

Sinyal Ötesi Savunma, Kolluk ve Askeri Teknolojilerinde 5G ve Sonrası Veri Kapasitesinin Getireceği Gelecek Perspektifi

Future perspectives of 5G and Post-5G data capacity in Beyond Signal Defense, Law Enforcement and Military Technologies

Kazım DURAKLAR ^{1*}  Vedat YILMAZ ² 

¹Jandarma ve Sahil Güvenlik Akademisi, Güvenlik Bilimleri Fakültesi, Güvenlik Bilimleri Bölümü, Ankara, Türkiye

²Jandarma ve Sahil Güvenlik Akademisi, Adli Bilimler Enstitüsü, Kriminalistik Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

Makale Bilgisi

Derleme makalesi
Başvuru: 22.06.2025
Düzeltilme: 01.08.2025
Kabul: 29.09.2025

Önemli Noktalar

5G ve gelecekteki 6G teknolojileri; ultra düşük gecikme, yüksek veri kapasitesi, yapay zekâ entegrasyonu ve ağ dilimleme gibi özellikleri sayesinde insansız sistemlerin koordinasyonunu, askeri komuta-kontrol süreçlerini, kamu güvenliği uygulamalarını ve siber-savunma altyapılarını dönüştürerek savunma stratejilerinde yeni bir paradigma oluşturmaktadır.

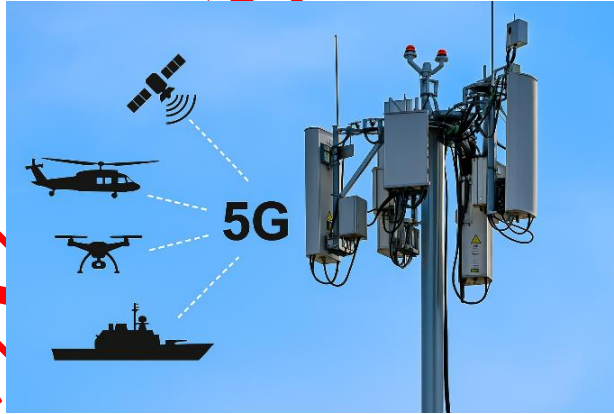
Anahtar Kelimeler

5G ve Ötesi
Güvenlik Teknolojileri
Elektronik
Gömülü Sistemler
Kolluk

Keywords

5G and Beyond
Security Technologies
Electronic
Embedded Systems
Law Enforcement

Grafiksel <Özet



Özet

Bu çalışma, beşinci nesil (5G) ve ötesi haberleşme teknolojilerinin güvenlik ve savunma alanlarındaki stratejik potansiyelini disiplinler arası bir perspektifle değerlendirmektedir. 5G'nin sunduğu düşük gecikme süresi, yüksek veri aktarım hızı, geniş bant genişliği ve çoklu cihaz bağlantısı gibi ileri düzey özelliklerin; askeri iletişim, kamu güvenliği, elektronik harp, otonom sistemler, lojistik yönetimi ve akıllı şehir uygulamalarında dönüştürücü etkileri ele alınmıştır. Literatürdeki örnek projeler, uluslararası uygulamalar ve teknik analizler ışığında, bu teknolojilerin operasyonel verimlilik, karar alma süreçleri ve tehditlere karşı dayanıklılık açısından sunduğu katkılar tartışılmıştır. Ayrıca, gömülü sistemlerin enerji verimliliği ve 6G'nin olası etkileri gibi mühendislik temelli konulara da değinilmiştir. Sonuç olarak, 5G ve ötesi teknolojilerin yalnızca haberleşme değil, aynı zamanda güvenlik stratejilerinin temel belirleyicisi olacağı vurgulanmaktadır.

Abstract

This study evaluates the strategic potential of fifth-generation (5G) and beyond communication technologies in the fields of security and defense through an interdisciplinary lens. Key features such as ultra-low latency, high-speed data transmission, wide bandwidth, and massive connectivity are examined in relation to their transformative roles in military communications, law enforcement, electronic warfare, autonomous systems, logistics management, and smart city security. Drawing on recent literature, international projects, and technical analyses, the paper explores how these technologies enhance operational efficiency, decision-making processes, and resilience against threats. Additionally, topics such as energy efficiency in embedded systems and the prospective impact of 6G are addressed from an engineering perspective. The findings emphasize that 5G and its successors are not merely communication infrastructures but core enablers of modern security strategies.

*Corresponding author, e-mail: kazim.duraklar@jsga.edu.tr

DOI:10.17134/khosbd.1724917

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dijital dönüşüm teknolojik altyapıların güvenlik için destekleyici ve belirleyici bir unsur haline gelmesine neden olmuştur. Özellikle iletişim teknolojilerindeki dönüşüm, askeri stratejilerin yeniden şekillendirilmesinde ve kamu güvenliğine yönelik karar süreçlerinin dijital temelli yürütülmesinde kritik rol oynamaktadır [1-2]. Beşinci nesil (5G) ve ötesi haberleşme sistemleri; sundukları ultra düşük gecikme süreleri, yüksek bant genişliği, yoğun bağlantı kapasitesi ve uçtan uca güvenlik yaklaşımları ile bu dönüşümün temel dinamikleri arasında yer almaktadır [3-4].

Sahadan elde edilen verilerin stratejik seviyedeki karar alma mekanizmalarına entegre edilmesi, yüksek hızlı iletişim ve aynı zamanda güvenli ve kesintisiz bağlantı altyapılarının varlığını da zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, geleneksel iletişim altyapılarının sunduğu sınırlı veri aktarım kapasitesi, çoklu platformlar arası senkronizasyon eksikliği ve siber güvenlik açıkları, modern güvenlik tehditleri karşısında yetersiz kalmaktadır [5]. 5G ve ötesi teknolojilerin bu tür eksiklikleri giderebilme potansiyeli, askeri ve kolluk kuvvetleri için dönüştürücü bir değer taşımaktadır [6].

Literatürdeki güncel çalışmalar, 5G teknolojisinin sadece bir haberleşme protokolü değil, aynı zamanda karar destek sistemlerinin, otonom platformların, elektronik harp uygulamalarının ve simülasyon tabanlı eğitim sistemlerinin temel yapı taşı haline geldiğini ortaya koymaktadır [7-9]. Liao ve Ou, 5G'nin özel ağ mimarileri üzerinden savunma senaryolarına nasıl entegre edilebileceğini vurgularken; Bhardwaj, özellikle taktik sahada

görev yürüten birimlerle komuta merkezleri arasındaki kesintisiz ve güvenli veri iletişiminin, operasyonel başarıyı doğrudan etkilediğini belirtmektedir [1-2].

Bu gelişmeler ışığında, 5G ve ötesi teknolojilerin sadece teknik değil, aynı zamanda stratejik, operasyonel ve politik bağlamlarda da yeniden ele alınması gerekmektedir. Zira bu altyapılar, askeri birliklerin karar döngülerini kısaltmakta, kamu güvenliği birimlerinin olaylara müdahale süresini azaltmakta ve çoklu güvenlik bileşenleri arasında gerçek zamanlı koordinasyonu mümkün kılmaktadır [10-11]. Ancak tüm bu avantajlara rağmen, yüksek maliyet, altyapı dönüşüm ihtiyaçları ve özellikle siber güvenlik tehditleri gibi çeşitli yapısal engeller de bu teknolojilerin yaygın kullanımını sınırlandıran faktörler arasında yer almaktadır [3, 12].

Bu çalışmada, kolluk ve askeri birimlerin mevcut haberleşme altyapılarını 5G ve ötesi teknolojilerle nasıl bütünleştirebileceği, bu entegrasyonun teknik ve operasyonel zorlukları ile birlikte ele alınmakta; ayrıca geleceğe dönük öngörüler çerçevesinde bu teknolojilerin savunma stratejileri üzerindeki potansiyel etkileri kapsamlı şekilde tartışılmaktadır.

