği de mümkün olacaktır.

Masif Çok Girdili Çok Çıktılı Anten⁶⁴ (Massive MIMO)

5G'de modülasyon, kanal dağıtımı ve optimum sinyal gücü ayarlama gibi yeni özelliklere ek olarak çoklu anten desteği ileri teknikleri ile kullanıma sokulacaktır. MIMO, aynı anda daha fazla veri iletimi sağlamak için iki veya daha fazla anten kullanan sistemlere denmektedir. MIMO teknolojisi kablosuz kanalın doğasındaki varyasyonları kullanarak, antenlerin belli bir mesafe aralıklarla konulmasıyla ortaya çıkan sanal ve kesişmeyen kanallar üzerine kurulmuş bir teknolojidir. Örneğin; alıcı ve vericide iki anten var ise 2x2 MIMO, dört var ise 4x4 MIMO denmektedir. Yani ilki iki paralel kanal yaratabilmektedir, ikincisi ise dört tane kanal yaratabilmektedir. Antenlerden aynı veri gönderilerek alıcının gönderilen veriyi güçlendirilmiş bir şekilde (diversity) hatasız alması sağlandığı gibi antenlerden farklı veri gönderilerek (spatial multiplexing) kapasitenin anten sayısı ile katlandığı kullanım da mevcuttur. İlki için alıcı ve vericide simetrik anten sayısı aranmaz ama ikincisinde kapasite en az anten sayısı kadar katlanır. Örneğin 4X2 MIMO'da en fazla kapasite ikiye katlanabilir. MIMO teknolojisi hâlihazırda WiFi ve 4G'de yaygın olarak kullanılmaktadır.

5G'de bunun daha ileri aşaması kullanıma sokulacaktır. Aynı anda ve frekansta bir baz istasyonunun birden fazla kullanıcı ile MIMO iletişimi istenmektedir. Buna Çok Kullanıcı MIMO (Multiuser MIMO yani MU-MIMO) denmektedir. Bu ileri mekanizmayı gerçekleştirmek için, kullanıcıda kısıtlı anten sayısı kalmasına karşın bazistasyonundaki anten sayısı oldukça artırılmaktadır (Masif MIMO). Böylece baz istasyonu birden fazla kullanıcı ile 2x2 veya 4x4 MIMO iletişimi sağlayabilir. Örneğin baz istasyonunda 100 anten var ise teorik

olarak 2x2 MIMO ile elli kullanıcıya aynı anda ve frekansta ulaşabilir. Bu da frekans verimliliğini oldukça üst noktaya taşımaktadır.

Bu teknolojinin bir benzeri ise 4G LTE de düşünülmektedir. Bu teknik birden fazla baz istasyonunun bir kullanıcı ile koordineli iletişim (Coordinated Multipoint- CoMP) sağlaması amaçlanmıştır. CoMP kapsamıyı artırmak için kullanılmakta ama kapasiteyi az artırmaktadır. Masif MIMO ise kapasiteyi artırdığı gibi kapsamada geri kalmaktadır. İkisinin beraber düşünüldüğü Koordineli Masif MIMO'nun (Coordinated Massive MIMO) iki noktayı iyileştirmek için potansiyeli vardır.

Cihazdan Cihaza İletişim (D2D⁶⁵)

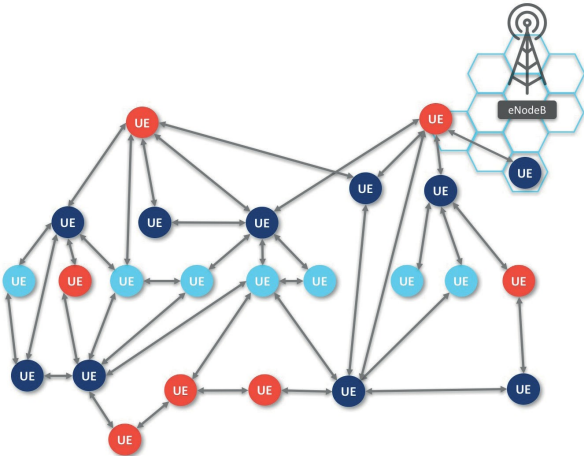
Bu zamana kadar bütün nesillerde baz istasyonu, merkezi yapıda diğer tüm cihazlarla etkileşime girerek veri aktarımını sağlamaktaydı. Kapsama alanını artırmak için baz istasyonunu devreden çıkarmanın çalışmaları, *LTE Direct* teknolojisi ile 4G'de başlanan yeni nesil versiyonlarının standartlaşması süren D2D Teknolojilerinin 5G'de geniş çapta kullanıma girmesi beklenmektedir. Bu teknoloji ile iki cep telefonu karşılıklı sinyal alınacak uzaklıkta direk haberleşme sağlayabilecekler ve toplam kapsama alanını genişleteceklerdir. Nesnelerin İnterneti gibi yeni teknolojilerin geniş çaplı kullanıma için birçok farklı kablosuz iletişim tekniğinin bir arada ve aynı zamanda koordineli, yani heterojen olarak çalışması gerekmektedir.

Cihazlar arası iletişim üzerinde dört farklı şekilde çalışılmaktadır: 1) Operatör kontrollü link kurulumunda operatör en güçlü sinyal ile veri aktarabildiği kullanıcıyı ana (pivot) cihaz olarak kabul edip tüm isteklerin bunun üzerinden geçmesini sağlayabilir. Böyle bir durumda en güçlü sinyali alan kullanıcı lokal bir veri dağıtıcıya dönüşür ve diğer kullanıcıların veri taleplerini de operatör üzerinden temin eder. Bunun temel problemi, ana cihaz olarak belirlenen cihazın zamanla değişkenlik göstermesi ya da diğer cihazların ana cihazın erişim alanında her zaman olmamasıdır. Bunu pratik bir şekilde denetleyecek algoritmaların ve yazı-

64 Massive Multiple Input Multiple Output

65 D2D: Device to Device

lımların tasarlanması gerekmektedir. 2) Operatör kontrollü direkt link kurulumunda operatör tüm mobil kullanıcılara veri sağlamaktadır; ek olarak kullanıcılar kendi arasında da veri aktarabilir. Böyle bir durumda operatörün yolladığı verinin azaltılması mümkündür. 3) Cihaz kontrollü link kurulumunda bir operatöre ihtiyaç yoktur. Cihazlar kendi aralarında doğrudan iletişim kurmaktadır. Cihazlar kendi arasında büyük bir ağ oluşturarak bilginin tüm ağ elemanlarından geçmesi sağlanır. Ağın büyüklüğü arttıkça bilginin akış yolunun gerçek zamanlı olarak belirlenmesi zorlaşır. 4) Cihaz kontrollü direkt link kurulumunda operatöre ihtiyaç yoktur. Bir cihaz veri dağıtıcısı görevini alır ve tüm istekler bu cihaza ulaşır.



Cihazlar arası iletişimin günlük hayatımıza girmesinde araştırılması gereken birçok konu vardır. D2D cihazları için özel spektrumlar ayrılmadığı ve lisanssız spektrumda düşük frekans aralığına sahip kanallar tanımlanmadığı için sinyal sönümlemesi olasıdır. Dolayısıyla var olan kanal yapısının modifiye edilmesi ya da kullanımı için protokollerin belirlenmesi gereklidir. Örneğin; OFDMA çerçevelerinin nasıl tasarlanacağı önemlidir. Buna ek olarak, özellikle D2D uygulamaları canlı video aktarımı ya da anlık verinin işlenmesi ile ilgili bir veri sağlıyorsa karışım yönetme algoritmaları servis kalitesi odaklı olarak karar almalıdır. Ayrıca, cihaz eşleştirilmesinin oluşturulması ve aralarındaki bağlantının kurulmasındaki zorluklar çözülmelidir.

Görünür Işıkla İletişim (VLC⁶⁶)

5G, milimetre dalga frekansların ötesini de hedeflemektedir. Görünen ışık frekansları olan 400 ile 800 TeraHertz arasında LED ışık kullanılarak 500 Mbps veri aktarım hızına ulaşılabildiği bilimsel makalelere yansımıştır. Yeni OLED⁶⁷ tipi ekranlardaki herhangi bir transistor gözlerimizi rahatsız etmeyecek şekilde yanıp sönerek işaret yaratabilmekte ve bu mesajlar cep telefonlarımızda olan kamera sayesinde çözülerek mesaja dönüşebilmektedir. Bu sayede, herhangi bir yerdeki ışık ekranları üzerinden veri aktarımı gerçekleştirilebilir. VLC geniş çapta uygulamaya geçtiğinde sokak lambaları, dış mekân reklam panoları, hava limanı ve hastane ekranları, dükkan tabelaları gibi yerlerden veri almak mümkün hâle gelecektir.

Işık ile haberleşmenin bir başka önemli aşaması da, araçlar arası haberleşme olarak kendini gösterecektir. Otomotiv teknolojisinin önümüzdeki on yıl için koyduğu önemli hedeflerinden birisi, gerekli teknolojilerin yüksek güvenilirlik ve kabul edilebilir maliyet yapısı içinde geliştirilerek, trafik sıkışıklığının, kaza oranlarının, kazalarda ölüm oranlarının, emisyon oranlarının ve enerji harcamalarının azaltılmasında önemli rol oynayacağına inanılan otonom araçların geliştirilmesi, çok sayıda üretilmesi ve yaygınlaştırılmasıdır. Otonom araç teknolojilerinin önemli bir kolunu araç-arac ve araç-altyapı haberleşmesi teşkil etmektedir. RF (radyo frekansı) bazlı kablosuz haberleşme teknolojisi alternatif teknolojiler arasında en öne çıkanıdır ve ana akım olarak kabul görmüştür. Diğer yandan tüm yoğun araştırma geliştirme çalışmalarına rağmen, RF çözümlerinin yeterli güvenilirliği sağlayabileceğinden kuşku duyulmaktadır. Kısıtlı bant genişliğinin giderek artan haberleşme trafiğine özellikle yoğun trafik koşullarında ihtiyaç duyulan yüksek güvenilirlikle cevap veremeyeceği öngörülmesi yapılmaktadır. Ayrıca RF çözümleri yayın bozma saldırılarına açıktır. Görünür ışıkla haberleşme, güvenilirliği artıracak destek sistemler için potansiyel teknolojilerden birisidir.

66 Visual Light Communication

67 Organik LED

Bunun yanında görünür ışığın insanların doğasının bir parçası olması, zararsız olmasını ve LOS⁶⁸ koşulu ise dışarıdan dinleme gibi güvenlik hususlarını ortadan kaldırmaktadır. Elektrik akımı ile oluşturulan radyo tabanlı haberleşmede sinyal boğma, dinleme ve taklit etme gibi güvenlik saldırılarına maruz kalma her zaman başa çıkılması gereken konulardır. Daha da önemlisi, radyo frekanslarındaki yoğunlaşma, 5G'de görünür ışık ile haberleşmenin önemini kaçınılmaz kılmaktadır.

5G Baz İstasyonu

5G'de baz istasyonlarının yazılım tabanlı hâle gelmesi beklenmektedir. 4G'de başlayan bu süreç içinde bir baz istasyonun kablosuz ve kablolu bağlantı kısmının kontrolü buluta taşınarak baz istasyonunun uzaktan kontrol edilir bir donanıma indirgenmesi üzerine çalışılmaktadır. Bu minvalde, temel teknolojilere kısaca değinebiliriz.

Küçük Hücre Yönetimi (Small Cell)

Baz istasyonlarının kapsama alanının daralması mobil nesiller boyunca gözlenen bir durum olmuştur. Kapsama alanı küçüldükçe, frekansın tekrar tekrar başka hücrelerde kullanımı artmış ama karşılığında baz istasyonu sayısı ve yatırım miktarı da artmıştır. Bu metot, kapasitenin artırılması için en etkili yöntem olarak görülmektedir. İkinci ve üçüncü yöntem ise, kullanılabilir frekansın artırılması ve kablosuz teknolojinin iyileştirilmesidir.

5G'nin gelişiyi birlikte küçük hücrelerin yaygın kullanımı, hızla artan kapasite sorununa çözüm olarak kaçınılmaz hâle gelecektir. Küçük hücreler, az enerji kullanan ve on metreden birkaç kilometreye kadar bir menzile sahip baz istasyonlarıdır. Bununla birlikte, yüksek frekanslarda çalışmanın en büyük problemi kısa mesafede sönmüş sinyallerdir. Milimetre dalgada küçük hücreler kaçınılmaz olacak ve belki de bir odada birden fazla baz istasyonu cep telefonu ile açık görüş hattı⁶⁹ sağlamak için gerekli hâle gelecektir. 2014 yılında %10 olan yoğun hücre oranının (> 75 hücre/km²) 2020 yılında %70'e

ulaşması beklenmektedir⁷⁰. Yoğun hücrelerin sayısı artarken, hükümetler ve uluslararası standartlar teknolojinin ilerleyiş yönünü belirleyecektir. Bu spektrum paylaşımı, site planlaması, özlük hakları ve vergi araçlarıyla yapılacaktır. Dolayısıyla operatörler var olan limitler ve piyasa ihtiyaçları üzerine çözümler bulurken, teorik ve pratik bütün potansiyeli değerlendirmelidir. Bununla birlikte, operatör çözümleri lokal olmak zorundadır. Bunun temel sebebi ülkeler arasındaki farklı politikalarının ve piyasa taleplerinin farklılık göstermesidir.

