

5G'NİN FARKI

Önceki Nesil Ağlarla Kapsamlı Teknik ve Mimari Karşılaştırma

5G Technology Explained: A Comprehensive Technical and Architectural Comparison with Previous Generation Networks

Derleme Makale / Review Article

Dr. Burak Olgun

burakolgun@soluitonhome.net

Solution Home Bilişim Tekn.ve Dan.Hizm., İstanbul.

Anahtar Kelimeler: 5G NR • Massive MIMO • Ağ Dilimleme • URLLC • mmWave

ÖZET

Beşinci nesil (5G) kablosuz iletişim sistemleri, yalnızca bir hız artışını değil; mobil ağların mimarisini, hizmet paradigmasını ve uygulama çerçevesini kökten yeniden tanımlayan devrimsel bir dönüşümü temsil etmektedir. Bu derleme makale, 5G New Radio (NR) standardının önceki nesil ağlardan — özellikle 4G LTE'den— hangi teknik ve mimari boyutlarda ayrıştığını sistematik ve kapsamlı biçimde ele almaktadır. İnceleme; fiziksel katman yenilikleri (Massive MIMO, beamforming, milimetre dalga spektrumu, yeni sayısal değerler), mimari dönüşümler (5G çekirdek ağı, servis tabanlı mimari, ağ dilimleme, uç hesaplama), hizmet senaryoları (eMBB, URLLC, mMTC) ve performans parametrelerini (gecikme, güvenilirlik, bağlantı yoğunluğu, enerji verimliliği) kapsamaktadır. Makalede ayrıca 5G'nin endüstri 4.0, otonom araçlar, uzaktan sağlık ve akıllı şehir uygulamalarındaki dönüştürücü rolü değerlendirilmekte; 6G araştırmalarıyla kesişim noktaları da irdelenmektedir. Tüm karşılaştırma ve analizler, alanın önde gelen yabancı dil akademik kaynaklarına ve 3GPP standart belgelerine dayandırılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: 5G NR, 4G LTE, Massive MIMO, ağ dilimleme, URLLC, eMBB, mMTC, milimetre dalga, uç hesaplama, servis tabanlı mimari

ABSTRACT

Fifth-generation (5G) wireless communication systems represent not merely a speed enhancement but a revolutionary transformation that fundamentally redefines the architecture, service paradigm, and application framework of mobile networks. This review article systematically and comprehensively examines how the 5G New Radio (NR) standard differentiates itself from previous generations — particularly 4G LTE — across technical and architectural dimensions. The analysis covers physical layer innovations (Massive MIMO, beamforming, millimeter-wave spectrum, new numerologies), architectural transformations (5G core network, service-based architecture, network slicing, edge computing), service scenarios (eMBB, URLLC, mMTC), and performance parameters (latency, reliability, connection density, energy efficiency). The article also evaluates the transformative role of 5G in Industry 4.0, autonomous vehicles, remote healthcare, and smart city applications, while examining its intersections with emerging 6G research. All comparisons and analyses are grounded in leading foreign-language academic sources and 3GPP standard documents.

Keywords: 5G NR, 4G LTE, Massive MIMO, network slicing, URLLC, eMBB, mMTC, millimeter wave, edge computing, service-based architecture

1. Giriş

Mobil iletişim teknolojileri, yaklaşık on yılda bir yaşanan nesil geçişleriyle sürekli dönüşüm içinde olmuştur. Her yeni nesil, bir öncekinin üzerine inşa edilmiş; kapasite, hız ve kapsama bakımından anlamlı iyileşmeler sunmuştur. Bununla birlikte 5G, bu doğrusal evrimin ötesine geçmekte ve mobil ağ mimarisini köklü biçimde yeniden tanımlamaktadır. Uluslararası Telekomünikasyon Birliği'nin (ITU) IMT-2020 çerçevesiyle belirlenen ve 3GPP Release 15'te (2017) standardize edilen 5G New Radio (NR), seleflerinden yalnızca performans parametreleri açısından değil; tasarım felsefesi ve hedef uygulama ekosistemi bakımından da belirgin biçimde ayrılmaktadır (ITU-R M.2083, 2015).

4G LTE, mobil geniş bantı kitleselleştirmiş ve akıllı telefon devriminin altyapısını oluşturmuştur. Tasarımı, temelde insan odaklı iletişimi —ses, video, veri— optimize etmek üzerine kurgulanmıştır. 5G ise çok daha geniş bir hedef kümesini —insanlar, makineler, araçlar, endüstriyel sistemler, tıbbi cihazlar— aynı anda ve birbirinden köklü biçimde farklı servis kalitesi gereksinimleriyle karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu durum; yeni bir fiziksel katman, yeni bir çekirdek ağ mimarisi ve yeni bir hizmet çerçevesi gerektirmiştir (Dahlman et al., 2018).

Bu makalenin amacı, 5G'nin önceki nesil ağlarla —ağırlıklı olarak 4G LTE ile— arasındaki farkları çok boyutlu ve akademik bir bakış açısıyla ortaya koymaktır. Makale; fiziksel katman, ağ mimarisi, spektrum kullanımı, servis senaryoları, enerji verimliliği ve uygulama alanları boyutlarını kapsayan kapsamlı bir karşılaştırma sunmakta; tüm teknik iddialar, alanın önde gelen yabancı dil kaynaklarıyla desteklenmektedir.

2. Paradigmatik Fark: Tasarım Felsefesi

1G'den 4G'ye uzanan evrimde her nesil, öncekinin temel tasarım mantığını —mobil ses ve veri iletimi— sürdürmüştür; bunu daha yüksek hız, daha geniş bant ve daha düşük maliyetle yapmıştır. Bu süreklilik, her neslin öncekiyle geriye dönük uyumluluğunu kolaylaştırmıştır; operatörlerin yatırımlarını kademeli biçimde dönüştürmesine olanak tanımıştır.