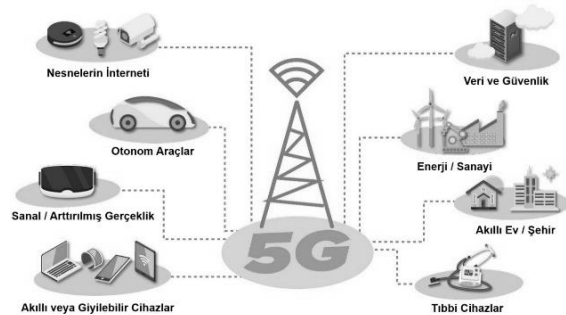
2. 5G TEKNOLOJİSİNDE MEVCUT DURUM (CURRENT STATUS OF 5G TECHNOLOGY)

5G ve ötesi elektronik haberleşme teknolojilerinin sunduğu yüksek potansiyel ve verimlilik, askeri haberleşme sistemlerinde kullanımını değerlendirmek açısından önemli bir motivasyon kaynağı haline gelmiştir. Özellikle silahlı çatışma senaryolarında operasyonel özgünlük, yüksek güvenilirlik ve kasıtlı müdahalelere (örneğin; sinyal karıştırma) karşı

dayanıklılık gibi gereklilikler, bu teknolojilere olan ilgiyi artırmaktadır. Geleneksel sivil telekomünikasyon altyapıları ve standartları, ileri teknoloji kullanımının gerekli olduğu bu tür çatışma ortamlarında silahlı kuvvetlerin ve kolluk kuvvetlerinin ihtiyaçlarını tam olarak karşılayamamaktadır. 3GPP standartları geçmişte askeri iletişim sistemlerinde yaygın olarak kullanılmış olmakla birlikte, günümüzdeki ileri düzey operasyonel faaliyetlerde yüksek hacimli veri aktarımı, birleşik kuvvetler arasında tam koordinasyon ve kara-hava-deniz unsurları arasında kesintisiz haberleşme gibi ihtiyaçlar karşısında yetersiz kalmaktadır [5].

2.1 Hız ve Bant Genişliği

Milimetre dalga (mmWave) teknolojisi, sunduğu yüksek hız, geniş bant ve yüksek çözünürlük gibi avantajları sayesinde hem ticari hem de askeri uygulamalarda artan bir ilgiyle karşılanmaktadır. Bu teknoloji; geniş bant kablosuz iletişim, multimedya aktarımı, Nesnelerin İnterneti (IoT), uzay ve savunma sistemleri, otomotiv radarları, görüntüleme sensörleri ve biyomedikal cihazlar gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. 5G ve ötesi teknolojilerin bu geniş uygulama alanlarını görsel olarak sunan örnek Şekil 1'de yer almaktadır [6].



Şekil 1. 5G kullanım alanları.

5G teknolojisinin sunduğu hız ve bant genişliği, güvenlik uygulamaları açısından kritik önem taşımaktadır. İndirme Hızı (Downlink): Teorik olarak 5G, 10 Gbps'ye kadar indirme hızına ulaşabilmektedir. Pratikte, ticari ağlarda ortalama 100 Mbps – 1 Gbps aralığında hızlar elde edilmektedir. Askeri özel ağlarda bu değer, ağ yoğunluğuna göre 2–5 Gbps seviyelerine çıkabilmektedir [1, 5]. Yükleme Hızı (Uplink): Teorik sınır 1–2 Gbps iken; operasyonel sahada kullanılan mobil çekirdek ağ mimarilerinde 500 Mbps – 1 Gbps arası yükleme hızları gözlemlenmiştir [6]. Bant Genişliği: 5G sistemleri için mevcut frekans spektrumu, sub-6 GHz (3.3–4.2 GHz) ve mmWave (24–100 GHz) bandı olarak ikiye ayrılmaktadır. Özellikle mmWave teknolojisi, 800 MHz ila 1 GHz seviyelerinde geniş bant sağlayabilmekte ve yüksek hızlı veri aktarımı sağlamaktadır [7]. MIMO Sistemleri: 5G, massive MIMO teknolojisi sayesinde, 64x64 anten konfigürasyonu ile çoklu kullanıcıya aynı anda hizmet verebilir. Bu da özellikle çoklu askeri birim koordinasyonunda büyük avantaj sağlar [8].

2.2 Düşük Gecikme Süresi

5G'nin ultra düşük gecikme süresi, askeri ve kolluk operasyonlarında gerçek zamanlı kontrol için vazgeçilmezdir; 4G LTE ortalama gecikme süresi: ~ 30–50 ms, 5G gecikme süresi (URLLC modu): ~ 1 ms veya daha az, 6G beklentisi: ~ 0.1 ms [3, 9]. Örneğin bir insansız hava aracı (İHA) ile komuta merkezi arasındaki gecikme süresinin 1 ms'ye düşürülmesi, saniyede 1000 komut alışverişine olanak tanıyarak otonom kontrol sistemlerinin tepkime süresini ciddi şekilde iyileştirir. Taktik sahada kullanılan mobil

çekirdek ağ altyapılarında yapılan saha testlerinde, güvenli özel 5G ağlarında 4–5 ms gecikme süresi sağlandığı rapor edilmiştir [6].

5G ve ötesi haberleşme teknolojilerinin sunduğu en önemli avantajlardan biri olan düşük gecikme süresi, uygulamalar arası etkileşimde ve gerçek zamanlı iletişim gerektiren senaryolarda kritik öneme sahiptir. Özellikle mobil uç hesaplama senaryolarında, IoT cihazlarının hesaplama görevlerinin merkezi değil, uç noktadaki mobil hesaplama sunucuları tarafından gerçekleştirilmesi sayesinde ultra düşük gecikme ile daha verimli IoT uygulamaları mümkün hale gelmiştir. Bu mimari, son dönemde literatürde giderek daha fazla kabul gören bir yaklaşım halini almıştır [10].

Öte yandan, uydu ve yer istasyonları arasındaki iletişim kanalları; atmosfer koşulları, görüş hattı kısıtlamaları, ağ tıkanıklığı ve fiziksel mesafeler gibi faktörler nedeniyle gecikmelere ve sinyal zayıflamalarına maruz kalmaktadır. Gecikmeyi azaltmaya yönelik geliştirilen yönlendirme algoritmaları ise, çoğu zaman kanal koşullarına bağlı olarak paket kayıplarına ve veri iletiminde verim kayıplarına yol açabilmektedir. Bu noktada, veri güvenilirliğini artırmak amacıyla uygulanan bazı önleyici yöntemler de iletim gecikmesini artıran etkiler doğurabilir. Bu tür zorlukları aşmak ve paket kaybını gecikmeden ödün vermeden azaltmak adına, literatürde Kleinrock'un güç ölçüsünün modifiye edilerek uygulanması önerilmektedir [11].

Günümüzde kullandığımız en gelişmiş haberleşme altyapısı olarak öne çıkan 5G ve ötesi teknolojiler, yüksek hız, ultra düşük gecikme, güvenilirlik ve yoğun cihaz bağlantısı gibi özellikleriyle kolluk ve askeri unsurlar için

stratejik avantajlar sunmaktadır. Bu yeni nesil haberleşme altyapısı, her ne kadar ticari ağlarda yaygınlaşmakta olsa da, görev-kritik askeri ve kolluk operasyonları için yeterli güvenlik, çevresel dayanıklılık ve özel konfigürasyonlar gerektirmektedir. Bu tür yüksek güvenli ve zorlu ortamlara uygun ağların kurulması, genellikle yüksek maliyetli altyapı yatırımlarını beraberinde getirmekte ve kurumların kendi standartlarında sistem geliştirmelerini zorunlu kılmaktadır.

Ancak gelişen 5G altyapıları, zamanla daha maliyet etkin, daha enerji verimli ve daha yüksek performanslı bir yapıya dönüşmektedir. Bu dönüşüm, savunma odaklı haberleşme sistemlerinin yeniden yapılandırılması konusunda umut verici bir potansiyel sunmaktadır. Bu teknolojik evrim, askeri ağ oluşumu ve haberleşme süreçlerini önemli ölçüde geliştirerek, operasyonel gereksinimlere daha hızlı ve etkili cevap verebilen sistemlerin önünü açmaktadır [12].

2.3 Yüksek Bağlantı Kapasitesi

5G'nin mMTC (massive Machine-Type Communication) yapısı, aynı anda milyonlarca cihazın bağlantısını mümkün kılar; bağlantı kapasitesi: 1 milyon cihaz/km² (5G), 10 milyon cihaz/km² (6G beklentisi) [10]. Bu, özellikle akıllı üsler, şehir güvenlik ağı, gözetleme sistemleri ve IoT temelli mühimmat takibi gibi yüksek yoğunluklu ortamlarda avantaj sağlar. 5G sayesinde, her bir İHA veya İKA platformu için ayrı ayrı bağlantı ihtiyaçları aynı spektrum içinde eş zamanlı sağlanabilir. 5G ve ötesi haberleşme sistemleri, sundukları kesintisiz veri aktarımı ve geniş coğrafi kapsama imkânıyla birçok sektörde önemli dönüşümlere zemin hazırlamaktadır. Bu

teknolojilerin yaygınlaşmasıyla birlikte, altyapı olanakları ülke geneline taşınabilecek ve bağlantı kapasitesi önemli ölçüde genişleyecektir [13]. 5G'nin teknik altyapısı, önceki nesil teknolojilere kıyasla aynı anda çok daha fazla cihazın ağa bağlanmasına olanak tanımaktadır. Bu durum, özellikle IoT uygulamaları, akıllı ev sistemleri ve endüstriyel otomasyon gibi çoklu bağlantı ihtiyacı olan alanlar için stratejik bir avantaj sunmaktadır.