Küçük hücreler mevcut baz istasyonlarının oluşturduğu ağın parçasıdır. Kullanıcıların hareket hızına göre küçük veya makro baz istasyonlarına yönlendirme yapılarak akıllı bir kapasite dağılımı sağlanacaktır. Küçük hücrelerin yönetiminin pek çok aşaması vardır. İlk aşama, ekipman onayıdır. Standartların yeterince net olmaması sebebiyle ekipmanların üretimi ve standartlara uygunluğu da gelişmektedir. Sonraki aşama, uygulama bölgesinin belirlenmesi ve planlamadır. Bu sebeple veri talebinin yüksek olduğu bölgelerin belirlenmesi gerekmektedir. Sonraki aşama, geniş bant hattındaki hızların ve diğer ağ elemanlarının belirlenmesidir. Henüz uygulaması sınırlı olduğu için gerçek anlamda verimliliği yakalamanın zor olduğu bu durumlarda dizayn için pilot bölgelerde deneme-yanılma odaklı çalışmalar yapılması gereklidir. Küçük hücrelerin kurulması, bundan sonraki aşamadır. Küçük hücrelerin sık olmasındaki fiziksel sorun, her birine enerji ve geniş bant



68 LOS: Line of Sight

69 LOS: Line of Sight

70 Small Cell Forum. Small cell siting challenges. *Small Cell Forum, Whitepaper* (2017).

hattı sağlanmasıdır. Pratik olarak ihtiyaç duyulan kabloların döşenmesi ve enerji hatlarının oluşturulması önemli altyapı problemleri doğurabilir. Bunun için de kablosuz çözümler⁷¹ üzerine çalışmalar yapılmaktadır. 5G PPP ve Horizon2020 tarafından fonlanan 5G-Crosshaul⁷² ve 5G-Xhaul⁷³ projelerinde, kablosuz tarafı tanımlayan *fronthaul* ve şebeke bağlantısını tanımlayan *backhaul* yapılarının beraber düşünüldüğü yazılım tabanlı mimariler çalışılmaktadır. Bu mimariler yüksek kapasitede, düşük gecikmeli programlanabilen bir ağ sunmayı amaçlamaktadır.

Sabit Kablosuz Erişim (5G FWA)

Sabit Kablosuz Erişim (FWA⁷⁴) ya da WTTx teknolojilerinin, yatırım yapılması zor ya da az gelişmiş bölgelerde evlere internet getirmek amacıyla kullanılabilecektir. Bunun getireceği en önemli yarar, sabit hatta erişimi zor olan bölgelerde hızlı ve ucuz geniş bant hizmeti verilmesinin sağlamasıdır. 4G FWA geleneksel sabit çözümlerin mümkün olmadığı ve düşük hızı tolere edebilen kısıtlı senaryolarda kullanılmıştır. 5G FWA'nın 4G FWA'dan temel farkı yüksek hız ve düşük gecikme gerekliliklerini sağlamak için daha yüksek frekanstaki milimetre dalga frekansını kullanmasıdır. Milimetre dalga frekansında yüksek bant genişliği kullanılması ve huzme ile kullanıcılara odaklanması buna imkân vermektedir. 5G FWA'nın 1 Gbps üzerinde hız ve 1ms seviyesinde gecikme performansı ile özellikle kırsal alanlarda yaygın bir şekilde kullanılması beklenmektedir. Milimetre dalga frekansında kullanılması planlanan frekanslar 28 GHz, 37 GHz ve 39 GHz'dir. İlk 5G denemeleri 10-25 Gbps hızlarına ulaşabildiğini göstermektedir⁷⁵.

Yeşil İletişim (Green Communication)

5G sistemlerde mobil ağlarda küçük hücre sayılarındaki, kullanıcı cihazları sayılarındaki ve kul-

lanıcı cihazlarındaki veri trafiğindeki artış, enerji tüketiminde ve karbon salınımında artışa neden olmaktadır⁷⁶. 2020 yılındaki bu karbon salınımının %30'unun radyo erişim ağında, %30'unun mobil cihaz üretiminde, %20'sinin veri merkezi ve iletişiminde, %12'sinin mobil cihazlarının çalışmasında olması beklenmektedir⁷⁷. Enerji tüketimini azaltmak amacıyla çok sayıda çalışma yapılmaktadır. Hücre ve kullanıcı cihazların enerji verimliliğinde önemli iyileşmeler heterojen hücreli ağlarda küçük hücreler kullanılarak elde edilebilir. Küçük hücreler altyapı ve dağıtım masraflarını düşük tutarken, ağ kapasitesini artırmaktadır. Bu dağıtım en yoğun saatteki trafiği destekleyecek şekilde yapılmaktadır. Ancak, ortalama ve en yoğun trafik arasında büyük farklılıklar gereksiz enerji tüketimine neden olmaktadır.

Yeşil iletişim ağı elde etmek için bir diğer yaklaşım olan güneş enerjisi, rüzgâr gibi yenilebilir enerji kaynaklarını baz istasyonlarına kazandırılmasıyla geleneksel enerji tüketiminin azaltılması, hatta ortadan kaldırılması hedeflenmektedir. Buna ek olarak Nesnelerin İnterneti'ni desteklemek amacıyla belirli aralıklarla üretilen küçük paketler, insan iletişiminde büyük paketlere göre tasarlanmış ağda çok fazla ek paket yüküne ve dolayısıyla enerji tüketimine neden olmaktadır. Bunu azaltmak için çalışmalar yapılmaktadır. Baz istasyonlarından kullanıcı cihazlarına radyo frekansı kullanarak enerji transferi de kullanıcı cihazların ömürlerini uzatmak için kullanılabilecek üzerinde çalışılan konulardan biridir. Radyo frekansı temelli enerji transferi baz istasyonlarından mobil cihazlara veri iletimini yanı sıra enerji aktarımını da sağlamaktadır. Alıcı ve vericilerin küçük boyutu, enerji transferi miktarının baz istasyonu tarafından kontrol edilebilir olması ve yüksek şarj mesafesi, bu teknolojiyi hücreli iletişime uygun kılmaktadır.

71 Small Cell Backhaul

72 <http://5g-crosshaul.eu>

73 <http://www.5g-xhaul-project.eu/>

74 Fixed Wireless Access

75 Ericsson. Ericsson 5G field trial gear achieves peak downlink throughput over 25 Gbps with MU-MIMO. *Ericsson, Press Release* (2016).

76 2011 yılında Türk Telekom, CDP'ye (Carbon Disclosure Project/Karbon Saydamlık Projesi)'ye karbon salınımını raporlayan Türkiye'den ilk telekomünikasyon şirketi oldu.

77 Center for Climate and Energy Solutions. Global Emissions. *c2es.org*

5G Bulut Şebeke

5G ile beraber çekirdek (*Evolved Packet Core*) şebekenin sanallaştırılmasına ve buluta taşınmasına çalışılmaktadır. Ayrıca dağıtık bir mimari ile internet ağı üzerinde ölçeklenebilir bir kontrol ve veri katmanı yaratılmak istenmektedir. Bu şekilde, şebekenin hızla büyüebilmesine imkân sağlanacak ve ağ dilimi özelliği ile aynı altyapıyı kullanan ve farklı özellikler barındıran ağlar yeni servisler için sağlanacaktır. Yeni şebekeyi gerçekleştirecek üç yeni teknoloji dalgasına değinebiliriz⁷⁸.

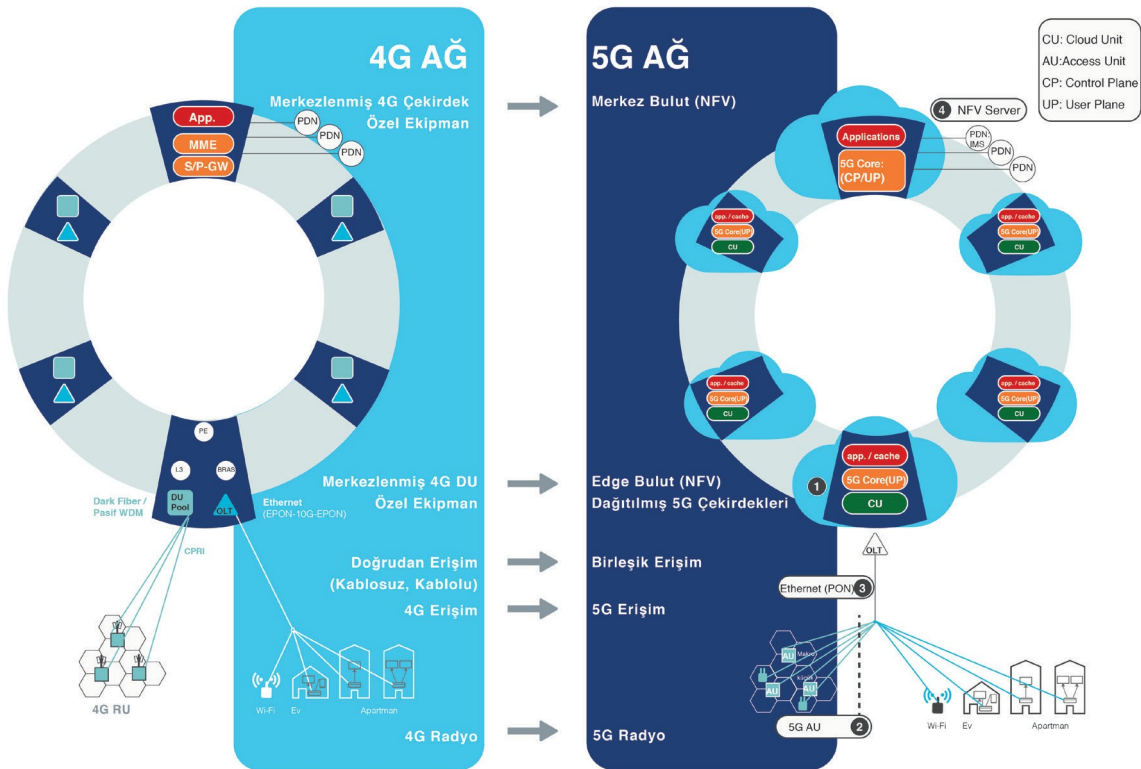
Yazılım Tanımlı Ağ (SDN)

SDN, ilk olarak hızla büyüyen veri merkezlerinin ağ yapısının kontrolü için ortaya çıkmıştır. Ağın anlık ihtiyaçları doğrultusunda doğru kararların alınması hedefiyle anahtarların kontrol katmanı merkezileştirilerek buluta taşınmıştır. Böylelikle kurulum

uzaktan yapılabilmiş ve kurulum hatalarına müdahale edilmiştir. Zaman içinde yazılım tabanlı ağlar veri merkezlerinden şebeke ve erişim katmanına dönük olarak tasarlanmaya başlanmıştır⁷⁹.

Yazılım odaklı ağların içeriğinde trafik yönlendirme, ağ sanallaştırma, trafik ve örüntü sınıflama gibi fonksiyonlar bulunmaktadır. SDN teknolojisinin mobil şebekelerde dinamik ve yapay zekâ ile donatılması istenmektedir; kullanım örüntülerini inceleyerek kaynak odaklı, trafik akışını takip ederek kümeleyen, kaynakların yetersiz kaldığı durumda verimli bir kullanım sıralaması sunan, veri aktarım gecikmelerini azaltan ve mümkün olduğunca açık kaynaklı kodlardan oluşan bir yapıda olması istenmektedir.

Veri merkezlerinden sonra ağ şebekelerinde ilk uygulamalardan biri müşterilere verilen cihazların⁸⁰ sanallaştırılması olabilir. Yazılım Tanımlı-Geniş Alan Ağları⁸¹ olarak tanımlanan bu teknoloji ile



78 Yallapragada, R. 5G for Verticals in the New Economy. *2nd Glob. 5G Event* (2016); Matsunaga, A. 5G System Architecture to realize 'Extreme Flexibility' End-to-End Quality in the 5G Era. *2nd Glob. 5G Event* (2016); Satoh, K. Overview of 5GMF Current Activities. *2nd Glob. 5G Event* (2016); Ericsson. 5G : What is it ? *Ericsson, Whitepaper* (2014).

79 Ziegler, V. Architectural Leadership for the 5G Era. *Nokia, Whitepaper* 1-7 (2016); Mohr, W. The 5G Infrastructure. *2nd Glob. 5G Event* (2016); KIM, K.M. Considerations for 5G Spectrum Harmonization. *2nd Glob. 5G Event*, (2016).

80 CPE: Customer Premise Equipment

81 SD-WAN: Software Defined – Wide Area Networking

evlere verilen geniş bant ve WiFi modemlerinin uzaktan yönetilmesi ve optimizasyonu, operatörlerin teknik servis maliyetlerini azaltacağı gibi makine öğrenme ile yönetiminin otomasyonu da gerçekleşecektir⁸².

Ağ Fonksiyon Sanallaştırması (NFV)

NFV, ağ fonksiyonlarını donanımdan ayırarak yazılımda çalışmasını sağlamaktadır. NFV bir taraftan ağ adresi çevirisi, güvenlik duvarı oluşturma, alan adı hizmeti ve önbelleğe alma gibi ağ fonksiyonlarını sanal ortamda yönetmeyi sağlarken, diğer taraftan sanal sunucular ve sanal depolama alanı gibi ağ bileşenlerini içeren tam olarak sanallaştırılmış bir altyapıyı getirmektedir. Operatörler NFV sayesinde yeni bir hizmetin piyasaya sürülme zamanını azaltabilirler ve müşteri ihtiyaçlarına hızlı bir şekilde cevap verebilirler.