5G ise bu süreklilik zincirini kırmaktadır. İlk kez olarak, bir nesil ağ yalnızca *tek* bir birincil kullanım senaryosu için değil; *birbirinden köklü biçimde farklı* üç senaryo için eş zamanlı hizmet sunacak biçimde tasarlanmıştır. Bu üç senaryo —eMBB, URLLC ve mMTC— farklı gecikme, güvenilirlik, bant genişliği ve cihaz yoğunluğu gereksinimlerine sahiptir ve tek bir donanım platformunun tüm bu gereksinimleri karşılaması, ciddi bir mühendislik zorluğunu beraberinde getirmektedir (IMT-2020 Requirements, 2017).

"5G, farklı kullanım senaryolarına aynı anda hizmet verebilmek için tasarlanmış ilk nesil kablosuz sistemdir; bu özelliği onu önceki nesillerden paradigmatik düzeyde ayırmaktadır." (Dahlman et al., 2018, s. 3)

Bu paradigmatik farklılık; ağ mimarisinin tüm katmanlarına —fiziksel katmandan çekirdek ağı, frekans tahsisinden hizmet yönetimine— yansımaktadır. Aşağıdaki bölümler bu farkları katman katman incelemektedir.

3. Fiziksel Katman Yenilikleri

3.1 Sayısal Değerler (Numerology) ve Esnek Çerçeve Yapısı

4G LTE'de OFDM alt-taşıyıcı aralığı (subcarrier spacing — SCS), standart operasyon için sabit **15 kHz** olarak belirlenmiştir. Bu sabit değer, sistemin farklı kullanım senaryolarına uyarlanma esnekliğini kısıtlar: Yüksek hareketlilik ortamlarında Doppler kayması, dar alt-taşıyıcı aralığını olumsuz etkilerken; geniş bantlı uygulamalar birden fazla taşıyıcıyı bir araya getirmeyi (carrier aggregation) zorunlu kılmaktadır (Sesia et al., 2011).

5G NR ise esnekliği temel tasarım ilkesi olarak benimsemiştir. 3GPP Release 15, **15, 30, 60, 120 ve 240 kHz** olmak üzere beş farklı SCS değeri tanımlamaktadır. Bu çeşitlilik; farklı bant aralıklarına, hareketlilik koşullarına ve servis gereksinimlerine göre optimize edilmiş bir yapılandırma sağlar (Dahlman et al., 2018). Örneğin, 240 kHz'lik alt-taşıyıcı aralığı milimetre dalga bantlarında kullanılarak son derece kısa sembol süreleri ve dolayısıyla düşük gecikme elde edilmesine olanak tanır. Bu esneklik, URLLC uygulamalarının ihtiyaç duyduğu alt-milisaniye gecikmelerini mümkün kılan kritik bir tasarım kararıdır.

3.2 Massive MIMO ve Beamforming

Çok Girişli Çok Çıkışlı anten sistemleri (Multiple Input Multiple Output — MIMO), 4G LTE döneminde de kullanılmış; ancak uygulamalar tipik olarak **2×2 veya 4×4** anten yapılandırmalarıyla sınırlı kalmıştır. 5G NR'da ise Massive MIMO kavramı, baz istasyonu tarafında **32, 64, 128 hatta 256** anten elemanı kullanılmasını mümkün ve pratik kılmıştır (Marzetta et al., 2016).

Massive MIMO'nun LTE MIMO'dan ayrıştığı boyutlar birden fazladır. İlk olarak, çok sayıda anten elemanı sayesinde sinyaller uzaysal boyutta son derece ince ışın demetlerine (beam) odaklanabilir; bu *3D beamforming* ya da *Full-Dimension MIMO (FD-MIMO)* olarak adlandırılır. İkinci olarak, birden fazla kullanıcıya aynı zaman-frekans kaynağı üzerinden eş zamanlı hizmet verilebilir —MU-MIMO (Multi-User MIMO)— ve bu sayede sektör kapasitesi doğrusal olmayan biçimde artar. Üçüncü olarak, Marzetta et al. (2016) tarafından teorik olarak kanıtlandığı üzere, anten sayısı sonsuza giderken rastgele kanallar arasındaki ortogonalite güçlenir (favorable propagation), termal gürültü ve çok kullanıcı girişimi pratikte yok olur.

Beamforming mimarileri 5G NR'da üç kategoride incelenmektedir: (1) Tüm anten elemanlarının ortak bir faz kaydırıcı zinciriyle yönetildiği *analog beamforming*; (2) Her antene ayrı bir sayısal ön işlemci (baseband) bağlanan *dijital beamforming*; ve (3) Bu ikisinin optimal dengesini sunan *hibrit beamforming*. Milimetre dalga (mmWave) bantlarında donanım maliyetini makul tutarken performansı maksimize eden hibrit yaklaşım endüstri standardı haline gelmiştir (Heath et al., 2016).