Ayrıca 5G teknolojisi, daha düşük maliyetli geniş bant kablosuz bağlantılar sağlayabilme yeteneği ile dikkat çekmektedir. Bu durum, özellikle gelişmekte olan bölgelerde geniş bant hizmetlerinin erişilebilirliğini artırmakta ve dijital uçurumu azaltma potansiyeli taşımaktadır [14].

2.4 Yenilikçi Uygulamalar ve Servisler

5G'nin URLLC modunda çalışması, işlemcilerin ve RF modüllerinin daha kısa süre aktif kalmasını sağlar. Bu da cihazların %30–70 oranında daha az enerji tüketmesi anlamına gelmektedir [12]. Beamforming ve DFPA (Dynamic Frequency & Power Allocation) gibi tekniklerle cihazların gereksiz sinyal yayılımı engellenmekte, bu sayede güç tüketimi düşürülmektedir. 5G ve ötesi teknolojilerin yüksek veri kapasitesi ve ultra düşük gecikme özellikleri, bireysel ve kurumsal ihtiyaçlara yönelik çok sayıda yeni mobil uygulama ve hizmetin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Bu gelişmelerle birlikte, özellikle görev kritik operasyonlarda zaman faktörünün ön plana çıktığı uygulamalarda bu altyapının rolü giderek artmaktadır. Tele-tıp sistemlerinden otonom araçlara, operasyonel bölgelere yönelik hassas veri ve görüntü aktarımına kadar birçok alanda düşük gecikmenin sağladığı avantajlar, bu

teknolojilerin kullanım alanlarını genişletmektedir [15].

Özellikle sanal gerçeklik destekli eğitim ve görev hazırlık sistemleri, operasyon öncesi bölge tanıma ve etkileşimli planlama imkânı sunarak, askeri ve güvenlik operasyonlarının başarısını artırma potansiyeline sahiptir. 5G altyapısının sağladığı yüksek çözünürlüklü video aktarımı ve gerçek zamanlı veri iletişimi, bu tür uygulamaların etkinliğini önemli ölçüde artırmaktadır.

2.5 Altyapı ve Yatırım

Günümüzdeki askeri iletişim sistemleri, geleneksel ağ yapılarıyla sınırlı kalmayıp; İHA ağları, mobil çekirdek ağ yapıları, Yazılım Tanımlı Ağlar (SDN) ve 5G ve ötesi haberleşme sistemleriyle birlikte entegre bir şekilde düşünülmelidir. Bu doğrultuda, mobil taktik ağların yeni nesil teknolojilere uyum sağlayabilecek esneklikte tasarlanması gerekmektedir [16].

Bu dönüşümün gerçekleştirilmesi, ülke genelinde büyük ölçekli altyapı yatırımlarını zorunlu kılmaktadır. Süreçte, önceliklere göre altyapı kurulumlarının stratejik öneme sahip bölgelere yönlendirilmesi gereklidir. Telekomünikasyon şirketleri, kamu otoriteleri ve ilgili paydaşlar arasında güçlü bir iş birliği mekanizmasının oluşturulması, sistemin başarısı açısından kritik gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır.

3. 5G TEKNOLOJİSİNİ ASKERİ ALANDA KULLANIM UYGULAMALARI (MILITARY APPLICATIONS OF 5G TECHNOLOGY)

Günümüzün yüksek tempolu ve tehdit çeşitliliği giderek artan güvenlik ortamında, kolluk ve silahlı kuvvetlerin teknolojiye olan bağımlılığı

hiç olmadığı kadar belirgin hale gelmiştir. 5G, sadece veri aktarımındaki hızıyla değil, aynı zamanda ağ esnekliği, bağlantı yoğunluğu ve gerçek zamanlı etkileşim kapasitesiyle bu alanda yeni bir paradigma sunmaktadır. 5G'nin sunduğu bu imkânlar, savunma ve güvenlik kurumlarının daha hızlı karar alabilen, daha hassas çalışan ve çok katmanlı görevlerde eş zamanlı koordinasyon sağlayabilen sistemler geliştirmelerine olanak tanımaktadır. Bu bağlamda, 5G altyapısının askeri ve kolluk kuvvetleri uygulamalarına entegrasyonu; lojistikten elektronik harbe, simülasyondan insansız araçlara kadar geniş kapsamlı stratejik dönüşümlerin kapısını aralamaktadır.

3.1 Lojistik ve Tedarik Zinciri Yönetimi

5G-IoT altyapısının, akıllı otomasyon ve yapay zekâ analiz sistemleriyle entegrasyonu; envanter kontrolünden depo yönetimine kadar uzanan askeri lojistik süreçlerinde önemli iyileştirmeler sağlamaktadır. Bu entegrasyon, tedarik zinciri boyunca yeniden sıralama, doğruluk, esneklik, mobilite ve gerçek zamanlı izleme gibi kritik işlevlerin daha etkin yönetilmesine olanak tanımaktadır. Fabrikadan savaş alanına kadar uzanan süreçlerde 5G-IoT, lojistik kabiliyetleri ileri seviyeye taşıyabilecek potansiyele sahiptir.

Bununla birlikte, bu gelişmiş altyapı ile birlikte iletilen verilerin güvenliğine ilişkin önemli riskler de ortaya çıkmaktadır. Kimlik doğrulama, veri bütünlüğü, mahremiyet ve gizlilik gibi siber güvenlik boyutları, askeri uygulamalarda göz ardı edilemeyecek düzeyde önem taşımaktadır. Ayrıca, tedarik zinciri süreçlerinde operasyonel önceliklendirme, esneklik, ölçeklenebilirlik ve sürekli kullanılabilirlik gibi gerekliliklerin de sağlanması gerekmektedir. Dolayısıyla, 5G-

IoT'nin sunduğu avantajlar kadar, bu sistemlerin güvenlik ve süreklilik bağlamında yaratabileceği risklerin de dikkate alınması zorunludur [17].

3.2 Elektronik Harp ve Siber Güvenlik

Elektronik harp (EH) ve siber güvenlik (SG), tarihsel olarak farklı disiplinler olarak görülmüş olsa da, modern savaş ortamlarında bu iki alan giderek iç içe geçen ve örtüşen bir yapı sergilemektedir. Özellikle 5G ve ötesi haberleşme sistemlerinin yüksek bağlantı yoğunluğu, veri hızları ve çok katmanlı yapıları, bu iki alan arasındaki sınırların bulanıklaşmasına neden olmuştur [4, 12]. EH, elektromanyetik spektrum üzerinde düşman sistemlerini tespit etme, aldatma, karıştırma veya yok etme amacıyla yürütülen faaliyetleri kapsar. Geleneksel EH unsurları arasında radar karıştırma, sinyal bastırma ve yön bulma sistemleri yer alır. Siber güvenlik SG ise bilgi sistemlerini, ağları, donanımı ve verileri kötü niyetli saldırılara karşı korumayı hedefler. Siber saldırılar genellikle yazılım tabanlıdır ve ağ altyapılarına sızarak bilgi hırsızlığı, tahrifat veya işlevsizlik yaratmayı amaçlar [3].

Ancak 5G ile birlikte bu alanlar arasındaki farklar ortadan kalkmaktadır. Örneğin, düşmanın iletişim ağına sızmak için yürütülen bir siber saldırı, EH kapsamında yürütülen bir karıştırma faaliyetiyle eş zamanlı olarak desteklenebilir. Bu tür eşgüdümlü saldırılar, hedef sistemin hem fiziksel hem de yazılımsal olarak işlevsiz hale getirilmesini amaçlar. 5G altyapısı, ağ dilimleme (network slicing), beamforming ve uçtan uca şifreleme gibi özellikler sunmasına rağmen, yüksek bağlantı yoğunluğu ve büyük veri akışı, hem EH hem SG saldırılarına karşı açık hedefler oluşturur [6].

EH sistemleri, hedef frekansları tespit edip bastırırken; SG saldırıları bu frekanslar üzerinden akan verinin içeriğini hedef alır. Bu nedenle, 5G ağlarında iletişim frekansını bastırmak ve aynı anda veri paketlerini manipüle etmek mümkün hale gelmiştir. Örneğin, düşman İHA'larının kontrol frekansları karıştırılırken, eş zamanlı olarak komuta merkezi ağlarına zararlı kod yerleştirme (malware injection) saldırısı gerçekleştirmek mümkündür.