NFV konusundaki araştırmalar sanallaştırmanın ağ performansı, sanal cihazların yerleştirilmesi ve sanal ağ fonksiyonlarının dış kaynaklara verilmesi üzerinedir. Buna ek olarak, operatörler sanal ağ fonksiyonlarını en verimli kullanabilecekleri yerlere yerleştirilmelidir. NFV'nin getirdiği standart x86⁸³ tabanlı donanımlar ve otomasyon yetenekleri ile, operatörler dağıtımını sağladıkları kullardan kaynaklanan hantal işletme ve bakım görevlerinden kurtulabilir. Bunun için operatör ağı altyapısı ve dış kaynaklara verilmiş sanal ağ fonksiyonlarının ücretlendirme kuralları ve politika etkileşimlerinin belirlenmesi gerekmektedir⁸⁴. Başlangıçta şebekenin uç kısımlarında (OSS⁸⁵ ve BSS⁸⁶) başlayan sanallaştırma, sanal operatör⁸⁷ sistemlerinin gelişmesinde rol oynamıştır. Şimdi sanal EPC⁸⁸ ve IMS⁸⁹ ile devam eden sistemde yeni servislerin kullanımı mümkün olabilecektir⁹⁰.

Ağ Dilimi (Network Slicing)

5G'nin kullanımının başlaması ile popülerliği artacak terimlerden biri de *ağ dilimi* (network slicing) olacaktır. Kısaca ağ dilimi, SDN ve NFV teknolojilerini temel alan bir sanal ağ yapısıdır. Bu sayede, sanal ağlar uygulamaya göre özelleştirilebilir ve kullanıma açılabilir. 5G'nin getireceği en büyük değişikliklerden biri olan "kullanım farklılığı," bu sistem sayesinde kolayca altından kalkılabilecek bir hâle gelecektir, çünkü ağ dilimlemeyle bölünen her ağ diliminin kendine özgü yapısı olduğundan istenen ağ dilimine farklı ağ fonksiyonları kurulup kullanıcılara farklı hizmetler verilebilir.

Veri aktarım hızının veri aktarım gecikmesinden daha önemli olduğu durumlarda, farklı bir ağ yapısı kullanılırken, tam tersi durumda da ona uygun bir sistem geliştirilebilecektir. Bu sayede kullanıcının isteklerini en iyi şekilde giderebilecek sistemler ortaya çıkmış olacaktır. Örneğin; kaza geçirme ihtimali olan (araçlar) veya hızlı tepki verilmesi gereken sistemlerde (fabrika robotları gibi) veri aktarımının gecikmesine müsaade edilemez. Bu yüzden uygulama bu şekilde tasarlanabilir. Ama bir video programı için gecikmeden ziyade veri aktarım hızı daha önemlidir. Ağ dilimi bu ikisine aynı fiziksel altyapıda farklı niteliklerde hizmet sunabilmek için anahtar bir rol oynar.

Ağ dilimlemede her dilim diğerlerinden izole bir şekilde tutulduğu için, dilimler arasında tam bir sanal izolasyon vardır. Ayrıca, bunun sistem güvenliğinin de geliştirilmesi beklenmektedir⁹¹. Bir dilimin saldırıya uğradığı örnek bir durumda, dilimler birbirinden izole olduğu için bu durumdan etkilenmeyeceklerdir.

82 Son, H.J. and Yoo, C. Analysis of Global 5G Development (1) - 5G Standardization so far. *Netmanias* (2017); Allevan, M. AT&T debuts 5G channel sounder 'Porcupine' with NI. *FierceWireless.com* (12 Nisan 2017); Aguiar, R. L., Bedo, J. S., Evans, B., Galis, A. & Karl, H. White Paper for Research Beyond 5G. *Networld2020, Whitepaper* (2015); Cisco. 802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi. *cisco.com* (2014).

83 COTS: Commercial Off-The-Shelf

84 Ergen, M. 5G ve AB Manifestosu ve Aksiyon Planı. *Ict Media* (2016).

85 Operation Support System

86 Business Support System

87 MVNO: Mobile Virtual Network Operator

88 Evolved Packet Core

89 IP Multimedia Subsystem

90 Verizon. SDN-NFV Reference Architecture. *Verizon* (2016).

91 Ericsson AB. 5G Security. *Ericsson AB* (2015).

Ağ dilimi bir anlamda ağ fonksiyonlarının, uygulamalarının ve bulut alt yapısının belli bir kullanım için konfigürasyonu ile oluşturulur. Bu konfigürasyon istenen kapasiteyi, gecikmeyi, işlemci gücünü ve bağlantı esnekliği parametrelerini içerir. Bir anlamda uçtan uca bir dilim oluşturmak için birden fazla şebekenin ve birden fazla tedarikçinin bu istenen konfigürasyon parametrelerine uyması beklenmektedir. Bunun içinde bunların üzerinde bir orkestrasyon katmanına ihtiyaç vardır. İnternet haberleşmesindeki OSI katmanları gibi bütün şebeke uçtan uca yatay katmanlar yaratılarak fiziksel ağ elemanlarının sanallaştırılması çalışılmaktadır. Bu katmanlar aşağıdaki gibidir.

- **Servis Katmanı:** Ağ dilimini kullanan operatörün ağ dilimi üzerinde koşacağı servisleri (BSS, OSS gibi) ve uygulamaları içerir.
- **Orkestrasyon ve Yönetim Katmanı:** Ağ dilimlerinin kurulumu ve yönetimini gerçekleştirir. Bu katman ETSI tarafından NFV MANO çalışmasıyla detaylandırılmaktadır. Ağ dilimleri kalıcı değil dinamik yaratılır ve her ağ dilimi için bir yaşam döngüsü tanımlanır.
- **Kontrol Katmanı:** SDN ve NFV fonksiyonlarını fiziksel ağ üzerinde koşarak sanallaştırma işlevini yürütür.
- **İşletim Sistemi Katmanı:** Fiziksel ağ elemanlarının üzerinde koşan sanallaştırma fonksiyonudur.
- **Veri Katmanı:** Kullanıcı trafiğinin taşındığı ve işlendiği katmandır.

Yaratılan bu esnek mimari ağ dilimlerinin çeşitlerini artırmaktadır. Bir ağ diliminin kendi RF ve anten katmanı olabilir ve bağımsız çalışır. Ya da ağ dilimi fiziksel katmanın üzerinde kurularak bir anlamda kendi frekansını kullanan ama ortak bir fiziksel katman kullanan bir ağ dilimi olabilir. Ya da bir üst katmanda ağ dilimi yaratılarak ortak bir kapasiteyi kullanan bir ağ dilimi ortam erişim katmanında yaratılabilir. Ağ dilimi daha da üst katmanda bir anlamda kullandığı fiziksel kapasiteden bağımsız da yaratılabilir⁹².

Ağ dilimi konseptinin zaman içinde genişletilmesi ve ilerletilmesi, Ar-Ge konusudur. Örneğin; dilim içinde dilim (*slice-in-slice*) ya da tekrarlamalı dilim (*recursive slice*) olası bir uygulama olabilir. Bir ağ diliminin içinde başka bir dilim yaratabilme imkânı, dilimin fiziksel katman ile uygulamalar katmanı arasında tanımlanan yazılım arayüzlerinin benzeşmesi ile olacaktır. Bu metodun birçok özelliği araştırmaya açıktır. Örneğin; ana dilimin mobilite veya radyo kaynak gibi fonksiyonlarının alt dilimlere nasıl aktarılacağı açık konulardandır. Bunun yanında, örneğin birden fazla dilimden tek bir dilim oluşturmada (*slice-cum-slice*) açık konulardandır⁹³.



92 Wessel, J. Towards globally harmonized spectrum for 5G. Radio Spectrum Policy Group (RSPG) (2016).

93 5GPPP. View on 5G Architecture (Version 2.0). 5G PPP Architecture Working Group (2017).



5GAğ Uygulama Pazarı

5G'de sanallaştırma ile gerçekleşecek şebeke yapısı 5G ağ uygulama pazarı gibi bir sistemle beraber çalışacaktır. Bu yapı ile daha önce bir şebekenin içinde olan fonksiyonlar şebekenin dışına çıkarak birden fazla şebekeye hizmet verir olarak kurgulanacak ve ölçeklenebilir büyüyecektir. Bir anlamda, 5G girişimcilik ekosistemi bu uygulama pazarı etrafında şekillenecektir. İrili ufaklı birçok fonksiyonun zaman içinde ortaya çıkması ve 5G şebekesini zenginleştirmesi beklenmektedir. Yakın zamanda ihtiyaç duyulan fonksiyonlar ise kısaca aşağıda anlatılmıştır⁹⁴.

SisAğ (Fog Computing)

Buluttaki bazı uygulamaların son kullanıcıya daha yakın olması gerekmektedir. Örneğin; mobil oyun, video konferans gibi sabit gecikme kısıtları olan uygulamalar, akıllı şebeke, akıllı trafik sistemleri gibi büyük ölçekli dağıtık kontrol sistemleri ve akıllı araçlar gibi mobil uygulamalar buna örnek verilebilir. Bu nedenle operatörler bulut bazlı uygulamalara yardımcı olmak üzere şebekelerde baz istasyonlarına yakın konumda sis ağ olarak adlandırılan bir bulut mimarisi geliştirmektedir. Bu sis ağ, hesaplama, depolama ve ağ hizmetleri sunarak ve bulut bilişim ile ortaklaşa çalışarak uygulamalar için bir ön kademe

sunar. Diğer bir deyişle, sis ağ cihazlardan gelen verileri ilk karşılayan kısımdır. Bir anlamda sis ağlar uygulamalar için düşük gecikme ve coğrafi farkındalık gibi yerleştirme olanakları sağlarken bulut ise küresel merkezileştirme sağlar. Sis ağın ilk kademesi gerçek zamanlı işlem gerektiren uygulamalar için alınan verileri işleyerek kontrol komutları gönderir. Buna ek olarak, verileri filtreden geçirerek geri kalanı üst kademelere iletir. Sis ağın ikinci ve üçüncü kademeleri ise görselleştirme ve raporlama yapmaktadır. Sis ağda üst kademelere gidildikçe gerçek zamanlı analitikten işlemsel analitiğe doğru gitmektedir, gecikme gereklilikleri saniye ve dakikalardan günlere doğru artmaktadır ve coğrafi olarak yayılan alan da genişlemektedir.

Çoklu Sınır Bilişim (MEC⁹⁵)

Operatörlerin uygulamalarının bulutta olacak hepsalsal yükünün bir kısmını sis ağlarla üzerlerine alarak servis sağlamak ve uygulamaları zenginleştirmek istemektedirler. MEC yaklaşımı, kısa zaman içinde mobil şebekeler yanında WiFi ve sabit erişim içinde değerlendirilir hâle gelmiştir.

MEC mimarisi ile operatörler, kullanım deneyimini artırmanın yanında gecikme istemeyen uygulamaları mobil ortamda daha iyi organize edebileceklerdir. Örneğin, ağ verimliliğini sağlamak için

⁹⁴ Sonal Ghelani & Skinner, C. Practical 5G: What is it good for? *TechXLR8* (2017);I, C.-L. Towards Flexible Network and AI. *2nd Global 5G Summit* (2016).

⁹⁵ Multi-access Edge Computing

iletim sırasında kablosuz trafiğin ve kanalın kalitesine göre ayarlama yapabilecek veya yerelde içeriği saklayarak veya şebekeyi by-pass ederek internete çıkararak uygulama özelinde iyileştirmeler sağlayabileceklerdir. Ayrıca *handover* gerektiren durumların çoğalmasi ile *Packet Core Gateway*'lerin dağıtık mimarisine duyulan ihti- yaç, doğru bir MEC yapılanması ile azaltılacaktır. 3G'de baz istasyonuna yakın *caching* ile başlayan bu konsept, 4G'de baz istasyonlarının işlemci yeteneğinin artırılması ile devam etmiş ve NFV ile beraber 5G'de sanallaştırılmış ağ fonksiyonlarının koşacağı yapılanma standart hâle gelecektir.

MEC ilk olarak, radyo bilgilerine vakıf bir video optimizasyon altyapısı için kullanılacaktır. Radyo koşullarının anlık değişmesinin yarattığı durum ya kaliteli kanalı kullanamama ya da gereksiz *buffer* yapma ile sonuçlanmakta ve kullanım deneyimini etkilemektedir. MEC ile radyo analitik olarak incelenerek video sunucularına iletilerek optimum iletim sağlanacaktır.

Ayrıca stadyum ve halka açık alanlardaki yoğunluk ve video isteğinin MEC sunucular tarafından karşılanması gündemdedir. Yani etkinlik içinde yaratılan video eğer etkinlik içinde tüketilecek bir hedefe yönlendirilmişse bu videonun bulutta- ki sunuculara gönderilip getirilmesi ihtiyacı MEC mimarisi tarafından yerelde çözülecektir. Bu metot, şirketlerde ve kampüs ağlarda video dışında intranet, VPN⁹⁶, VoIP⁹⁷ gibi diğer veri aktarımları için de fayda sağlar. Bunun yanında MEC ile akıllı bina gibi cihazlar arası iletişim sağlayan ve buluta ulaşmak zorunda olmayan sistemler de verimli hâle getirilebilir veya sensörlerden gelen küçük paketler birleştirilerek buluta aktarılabilir. Araç- lar arası haberleşmede gecikme, MEC ile azaltılır ve çoğu işlem yerelde yapılır. Artırılmış gerçeklik uygulamalarında kamera görüntüsü üzerine binecek olan katman yoğunlukla yerel olacağı için MEC üzerinden verilmesi kullanım deneyimini (QoS) artırır.