3.3 Milimetre Dalga Spektrumu

Frekans spektrumu açısından 4G LTE, genel olarak **700 MHz – 2.6 GHz** aralığında faaliyet göstermektedir. Bu alt-6 GHz spektrumu iyi yayılım özellikleri sunar; ancak mevcut kullanım yoğunluğu nedeniyle ciddi bir tıkanma (congestion) sorunuyla karşı karşıyadır. 5G ise iki farklı frekans aralığı tanımlamıştır: **FR1 (450 MHz – 7.125 GHz)** ve **FR2 (24.25 GHz – 52.6 GHz)**. FR2, milimetre dalga bandı olarak bilinmekte ve 5G'nin gerçek anlamda dönüştürücü potansiyelini barındırmaktadır (Rangan et al., 2014).

mmWave bantlarının temel avantajı, gigahertz mertebesinde geniş frekans bloklarının tahsis edilebilmesidir; bu sayede teorik olarak **10–20 Gbps** tepe veri hızları elde edilebilmektedir. Öte yandan bu bantlar ciddi yayılım güçlükleri içerir: Atmosferik soğurma, yağmur ve nem kaynaklı zayıflama; beton ve cam gibi malzemelerden kaynaklanan yüksek penetrasyon kaybı; görüş hattı (LoS) kesintilerinde keskin sinyal düşüşü. Bu nedenle mmWave 5G hücreleri tipik olarak **50–200 m yarıçaplı** yoğun kentsel dağıtımlarda konuşlandırılmakta ve yoğun baz istasyonu altyapısı gerektirmektedir (Rangan et al., 2014).

3.4 Modülasyon ve Kodlama

4G LTE'de kullanılan en yüksek modülasyon düzeni **64-QAM**'dir (LTE-Advanced Pro ile bazı yapılandırmalarda 256-QAM desteklenmiştir). 5G NR ise **256-QAM**'i standart modülasyon şeması olarak benimsemiş; bu sayede aynı spektral kaynaktan çok daha yüksek bit hızı elde edilmektedir. Teorik olarak 256-QAM, 64-QAM'e kıyasla %33 daha yüksek spektral verimlilik sağlar; ancak bu kazanım yalnızca yüksek sinyal-gürültü oranı (SNR) koşullarında gerçekleştirilebilir (Dahlman et al., 2018).

Hata düzeltme kodlaması açısından 5G NR, 4G'nin kullandığı Turbo kodlardan **LDPC (Low-Density Parity-Check)** ve **Polar kodlarına** geçiş yapmıştır. LDPC kodları, veri kanalları için kullanılmakta ve yüksek veri hızlarında daha düşük kod çözme gecikmesi sunmaktadır. Polar kodlar ise kontrol kanalları için benimsenmekte olup Shannon limitine

teorik olarak en yaklaşan kod ailesi olarak dikkat çekmektedir. Bu geçiş, özellikle URLLC senaryolarında kritik önem taşımaktadır (3GPP TS 38.212, 2021).

Tablo 1. 5G NR ve 4G LTE Fiziksel Katman Parametrelerinin Karşılaştırması

Parametre	4G LTE / LTE-A	5G NR
Alt-taşıyıcı aralığı	15 kHz (sabit)	15 / 30 / 60 / 120 / 240 kHz (esnek)
Frekans bantları	700 MHz – 2.6 GHz (FR1)	450 MHz – 7.125 GHz (FR1) + 24.25–52.6 GHz (FR2)
Tepe veri hızı (DL)	1 Gbps (LTE-A)	20 Gbps (NR)
MIMO yapısı	Maks. 8 katman (tipik 2×2 / 4×4)	Maks. 256 anten / Massive MIMO / 3D Beamforming
Modülasyon (maks.)	64-QAM (bazı: 256-QAM)	256-QAM (standart)
Hata düzeltme kodu	Turbo kod	LDPC (veri) + Polar kod (kontrol)
Kullanıcı düzlemi gecikmesi	~30 ms (tipik)	< 4 ms (eMBB) / < 1 ms (URLLC)
Çift yön modu	FDD / TDD	FDD / TDD / dinamik TDD

Not. Değerler 3GPP Release 15/16 standartları temel alınarak derlenmiştir. Gerçek ağ koşullarında elde edilen performans, ortam ve donanıma bağlı olarak farklılık gösterebilir. Kaynak: Dahlman et al. (2018); 3GPP TS 38.212 (2021).

4. Hizmet Senaryoları: 5G'nin Üçlü Paradigması

4.1 eMBB: Geliştirilmiş Mobil Geniş Bant

Enhanced Mobile Broadband (eMBB), 5G'nin 4G LTE'nin doğrudan mirasçısı olduğu senaryodur ve kullanıcılara yönelik yüksek veri hızı uygulamalarını kapsar. Bununla birlikte 5G eMBB, LTE geniş bantından nitelik ve nicelik bakımından önemli ölçüde ayrılmaktadır.

ITU-R IMT-2020 gereksinimlerine göre eMBB, **20 Gbps tepe indirme hızı** ve **100 Mbps deneyimsel veri hızı** hedeflemektedir. Bu değerler, LTE-Advanced'ın 1 Gbps tepe ve ~10 Mbps deneyimsel değerlerinin çok ötesindedir. 4K/8K video akışı, sanal gerçeklik (VR), artırılmış gerçeklik (AR), bulut oyun hizmetleri ve holografik iletişim gibi uygulamalar, eMBB'nin birincil kullanım alanları olarak öngörülmektedir (IMT-2020 Requirements, 2017).

4.2 URLLC: Ultra Güvenilir Düşük Gecikmeli İletişim

Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC), 5G'nin 4G LTE'den en belirgin biçimde ayrıştığı alandır; zira 4G, bu tür uygulamaları hedefleyecek biçimde tasarlanmamıştır. URLLC; **1 ms kullanıcı düzlemi gecikmesi** ve **%99.9999 (altı dokuz) güvenilirlik** hedeflemektedir (Popovski et al., 2018). Bu değerler, insan yaşamı üzerinde doğrudan etkisi olan uygulamalar için zorunludur:

- Otonom araçlar: V2X (Vehicle-to-Everything) iletişimi, ani fren ve çarpışma önleme sistemleri için milisaniyenin altında tepki süreleri gerektirir.