EH + SG entegre saldırılar, özellikle 5G destekli askeri sistemlerde büyük risk teşkil etmektedir. Düşman unsurlar, elektronik karıştırma ile iletişimi zayıflatırken, SG saldırısıyla veri bütünlüğünü ve sistem güvenliğini de hedef alabilir. Bu durum, spektrum yönetimi, ağ izleme ve gerçek zamanlı tehdit tespiti konularında entegre savunma ihtiyacını doğurur [16].

Her koşulda etkili iletişim, askeri ve kolluk uygulamalarında stratejik başarı için kritik bir bileşendir. İletişim altyapısının yetersizliği veya özel iletim olanaklarının eksikliği, düşman unsurların üstünlük kazanmasına neden olabilecek zafiyetler yaratabilir. Literatürdeki önceki çalışmalarda, geleneksel iletişim modellerinin ötesine geçen, işbirlikçi ve özel iletişim uygulamalarına imkân tanıyan mimariler önerilmiş, bu sayede dağıtım süreci hızlandırılmış ve siber güvenlik avantajları sağlanmıştır [18].

3.3 Akıllı Mühimmatlar

Akıllı mühimmat sistemleri, savaş alanında minimum insan müdahalesiyle maksimum etkinlik sağlamayı hedefleyen, yüksek hassasiyetli güdüm ve karar mekanizmaları ile donatılmış silah sistemleridir. Bu sistemler;

elektro-optik sensörler, GNSS (Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri), INS (Ataletsel Seyrüsefer Sistemleri), görüntü işleme modülleri ve kablosuz haberleşme bileşenleri ile entegre çalışmaktadır. Son yıllarda, bu mühimmatların karar döngülerinin daha esnek ve çevik hale getirilmesi için 5G haberleşme altyapılarının entegrasyonu giderek artan bir ilgi görmektedir [19-20]. 5G'nin sunduğu gigabit seviyesinde veri aktarım hızı (1–10 Gbps) ve 1 ms altı gecikme süresi, akıllı mühimmatlar ile yer/hava kontrol merkezleri arasında gerçek zamanlı veri alışverişini mümkün kılmaktadır. Bu sayede mühimmat hedefe doğru ilerlerken, rota güncellemeleri, hedef değişikliği veya görev iptali gibi komutlar uçuş sırasında iletilebilir. Hedefin hareketli olduğu durumlarda mühimmat, anlık görüntü veya sensör verilerine göre yeniden yönlendirme (retargeting) yapılabilir. Bu tür dinamik müdahaleler, özellikle şehir içi operasyonlar, terörle mücadele ve düşük hasarlı hassas saldırılar gibi görevlerde sivil kayıpları en aza indirmek adına büyük önem taşımaktadır [21].

Akıllı mühimmatların çoğu, uçuş süresince GPS, INS ve EO sensörlerinden gelen verileri entegre ederek özyineli (iteratif) hedef doğrulama süreçleri yürütür. 5G destekli bağlantılar bu süreçlere iki avantaj sunar: URLLC sayesinde, mühimmat ile karar destek sistemleri arasında güvenilir veri alışverişi yapılabilir. Ağ dilimleme ile görev kritik iletişim kanalları izole edilerek, düşman karıştırmasına karşı bağışıklık kazanılır [6]. Örneğin; lazer işaretleme sistemleriyle hedefe yönlendirilen bir akıllı mühimmat, aynı anda 5G ağı üzerinden hedefin zırh türü, kısa mesafeli hava tehditleri, GPS karıştırıcı varlığı

gibi bilgileri alarak o anki koşula göre uçuş modunu değiştirebilir.

Günümüzde kullanılan güdümlü füze ve mühimmat sistemlerinin çoğu, üzerinde ARM Cortex-M, RISC-V ya da benzeri düşük güç tüketimli gömülü işlemciler barındırmaktadır. Bu platformlar, 5G modülleriyle entegre edilerek aşağıdaki görevleri yerine getirebilir; Yüksek çözünürlüklü görüntü ya da LIDAR verilerinin komuta merkezine aktarılması (ön-haritalama), Ara hedef noktası güncellemesi alınması, Mühimmat ömrü izleme ve otomatik geri çağırma emri alınması. Bu mimaride mühimmat birimi, pasif bir taşıyıcı olmaktan çıkıp aktif bir sensör ve karar modülü haline gelir.

3.4 Simülasyon ve Eğitim

Günümüzde modern askeri güçlerin başarısı, silah sistemlerinin teknik yeterliliğiyle ve aynı zamanda personelin durumsal farkındalık, çoklu senaryo yönetimi ve karar verme kapasitesi gibi nitelikleriyle doğru orantılıdır. Bu bağlamda, gelişmiş simülasyon sistemleri ve gerçek zamanlı eğitim ortamları hem barış zamanında hazırlık hem de görev öncesi planlama açısından kritik önem taşımaktadır [22-23]. Simülasyonlarda sadece görsel deneyim değil, aynı zamanda karar kalitesinin ölçülmesi ve otomatik değerlendirme de önemlidir. 5G üzerinden aktarılan büyük veri sayesinde eğitim sırasında yapılan her hareket, Yapay Zeka (YZ) algoritmalarıyla analiz edilir ve geri bildirim üretir. Karar süresi, hedef isabeti, yanlış tepki oranı gibi metrikler gerçek zamanlı olarak eğitmen ekranına yansıtılır. Bu özellik, geleneksel eğitimlerde gözden kaçabilecek davranışları ortaya çıkararak kişiselleştirilmiş gelişim imkânı sunar [24].

5G'nin 1 milisaniyeye kadar düşen gecikme süresi, askeri simülasyonlarda anlık kullanıcı etkileşimi ve senaryo adaptasyonu için kritik bir avantaj sunar: Taktik karar verme simülasyonlarında, asker ile merkezi sistem arasındaki iletişim gecikmesinin ortadan kaldırılması, senaryo gerçekçiliğini artırır. Özellikle çok alanlı harekât (kara-hava-deniz) ortamlarında, farklı birimlerin aynı anda aynı simülasyona katılmasını sağlayarak ortak taktik reflekslerin geliştirilmesine imkân tanır. Örnek: Sanal gerçeklik (VR) tabanlı bir birlik eğitimi sırasında, bir komutanın konum değiştirmesi 5G üzerinden anlık olarak diğer oyuncuların ekranına yansır. Bu, "görsel gecikme" sorununu ortadan kaldırır ve karar sürekliliği sağlar [25]. Sanal gerçeklik tabanlı sistemlerin askeri alanda yakın gelecekte daha fazla önem kazanacağı öngörülmektedir. Bu durumu destekleyen beş temel gerekçe aşağıda sıralanmıştır:

-Hızlı Teknolojik Gelişmeler: Gerçeğe yakın çözümler sunan yeni teknolojiler sayesinde eğitim dışı operasyonel ihtiyaçlara da cevap verebilecek araçların geliştirilmesi mümkündür.

-Çeşitli Operasyonel Zorluklar: Yirmi birinci yüzyılın konvansiyonel ve asimetrik tehditlerine karşı personelin esnek ve durumsal farkındalık sahibi şekilde eğitilmesini sağlamak için simülasyon sistemleri kullanılmalıdır.

-Eğitimlerde Risklerin Azaltılması: Gerçek personel ve ekipmanla yapılan eğitimlerde ortaya çıkabilecek kazaların ve yaralanmaların önüne geçilerek güvenli bir eğitim ortamı sağlanır.

-Maliyet ve Zaman Tasarrufu: Geleneksel tatbikatlara kıyasla daha düşük maliyet ve zaman

yönetimi avantajı sunar; bu da hızlı ve yaygın eğitim fırsatları doğurur.

-Operasyonel Kararlarda Etkinlik: Sanal sistemler çok boyutlu analiz imkânı sunarak gerekli operasyonel boyutların kullanılmasına olanak tanır ve stratejik kararlarda daha hedef odaklı bir yaklaşım sağlar [26].

5G'nin yüksek bağlantı kapasitesi (1 milyon cihaz/km²), sanal savaş alanlarında birden fazla birliğin entegre eğitim almasına olanak tanır. Askeri birimler; farklı seviyelerden katılımcılarla (er, uzman, subay) aynı VR tabanlı ortamda görev dağılımı yaparak uyum pratiği gerçekleştirebilir. İHA operatörleri, topçu birlikleri, lojistik birimleri gibi farklı branşların tek bir senaryoya entegre edilmesi, 5G sayesinde mümkün hale gelmektedir.