Özdüzenleyici Şebekeler (SON⁹⁸)

Kendini organize eden ağ konsepti 4G ile beraber denenmeye başlanmış bir mimaridir. Bir anlamda radyo ve baz istasyonu operasyonunun otomasyonu için tasarlanmıştır. Baz istasyonu komşuluğu tanımaktan, tak-çalıştır özelliklerine kadar birçok özellik dâhilinde kullanımdadır. SON bir anlam- da operatörlere ölçeklenebilir büyüme getirmesi bakımından bir ihtiyaçtır. 3GPP, Sürüm 8'de ilk SON fonksiyonlarının standarda girmesiyle beraber 5G'de SON'un tam potansiyeline ulaşacak bir kullanıma girmesi beklenmektedir.

Yukarıda bahsettiğimiz gibi Cloud RAN ile başlayacak olan dağıtık mimari bir anlamda RAN fonksiyonlarının merkezileştirilmesini getirecektir. Düşük gecikme gerektiren fonksiyonlar ise, erişim noktasının uç noktasında kalmaya devam edecektir. Bunun yanında, 5G yeni radyo ile daha çok frekans baz istasyonunun parçası olacak, daha fazla anten kullanılacak ve küçük hücrelerle baz istasyonu sayısı hızla artacaktır. Bu yapı hızlı ölçeklenmek içindir. Buna ek olarak bu sistemin otonom konfigürasyonu ve işletilmesi de gereklidir; zaman içinde değişen durumlara göre anlık kaynak ayırımı değişken servis ve ağ durumlarına adapte olmalıdır.

Ayrıca lisanssız frekansların yönetimi de eklenerek SON uçtan uca genişletilecektir⁹⁹. WiFi teknolojisinin temeli olan IEEE 802.11 ailesinin kullandığı lisanssız spektrumlarda 3GPP temelli LTE-U/LAA, LWA ve Multefire protokolünün entegrasyonu söz konusudur. Özellikle 5G heterojen ağ kapsamında yaygınlaşmış lisanssız spektrum bandının daha aktif kullanılması önemlidir. Tipik bir LTE-U(unlicensed) uygulamasında tüm veri lisanssız frekans üzerinden geçer ve lisans- lı spektrum göreceli olarak az kullanılır; yani *off-loading* yapılır. Bu durumda operatörler lisanslı spektrumdaki veri aktarımlarını lisanssız spektruma aktarmak için optimizasyon çalışmaları yapacaklardır. Böylece daha az lisanslı spektrum satın

96 Virtual Private Networks

97 Voice over IP

98 Self Organizing Networks

99 Allevin, M. AT&T debuts 5G channel sounder 'Porcupine' with NI. *FierceWireless.com* (12 Nisan 2017).

5G'de sanallaştırma ile gerçekleştirilecek şebeke yapısı 5G ağ uygulama pazarı gibi bir sistemle beraber çalışacaktır.



alınabilir ve bunlarda yayın yapacak küçük hücre maliyetinde azalışa gidilebilir. LTE-U ile aynı ortamda çalışan WiFi sistemleri ile karşılıklı bir onay süreci yürüterek veri aktarımını başlatabilir. LAA¹⁰⁰, LTE-U'nun standartlaşmış versiyonudur ve bu sistem lisanslı frekansta ki LTE iletişimini lisansız frekansta ki LTE iletişimi için gerekli görmektedir. Buna karşın tamamen lisansız frekansta LTE çalışması için önerilen Multefire¹⁰¹ protokolü de çalışılmaktadır. LWA¹⁰² ise WiFi ve LTE bantlarının kullanıcı cihazı bazında birleştirilerek kullanılması söz konusudur^{103 104}. Böylece 5G ile tam otonom bir mimariye gidilmesi istenmektedir: kendini planlayan, ayarlayan ve optimize eden bir yapı amaçlanmaktadır. Bu noktada birden fazla katmanlı bir coğrafya tanımı yapılarak servis alanlarının kategorileştirilmesi bir girdi olarak platformun parçasıdır. Ayrıca birden fazla senaryoya göre kaynakların varyasyonlarının sağlan-

ması yanında kullanıcı grupları veya kapasite ihtiyacına göre otonom geçiş önemlidir. Bir anlamda *context-aware* (bağlanma durumun farkında) ağ konsepti ile hangi kullanıcı cihazına (araç, telefon, tablet, bilgisayar, sensör, giyilebilir cihaz) trafiğin yönlendirildiğinden kullanıcının nerede olduğuna veya hangi uygulamayı istediğine kadar her türde bilgi bu otonom yapının girdisi olacaktır. Bunlar büyük veri mimarisi ile yapay zekâ algoritmalarının önemini artırmaktadır.

Big Data yani "büyük veri" isminden de kolayca anlaşılabilir gibi, geleneksel veri tabanı sistemlerinin işlemekte güçlük yaşayacağı kadar büyük miktarda veriye verilen genel addır. 5G ile beraber büyük verinin yarattığı problem de büyüyecektir. Örneğin, tipik bir sürücüsüz arabada saniyede 1GB veri, bir fabrikada günde 1 milyon GB veri üretilmesi beklenmektedir¹⁰⁵. Temelde, deva-

100 License Assisted Access

101 <https://www.multefire.org>

102 LTE-WLAN Aggregation

103 Türk Telekom GiGA 4.5G bir örneğidir.

104 Qualcomm Incorporated. LTE in Unlicensed Spectrum : Harmonious Coexistence with Wi-Fi. *Qualcomm*(2014).

105 Van Rijmenam, M. Self-driving Cars Will Create 2 Petabytes Of Data, What Are The Big Data Opportunities For The Car Industry? *Datafloq.com* (2016).

sa boyutlarda yapılandırılmamış verinin otomatize edilmiş ve verimli bir şekilde değerlendirilmesi ve işlenmesi gerekmektedir. Apache açık kaynak platformunun oluşturduğu Hadoop¹⁰⁶ mimarisi ile büyük veriler üzerinde birden fazla makinede dağıtık işlem yapılması sağlanmaktadır. Yapay zekâ ve makine öğrenme ile de şebeke için karar mekanizmasının otonom hâle getirilmesi istenmektedir. Yapay zekâ çok sayıda ve farklı özelliklerdeki cihazdan gelen anlık ölçümleri değerlendirerek verimlilik ve operasyonel kolaylık önerileri getirmektedir.

Yapay zekânın oluşturulması büyük hesapsal yük getirirse bile, zekâ oluşturulduktan sonra gerçek zamanlı olarak hesaplama yapılması çok pratiktir.

Bu kapsamda oluşturulan yapay zekâ büyük verilerden hızlı bir şekilde anlam çıkarıp değişkenlere müdahale edebilir. Alışlagelmiş yöntemlerde görüntü işleme algoritmaları ya da özellik çıkarımı algoritmalarının birleşimiyle bir dizi yöntemin ardından bir karar alınması mümkündür ancak bu kayda değer gecikmeyle sonuçlanmaktadır. Yapay zekâ eğitildikten sonra bu algoritmaların yerini alarak basit ve anlık ölçümleri gerçek zamanlı olarak bir değere dönüştürür.

Türk Telekom büyük veri platformlarını müşteri memnuniyeti¹⁰⁷ teknolojileri için kullanarak değer yaratmaya başlamıştır ve bu kullanımı giderek zenginleştirmektedir.



¹⁰⁶ <http://hadoop.apache.org>

¹⁰⁷ CEM: Customer Experience Management



III.Bölüm

5G Nasıl?

Karar Verici Okuyucu

5G Nasıl?

5G, bir anlamda devletlerin, düzenleyici kurumların ve endüstrinin ortaklaşa yaratacağı bir konsensüs ile ilerlemektedir. Bu noktada Uluslararası Telekomünikasyon Birliği¹⁰⁸ (ITU) kriterleri ve frekansları belirlerken Avrupa Birliği çalışmaları çerçevesinde 5GPPP araştırma ve strateji faaliyetlerini, 3GPP radyo ve şebekenin standartlaşmasını, ETSI NFV¹⁰⁹ (/MANO), ONF¹¹⁰, Open Daylight¹¹¹, OPNFV¹¹², Open Stack¹¹³, ONAP¹¹⁴ gibi oluşumlar SDN ve NFV faaliyetlerini, GSMA¹¹⁵, NGMN¹¹⁶, 5GAA¹¹⁷, C-V2X¹¹⁸, BBF¹¹⁹, CPRI Forum¹²⁰ gibi ekosistemler pozisyonlarını üyelerinden aldıkları verilerle açıklayarak bir fikir birliği ile teknolojiyi kullanıma sokmak istemektedirler¹²¹.

5G ve Frekans Yönetimi

5G programı çerçevesinde yapılan çalışmaların en önemlisi, frekans tahsisinin ne olacağı ve nasıl yapılacağıdır. Genel olarak ortaya konan ve uzlaşılan karar 5G frekanslarının tahsisiyle yeni iş planlarının gerçekleştirilmesi, dikey endüstrilerin önünün açılabilmesi ve frekans paylaşma metodlarının inovatif olarak uygulanması yönündedir.

Yapılan değerlendirmeler ile ihtiyaç olan frekanslar günümüzde harmonize edilen frekanslarla beraber düşünülmektedir. İstenilen frekans aralığı ve bu tahsisin neticesinde ortaya çıkacak yayın kalitesi her yönüyle ilk baştaki kararı destekler nitelikte olmalıdır. Bir uçta düşük

hız karşılığında geniş kapsama isteyen Nesnelerin İnterneti desteklenmeli, diğer uçta yüksek hız isteyen geniş bant servislerine imkân verecek bir frekans aralığı düşünülmelidir. Bunun yanı sıra uzaktan ameliyat veya uzaktan yönetilen araç gibi güvenilirlik ve gecikme istemeyen uygulamalar için de yetenek sağlamalıdır. Çalışmalar neticesinde 2015 Dünya Radyo Konferansında (WRC-15) konsensüs için listelenen frekanslar aşağıdaki gibidir¹²².

Düşük Frekans	Orta Frekans	Yüksek Frekans
470-698 MHz	3300-3400 MHz	24.25-27.5 GHz
698-790 MHz	3400-3600 MHz	31.8-33.4 GHz
1427-1518 MHz	3600-3800 MHz	37-40.5 GHz
	5150-5925 MHz	40.5-42.5 GHz
		42.5-43.5 GHz
		45.5-47 GHz
		47-47.2 GHz
		47.2-50.2 GHz
		50.4-52.6 GHz
		66-76 GHz
		81-86 GHz

700 MHz, düşük hız ve yüksek kapsama uygulamaları için düşünülen bir frekanstır. Amerika ve Avrupa operatörleri tarafından kullanımı değerlendirilmektedir. 3.6 GHz ise yüksek hız için Avrupa, Çin, Japonya ve Güney Kore operatörleri tarafından kullanımı istenen bir frekanstır. Bunun yanında 600 MHz Avrupa ve Amerika'da ses ve

108 Kablosuz telgraf ile frekansların tahsisi zaman içinde uluslararası ortak anlayışa oturtulmaya başlanmıştır. Her ülkenin kendi birimleri küresel olarak ITU (International Telecommunications Union) altında frekanslarını harmonize etmişlerdir. Böylelikle neredeyse her ülke aynı TV ver radyo frekanslarını benimsemiş ve çıkan ürünlerin bütün ülkelerde dolaşımı sağlanmıştır. Aynı şekilde cep telefonu için aynı frekansların benimsenmesi cep telefonu birim fiyatını düşürebilmiş ve ülkeler arası haberleşmeyi öne çıkarmıştır. Her ne kadar ideal durum bu olsa da ülkeler kendi teknolojilerini öne çıkarmak amacıyla kendi frekans kanallarının baskın olması için de hamleler yapmaktadır. Sonuç olarak bu bir teknoloji yarışıdır.

109 <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/nfv/nfv-poc>

110 <https://www.opennetworking.org>

111 <https://www.opendaylight.org>

112 <https://www.opnfv.org>

113 <https://www.openstack.org>

114 <https://www.onap.org>

115 <https://www.gsma.com>

116 <https://www.ngmn.org/home.html>

117 <http://5gaa.org>

118 <https://5g.ieee.org/>

119 <https://5g.ieee.org/>

120 <http://www.cpri.info>

121 Nakamura, Y. Japan's 5G Policy Perspectives. *2nd Glob. 5G Event* (2016).

122 Langtry, C. Towards Globally Harmonized Spectrum for 5G. *2nd Glob. 5G* (2016); Wessel, J. Towards globally harmonized spectrum for 5G. *Radio Spectrum Policy Group (RSPG)* (2016).

görüntü için kullanımı düşünülen bir frekanstır¹²³. Bunların hepsi şu anda 6 GHz altında kullanılan frekanslara ek olarak kullanıma alınacaktır. Bunlara 5.9 GHz'de araçlar için ayrılan frekansı da ekleyebiliriz.

Milimetre dalga frekanslarında ise 26 GHz etrafında Avrupa, Amerika, Çin, Japonya ve Güney Kore'de bir konsensüs oluşmuştur. 26 GHz'de aşağıdaki frekanslar gündemdedir ¹²⁴.

- 24.25-27.5 GHz
- 31.8-33.4 GHz
- 37-43.5 GHz

Frekans seçiminde üç nokta önemlidir. Frekans aralığının vereceği kapasite, frekansın kapsama kapasitesi ve güvenilirlik. Kullanıcı deneyimlerine göre değerlendirildiğinde örneğin sanal ofis uygulamaları sadece kapasite ve güvenilirliğe bakarken, herkese geniş bant kapasite ve kapsamaya bakmaktadır. Nesnelerin İnterneti için ise tek kriter kapsamadır. Buna karşın internete bağlı araçlarda kapsama ve güvenilirlik öne çıkarken uzaktan sürülen araçlarda her üçünü de sağlayan bir frekans aralığı gerekmektedir. İşin özü, hangi frekansın hangi zamanda öne çıkacağı, bir anlamda hangi uygulamanın ne zaman kullanıcıyla buluşacağı ile ilgilidir.