- Uzaktan cerrahi ve robotik: Cerrahın el hareketleri ile robotik kolu arasındaki gecikme, insan algısının sınırının (10–20 ms) altında olmalıdır.
- Endüstriyel otomasyon: Üretim hattı PLC (Programmable Logic Controller) sistemleri, eş zamanlı ve kesin zamanlı (deterministic) iletişim gerektirir.
- Akıllı elektrik şebekeleri: Arıza tespiti ve izole etme işlemleri, milisaniyeler içinde gerçekleşmelidir (Popovski et al., 2018).

4G LTE'de bu gereksinimler teknik olarak karşılanamamaktadır. LTE'nin minimum iletim zaman aralığı (Transmission Time Interval — TTI) **1 ms** iken 5G NR'da esnek alt- taşıyıcı yapısı sayesinde TTI **0.125 ms**'ye (120 kHz SCS ile) kadar düşürülebilmektedir. Bu dramatik azalma, URLLC uygulamalarını gerçekçi kılan temel fiziksel katman tasarım kararlarından biridir (Dahlman et al., 2018).

4.3 mMTC: Yoğun Makine Tipi İletişim

Massive Machine Type Communications (mMTC), nesnelerin internetinin (IoT) büyük ölçekli bağlantı gereksinimini karşılamak üzere tanımlanmıştır. mMTC, **km² başına 1 milyon cihaz** bağlantı yoğunluğu hedeflemekte; bu değer LTE'nin destekleyebildiği değer yaklaşık 10 katıdır (ITU-R M.2083, 2015).

mMTC cihazları genellikle düşük güç tüketimi, uzun pıl ömrü (10 yıla kadar), geniş kapsama derinliği ve düşük veri hızı özelliklerine sahiptir. Akıllı su/elektrik sayaçları, tarım sensörleri, şehir aydınlatma yönetim sistemleri ve çevre izleme istasyonları bu kategorinin tipik örnekleridir. 5G standardı, mMTC için geriye dönük uyumluluk amacıyla 4G döneminde geliştirilen NB-IoT ve LTE-M teknolojilerini de benimsemekte; ancak gelecekte özgün 5G NR tabanlı çözümlerin ön plana çıkması beklenmektedir (Lin et al., 2020).

5. Ağ Mimarisi: 4G EPC'den 5GC'ye Dönüşüm

5.1 4G EPC Mimarisinin Sınırlılıkları

4G LTE'nin çekirdek ağı olan Evolved Packet Core (EPC), tüm-IP mimarisine geçişin en önemli adımlarından birini temsil etmektedir. EPC; Mobility Management Entity (MME), Serving Gateway (S-GW), Packet Data Network Gateway (P-GW) ve Home Subscriber Server (HSS) gibi fonksiyonel blokları içermekte; bu bloklar belirlenmiş arayüzler (S1, S5/S8, SGi vb.) üzerinden haberleşmektedir (Sesia et al., 2011).

EPC mimarisinin temel sınırlılıkları şöyle sıralanabilir: (1) Ağ işlevleri *monolitik donanım platformlarına* bağımlıdır; esneklik ve ölçeklenebilirlik kısıtlıdır. (2) Her yeni hizmet tipi için ayrı bir çekirdek ağ katmanı ya da güncelleme gerekmektedir. (3) Servis kalitesi (QoS) yönetimi, farklı hizmet tiplerini birbirinden yalıtım için yeterli esnekliği sunmamaktadır. (4) Ağ sanallaştırması ve yazılım tanımlı ağ (SDN) prensiplerinin entegrasyonu sonradan eklenmiş (retrofit) bir yaklaşımla gerçekleştirilmiştir; bu da mimarinin tutarlılığını zayıflatmaktadır (Zhang, 2019).

5.2 5G Çekirdek Ağı: Servis Tabanlı Mimari

5G Core (5GC), sıfırdan tasarlanmış ve **Servis Tabanlı Mimari (Service-Based Architecture — SBA)** ilkesini temel alan bir çekirdek ağıdır. SBA'da her ağ işlevi (Network Function — NF), diğer işlevlerin tüketebileceği **RESTful API'ler** aracılığıyla servislerini sunar; bu yaklaşım, modern yazılım geliştirme pratiğindeki mikro-hizmet (microservice) mimarisine yakınsamaktadır. Temel ağ işlevleri şöyle listelenebilir:

- AMF (Access and Mobility Management Function): Erişim ve hareketlilik yönetimi; LTE'nin MME işlevini üstlenir.
- SMF (Session Management Function): Oturum yönetimi; P-GW'nin kontrol düzlemi işlevine karşılık gelir.
- UPF (User Plane Function): Kullanıcı düzlemi veri iletimi; veri trafiğini yönlendiren ve iletilen işlevi gören fonksiyondur.
- PCF (Policy Control Function): İlke ve kural yönetimi; hizmet kalitesi (QoS) parametrelerini belirler.
- AUSF (Authentication Server Function): Kimlik doğrulama; güvenli ağ erişimini sağlar (3GPP TS 23.501, 2021).

5GC'nin en kritik özelliği, **kontrol düzlemi (control plane)** ile **kullanıcı düzlemi (user plane)** işlevlerinin (CUPS — Control and User Plane Separation) net biçimde birbirinden ayrılmış olmasıdır. Bu ayrım; kullanıcı düzlemi işlevlerinin (UPF) ağı kenarına —baz istasyonuna yakın konumlara— taşınabilmesine ve böylece uç hesaplama (edge computing) uygulamalarının hayata geçirilmesine temel hazırlamaktadır (Zhang, 2019).