3.5 İleri İkmal, Taşıma Operasyonları ve İnsansız Sistemler

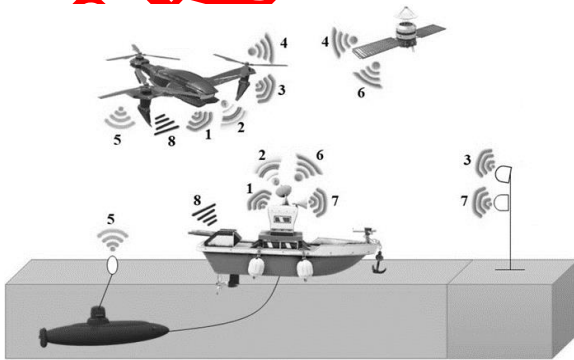
Modern savaş alanlarında taşıma, ikmal ve keşif görevlerinin verimli ve güvenli biçimde yürütülebilmesi için insansız hava, kara ve deniz araçlarının kullanımı stratejik bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu sistemlerin birlikte çalışabilmesi, görevleri kesintisiz sürdürebilmesi ve gerçek zamanlı veri aktarımı gerçekleştirebilmesi için yüksek hızlı, düşük gecikmeli ve esnek bir iletişim altyapısı gereklidir. 5G ve ötesi haberleşme teknolojileri, bu ihtiyacı çok katmanlı çözümler sunmaktadır.

Taşıma ve ileri ikmal görevleri, özellikle savaş ortamlarında operasyonel süreklilik ve lojistik desteğin zamanında ulaştırılması açısından hayati önem taşır. Bu görevlerin büyük kısmı artık insansız sistemler tarafından yürütülmektedir. 5G teknolojisi sayesinde geniş bant veri aktarımı ile taşıma sırasında konum, rota ve çevresel risk

faktörleri (düşman unsurlar, mayın alanları, radar tespiti) gerçek zamanlı olarak izlenebilir. Düşük gecikme süresi sayesinde, ikmal İHA'sının uçuş yönü, hedef koordinatları veya acil geri çağırma komutu anlık olarak iletilebilir. URLLC modları ile hayati ikmal görevlerinde iletişim sürekliliği güvence altına alınabilir [12]. Ayrıca, RFID etiketli akıllı yük modülleri, 5G ağı üzerinden anlık envanter takibi yapılmasını sağlayarak hem ikmal optimizasyonu hem de mühimmat güvenliği sağlar. Çok amaçlı İHA'lar, sıklıkla modifiye edilmiş ve silahlandırılmış keşif platformları olarak görev yapmakta olup; sınır içi ve sınır ötesi operasyonlarda kritik ve hassas alanların taranması, hedef tespiti ve etkisiz hale getirilmesi gibi işlevler üstlenmektedir. Bu tür sistemler, gerektiğinde lojistik kabiliyetle donatılarak belirli miktarda yük taşıma kapasitesi ile desteklenebilir. Özellikle İHA havadan ikmal sistemleri, küçük kargo yüklerinin – başta mühimmat ve gıda malzemeleri olmak üzere güvenli ve sürekli biçimde iletilmesi gereken görevler için kritik öneme sahiptir [27].

Farklı türdeki insansız sistemlerin (hava, kara ve deniz) birbiriyle entegre iletişim kurabilme yetenekleri, çok katmanlı askeri operasyonlarda koordineli hareket kabiliyetini önemli ölçüde artırmaktadır. Şekil 2'de, farklı türdeki insansız sistemlerin 5G destekli çok katmanlı bir mimari içerisinde nasıl etkileşim kurduğunu görsel olarak sunmaktadır. Bu yapıda yer alan sekiz farklı sinyal hattı, haberleşme yapısının görev esnekliğine nasıl katkı sağladığını göstermektedir: Sinyal 1: Kara kontrol birimi ile İHA arasında yönlü Wi-Fi/5G bağlantısı sağlanır. Bu bağlantı, İHA'nın uçuş rotası, görev bilgisi ve sensör verilerini içerir. Sinyal 2: Kara kontrol

birimi ile İSÜA arasında 5G tabanlı bağlantı kurularak su üstü aracının rota güncellemeleri ve çevresel veri paylaşımı gerçekleştirilir. Sinyal 3: İHA ile İSÜA arasında RF tabanlı yedek haberleşme hattı kurulur. Bu, kara kontrol bağlantısı kesildiğinde görev sürekliliği için yedek kanal olarak kullanılır. Sinyal 4: İHA ile İSAA arasında kısa menzilli yönsüz Wi-Fi bağlantısı ile su altı verileri, örneğin sonar tarama sonuçları, İHA'ya aktarılır. Sinyal 5: İSAA ile komuta sistemleri arasında beacon (işaretleyici) destekli konumlandırma bağlantısı kurulur. Bu bağlantı sayesinde, İHA'lar hassas iniş için İSAA'nın konumunu referans alır. Sinyal 6: Uydu üzerinden geniş alan kapsama sağlayan bağlantı ile, uzak bölgelerdeki İHA'lar veya deniz araçları kontrol altında tutulabilir. Bu kanal, özellikle 5G kapsamasının zayıf olduğu coğrafi alanlarda kritik rol oynar. Sinyal 7: Yer istasyonları ile kara kontrol birimi arasında sabit veri akışı sağlanarak radar sistemleri, sabit kamera ve sensör altyapıları üzerinden gelen veriler analiz edilir. Sinyal 8: İHA'dan İSAA'ya veya kara kontrol birimine gönderilen konumlandırma sinyali, özellikle otomatik iniş veya yük bırakma operasyonlarında yüksek hassasiyetli konumlama sağlar (konum doğruluğu <1 metre) [28].



Şekil 2: İnsansız araçların birbiri arasında iletişimi.

3.5.1 İnsansız Hava Araçları

İHA'lar; dağıtım kolaylığı, dinamik yapılandırma esnekliği, düşük bakım gereksinimi, yüksek hareketlilik ve hızlı tepki süresi gibi avantajlar sunmaları nedeniyle çok sayıda uygulama alanında kullanılmaktadır. Bu araçlar; askeri ve sivil alanların yanı sıra lojistik, uzaktan kumanda sistemleri, izleme, sinematografi, tarımsal gözlem, arama-kurtarma, hedef işaretleme ve 3D haritalama gibi çeşitli sektörlerde etkin biçimde değerlendirilmektedir [29].

Bu sistemler, elektro-optik sensörler ve radarlarla donatılarak yüksek çözünürlükte görüntüleme yapabilmektedir. Milimetre altı seviyeden birkaç santimetreye kadar ayrıntılı çözünürlük sağlayabilen bu sistemler, gözetleme ve izleme operasyonlarında kritik işlevler görmektedir. Spektrumun farklı bölgelerinde çalışan sensörler arasında düşük-yüksek çözünürlüklü RGB kameralar, normalleştirilmiş fark bitki örtüsü endeksi (NDVI) kameraları, LIDAR sistemleri (ışık algılama ve menzil tayini), eşzamanlı konumlandırma ve haritalama sistemleri (SLAM) ile ultrasonik engel algılama sensörleri gibi birçok teknoloji yer almaktadır [30].

Askeri amaçların yanı sıra çevresel izleme, kamu güvenliği ve kablosuz iletişim gibi alanlarda da başarıyla kullanılan İHA'lar, 5G altyapılarıyla entegre edildiğinde enerji verimliliği ve spektrum kullanımı açısından büyük avantajlar sunmaktadır. Adaptif irtifa, ölçeklenebilirlik, düşük maliyet ve esnek hareket kabiliyeti, bu sistemlerin çeşitli senaryolarda yaygın olarak kullanılmasını teşvik etmektedir. Akıllı kontrol sistemleri ve uzaktan yönetim teknolojileri sayesinde performans artışı sağlanabilirken, müdahaleye açıklık ve dinamik ağ

topolojilerinden kaynaklı zorluklar bu sistemlerin güvenliğini tehdit edebilmektedir.

İHA'lar ayrıca IoT cihazlarına güç iletimi sağlamak, veri aktarımını sürdürmek ve kablosuz enerji aktarımı yoluyla sürdürülebilir haberleşme altyapıları oluşturmak gibi önemli görevleri de üstlenebilir. Bu bağlamda, çeviklik, otonom hareket kapasitesi, uçuş hızı ve mekanik kabiliyetleri gibi sürekli gelişen özellikleriyle, çeşitli IoT uygulamaları için etkili platformlar haline gelmişlerdir. Bununla birlikte, kanal modelleme, enerji yönetimi kısıtları ve ağ bağlantı sürekliliği gibi teknik zorluklar, İHA'ların IoT ağlarında etkin şekilde kullanımı önünde çözülmesi gereken önemli engeller olarak öne çıkmaktadır [31].