Operatörlerin 5G Stratejisine Örnekler

Bu kapsamda Amerika'nın iki büyük operatörü Verizon ve AT&T'nin 5G frekans yarışında ne yaptığını bakılabilir. AT&T 10 Nisan 2017'de 1.6 milyar dolara Straight Path şirketini almak için teklif verdi¹²⁵. Şirket, birçok milimetre dalga frekansına sahipti. Şirketin 39 GHz'de bulunan 735 lisansı ve 28 GHz'de bulunan 133 lisansı ile bütün Amerika kapsama altına alınabilmektedir. Yalnız bu teklife karşı Verizon hemen 3.1 milyar dolar önererek

şirketi satın aldı. Verizon daha önce XO Haberleşme şirketini de 1.8 milyar dolar vererek 180 MHz genişliğinde milimetre dalga frekansını bünyesine katmıştı.

Aynı şekilde 2017'de 600 MHz için yapılan açık artırmayı ise Amerika'nın üçüncü büyük operatörü T-Mobile 8 milyar dolara kazandı. T-Mobile, AT&T ve Verizon'a karşı 5G servislerini daha düşük bantta kurmak istemesinde farklı bir strateji görülmektedir. T-Mobile kapsamaya önem vermekte, AT&T ve Verizon ise kapasiteye. Bu noktada 600 MHz frekansa Dish Network 6.2 milyar dolar, Comcast 1.7 milyar dolar vererek ikinci ve üçüncü oldu. Bu iki şirket de aslında mobil haberleşme şirketi değil, biri uydu diğeri ise kablo ile evlere giren sabit şebekelere sahip geniş bant internet ve TV sağlayıcısıdır. İki şirketin de Nesnelerin İnterneti'ne yönelmesi önemli bir gelişme olarak not edilebilir. Bunun yanında AT&T ve Verizon ise milimetre dalga ile yüksek hız yakalayarak muhtemelen evin içine girmek istemektedir¹²⁶.



¹²³ Jones, D. T-Mobile Says Its 600MHz LTE Sites Will Be 5G-Ready. *Light Reading* (31 Ağustos 2017).

¹²⁴ Ziegler, V. Architectural Leadership for the 5G Era. *Nokia, Whitepaper 1-7* (2016); European Commission. Why the EU is Betting Big on 5G. *Research EU Focus Magazine, No15*. (2015).

¹²⁵ Frekans fiyatlandırması genellikle ödenen miktarın alınan frekans oranına ve popülasyona bölümü ile bir kıyaslama metriği hâline getirilir ve ülkelerin GSMH'sına göre de bir çarpanla dengelenir.

¹²⁶ Knapp, J. FCC Actions to Make Spectrum Available for 5G. 2nd Glob. 5G Event (2016).



Ek olarak ABD'nin diğer büyük operatörü Sprint (Japon Softbank operatörü tarafından satın alındı) 2.5 GHz frekansta Massive MIMO teknolojisini 2019 sonunda kullanmak üzere çalışmaktadır. Yeni 2017 sonunda kabul edilen 3GPP 5G NR standardına 2.5 GHz eklenmiştir¹²⁷.

Son düzenlemelere göre ITU tarafından açıklanan 5G tanımı ile mobil cihaz 20 Gbps hızı ile veri indirebilme ve bir kilometre kare içinde bir milyon cihaz servis görebilme kriterleri üzerinden tanımlanmaktadır. Bu şartlar daha çok kapasite ve kapasiteyi öne çıkarmaktadır.

Bunun yanında frekanslar üzerinde oluşacak olan konsensüs ile ölçek ekonomisinin yakalanması en büyük hedeftir. Bu noktada ülkeler arası harmonizasyon yaklaşık belirtilen aralıklarda olması bir anlamda (*radio tuning*) frekans ayarlayıcılarla üstesinden gelinecek bir durumdur. Maliyet, performans ve kompleks yapı ise frekans ayarlayıcıların özelliklerini belirler. Frekans ayarlayıcılarda örneğin teknolojik bariyer olmasaydı, bu frekans harmonizasyon çalışmalarına da gerek kalmazdı. Amerika 27.5-28.35 GHz'i kullanırken, diğer ülkeler 26.5-29.5 GHz'i kullanmaktadır. Buna karşın Avrupa 24.5-27.5 GHz'i ilk 5G frekansı olarak tahsis etmiştir. Bu durum farklı radyo çipi yerine aynı çipin farklı frekanslara ayarlanmasıyla aşılabilir bir durumdur. Bu zamana kadar 6 GHz altında bu teknoloji yeterli olmuş olsa da milimetre dalga gibi yüksek frekanslarda frekansların arasının

daha da açık olmasından dolayı aşılması gereken bir problem olarak ortaya çıkmaktadır.

Bunlara ek olarak 5G'de herhangi bir frekans teknoloji/servis bağımlılığı veya bir servise bağlı olmaması, frekans tahsisinin anlık olabilmesi veya bir operatör frekansının bir başka operatöre anlık kullanılabilmesi beklenen durumlardır. Bunlar 5G ile gelmesi beklenen ürün ve servis çeşitliliğinin önünü açacaktır.

5G ve Açık Kaynak

5G'de yaşanacak bir başka devrim şebeke yazılım ve donanım geliştirme faaliyetlerinin açık kaynak metodunu benimsemesidir. Telekom sektörü açısından bugüne kadar daha çok şebeke ötesinde kullanılan açık kaynak kodları son zamanlarda şebeke mimarisine doğru ilerlemekte ve kendi kapalı anlayışı ile bilinen bu sektörü sarsmaya başlamıştır.

Açık kaynak sistemi, kitlelerin katkısını içine alacak şekilde ilerler ve geliştirme faaliyetlerini hızlandırır. Bu sistem bu zamana kadar Telekom sektörü için yabancı bir anlayıştı. Daha çok geleneksel şelale (*waterfall*) sistemi ile yapılan ürün ve servislerle gelişen Telekom sektöründe donanım her zaman baskındı. Buna karşın, son yıllarda gelişen ve daha önce değinilmiş olan teknolojiler Telekom sektöründeki donanım ağırlığını hafifletmekte ve şebekenin merkezine doğru ilerlemektedir.

¹²⁷ Frumusanu, A. 3GPP Completes First 5G NR Specification For Release 15. Anandtech.com (21 Aralık 2017).

M-CORD¹²⁸ açık kaynak oluşumu ise Open Network Foundation ve Linux Foundation ile beraber oluşturulmuştur. Açık kaynaklı teknolojilerin geliştirilmesinde öncü kuruluşlardan biri olan ve AT&T, Verizon ve NTT gibi büyük operatörlerin partneri olduğu ONF'e (Open Networking Foundation) Türk Telekom olarak partner seviyesinde üye olunmuş ve ONF, CORD ve UCST'nin yönetim kurullarına girilmiştir. Bu kuruluş tarafından yürütülen açık kaynaklı yazılım tanımlı ağ ve sanallaştırılmış ağ fonksiyonları projeleri Türk Telekom'un 5G'ye hazır hâle getirilmesine büyük fayda sağlayacağı öngörülmektedir. Ayrıca AT&T, China Telecom ve Vodafone gibi birçok operatörün üyesi olduğu Linux Foundation tarafından yürütülmekte olan ve uçtan uca servis orkestrasyonunu sağlamayı amaçlayan ONAP'a da üye olunmuştur. Bu proje daha hızlı ve yeni servislerin verilmesine imkân tanımaktadır.

Facebook'un başını çektiği Open Compute Project (OCP) donanım sistemlerini genel olarak tekrar tasarlamayı amaçlamaktadır. 2009 yılı ile beraber Facebook'un katlanarak büyümesini cevaplamak amacı ile kurulmuştur. Bu amaçla Facebook dünyanın en enerji verimli ve en düşük maliyetli veri merkezini kurmak için çalışmalara başladı. 2011 yılında ise kurduğu bu sistemi OCP ile açık kaynak hareketine dönüştürdü.

Bunun yanında Telekom şirketleri kendi inisiyatifleri ile açık kaynak ekosistemleri kurmaya başlamışlardır. Carrier Open Compute Project örneğin AT&T, Deutsche Telekom, EE, SK Telecom ve Verizon gibi operatörlerinin başını çektiği bir konsorسيوم olarak veri merkezlerini telekom altyapısına özgün yapmak üzere oluşturuldu. Platform olarak ise OCP alt yapısını kullanarak ilerlemektedir.

Sistemdeki maliyetli yapıların üstesinden gelinmesi ve müşteriye ulaşmak için daha zengin bir ürün portföyünün oluşturulması için arkaik ya-

pıların modernizasyonu gerekmektedir. Bunun yanında operatörler tedarikçilere bağlı kalmak-tansa açık kaynak kodlu sistemler ile önü açık bir inovasyonun parçası olmak istemektedirler. Not edilmesi gereken husus, tedarikçilerden¹²⁹ ziyade operatörlerin başını çektiği bir açık kaynak hareketi ile karşı karşıya olduğumuzdur. Operatörlerin yanında Google ve Facebook gibi şirketlerin bu sürece ilgisi önemlidir. Bu gibi internet şirketlerinden zarar görmekte olan operatörler için bir kazan-kazan senaryosu, açık kaynak ile daha çevik bir altyapı yaratılarak ortaya çıkabilir. Burada çemberin dışında kalan geleneksel tedarikçiler olacaktır. Çemberin içindeki internet devleri ile operatörler açısından da iş planında farklılık vardır. Bu model, telekom değer zincirini yeniden tasarlayarak bulut şirketlerinin başını çektiği bir oluşuma yerini bırakacaktır¹³⁰.

5G ve Sayısal Uçurum

5G ile gelecek olan hızla ölçeklenir şebeke yapısı ve artan frekans bir anlamda sayısal uçurumun önüne geçmek için de gerekmektedir. "Sayısal uçurum" (Digital Divide) haberleşme teknolojilerine sahip olan ve olmayan kesimler arasındaki gelişmişlik farkının ortaya çıkardığı bir durum olarak tanımlanmaktadır¹³¹.

Dünyada 4 milyar insanın internete ulaşımı yoktur¹³². Buradaki bağlantı problemi bir taraftan teknolojik, diğer taraftan finansal bir problem olarak değerlendirilebilir; çünkü sonsuz finans gücü veya çok ucuz teknolojinin teorik olarak varlığında herkesi internete bağlamak hızlıca çözülebilecek bir problemdir¹³³.

Ölçeklenerek büyümenin getirdiği değer, günümüzde teknoloji yarışını bir anlamda internete bağlı olmayan kesime ulaşmaya yöneltmiştir.

¹²⁸ Central Office Re-architected as a Datacenter

¹²⁹ TEM: Telecom Equipment Manufacturer

¹³⁰ Ergen, M. 5G ve AB Manifestosu ve Aksiyon Planı. *Ict Media* (2016); Communications, M. of I. A. and. Japan's Radio Policies Towards 5G. *2nd Glob. 5G Event* (2016).

¹³¹ Commission, E. 5G Infrastructure PPP: The next generation of communication networks will be 'Made in EU'. *Eur. Digit. Agents* (2013).

¹³² World Economic Forum. Internet for All - A Framework for Accelerating Internet Access and Adoption. *World Economic Forum, Whitepaper* (2016).

¹³³ United Nations: Sustainable Development Goals. *un.org* (2015).

1969 yılında Ay'a ayak basan Neil Armstrong'dan beri uzaya bir kilogram malzeme çıkarmanın bedeli ortalama 19 bin dolardır¹³⁴. Uydu fırlatma maliyetlerini azaltmak için örneğin SpaceX şirketi 24 saat içinde tekrar kullanabilir roket teknolojisini geliştirmektedir.

Virgin Galactic ise yolcu uçaklarına takılı bir sistem ile uydu fırlatma maliyetini düşürmek istemektedir. Microsoft kurucularından Paul Allen ise Stratolaunch şirketi ile dünyanın en uzun kanatlı uçağını geliştirmiştir ve roketlere yüksek irtifada atış mekanizması geliştirmektedir. Bu çalışmalar sonunda uzaya çıkış maliyetleri indirilirse örneğin SpaceX 12000'e yakın uydu atarak bütün dünyaya internet hizmeti vermeyi amaçlamaktadır. 4 bin uyduyu Ka bandında, 8 bine kadar uyduyu ise V bandında konumlamak istemektedir. Aynı şekilde Virgin Galactic firmasının kurduğu OneWeb konsorsiyumu ise 648 tane uyduyu Ku bandında SpaceX gibi 1200 km (LEO) yüksekliğe konumlandırmak istemektedir. GPS uydularının 36 bin kilometre (GEO) uzakta olduğunu düşünürsek daha yakında göreceğimiz uyduların sayısının artacağını düşünülebilir. Bu konuda önemli bir parantez olarak uzayda şu anda 1459 tane aktif, 3600 tane de çalışmayan uydu bulunmaktadır.

Bunun yanında yüksek irtifa çözümleri üzerinde de (HAPS – High Altitude Platforms) çalışılmaktadır. Google bu yeni milyarlık kitleleri bünyesine katmak için balonları kullanarak kablosuz internet hizmeti verme çalışmaları yapmaktadır. Balonlar, atmosferdeki hava akımlarının da yardımıyla hareket hâlinde dünya etrafında dönerken yeryüzüne kablosuz sinyalleri göndererek bağlantı hizmeti verecek şekilde tasarlanmıştır. Japonların İkinci Dünya Savaşı'nda ABD'nin batı yakasını bombalamak üzere keşfettiği teknoloji şimdi dünyaya internet vermek üzere yeniden değerlendirilmektedir. Facebook aynı şekilde dron teknolojileri ile internet servisi vermek üzere bünyesinde bağlantı laboratuvarı kurmuştur ve internet.org adlı sosyal vakfı kurarak farkındalık yaratmaktadır¹³⁵.