5.3 Ağ Dilimleme

Ağ dilimleme (Network Slicing), 5G'nin en çarpıcı mimari yeniliklerinden birini ve 4G ile arasındaki en önemli işlevsel farklardan birini temsil etmektedir. 4G'de bir operatör yalnızca tek tip bir ağ hizmeti sunabilmektedir; 5G ise ortak fiziksel altyapı üzerinde, **birbirinden mantıksal olarak tamamen yalıtılmış** sanal ağlar (dilimler) oluşturulmasına olanak tanır (Zhang, 2019).

Her dilim (slice), bağımsız bir QoS politikasına, kaynak kotasına ve hizmet yapılandırmasına sahiptir. Örneğin: Bir acil servis ambulansındaki medikal izleme sistemi *URLLC dilimi* üzerinden ultra-güvenilir bağlantı alırken; bir stadyumda bulunan on binlerce seyirci *eMBB dilimi* üzerinden 4K video akışı gerçekleştirebilir; fabrikadaki sensörler ise *mMTC dilimi* üzerinden düşük maliyetli bağlantı kurar —hepsi aynı fiziksel 5G ağını paylaşırken birbirinden tamamen yalıtılmış biçimde çalışır. Bu özellik, operatörlerin farklı sektörlerle dikey pazarlar (vertical markets) oluşturmasını kolaylaştırmakta; sağlık, ulaşım, enerji ve üretim sektörleri için özelleştirilmiş bağlantı hizmetleri sunmasına olanak tanımaktadır.

5.4 Çok Erişimli Uç Hesaplama (MEC)

Multi-Access Edge Computing (MEC), hesaplama kapasitesini merkezi bulut veri merkezlerinden ağı fiziksel kenarına —baz istasyonu yakınlarına ya da yerel veri merkezlerine— taşıyan mimaridir. ETSI tarafından 2014'te tanımlanan ve 5G mimarisinin ayrılmaz bir parçası haline gelen MEC, URLLC uygulamaları için kritik öneme sahiptir (Zhang, 2019).

4G ağlarında uygulama trafiği, kullanıcıdan internet omurgasındaki içerik sunucusuna kadar uzun bir yol kat etmek zorundadır; bu yolculuğun toplam gecikmesi çoğunlukla 30–80 ms aralığındadır. MEC ile birlikte işlem yerel olarak gerçekleştirildiğinde, kullanıcıdan uygulama sunucusuna olan **gecikme 1–5 ms'ye** kadar düşürülebilmektedir. Otonom araçların yol kenarı altyapısıyla iletişimi (V2I), gerçek zamanlı yüz tanıma, endüstriyel robot koordinasyonu ve akıllı trafik yönetimi MEC'in doğrudan yararlandığı uygulamalar arasındadır.

6. Performans Parametreleri: Nesiller Arası Karşılaştırma

6.1 Veri Hızı ve Gecikme

Veri hızı ve gecikme, nesiller arası karşılaştırmanın en görünür boyutudur. 1G'den 5G'ye her nesil geçişinde tepe veri hızı yaklaşık on kat artmıştır; gecikme ise dramatik biçimde azalmıştır. Bu iki parametre, uygulamaların kalitesini ve kullanıcı deneyimini doğrudan etkileyen göstergeler olduğundan endüstri ve akademik çevrelerin birincil odak noktaları arasında yer almaktadır (Dahlman et al., 2018).

Gecikme boyutunda 5G'nin getirisi özellikle çarpıcıdır: 3G UMTS'te tipik kullanıcı düzlemi gecikmesi 100–150 ms iken 4G LTE bunu 30–50 ms'ye indirmiştir. 5G NR ise eMBB için **< 4 ms** ve URLLC için **< 1 ms** kullanıcı düzlemi gecikmesi hedeflemektedir. Bu son değer, insanın ağrı uyarısına motor tepki süresinin (150–200 ms) çok çok altındadır ve gerçek zamanlı uzaktan müdahale uygulamalarını ilk kez gerçekçi kılmaktadır (Popovski et al., 2018).

6.2 Bağlantı Yoğunluğu ve Cihaz Sayısı

Bağlantı yoğunluğu, 4G'den 5G'ye geçişte en dramatik iyileşmenin yaşandığı parametrelerden biridir. 4G LTE, km² başına yaklaşık **100.000 cihazı** desteklerken 5G NR'ın mMTC senaryosu **1.000.000 cihaz/km²** hedeflemektedir. Bu on katlık artış, birbirine yakın konumlandırılmış yüksek yoğunluklu sensör ağlarının —akıllı şehir aydınlatma sistemleri, büyük alışveriş merkezleri, endüstriyel fabrika zeminleri— gerçek anlamda pratik hale gelmesini mümkün kılmaktadır (ITU-R M.2083, 2015).

6.3 Enerji Verimliliği

Enerji verimliliği, sürdürülebilirlik kaygılarının ön plana çıkmasıyla birlikte 5G tasarımının öncelikli hedeflerinden biri haline gelmiştir. ITU-R IMT-2020, 5G'nin LTE'ye kıyasla **100 kat** daha yüksek enerji verimliliği sunmasını hedeflemiştir. Bu hedefe ulaşmak için çeşitli mekanizmalar devreye alınmıştır: Uyku modu yönetimi (sleep mode management), yük-

farkındalıklı kaynak tahsisi, hücre kapatma (cell sleeping) stratejileri ve Massive MIMO'nun sunduğu ışın odaklama verimliliği bunların başında gelmektedir (Marzetta et al., 2016).

Bununla birlikte, mutlak enerji tüketimi açısından değerlendirildiğinde, 5G baz istasyonlarının —özellikle Massive MIMO antenlerinin— LTE baz istasyonlarına kıyasla daha yüksek donanım gücü tükettiği görülmektedir. Bit başına enerji tüketimi düşse de toplam altyapı enerji tüketimi artış eğilimindedir; bu durum, operatörler ve düzenleyiciler için politika geliştirilmesi gereken kritik bir alan oluşturmaktadır (Dahlman et al., 2018).