3.5.2 İnsansız Kara Araçları

İnsansız Kara Araçları (İKA), askeri görevlerde gözetleme, keşif, lojistik taşıma, mayın tespiti ve saldırı gibi birçok alanda aktif biçimde kullanılmaktadır. Bu araçlar, otonom hareket kabiliyetleri ve zorlu arazi koşullarına uyum yetenekleri sayesinde hem sahadaki riski azaltmakta hem de görev etkinliğini artırmaktadır. Bu sistemlerin karar verme, veri aktarımı ve görev planlama süreçlerinin güvenirliliği, 5G haberleşme altyapısıyla doğrudan ilişkilidir. İKA'lar operasyon sırasında, merkezi kontrol biriminden gelen rota, hedef ve sensör ayarlarına dair komutları 5G bağlantısı üzerinden anlık olarak alabilir. URLLC sayesinde bu komutlar <1 ms gecikmeyle uygulanır. Özellikle karışık görev ortamlarında (şehir içi çatışmalar) İKA'ya hedef değiştirme komutu gönderilebilir. 5G üzerinden bulut destekli yapay zekâ analiz altyapılarına bağlanan İKA'lar lidar, termal kamera ve radar verilerini merkeze

aktarabilir. Bu veriler, bulutta analiz edilerek geri bildirim olarak İKA'ya döner ve rotasını değiştirir. Örneğin bir engel tespit edildiğinde, yeni rota 2 saniye içinde İKA'ya aktarılır ve yürürlüğe girer. 5G'nin mmWave modları ve beamforming sayesinde İKA'nın bulunduğu konum yüksek hassasiyetle (<1 m) takip edilir. RF karıştırıcılara karşı 5G'nin çoklu frekans taşıyıcıları sayesinde alternatif iletişim kanalları devreye girerek görev sürekliliği sağlanır. Bir İKA, düşman elektronik karıştırma sinyali tespit ettiğinde, 5G üzerinden yeni bir kanal aracılığıyla iletişimi sürdürür, rota değiştirir ve merkezden destek almaya devam eder.

Günümüzde İHA'lar gibi İKA'lar da modern kara kuvvetlerinin geleceğinde vazgeçilmez bir unsur olarak değerlendirilmektedir. Birçok ülke ve ileri teknoloji firması, bu araçların gerçek muharebe koşullarında kullanılabilirliğini artırmaya yönelik önemli yatırımlar gerçekleştirmektedir. Geliştirilen İKA sistemleri, hem taktik saha uygulamalarında hem de uzun süreli keşif görevlerinde önemli avantajlar sunmaktadır. Taktik sahada, özellikle riskli bölgelerde görev yapan personelin can güvenliğini korumak adına İKA'lar etkili bir alternatif sunmaktadır. X-by-wire şasi teknolojisi ve gelişmiş kontrol algoritmaları sayesinde İKA'lar, klasik askeri araçlara kıyasla daha üstün manevra ve hareket yetenekleri sergilemektedir. İKA'lar, İHA'lar ve insansız deniz araçlarıyla entegre biçimde çalışarak, çok boyutlu ve yüksek verimliliğe sahip görev yapıları oluşturmaktadır. Bu iş birliği, askeri harekâtların bütüncül bir yaklaşımla yürütülmesine katkı sağlamaktadır. Yüksek performanslı İKA sistemlerinin geliştirilmesi, özellikle savaş alanında esneklik,

çeviklik ve etki derinliğini artırmaya yönelik küresel araştırma çabalarının merkezinde yer almaktadır. Bu teknolojik ilerlemeler, savunma stratejilerinin yeniden şekillendirilmesine ve askeri güç projeksiyonunun artırılmasına katkı sağlamaktadır [32].

3.5.3 İnsansız Deniz Araçları

İnsansız Deniz Araçları (İDA), su üstü ve su altı görevlerinde kullanılan, keşif, sızma, liman güvenliği ve deniz mayın tespiti gibi kritik rolleri üstlenen sistemlerdir. 5G tabanlı haberleşme altyapısı, bu sistemlerin daha güvenilir, esnek ve yüksek veri iletim kapasiteli çalışmasını sağlar. Liman, üs veya kıyıya yakın görevlerde, İDA sistemleri kara kontrol birimi ile doğrudan 5G bağlantısı kurabilir. Gerçek zamanlı görüntü aktarımı, özellikle düşman su üstü unsurlarının veya şüpheli cisimlerin tespiti için hayati önem taşır. Şekil 2 – Sinyal 2, bu bağlantıyı temsil etmektedir. Çok katmanlı veri aktarımı İDA, İHA, Uydu arasındadır. Açık deniz görevlerinde doğrudan bağlantı mümkün olmadığında, veri aktarımı İHA üzerinden uydu bağlantısı ile merkeze iletilir (Şekil 2 – Sinyal 3 ve Sinyal 6). Bu yapı, kesintisiz ve yedekli bağlantı mimarisi sağlayarak haberleşmenin sürdürülebilirliğini artırır.

Su altı görevleri yürüten İSAA sistemleri, genellikle yüzeydeki İDA'ya düşük frekanslı yönsüz RF veya akustik sinyaller ile veri gönderir (Şekil 2 – Sinyal 5). Yüzeye çıkan İDA, bu verileri 5G üzerinden merkeze aktarır. Bu yapı, çok katmanlı iletişim protokolü olarak adlandırılır. İDA'larda kullanılan gömülü kontrol üniteleri, yalnızca veri alışverişi anında aktif hale getirilerek enerji tüketimi optimize edilir. 5G'nin dinamik frekans seçimi (DFS) özelliği, sinyal

kirliliğini azaltır ve iletişimi karıştırmaya karşı daha dirençli kılar. Toplanan sensör verileri, 5G aracılığıyla merkeze aktarılır. Burada çalışan AI tabanlı analiz sistemleri, görev sonuçlarını değerlendirerek İDA'ya anlık komutlar gönderebilir.

İDA'lar, son yirmi yıl içerisinde kamu ve özel sektör girişimleriyle farklı görev ve amaçlara uygun biçimde geliştirilmektedir [33]. Bu sistemlerin çoğu, kısmen veya tamamen okyanus kaynaklı yenilenebilir enerji kaynaklarından faydalanarak uzun süreli otonom görevlerde enerji sürekliliği sağlamaktadır. Bu bağlamda, Sea-Kit gibi öncü firmalar tarafından geliştirilen sistemler, otonom gemi teknolojisinin önemli örneklerini oluşturmaktadır [34].

Deniz robotik firması Ocean Infinity [35], okyanus havzalarının haritalanması ve araştırılması gibi endüstriyel uygulamalarda İDA sistemlerinin etkinliğini sahaya yansıtmaktadır. Bu sistemler, uzun süreli görevlerde yüksek dayanıklılık göstermekte ve yazılım sistemleri, zorlu deniz koşullarında dahi güvenilir veri toplama kapasitesine sahiptir. Geliştirilen bu teknolojiler, deniz altı kaynaklarının keşfi, deniz yatağı haritalaması ve çevresel araştırmalarda stratejik bir dönüşüm sağlamaktadır [36].

3.6 Bütünleşik Mimari Yaklaşımlar ve Operasyonel Yansımaları

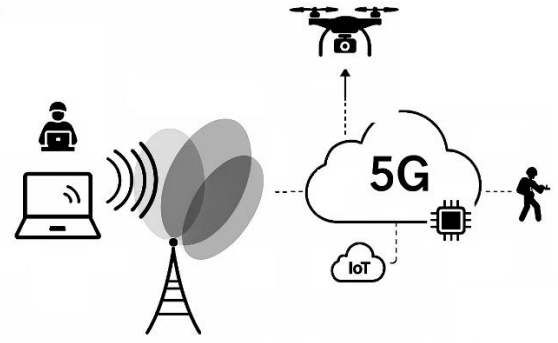
Günümüz savunma mimarisinde veri iletimi ve gömülü sistemler arasındaki ilişki, teknik bir entegrasyon meselesi olmaktan çıkıp operasyonel başarımın belirleyici faktörlerinden biri haline gelmiştir. 5G ve sonrası haberleşme protokollerinin sunduğu ultra düşük gecikme süresi, dinamik ağ yönetimi ve güvenilir kanal

mimarisi; sahada görev yapan gömülü sistemlerin performansını yeniden tanımlamaktadır [6, 12]. Askerî teknolojilerin giderek daha karmaşık hale gelmesiyle birlikte, sahadaki başarıyı belirleyen unsurlar donanım gücü yanı sıra veri iletim hızı ve enerji verimliliği gibi temel iletişim altyapılarına da bağlı hâle gelmiştir. Bu noktada, 5G teknolojisi ile gömülü sistemlerin entegrasyonu, modern savunma uygulamaları açısından çarpan etkisi yaratan bir dönüşüm potansiyeli sunmaktadır.