Q/V-band	→ ~ 40-50 GHz
Ka-band	→ ~ 20 GHz
Ku-band	→ ~ 12 GHz
C-band	→ ~ 4 GHz
S-band	→ ~ 3 GHz
L-band	→ ~ 1.5 GHz

5G Ne Zaman?

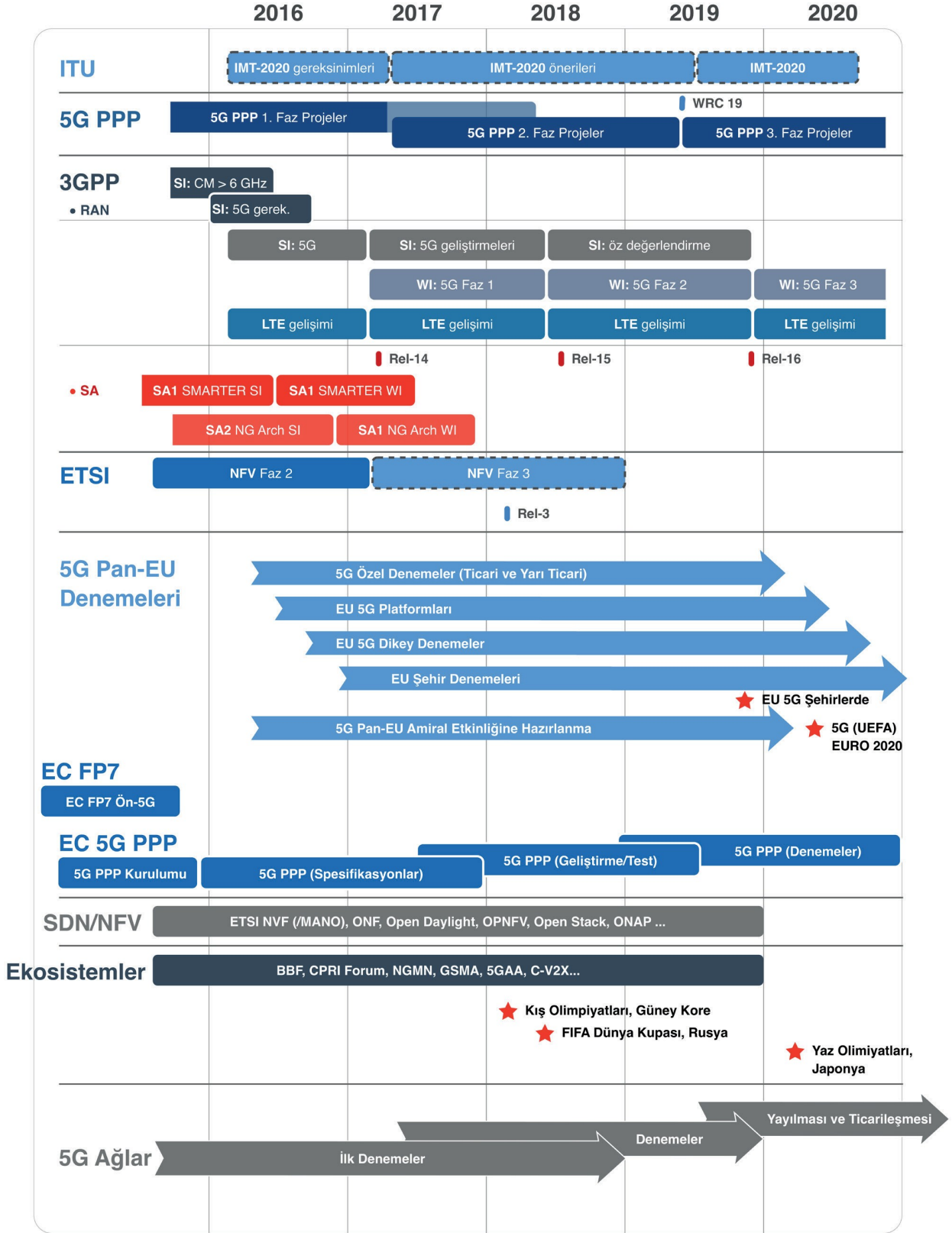
Mobil iletişimde her nesil belli süreçlerin sonucudur. Araştırmalardan sonra standartlaşma başlar ve standardın kabulünün akabinde çözümler ortaya çıkar. 5G'de de bu döngü değişmemiştir.

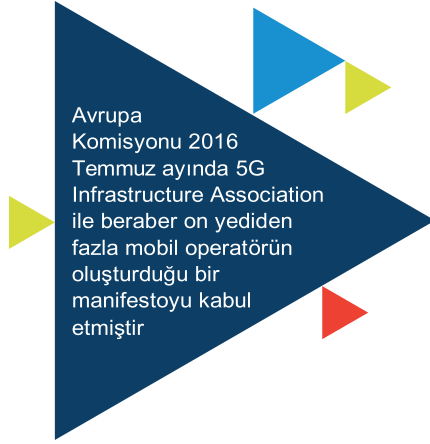
5G standartlaştırma uygulaması, 2010 yılından bu yana yapılan araştırmalar, örnekler ve deneyimler sayesinde geliştirilen teknolojilerin uluslararası konferanslarda ve toplantılarda tanıtılması ve uygulanması sonucu ilerleme kaydetmiştir. 5G standartlaşması; ITU (Birleşmiş Milletler), 3GPP (Asya, Avrupa ve Kuzey Amerika) ve 5G PPP (Avrupa Komisyonu) önderliğinde yürütülmektedir. ITU dünya radyo haberleşme konferansında (WRC-15) 2019 yılına kadar yeni spektrum ve vizyon doğrultusunda gerekenlerin yapılması kararı alınmıştır¹³⁶. 2019 yılı sonrası teknolojik devrim adı altında 5G ürünlerinin, WRC-18/19 konferansı ile yerleştirilmesine ve uygulanmasına resmi olarak başlanacağı öngörülmüştür. 3GPP ve 5GPP, 5G standartlaştırması altında yayınladığı ve uyguladığı projeleri aşama aşama büyütmeyi ve ileri seviyelere taşımayı hedeflemiştir. Geniş bir çerçeveden önümüzdeki yıllarda 5G ürünlerine ve uygulama alanlarına aktif olarak geçiş sağlanarak, 2020 yılında 5G'nin kurulumunun temellerinin atılması beklenmektedir.

¹³⁴ Ergen, M., Girişimci Kapital: Silikon Vadisi Tarihi ve Startup Ekonomisi. *girisimcikapital.com* (2017).

¹³⁵ ZTE. 5G Software Network Framework & Prototype. *zte.com* (2016).

¹³⁶ European Commission: Reflection Paper on the Future of EU Finances. *ec.europa.eu* (2017); ITU: State of Broadband Report. *itu.int* (2016); World Economic Forum: Internet for All Report. *weforum.org*, (2016).





5G teknolojisini kimler tanımlayacak?

5G teknolojinin tek bir sahibinden söz etmek anlamlı değildir. Ancak bu çoklu yapıda, bir Birleşmiş Milletler örgütü olarak, ITU'nun en tepede uluslararası çatı kurum rolünü üstlendiğini söylemek yanlış olmaz. Çatı kurum olarak, ITU kendi başına standart geliştirmez, ancak 3GPP gibi standart belirleyici kurumların çalışmalarına dayalı olarak standardın onay sürecini yürütür. ITU'nun onayladığı standartlar, genel küresel çerçeveyi oluşturur.

5G standardının 2020 yılında tamamlanarak, ticari hâle gelmesi beklenmektedir. Bu süreçte, birçok örgüt, kurum ve şirket standarda katkı sağlamak için büyük ölçekli hazırlıklara başlamışlardır. Ancak, bunlardan daha da önemlisi devletlerin standardın oluşumuna katkı sağlamak için başlattıkları kapsamlı girişimlerdir. AB, 5G çalışmalarına 5G PPP konsorsiyumu çerçevesinde 700 milyon Euro devlet desteği ve bunu destekleyen özel sektör katkısıyla 3.5 milyar dolar ayırmıştır. İngiltere, 2012 yılında, Surrey Üniversitesi'nde, dünyanın ilk 5G İnovasyon Merkezi'ni kurmuştur. Güney Kore'nin 5G için ayırdığı kaynak 1.4 milyar dolardır. Güney Kore, Çin ile birlikte bu standartta tekel olma rekabeti içerisindedir. Avrupa ise, rekabete kendi iş bünyesinde eşitlikçi yaklaşmak zorundadır ve kendini sadece bu işe platform sağlama nokta-



sında konumlanmıştır¹³⁷. ABD ise, daha 2008 yılında NASA ve bazı özel girişimcilerin ortaklığıyla, 5G teknolojisine yönelik araştırmalar yapmak üzere, Machine-to-Machine Intelligence – (M2Mi) Corp (Makinalar Arası Zekâ) Şirketi'ni kurmuştur. Dolayısıyla, 5G teknolojisini ve standardını 2020 yılına kadar belirlemek üzere kıyasıya bir yarış başlamış durumdadır ve yarışının kazananının kimler olacağı, kimin oyunda kalacağı henüz belli değildir. Türkiye, Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu'nun öncü olduğu, Türk Telekom'un da kurucu üyelik ile katkı verdiği 5GTR konsorsiyumu ile bu yarışa zamanında katılmıştır. Ayrıca, Türk Telekom 5G PPP'de kurucu yönetim kurulu üyesidir.

AB 5G Manifestosu ve Aksiyon Planı

Avrupa Komisyonu 2016 Temmuz ayında 5G Infrastructure Association ile beraber on yediden fazla mobil operatörün oluşturduğu bir manifestoyu kabul etmiştir¹³⁸.

5G manifestosu fırsatlar ve zorlukların anlatıldığı bir öneri belgesi olarak önemlidir. Frekans ihtiyacından düzenlemelerdeki istenen değişimlere kadar her açıdan 5G'nin zaman içindeki başarısının kriterleri ortaya konmuştur. Bunun yanında manifesto ile beraber Avrupa'da ve dünya genelinde vizyonda ve takvimde beraberlik amaçlanmıştır.

Operatörlerin istediği takvime göre, 2018 yılı itibarıyla geniş çaplı denemelerin başlaması ve 2020

¹³⁷ ECC. The way forward for 5G in Europe. ECC Newsletter (2016).

¹³⁸ 5GPPP. Towards 5G: European Approach. 5GPPP, Whitepaper (2014).

yılına gelince her 28 üye devletin en az bir şehrinde ticari 5G'nin başlaması amaçlanmıştır.

Bu bir anlamda Avrupa Komisyonu'nun eski adı ile Dijital Ajanda, yeni adı ile ise Dijital Ekonomi ve Toplum grubunun 5G konusunda hızlanma çağrısına bir cevap niteliği olduğu da görüşlere yansımıştır.

5G manifestosu ile yalnızca haberleşme katmanını değil dikey sektörlerin de yararının ilk olarak düşünülmesinin ve planlamanın ona göre yapılmasının gerektiği belirtilmiştir. İlk olarak dikey alanlardan otomotiv ve medya sektörü dikkate alınmış, ek olarak kamu kuruluşlarının modernizasyonu da belirtilmiştir.

Ekosistemin her alanına 5G ile birlikte haberleşmenin girmesi için 2017 yılı itibarıyla en azından otomotiv, sağlık, ulaştırma, lojistik, toplum sağlığı, akıllı şebekeler, akıllı şehirler, medya ve eğlence sektörlerine planlamaların tamamlanması ve 2018 yılı itibarıyla bu sektörlerin 5G içerisindeki altyapı yeniliklerinin denenmesi amaçlanmaktadır.

Bu düşünülen çarkların çalışması için ise AB 1 milyar Euro civarında bir risk yatırımı kurmak ve 5G *start-up*larına aktararak, akabinde hisse almak istemektedir¹³⁹.

Bu elbette 5G PPP araştırma fonlarına ek olarak konuşlanacak ve ekstra olarak da risk yatırımı yanında dikey endüstrilerin 5G vizyonuna yakınsaması için yarım milyar ile bir milyar Euro arasında devlet desteği düşünülmektedir. Ayrıca altyapı teşvikleri ile fiber yatırımlarının artırılması istenmektedir.

Bunun yanında manifesto üye devletlerinde kendi içinde fonlamaları artırması ve 5G ekosistemini kurması için teşvik etmesini de önermektedir. Türk Telekom, son yıllarda Pilott hızlandırma programı ile girişimcilere desteğini 2017 son çeyreğinde Şirket Risk Yatırım Firması kurarak ilerletme kararı almıştır.

5G aksiyon planı¹⁴⁰ ile beraber AB en azından kendi içinde tek bir pazar oluşturmak istemektedir. AB'nin kuruluş vizyonunun temel taşı olan bu düşüncenin hâlâ gerçekleşmemiş olması AB içinde ölçek ekonomisi ile büyümeyi engellemekte ve *start-up* dünyasında *unicorn*ların çıkamamasının nedenlerinden biri olarak gözükmektedir.

Bunun yanında üye ülkelerin düzenlemelerinin birim alana daha fazla baz istasyonu koyabilecek düzenlemeleri hem yasalar hem de mali açıdan önünü açması istenmektedir.

Ayrıca, *net neutrality* maddelerinin revizyonu ile beraber 5G yatırımlarının geri dönüşünü engelleyecek ve inovasyonun önünü kesecek maddelerin tekrar revizyonu istenmektedir. Bir anlamda regülasyonların esnetilmesi ve yükümlülüklerin azaltılması ile beraber yatırımın geri dönüş süresinin kısalması operatörlerin 5G yatırımlarını artıracaktır.