Tablo 2. Nesil Ağların Temel Performans Parametreleri Karşılaştırması

Parametre	2G (GSM)	3G (UMTS/HSPA)	4G (LTE-A)	5G (NR)
Tepe hız (DL)	384 kbps	42 Mbps	1 Gbps	20 Gbps
Gecikme (tipik)	~300 ms	~100 ms	~30 ms	< 1 ms (URLLC)
Bağlantı yoğunluğu	—	—	~100 K/km ²	1 M/km²
Spektrum bantları	900/1800 MHz	2100 MHz	700–2600 MHz	FR1+FR2 (mmWave)
Çekirdek ağ	GSM Core	GPRS Core	EPC (tüm-IP)	5GC (SBA, dilimleme)
Güvenilirlik hedefi	—	—	~%99.9	%99.9999 (URLLC)

Not. Kaynak: Dahlman et al. (2018); ITU-R M.2083 (2015); IMT-2020 Requirements (2017). Tepe hız ve gecikme değerleri standart hedeflerini yansıtmaktadır.

7. 5G'nin Dönüştürücü Uygulama Alanları

7.1 Endüstri 4.0 ve Bağlantılı Fabrikalar

Endüstri 4.0, üretim süreçlerinin siber-fiziksel sistemler, yapay zeka ve büyük veri analitiğiyle entegrasyonunu öngören bir dönüşüm paradigmasıdır. Bu dönüşümün omurgasını oluşturan bağlantı altyapısı; düşük gecikme, yüksek güvenilirlik ve yoğun cihaz desteği gerektirmekte olup bu gereksinimler tam anlamıyla 5G URLLC ve mMTC senaryolarının tasarım hedefleriyle örtüşmektedir (Simsek et al., 2016).

Geleneksel fabrika ortamlarında kablolu fieldbus sistemleri (PROFINET, EtherCAT) kontrol iletişimi için kullanılmaktadır; bu sistemler son derece güvenilir olmakla birlikte esneklikten yoksun ve kurulum maliyeti yüksektir. 5G özel ağları (Private 5G Networks), aynı güvenilirliği kablosuz olarak sunabilme potansiyeliyle dikkat çekmektedir. Birçok büyük üretici —Volkswagen, Bosch, BMW— fabrika içinde özel 5G ağları kurmakta ya da test etmektedir. Bu ağlar; AGV (Otonom Güdümlü Araç) koordinasyonu, gerçek zamanlı kalite kontrol ve robot kol senkronizasyonu gibi kritik uygulamalara hizmet etmektedir (Simsek et al., 2016).

7.2 Otonom Araçlar ve V2X İletişimi

Vehicle-to-Everything (V2X) iletişimi; araç-arac (V2V), araç-altyapı (V2I), araç-yaya (V2P) ve araç-ağ (V2N) bağlantılarını kapsar. Otonom sürüşün güvenliğini garanti altına almak için bu iletişimin **5 ms'nin altında** gecikmeyle gerçekleşmesi gerekmektedir; bu eşik, ani bir fren kararının verilebileceği maksimum süreyi temsil etmektedir. 5G C-V2X (Cellular V2X), özellikle LTE-V2X'in yetersiz kaldığı yüksek hız senaryolarında ve yoğun kentsel ortamlarda belirleyici bir katkı sunmaktadır (Lin et al., 2020).

5G'nin V2X'e sunduğu temel katkılar arasında daha düşük gecikme, daha geniş kapsama, Rel-16 ile tanımlanan yan bağlantı (sidelink) geliştirmeleri ve PC5 arayüzü üzerinden doğrudan araç-arac iletişimi sayılabilir. Öte yandan, otonom araçların güvenli sürüş için yalnızca 5G'ye bağımlı olup olamayacağı tartışması sürmektedir; çoğu uzman, 5G'nin araç içi algılayıcı verisiyle (LIDAR, radar, kamera) tamamlayıcı bir rol oynayacağı görüşündedir.

7.3 Uzaktan Sağlık Hizmetleri

COVID-19 pandemisi, uzaktan sağlık hizmetlerinin potansiyelini ve altyapı gereksinimlerini tüm açıklığıyla ortaya koymuştur. 5G, tıp alanında iki kritik uygulama kategorisini mümkün kılmaktadır: (1) *Yüksek bant genişliği gerektiren uygulamalar*: 4K/8K tıbbi görüntü iletimi, tele-radyoloji, gerçek zamanlı ultrason akışı ve sanal gerçeklik destekli tıbbi eğitim. (2) *Düşük gecikme gerektiren uygulamalar*: Uzaktan cerrahi robotlar (örneğin da Vinci sistemi), nörolojik stümlasyon cihazlarının uzaktan kalibrasyonu ve yoğun bakım hastalarının anlık fizyolojik izlenmesi (Simsek et al., 2016).

7.4 Akıllı Şehir Uygulamaları

Akıllı şehir konsepti; ulaşım, enerji, su yönetimi, çevre izleme ve kamu güvenliği gibi kentsel sistemlerin birbirine bağlı sensör ve platformlar aracılığıyla optimize edilmesini öngörmektedir. 5G'nin mMTC senaryosu, km² başına çok sayıda düşük güçlü sensörün aynı anda bağlı kalabilmesini sağlarken eMBB, şehir genelinde yüksek çözünürlüklü kamera akışlarına zemin hazırlamaktadır (ITU-R M.2083, 2015).