3.6.1 5G Destekli Mimari ve Veri İletimi

Klasik gömülü sistem mimarileri, çoğunlukla tekil görevleri yerine getirmeye odaklı, sınırlı işlem kapasitesi ve sabit veri aktarım protokolleriyle yapılandırılmıştır. Ancak 5G ile birlikte, bu sistemler artık çevik, görev odaklı ve karar destek sistemlerine entegre olabilen bir yapıya evrilmektedir [3]. Örneğin, bir İHA üzerinde yer alan ARM Cortex-M serisi bir işlemci, uçuş kontrolünü sağlamakla kalmaz; aynı zamanda LIDAR ve EO sensörlerinden gelen verileri işleyerek, URLLC destekli 5G çekirdek ağı üzerinden komuta merkezine anlık olarak iletebilir [6, 19].

Bu yeni nesil mimarilerde, ağ dilimleme yöntemi öne çıkmaktadır. Her bir görev tipi için ayrılmış haberleşme kanalları sayesinde, örneğin elektronik harp ile veri toplama görevleri aynı anda ve birbirini etkilemeden yürütülebilmektedir [4, 12]. Bu yapı, hem operasyonel esnekliği hem de sinyal güvenliğini artırmaktadır. Şekil 3'te sunulan bu mimari, 5G tabanlı askeri iletişim sistemlerinin operasyon sahasında nasıl yapılandırıldığını göstermektedir [38].



Şekil 3: 5G destekli askeri iletişim altyapısı.

Bu yapı içerisinde, İHA'lar üzerindeki sensörlerden toplanan ses, görüntü ve konum verileri; yerel gömülü sistemlerce işlenerek 5G çekirdek ağı üzerinden komuta kontrol merkezine yönlendirilir. Veriler, ara istasyonlar aracılığıyla aktarılırken, taktik seviyede görev yapan birimlerle eş zamanlı paylaşım ve yapay zekâ destekli karar destek sistemlerine entegrasyon sağlanır.

Bununla birlikte, beamforming, dinamik frekans atlama (DPH) ve dinamik frekans ve güç ayarlama (DFPA) gibi 5G teknikleri, sinyal yönlendirmesi ve frekans yönetimi açısından gömülü sistemlerin çevresel koşullara daha uyumlu hale gelmesini sağlamaktadır [6, 15].

3.6.2 5G Teknolojisi ile Gömülü Sistemlerde Enerji Verimliliği Optimizasyonu

Askeri platformlarda görev yapan gömülü sistemler; genellikle insansız araçlar, mobil sensör ağları ve elektronik harp sistemlerinde sınırlı enerji kaynaklarıyla çalıştığından, enerji verimliliği bu sistemlerin en kritik gereksinimlerinden biridir. 5G teknolojisi bu noktada, sadece yüksek performanslı veri iletim kapasitesi sunmakla kalmaz, aynı zamanda enerji yönetimini iyileştiren birçok teknik yenilik de barındırır. Özellikle URLLC özelliği, veri aktarım sürelerini minimuma indirerek

işlemcilerin ve RF modüllerinin aktif kalma süresini azaltır. Bu sayede, gömülü cihazların daha uzun süre düşük güç modlarında (sleep mode) çalışması sağlanır; bu da IoT tabanlı askeri uygulamalarda ciddi bir enerji tasarrufu sağlar. Ayrıca, görev türüne göre dinamik ağ yapılandırmasına imkân tanıyan ağ dilimleme özelliği, enerji kullanımını görev gereksinimlerine göre özelleştirme fırsatı sunar. Düşük bant genişliği gerektiren görevlerde düşük enerji tüketimiyle çalışan ağ dilimleri kullanılabilirken, yoğun veri gereksinimi olan görevlerde ise enerji artışı kısa süreli olarak optimize edilebilir.

Enerji verimliliği, donanım seviyesinde de sağlanmaktadır. Özellikle düşük güç tüketimli mikrodenetleyiciler (ARM Cortex-M serisi, RISC-V mimarileri) ile 5G modüllerinin entegrasyonu, sistemlerin görev süresini uzatmaktadır. Bu sistemlerde kullanılan dar bant IoT protokolleri (NB-IoT), enerji tüketimini daha da azaltmaktadır. Ek olarak, beamforming sayesinde yönlendirilmiş sinyal iletimi gerçekleştirilerek gereksiz enerji kayıplarının önüne geçilirken, DFPA tekniği ile cihazlar ortam koşullarına göre yayın gücünü ayarlayabilmekte; bu da hem sistem ömrünü artırmakta hem de düşük tespit edilebilirlik sağlamaktadır. Sonuç olarak, 5G destekli iletişim altyapıları, gömülü sistemlerin görev süresini uzatacak, operasyonel sürekliliği güçlendirecek ve lojistik destek ihtiyacını azaltacak şekilde enerji verimliliği sağlar. 6G ile birlikte bu yapıya kuantum güvenlik, yapay zekâ tabanlı enerji optimizasyonu ve biyometrik geri bildirim sistemleri gibi daha ileri düzey teknolojilerin entegre edilmesi beklenmektedir.

4. KAMU GÜVENLİĞİNDE 5G TEKNOLOJİLERİNİN KULLANIMI (USE OF 5G TECHNOLOGIES IN PUBLIC SECURITY)

5G teknolojisi, sadece bireysel iletişim alanında değil, kamu güvenliği ve şehir güvenliği uygulamalarında da devrim niteliğinde dönüşümler yaratmaktadır. Artan veri iletim hızı, ultra düşük gecikme süreleri ve yüksek bağlantı yoğunluğu gibi avantajları sayesinde, kamu kurumları özellikle güvenlik, acil durum yönetimi ve suç önleme alanlarında daha etkili çözümler geliştirebilmektedir. Bu bağlamda; yüz tanıma sistemlerinden akıllı şehir altyapılarına, gerçek zamanlı gözetim uygulamalarından yapay zekâ destekli karar sistemlerine kadar geniş bir yelpazede 5G destekli güvenlik teknolojileri ön plana çıkmaktadır. Bu bölümde, 5G teknolojisinin kamu güvenliğine yönelik sunduğu temel uygulama alanları sistematik bir şekilde ele alınmaktadır.

4.1 Yüz Tanıma Teknolojisinin Güvenlik Uygulamaları

Yüz tanıma teknolojisi, bireylerin fiziksel özelliklerini analiz ederek kimlik tespiti gerçekleştiren biyometrik bir güvenlik yaklaşımıdır. Ancak bu sistemlerin etkili biçimde çalışabilmesi için yüksek çözünürlüklü görüntü akışı, gerçek zamanlı veri işleme ve düşük gecikme sürelerine ihtiyaç duyulmaktadır. İşte bu noktada 5G teknolojisi, yüz tanıma sistemlerinin performansını radikal biçimde iyileştiren bir altyapı sunmaktadır [39]. Otomatik yüz tanıma sistemleri genel olarak üç temel aşamadan oluşur: (1) yüzün algılanması ve normalizasyonu, (2) özellik çıkarımı, (3) tanımlama veya doğrulama. İlk aşamada sistem, görüntüde bir ya da birden fazla yüz olup olmadığını tespit eder. Takip eden aşamalarda ise çıkarılan özellikler veri

tabanındaki bilinen yüzlerle karşılaştırılarak kimlik doğrulama gerçekleştirilir. Yüz tanımanın iki temel uygulaması tanımlama ve doğrulamadır. Tanımlama, bir test yüzünün veri tabanındaki yüzlerle eşleştirilmesini içerirken; doğrulama, bir test yüzünün belirli bir kimlikle eşleşip eşleşmediğini belirler. Bu süreçlerde korelasyon filtreleri (CF), evrişimli sinir ağları (CNN) ve k-en yakın komşu (K-NN) algoritmalarının etkili olduğu bilinmektedir [40]. Özellikle kamusal alanlarda kullanılan yüz tanıma sistemlerinde; 4K ve üzeri çözünürlükteki video verisinin sürekli olarak merkeze iletilmesi, bu verinin anlık olarak işlenerek şüpheli bireylerin eşleştirilmesi ve güvenlik ekiplerine bildirilmesi gibi işlemler, yüksek bant genişliği ve ultra düşük gecikme süresi gerektirir. 5G altyapısının sağladığı ≥ 1 Gbps veri aktarım hızı ve ≤ 1 ms gecikme süresi, bu tür uygulamalar için kritik eşiği aşmayı mümkün kılar.