Zaman çizelgesine göre 2018 öncesinde standart öncesi teknolojilerin deneneceği, 2018 sonrasında 3GPP standartlarının tamamlanacağı düşünülmektedir. Bu zamana gelindiğinde operatörlerin kullanım senaryoları dâhil birçok konuda mutabık olması beklenmektedir.

Manifestonun akabinde AB Komisyonu 5G Aksiyon Planı'nı kabul etti. Bu kapsamda aksiyon planları aşağıdaki şekildedir¹⁴¹;

- Bütün paydaşların aynı takvime uyması sağlanacak ve 2020'de ticari hâle geçilmesi ve 2025 yılı ile beraber 5G'nin kapsammasının tamamlanması istenecektir.
- Resmi düzenlemelerin harmonizasyonu yapılacaktır.
- 6 GHz altı ve 6 GHz üstündeki 5G frekanslarına üye ülkeler çapında mutabık olunmasına çalışılacaktır¹⁴².
- Fiber altyapı ve coğrafi baz istasyonu kurulum planlamaları yapılacaktır.

139 Industry High Level Group. 5G Manifesto for timely deployment of 5G in Europe. Submitted to the European Commission (2016)

140 European Commission. 5GAP: 5G Action Plan for Europe. European Commission (2016).

141 Avanti Communications. 5G: Building the European Digital Society Spectrum-Related Aspects For Economically Viable Rollout Of 5G Services. qed.eu (2017).

142 Meyer, D. 5G spectrum at center of Straight Path settlement with FCC. RCRWirelessNews (2017).

- 2019 yılı ile beraber 5G standartlarının ilk kısmının ortaya çıkarılması ve bunun için standardizasyon faaliyetlerinin farklı kullanım seçenekleri de dâhil olmak üzere testlerle iç içe geçmiş şekilde sürdürülmesi ve gerçekçi bir standardizasyon ortamının sağlanması amaçlanacak.
- Testlerin takvime göre başlaması planlanmaktadır¹⁴³.
- Kamu güvenliği sisteminin 5G içinde yerinin tayini için çalışılması hedeflenecek.
- 5G'de girişimci ekosistemin kurulması için risk yatırımı altyapısı için çalışılacaktır.

Avrupa Birliği 5G'yi fırsat bilerek yeni dünyanın haberleşme altyapısını kurmak için öncü olmaya çalışmaktadır. Cesur adımlar atarak 5G konusunu başlatmış, şimdi ise hızlanarak kamu ve özel sektör yatırımlarını bu yeni ekonomiye doğru akıtarak değer yaratmak istemektedir¹⁴⁴.

AB 5G Planı

5G teknolojilerinin hızla hayatımıza girmesi için AB nezdinde 5G denemeleri¹⁴⁵ programı başlatmıştır. Bu denemeler aşağıdaki beş soruyu cevaplayacak nitelikte olması düşünülmüştür.

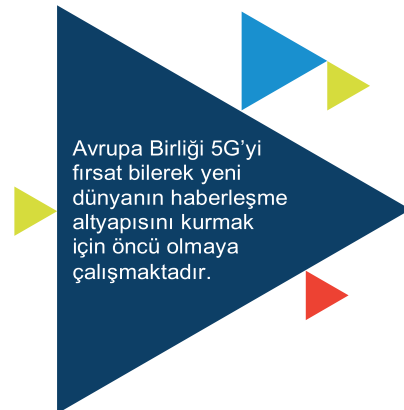
1. 5G'nin yararı nedir?
2. Bu yararları nasıl gösterebiliriz?
3. Şu andaki teknoloji neden bunlar için kısıtlı kalmaktadır?
4. 5G hangi yenilikleri getirerek bunları çözmektedir?
5. 4G'den 5G'ye geçiş nasıl olacak?

5G denemeleri 5G teknolojilerini test ederken 5G pilot çalışmalarının ise teknolojilerin iş planları- la beraber son kullanıcıya olan değerini ölçecek

şekilde planlanması düşünülmüştür. Genellikle özel sektör tarafından ilerletilmesi beklenen dikey alanlar ve platform deneme çalışmalarını AB birkaç alanda hızlandırmak amacıyla destek vermesi beklenmektedir. Örneğin; 5G UEFA EURO 2020 spor şampiyonası AB'nin 5G çalışmalarını göstereceği önemli bir etkinlik olarak düşünülmüştür. Ayrıca 5G Deneme Şehirleri¹⁴⁶ programı ile de aday şehirlerde 5G teknolojilerin kullanıma sokulmasıyla deneyimin genişletilmesi amaçlanmıştır. Bunları desteklemek için de 5G PPP¹⁴⁷ ikinci ve üçüncü faz projelerinde prototip, deney ve denemelerin önemini artırmıştır.

Bunun yanında 5G Infrastructure Association ile beraber aşağıdaki ülkelerde planlanan uluslararası denemeler de koordine edilerek 5G'nin dünya çapında hızla kullanıma girmesi için çalışılacaktır. Aşağıdaki ülkeler bu konuda öncelikli katkılar sunmaktadır:

- Japonya
- Güney Kore
- Çin
- Tayvan
- Brezilya
- Amerika
- Kanada
- Hindistan



143 Marek, S. 5G Trials and Tribulations: A Guide to Global 5G Operator Tests. *SDXcentral* (2016); Iwamura, M. 5G for Verticals in the New Economy. *Glob. 5G Event* (2016).

144 Ergen, M. 5G ve AB Manifestosu ve Aksiyon Planı. *Ict Media* (2016).

145 5G PAN European Trials

146 5G Trial Cities programme: Amsterdam, Barcelona, Bari, Berlin, Espoo, L'Aquila, London, Madrid, Malaga, Matera, Milan, Oulu, Patras, Prato, Stockholm, Tallinn, Turin öne çıkan şehirlerdir.

147 2015'te başlayan 2017'de sonuçlanan 5G PPP birinci faz projeleri ile teknolojinin temeli atılmış ve standartlaşma çalışmalarının temel çerçevesi çizilmiştir.



5G Ötesi

Kablosuz ağ teknolojileri gelişirken nesiller altında sınıflanan yeteneklerin sınıflandırılması ve belirlenmesi pek çok koşula bağlıdır. Örneğin 3G ile 4G arasında kullanılan teknolojilerin önemli bir kısmı ortaktır ya da çok benzer bir altyapıya sahiptir. Dolayısıyla yeni nesil teknolojilerin de sınırlarını çizmek belirsizlik içerir. 5G çalışmalarının sınırları da benzer belirsizlikler içermek ile birlikte, küreselleşmenin ortak talepleri sebebiyle hedef yetenekler için bir liste oluşturulmuştur. 5G'nin ötesinde neler olacağına dair de bazı fikirler mevcuttur.

5G'nin ötesindeki çalışmaların dört ana başlıkta toplanması şu aşamada mümkündür: Temel kablosuz haberleşme teorisinin güncellenmesi, daha dinamik ve verimli spektrum yönetimi, yenilikçi ve yapay zekâ temelli sistem tasarımı ve yenilikçi iş planları. Bu konseptlerin bir kısmı 5G'de de ortak olmakla birlikte verimliliği artırıcı uygulamaların dâhil edilmesi 5G uygulamalarını daha öteye taşıyacaktır. Yazılımın önünün açılması ile 5G kendi içinde yapay zekâ ile yenilenerek ilerleyecek görülmektedir.

5G ötesindeki çalışmalarda iletişim ağı yerine iletişim sistemi teriminin kullanılacağı öngörülmektedir. Bu çalışmalar yapay zekânın ağı yönetmesi sebebiyle yerleştirilmiş sistemlerin entegre ve büyük sistemleri oluşturmasını içerecektir. Bu sistemlerin sadece şu anki ağ elemanlarından ve

kablosuz ağ ölçümlerinden değil insan etkilerini hesaba katan, hatta biyolojik sensörlerden gelen bilgileri de işleyerek karar veren mekanizmaları da dâhil edebilir. Dolayısıyla insan ve biyoloji dâhil edilmiş sistemlerin yönetimi için yeni standartların ve teknolojik ürünlerin geliştirilmesi gerekecektir.

5G ötesindeki taleplerin *Terrabit* hızlar ile ölçüleceği ve belki 6G ile adlandırılacak çalışmaların 2030'dan sonra gerçekleşeceği öngörülmektedir. 5G çalışmalarının aksine 300GHz üzerindeki frekansların da çalışmalara dâhil edilmesi 6G'nin kendine has özelliklerinden olacaktır. Bu frekansların özellikle biosensörler gibi kısa mesafeye veri ileten ürünlerde katkı sağlayacağı öngörülmüştür. RF ortamında kirlilik yaratma ihtimali düşük olduğundan 50GHz'lik kanal genişliklerinin tanımlanması mümkün olacaktır. Kirliliğin az olması sebebiyle yeni modülasyon algoritmaları bu kanal genişliklerini çok daha verimli kullanacaktır. Şu anda bile bu frekansların fiziksel koşullardaki performansını belirlemeye yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

Ağ yazılım sanallaştırması 5G ötesi çalışmaları için önemli adımlardan biridir. 5G için geliştirilen NFV ve SDN gibi çözümlerin çok daha temel düzeyde programlanabilir ve az hesapsal yük ile çalışabilir olması gereklidir. Bu yönetim mekanizmalarının boyutlanabilir olması gereklidir ve veri boyutuna göre hesapsal yeteneklerini güncellemelidir¹⁴⁸.

Enerji odaklı yönetim hedefleriyle yerleştirilmiş enerji örüntüleri oluşturulmalıdır. Bu örüntüler diğerleri ile etkileşimlerini gerçek zamanlı olarak

148 Shimizu, T. Network Softwarization, NFV and 5G. ppt. 2nd Glob. 5G Event (2016).

hesaplayarak toplam enerji yönetim politikasıyla uyumlu aksiyonlar almalıdır. Dolayısıyla telekomünikasyon alanındaki çalışmaların üretim sistemlerine de entegrasyonu gereklidir. Özellikle biosensör gibi cihazların pil ömrünü yüksek tutmak için mümkün olduğunca düşük sinyal gücüyle veri aktarımı planlanmalıdır.

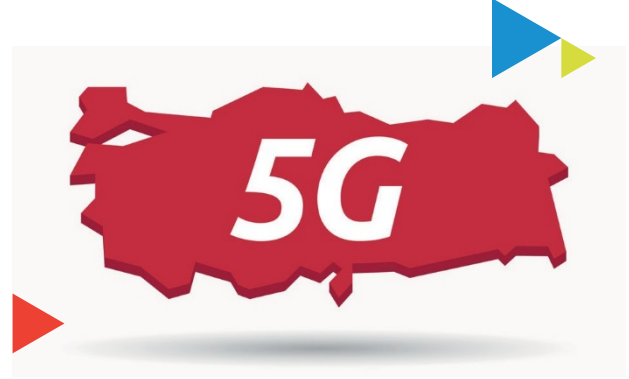
5G ötesi çalışmalarda Nesnelerin İnterneti'nin çok daha gelişmiş ve entegre versiyonları karşımıza çıkacaktır. Biyomekanik sistemlerin de ağın bir parçası olmasıyla D2D cihazlarının bir merkez olmadan belki de *blockchain* benzeri uygulamalar ile entegre edilmesi gereklidir. Ek olarak, tüm bu karmaşık ve büyük sistemlerde ağ ve sistem güvenliği önemli bir problem olarak ortaya çıkacaktır. Bu sistemlerde gerçek zamanlı verimliliği hesaplayan ve bu kararları uygulayan mekanizmalara dışarıdan yapılan kötü amaçlı bir müdahale bütün sistemi etkileyen sonuçlar doğurabilir. Çok farklı problemler olduğu için tek bir fiziksel ağ mimarisi tipi yerine şu anda da çalışmaları bulunan (HIMALIS¹⁴⁹, MOFI¹⁵⁰ gibi) platformların entegre edilmesi gerekecektir.

5G'den sonraki tasarımlardaki önemli kriterlerden biri antenlerdir. Zaten Nesnelerin İnterneti ihtiyaçları için aşırı küçülen sistemlere ihtiyaç duyulurken bunların beamforming özellikleri için anten tasarımlarında da büyük değişikliklere ihtiyaç vardır.

Kablosuz haberleşme ile ilgili doğrudan 5G çatısı altında bulunmayan fakat paralel yaklaşımlar gösteren pek çok çalışmanın 5G ötesinde kullanılacağı tahmin edilmektedir. Bunlardan biri daha önce değinilmiş olan görünebilir ışığın veri transferinde kullanılmasıdır. Şu anda Nesnelerin İnterneti cihazları yeterince yayılmadığı için ve mobil cihazların da veri merkezini çoğu zaman doğrudan görmediği için yaygınlaşmayan bu teknoloji 5G sonrasında önemli yerlere katkı sağlayabilir. Görünür ışık iletişimindeki en önemli limit veri kaynağını doğrudan gösteren ve çevresel koşul-

lardan bağımsız ortam oluşturulması ile ilgilidir. Dolayısıyla, özellikle akıllı ev uygulamalarında sabit eşyalarda Nesnelerin İnterneti uygulaması için kolayca kullanılabilir.

5G Vizyonunun Türkiye için Önemi



IMF Dünya Ekonomik Görünüm Raporu'na göre, Türkiye 2017 yılı itibarıyla, dünyanın 18., Avrupa'nın ise 6. en büyük ekonomisi konumundadır. Toplam dış ticaret hacmi, milli gelirinin %50'sine ulaşan bir ekonomi olarak, Türkiye, son yıllarda dışa açıklığı artan bir ekonomidir.