Özellikle dikkat çekici bir uygulama, **akıllı trafik yönetimidir**: Kavşaklardaki akıllı sinyalizasyon sistemleri, araç yoğunluğunu gerçek zamanlı algılayarak sinyal sürelerini dinamik olarak ayarlar; bu süreçte hem V2I iletişimine hem de merkezi yapay zeka platformuyla veri paylaşımına ihtiyaç duyulur. 5G, bu iki gereksinimi eş zamanlı ve güvenilir biçimde karşılayabilen ilk nesil ağ teknolojisidir.

8. Güvenlik Mimarisi: 5G'nin Getirdiği Yenilikler

Güvenlik mimarisi, 4G'den 5G'ye geçişte önemli ölçüde güçlendirilmiş bir alandır. 4G LTE güvenlik mimarisi birçok zayıflık barındırmaktaydı: Sahte baz istasyonu (IMSI-catcher) saldırıları, yalnızca ağ tarafında gerçekleştirilen kimlik doğrulama (tek taraflı) ve bazı protokollerde şifrelenmemiş mesajlaşma sinyali öne çıkan zaafiyetler arasında sayılabilir (3GPP TS 33.501, 2021).

5G NR, bu açıkları gidermek üzere kapsamlı güvenlik iyileştirmeleri içermektedir: Abonelik kimliğinin (SUPI — Subscription Permanent Identifier) şifrelenerek SUCI

(Subscription Concealed Identifier) olarak iletilmesi, IMSI-catcher saldırılarını büyük ölçüde güçleştirmektedir. 5G-AKA (Authentication and Key Agreement) protokolü, karşılıklı kimlik doğrulamayı (mutual authentication) zorunlu kılmakta; ağın terminale kendini kanıtlaması gerekmektedir. Kullanıcı düzlemi bütünlük koruması (UP Integrity Protection), veri paketlerinin değiştirilmeden teslim edildiğini doğrular (3GPP TS 33.501, 2021).

Ağ dilimleme mimarisi, güvenlik boyutunda da önemli avantajlar sunar: Her dilim bağımsız bir güvenlik politikasına ve kaynak yalıtımına sahip olduğundan, bir dilimdeki güvenlik ihlali diğer dilimleri etkilemez. Bu özellik, kritik altyapı uygulamalarının —kamu güvenliği, enerji şebekeleri— güvenliğini artırmak açısından belirleyicidir.

9. 5G'nin Zorlukları ve Sınırlılıkları

5G'nin sunduğu olanakların yanı sıra, bu teknolojinin yaygınlaşmasının önünde ciddi teknik, ekonomik ve düzenleyici engeller bulunmaktadır. Bu engellerin dürüstçe değerlendirilmesi, gerçekçi bir perspektif kazandırması açısından önem taşımaktadır.

9.1 Yoğun Altyapı Yatırımı

mmWave bantlarında yayılım mesafesinin kısalığı, yoğun baz istasyonu konuşlandırması gerektirmektedir. Bir mmWave 5G ağının belirli bir kentsel alanda LTE ile eşdeğer kapsama sağlayabilmesi için gereken baz istasyonu sayısı **10–100 kat** daha fazla olabilmektedir (Rangan et al., 2014). Bu durum, kurulum maliyetlerini ve zaman çizelgesini büyük ölçüde artırmakta; mmWave'in gerçek kapsama vaaadinin kısa vadede sınırlı kalacağına işaret etmektedir.

9.2 Cihaz Ekosistemi ve Pil Ömrü

5G modem ve radyo ön uç (Radio Front-End) teknolojisi, özellikle mmWave destekli cihazlarda önemli güç tüketimi sorunlarına yol açmaktadır. İlk nesil 5G akıllı telefonların pil tüketimi, benzer kullanım koşullarında 4G cihazlarına kıyasla belirgin biçimde yüksek olmuştur. Çip tasarımcıları bu sorunu aşmak için 4nm ve daha küçük süreç teknolojilerine geçiş yapmakta; ancak bu geçiş maliyetleri yüksek tutmaktadır (Heath et al., 2016).

9.3 Spektrum Karmaşıklığı ve Düzenleyici Engeller

5G'nin farklı bantlarda (sub-1 GHz, 3.5 GHz, mmWave) eş zamanlı faaliyet göstermesi, cihaz tasarımını ve doğrulama süreçlerini karmaşıktırılmaktadır. Ayrıca her ülkede farklı frekans bantlarının lisanslandığı gerçeği, uluslararası cihaz uyumluluğunu ve dolaşım (roaming) senaryolarını güçleştirmektedir. Bazı mmWave bantları (özellikle 26 GHz) mevcut uydu servisleriyle (Fixed Satellite Service) çakışmakta ve bu durum düzenleyici koordinasyon gerektirmektedir (Rangan et al., 2014).

10. 5G'den 6G'ye: Kesişim Noktaları ve Araştırma Gündemleri

5G henüz dünya genelinde yaygınlaşma sürecindeyken akademik çevreler ve önde gelen araştırma kurumları, 2030'ların başını hedefleyen altıncı nesil (6G) sistemler üzerine yoğun

çalışmalar yürütmektedir. ITU, IMT-2030 tavsiye çerçevesini 2023 yılında yayımlamış; Samsung, Nokia, Ericsson ve Huawei gibi teknoloji devlerinin yanı sıra Hexa-X (AB), B5G/6G (Japonya) ve FCC NextG (ABD) gibi kamu destekli araştırma programları hayata geçirilmiştir (Dang et al., 2020).

6G'nin 5G'yi nasıl aşacağına ilişkin akademik görüş birliği şu eksenlerde yoğunlaşmaktadır: (1) **Terahertz (THz) iletişim**: 100 GHz–10 THz aralığında teorik olarak Tbps hızlar mümkündür; ancak atmosferik soğurma ve bileşen olgunluğu kritik engellerdir. (2) **Yapay zeka (AI) yerleşik ağ**: AI/ML, 6G'de yalnızca bir optimizasyon aracı değil; ağ protokollerinin ve kanal yönetiminin ayrılmaz bir parçası olarak tasarlanmaktadır. (3) **İletişim ve algılama entegrasyonu (ISAC)**: Radyo sinyalleri hem haberleşme hem radar benzeri çevre algılama için kullanılacaktır (Dang et al., 2020). (4) **Dünya dışı ağ entegrasyonu (NTN)**: LEO uydu ağlarıyla küresel kesintisiz kapsama; 5G döneminde başlayan bu eğilim 6G'de standart mimari unsuru haline gelecektir.

11. Sonuç

Bu makale, 5G NR'ın önceki nesil ağlardan —başta 4G LTE— nasıl ve hangi boyutlarda ayrıştığını kapsamlı bir biçimde ortaya koymaya çalışmıştır. Yapılan karşılaştırma, 5G'nin yalnızca daha hızlı bir LTE olmadığını; mimari, paradigma ve hedef ekosistem bakımından gerçek anlamda bir kuşak sıçramasını temsil ettiğini açıkça göstermektedir.

Fiziksel katmanda Massive MIMO, esnek sayısal değerler, milimetre dalga spektrumu ve gelişmiş kodlama şemaları; 4G'nin ulaşamadığı veri hızları ve gecikme değerlerini mümkün kılmaktadır. Ağ mimarisinde servis tabanlı yapı, ağ dilimleme ve uç hesaplama; operatörlere farklı sektörler için özelleştirilmiş hizmet sunma kapasitesi kazandırmaktadır. Hizmet senaryoları boyutunda eMBB, URLLC ve mMTC'nin eş zamanlı desteklenmesi; insan iletişiminin ötesinde makine, araç ve altyapı bağlantısını merkeze alan yeni bir ekosistem açmaktadır.

Bununla birlikte 5G'nin pratik yaygınlaşması, mmWave altyapı yoğunluğu, cihaz güç tüketimi, spektrum düzenlemesi ve yatırım maliyeti gibi gerçek güçlüklerle karşı karşıyadır. Bu güçlüklerin üstesinden gelinmesi; teknoloji şirketleri, operatörler, düzenleyici kurumlar ve akademik araştırmacıların iş birliğini zorunlu kılmaktadır. 6G araştırmalarıyla birlikte bu süreç daha da hızlanacak; 2030'ların başında iletişim, algılama ve hesaplamayı tek bir mimaride birleştiren yeni bir ağ paradigması şekillenecektir.

Kaynakça

- 3GPP TS 23.501. (2021). System architecture for the 5G System (5GS) (Release 16). 3rd Generation Partnership Project.
- 3GPP TS 33.501. (2021). Security architecture and procedures for 5G system (Release 16). 3rd Generation Partnership Project.
- 3GPP TS 38.212. (2021). NR; Multiplexing and channel coding (Release 16). 3rd Generation Partnership Project.

- Dahlman, E., Parkvall, S., & Sköld, J. (2018). 5G NR: The next generation wireless access technology. Academic Press.
- Dang, S., Amin, O., Shihada, B., & Alouini, M.-S. (2020). What should 6G be? *Nature Electronics*, 3(1), 20–29. <https://doi.org/10.1038/s41928-019-0355-6>
- Goldsmith, A. (2005). *Wireless communications*. Cambridge University Press.
- Heath, R. W., González-Prelcic, N., Rangan, S., Roh, W., & Sayeed, A. M. (2016). An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 10(3), 436–453. <https://doi.org/10.1109/JSTSP.2016.2523924>
- IMT-2020 Requirements. (2017). Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s) (Report ITU-R M.2410). International Telecommunication Union.
- ITU. (2023). *Measuring digital development: Facts and figures 2023*. International Telecommunication Union.
- ITU-R M.2083. (2015). *IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond*. International Telecommunication Union.
- Lin, X., Li, J., Baldemair, R., Cheng, J.-F. T., Parkvall, S., Larsson, D. C., Koorapaty, H., Frenne, M., Falahati, S., Grovlen, A., & Werner, K. (2020). 5G new radio: Unveiling the essentials of the next generation wireless access technology. *IEEE Communications Standards Magazine*, 3(3), 30–37. <https://doi.org/10.1109/MCOMSTD.001.1800036>
- Marzetta, T. L., Larsson, E. G., Yang, H., & Ngo, H. Q. (2016). *Fundamentals of massive MIMO*. Cambridge University Press.
- Molisch, A. F. (2011). *Wireless communications (2nd ed.)*. John Wiley & Sons.
- Popovski, P., Trillingsgaard, K. F., Simeone, O., & Durisi, G. (2018). 5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A communication-theoretic view. *IEEE Access*, 6, 55765–55779. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2872781>
- Rangan, S., Rappaport, T. S., & Erkip, E. (2014). Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges. *Proceedings of the IEEE*, 102(3), 366–385. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2299397>
- Rappaport, T. S. (2002). *Wireless communications: Principles and practice (2nd ed.)*. Prentice Hall.
- Sesia, S., Toufik, I., & Baker, M. (Eds.). (2011). *LTE: The UMTS long term evolution — From theory to practice (2nd ed.)*. John Wiley & Sons.
- Simsek, M., Aijaz, A., Dohler, M., Sachs, J., & Fettweis, G. (2016). 5G-enabled tactile internet. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(3), 460–473. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2525398>
- Tse, D., & Viswanath, P. (2005). *Fundamentals of wireless communication*. Cambridge University Press.
- Zhang, S. (2019). An overview of network slicing for 5G. *IEEE Wireless Communications*, 26(3), 111–117. <https://doi.org/10.1109/MWC.2019.1800234>