Türkiye'nin küresel ekonomide etkili bir oyuncu olma arzusu, önemini ve önceliğini korumaya devam etmektedir. Türkiye, bu hedefini, 2023 vizyonunda açıkça ifade etmiş ve son birkaç yıldır küresel ekonomide gelişmekte olan tüm ekonomileri zorlamaya devam eden olumsuz koşullara rağmen, bu hedefe dair heyecanını kaybetmemiştir. Türkiye Ar-Ge yatırımlarını son yıllarda arttırmıştır ve Ar-Ge harcamalarını GSMH'nin %3'üne çıkarma gayreti içerisinde¹⁵¹.

Ayrıca, teknoloji geliştirme ve standart çalışmaları bir ülkenin veya şirketin uluslararası arenada mevcudiyetinin göstergesidir. Dolaylı olarak ülke imajına ve ülke şirketlerine etkisi olacaktır. Türkiye gibi uluslararası roller üstlenmede başarılı bir ülkenin, teknolojinin yeni alanlarına güçlü katkılarda bulunması, dinamizminin iyi bir göstergesi olacaktır¹⁵².

149 Heterogeneity Inclusion and Mobility Adaptation through Locator ID Separation

150 Mobile-Oriented Future Internet

151 Misone, Türkiye'nin 5G Vizyonu. *misone.com.tr* (2015).

152 Ibid.

Türkiye 5G ve ötesinde etkili olabilir mi?

5G'de küresel oyuncu olabilmek için, mevcut teknoloji döngüsünün Türkiye'ye bir fırsat sunduğunu söylemek mümkündür. Küresel ekonomi, neredeyse, tüm oyuncularıyla beraber, haberleşme teknolojisi anlamında önemli bir dönüm noktasına ilerlemektedir. Devletlerin, teknoloji yarışına bilfiil girerek günümüzde orkestrasyon rolünü üstlendiği görülmektedir. Pazardaki her büyük sorunun çözümü için çekinmeden sahaya inmektedirler. Bu nedenle, bu yarışta devlet desteği önemlidir.

Diğer yandan, telekomünikasyon endüstrisinin mevcut yapısında, özellikle standart geliştirme ve Ar-Ge çalışmalarında, rakip olmak kavramını bir kenara bırakarak stratejik iş birliklerine gitmek zaruri hâle gelmiştir. Stratejik iş birlikleri ve ilk turlardaki mütevazı başarılar, gelecek turlarda liderliğe etkili şekilde zemin oluşturmaktadır. Ülkemiz, bu yarışta, AB, ABD, Kore, Çin ve Japonya gibi gelişmiş ve teknolojiye ileri ülkelerin yanında hızlı ve çevik bir yapı tesis ederse yer alabilir. Bu vizyonda Türk Telekom farkındalığın artırılması ve ülkesel organizasyon yeteneğinin artması için çalışmaktadır.



Yararlanılan Kaynaklar

- 3GPP. NR first specs & 5G system progress in Release 15, *3gpp.org* (2017)
- 3GPP. Standardization of NB-IoT Completed, *3gpp.org* (2016)
- 5GPPP. Towards 5G: European Approach. *5GPPP, Whitepaper* (2014).
- 5GPP. 5G Trials Roadmap. *5g-ppp.eu*.
- 5GPPP. View on 5G Architecture (Version 2.0). *5G PPP Architecture Working Group* (2017).
- ABI Research. Consumer Drone Shipments to Exceed 90 Million Units and Generate \$4.6 Billion in Revenue by 2025. *ABI Research Press* (19 Ocak 2016)
- Access, R., Aspects, L., Interface, R. & Aspects, P. 3GPP 5G Study completed by RAN. *3GPP Tech. Rep.* 803–805 (2017).
- Aguiar, R. L., Bedo, J. S., Evans, B., Galis, A. & Karl, H. White Paper for Research Beyond 5G. *Network-Id2020, Whitepaper* (2015).
- Akyildiz, I. F., Nie, S., Lin, S. C. & Chandrasekaran, M. 5G Roadmap: 10 Key Enabling Technologies. *Comput. Networks* (2016).
- Al-Falahy, N. & Alani, O. Y. Technologies for 5G Networks: Challenges and Opportunities. *IT Prof.* 19, (2017).
- Allevin, M. AT&T debuts 5G channel sounder 'Porcupine' with NI. *FierceWireless.com* (12 Nisan 2017).
- Anritsu. Ten 5G Challenges for Engineers to Overcome. *anritsu.com* (2016).
- Arıkan, E. On the Origin of Polar Coding, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 34, No. 2, 209-223 (Şubat 2016).
- Avanti Communications. 5G: Building the European Digital Society Spectrum-Related Aspects For Economically Viable Rollout Of 5G Services. *qed.eu* (2017).
- Bass, M., Berg, M. and Dhingra, V. Drivers and path to 5G. *Bell Labs Consulting* (2017).
- Belcher, S. The Future of Connectivity in Transportation From 5.9 GHz to 5G. *TIA Work.* (2016).
- Bienaimé, J.-P. 5G roadmap for mobile broadband and beyond. *2nd Glob. 5G Event* (2016).
- Bureau, C. R. & Regulation, R. Consideration on spectrum for 5G. *2nd Glob. 5G Event* (2016).
- Casaccia, L., President, V. & Standards, T. 5G: Advanced Tech as a Platform for Innovators. *Glob. 5G Event* (2016).
- Cisco. 802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi. *cisco.com* (2014).
- Center for Climate and Energy Solutions. Global Emissions. *c2es.org*
- Commission, E. 5G Infrastructure PPP : The next generation of communication networks will be 'Made in EU'. *Eur. Digit. Agenda* (2013).
- Communications, M. of I. A. and. Japan's Radio Policies Towards 5G. *2nd Glob. 5G Event* (2016).
- Daily Sabah, *Türk Telekom carries Turkey to a future where cities get smart* (2017).
- ECC. The way forward for 5G in Europe. *ECC Newsletter* (2016).
- Ergen, M., Girişimci Kapital: Silikon Vadisi Tarihi ve Startup Ekonomisi. *girisimcikapital.com* (2017).
- Ergen, M. 5G ve AB Manifestosu ve Aksiyon Planı. *Ict Media* (2016).
- Ergen, M. 5G ve Açık Kaynak. *Ict Media* (2016).
- Ericsson. Ericsson 5G field trial gear achieves peak downlink throughput over 25 Gbps with MU-MIMO. *Ericsson, Press Release* (2016).
- Ericsson AB. 5G Security. *Ericsson AB* (2015).
- Ericsson. 5G : What is it ? *Ericsson, Whitepaper* (2014).
- European Commission: Reflection Paper on the Future of EU Finances. *ec.europa.eu* (2017).
- European Commission. 5GAP: 5G Action Plan for Europe. *European Commission* (2016).
- European Commission. Why the EU is Betting Big on 5G. *Research EU Focus Magazine, No15.* (2015).
- European Commission. Commission calls for immediate action for a European Industrial Renaissance. *European Commission, Press Release* (22 Ocak 2014).

- European Parliament. Industry 4.0 Digitalisation for productivity and growth. *European Parliament, Briefing* (2015)
- Färjh, J. The Road to 5G Industry and Ecosystem. *Ericsson* (2013).
- Fengyi, Y. 5G for Verticals in the New Economy. *China Telecom* (2016).
- Fleming, P. 5G Research at Nokia Networks. *5G Day MIT Wireless Center* (2015).
- Flore, D. LTE evolution and 5G. *3GPP* (2016).
- Frumusanu, A. 3GPP Completes First 5G NR Specification for Release 15. *Anandtech.com* (2017).
- GSMA, Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile. *GSMA Intell. Underst. 5G* (2014).
- Huawei. 5G Unlocks a World of Opportunities. *Huawei, Whitepaper* (2017).
- Huawei Technologies Co. 5G Security: Forward Thinking, *Huawei, Whitepaper* (2015).
- Huawei. 5G : A Technology Vision. *Huawei, Whitepaper* 1–16 (2014).
- I, C.-L. Towards Flexible Network and AI. *2nd Global 5G Summit* (2016).
- Industry High Level Group. 5G Manifesto for timely deployment of 5G in Europe. *Submitted to the European Commission* (2016).
- ITU, ICT Facts and Figures. *itu.int* (2017).
- ITU: State of Broadband Report. *itu.int* (2016).
- Iwamura, M. 5G for Verticals in the New Economy. *Glob. 5G Event* (2016).
- Jones, D. T-Mobile Says Its 600MHz LTE Sites Will Be 5G-Ready. *Light Reading* (31 Ağustos 2017).
- KIM, K.-M. Considerations for 5G Spectrum Harmonization. *2nd Glob. 5G Event*, (2016).
- Kim, T. Smarter Network for 5G Era. *2nd 5G Glob. Event* (2016).
- Knapp, J. FCC Actions to Make Spectrum Available for 5G. *2nd Glob. 5G Event* (2016).
- Langtry, C. Towards Globally Harmonized Spectrum for 5G. *2nd Glob. 5G* (2016).
- Lee, J. Paving the way for 5G. *2nd Glob. 5G Event* (2016).
- López, D. R. Software Networks in the Transition to 5G. *Telefonica* (2017).
- Mademann, F. 3GPP's flexible 5G System Architecture. *Second Glob. 5G Event* (2016).
- Marek, S. 5G Trials and Tribulations: A Guide to Global 5G Operator Tests. *SDXcentral* (2016).
- Market Research Future. Wearable Technology Market Research Report- Forecast 2022. *Market Research Future, Report* (2018).
- Matsunaga, A. 5G System Architecture to realize 'Extreme Flexibility' End-to-End Quality in the 5G Era. *2nd Glob. 5G Event* (2016).
- Meyer, D. 5G spectrum at center of Straight Path settlement with FCC. *RCRWirelessNews* (2017).
- Misone, Türkiye'nin 5G Vizyonu. *misone.com.tr* (2015).
- Mohr, W. The 5G Infrastructure. *2nd Glob. 5G Event* (2016).
- Mueller, A. 5G for Vertical Industries – The BOSCH Perspective. *Bosch, Whitepaper* (2016).
- Nakamura, T. & Committee, T. Research Progress of the Fifth Generation Mobile Communications Promotion Forum – SIM2nd Glob. 5G Event (2016).
- Nakamura, Y. Japan's 5G Policy Perspectives. *2nd Glob. 5G Event* (2016).
- Pan European Networks. The Future of IoT. *paneuropennetworks.com* (2017).
- Park, Y. Ecosystems Promotion in Korea. *5G Forum* (2016).
- PG, I.-2020 (5G). Activities of IMT-2020 (5G) Promotion Group. *2nd Glob. 5G Event 2020* (2016).
- Qualcomm Incorporated. LTE in Unlicensed Spectrum : Harmonious Coexistence with Wi-Fi. *Qualcomm* (2014).
- Reuters, U.S. smart grid to cost billions, save trillions (2011).
- RF Wireless World. OFDM vs FBMC-Similarity and difference between OFDM and FBMC modulation. *rfwireless-world.com*

- Satoh, K. Overview of 5GMF Current Activities. *2nd Glob. 5G Event* (2016).
- Shimizu, T. Network Softwarization, NFV and 5G. ppt. *2nd Glob. 5G Event* (2016).
- SIMalliance. An analysis of the security needs of the 5G market. *SIMalliance, Whitepaper* (2016).
- Small Cell Forum. Small cell siting challenges. *Small Cell Forum, Whitepaper* (2017).
- Smulders, P.F.M. 60 GHz radio: prospects and future directions. *Proceedings Symposium IEEE Benelux Chapter on Communications and Vehicular Technology* (2003).
- Son, H.J. and Yoo, C. Analysis of Global 5G Development (1) - 5G Standardization so far. *Netmanias* (2017).
- Sonal Ghelani & Skinner, C. Practical 5G: What is it good for? *TechXLR8* (2017).
- Tong, W. Jointly Build the Bridge to 5G. *Huawei, Whitepaper* (2016).
- Transparency Market Research (TMR), Digital Health Market (Product - Health Care Information Systems and Wearable Devices; Component - Hardware, Software, and Services; End User - B2C and B2B) - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast, 2017 – 2025 *Transparency Market Research, Report* (2017).
- United Nations: Sustainable Development Goals. *un.org* (2015).
- Van Rijmenam, M. Self-driving Cars Will Create 2 Petabytes of Data, What are the Big Data Opportunities For The Car Industry? *Datafloq.com* (2016).
- Verizon. SDN-NFV Reference Architecture. *Verizon* (2016).
- Visiongain, Automotive Vehicle To Everything (V2X) Communications Market 2016-2026, *Visiongain, Report* (2016).
- Watson, B. From Light to Bright: San Diego is Building the World's Largest Municipal Internet Of Things. *Ge.com* (2017)
- Wessel, J. Towards globally harmonized spectrum for 5G. *Radio Spectrum Policy Group (RSPG)* (2016).
- World Economic Forum: Internet for All Report. *weforum.org*, (2016).
- World Economic Forum. Internet for All - A Framework for Accelerating Internet Access and Adoption. *World Economic Forum, Whitepaper* (2016).
- Yallapragada, R. 5G for Verticals in the New Economy. *2nd Glob. 5G Event* (2016).
- Youngnam, H. A. N. 5G Forum: Status Quo. *2nd Glob. 5G Event* (2016).
- Ziegler, V. Architectural Leadership for the 5G Era. *Nokia, Whitepaper* 1–7 (2016).
- ZTE. 5G Software Network Framework & Prototype. *zte.com* (2016).