Ayrıca; 5G'nin ağ dilimleme özelliği sayesinde, yüz tanıma sistemleri için özel ve yalıtılmış veri kanalları oluşturulabilir. Bu yapı, sistemlerin kalabalık alanlarda bile güvenilir biçimde çalışmasını sağlar. Örneğin, bir miting alanında hem sesli iletişim hem de yüz tanıma yapılması gereken bir senaryoda, ağ dilimleri görev önceliklerine göre kaynak tahsisi yaparak yüz tanıma sistemlerinin performansını düşürmeden çalışmasını sürdürür.

Ek olarak, 5G'nin kenar bilişim ile entegrasyonu, yüz tanıma sistemlerinin veriyi merkeze göndermeden yerel sunucular üzerinde analiz etmesine olanak tanır. Bu, hem veri güvenliğini artırmakta hem de anlık karar alma sürecini hızlandırmaktadır. Dolayısıyla, 5G altyapısı, yüz tanıma teknolojilerinin sadece hızını değil;

güvenliğini, ölçeklenebilirliğini ve operasyonel etkinliğini de artıran stratejik bir unsurdur.

4.2 Akıllı Şehir Güvenliği

Dünya nüfusunun yaklaşık %54'ü günümüzde şehirlerde yaşamaktadır ve bu oranın 2050 yılında %66'ya ulaşması beklenmektedir [41]. Bu hızlı kentleşme ve bilgi iletişim teknolojilerindeki gelişmeler, akıllı şehirlerin güvenlik altyapısının dönüşümünü zorunlu kılmaktadır. Akıllı şehir mimarileri genellikle üç katmandan oluşur: sensör katmanı, ağ veya işleme katmanı ve aktüatör katmanı [42]. Sensör katmanı; çevresel faktörleri, kameralardan elde edilen görüntüleri, RFID etiketleriyle takip edilen nesneleri ve çok sayıda veri kaynağını kapsar. Bu veriler, ağ katmanı aracılığıyla işlenir ve aktüatörlere yönlendirilir. Aktüatör katmanı ise çevresel müdahalelerde bulunur ve suç önleme gibi işlevsel tepkiler oluşturur [43-44].

Akıllı şehir güvenliği, sensörler, kameralar, ağ sistemleri ve yapay zekâ algoritmaları aracılığıyla şehir yaşamını daha güvenli, izlenebilir ve sürdürülebilir hale getirmeyi amaçlamaktadır. Bu sistemlerin etkili çalışabilmesi için yoğun veri akışı, kesintisiz bağlantı ve gerçek zamanlı yanıt mekanizmaları gerekir. 5G teknolojisi, bu gereksinimleri karşılamakla kalmaz, aynı zamanda akıllı şehir güvenliği sistemlerinin evrimsel gelişimine de olanak tanır [42, 45].

Öncelikle, 5G'nin 1 milyon cihaz/km² bağlantı yoğunluğu kapasitesi, şehir genelinde yerleştirilen sensör, kamera, dron, RFID modülü gibi IoT bileşenlerinin aynı anda ve gecikmesiz şekilde ağa bağlanmasına imkân tanır. Bu sayede güvenlik kameralarıyla alınan görüntüler,

kimyasal gaz sensörlerinden gelen veriler ve olay yerinden gelen acil çağrılar eş zamanlı olarak işlenebilir. 4G altyapılarında yaşanan ağ tıkanıklığı ve gecikme problemleri, 5G ile ortadan kalkar.

Ayrıca 5G'nin beamforming özelliği sayesinde, veri iletimi doğrudan hedef cihazlara yönlendirilerek sinyal verimliliği artırılır ve saldırılara karşı daha güvenli iletişim sağlanır. Şehir içi güvenlik birimlerinin hareketli olması (mobil karakollar, devriye dronları, otonom güvenlik araçları) düşünüldüğünde, bu özellik görev sürekliliği açısından belirleyicidir.

5G ayrıca kenar bilişim altyapısıyla, güvenlik verilerini merkezi sunucuya göndermeden yerel işlemeye olanak tanır. Örneğin, bir güvenlik kamerası, şüpheli hareketi tespit ettiğinde görüntüyü analiz edip yalnızca tehdit içeren veriyi merkeze gönderir. Bu, hem ağ yükünü azaltır hem de gizliliği artırır. Sonuç olarak, 5G teknolojisi; akıllı şehir güvenliğinde ölçeklenebilirlik, güvenlik, düşük maliyet ve gerçek zamanlı müdahale gibi temel ihtiyaçları karşılayan bütünsel bir altyapı sunmaktadır.

4.3 5G Destekli Kamu Güvenliği Kullanım Senaryoları

Kamu güvenliğinde 5G destekli sistemlerin kullanımı, hız ve bağlantı kalitesi açısı gibi olaylara anlık müdahale, yüksek çözünürlüklü izleme, yerel analiz kabiliyeti ve enerji verimliliği gibi birçok yönden stratejik avantaj sağlamaktadır [47].

İstihbarat, Gözetleme ve Keşif (ISR): 5G sayesinde sabit ve mobil gözetleme sistemlerinden gelen görüntülerin yüksek çözünürlükte, 4K+ kalitede, gecikmesiz biçimde aktarılması mümkün hâle gelir. Bu da olay

yerinde alınacak aksiyonların hızını doğrudan artırır.

Navigasyon ve Hareketlilik: Otonom kolluk araçları, 5G sayesinde gerçek zamanlı trafik verilerini analiz ederek en hızlı müdahale rotasını belirleyebilir. Ağ gecikmesinin ≤ 1 ms olması, komutların araç sistemine anında ulaşmasını sağlar.

Yangın Tespiti ve Müdahale: Akıllı sensör ağları, sıcaklık, duman ve gaz verilerini 5G ile merkeze iletir; bu sayede yangın erken aşamada tespit edilir ve acil müdahale birimleri yönlendirilir. Ayrıca yangın sahasındaki ekipler 5G ile sürekli bağlı kalabilir.

Arama-Kurtarma: Felaket bölgelerinde görev yapan dronlar ve kurtarma robotları, yüksek veri iletim kapasitesi sayesinde termal kamera görüntülerini merkeze aktarabilir. Bu sayede enkaz altı yaşam belirtileri ve benzeri acil öncelikli durumlar hızla analiz edilir.

Enerji Yönetimi ve Altyapı Güvenliği: Akıllı şebeke sistemleri, enerji kesintisi durumlarında alternatif kaynakları 5G ile entegre şekilde devreye alır. Ayrıca kritik altyapıların durumunu izleyerek sabotaj girişimlerine karşı erken uyarı sağlar [46].

Tüm bu senaryolarda 5G'nin sağladığı yüksek güvenilirlik, URLLC destekli anlık tepki süresi, çok katmanlı bağlantı, yüksek görüntü kalitesi ve dağıtık karar destek olanakları, kamu güvenliğinde dönüşüm yaratmaktadır. Özellikle elektronik harp veya afet ortamlarında ağ sürekliliği ve güvenli iletişim ihtiyacı göz önüne alındığında, 5G altyapısı kamu güvenliğinin geleceğinde vazgeçilmez bir bileşen olarak konumlanmaktadır.

4.4 Yapay Zekâ Destekli Kamu Güvenliği

5G altyapısı, yapay zekâ (YZ) destekli güvenlik sistemlerinde yeni bir çağ başlatmaktadır. Yüksek bant genişliği, düşük gecikme süresi ve güvenilir bağlantı olanakları sayesinde, gerçek zamanlı veri işleme ve karar verme süreçleri hızlanmaktadır. YZ destekli yüz tanıma sistemleri, otonom dronlar ve akıllı şehir kameraları, olaylara anlık müdahale kapasitesini

arttırırken; büyük veri analitiği kullanımı ile suç örüntüleri tespit edilebilir, önleyici güvenlik stratejileri geliştirilebilir. Bu teknoloji sayesinde hem halk güvenliği artırılmakta hem de kolluk kuvvetlerinin operasyonel etkinliği yeni bir seviyeye taşınmaktadır. Örnek olarak, 5G tabanlı kolluk ve dron gözetim sistemleri için performans kriterlerine yönelik değerlendirme tablo 1’de sunulmuştur [47].

Tablo 1: 5G tabanlı kolluk ve dron gözetim sistemleri için performans kriterleri.

Kriter	Açıklama	Hedef Değer / Beklenti
Gecikme Süresi	Uçtan uca iletişimdeki süre. Özellikle anlık müdahalelerde kritik	≤ 1 ms
Veri Aktarım Hızı	Video ve sensör verisinin aktarımı için gerekli bant genişliği	≥ 1 Gbps
Cihaz Yoğunluğu	1 km ² alanda desteklenebilecek bağlantılı cihaz (IoT, dron, sensör vb.)	≥ 1 milyon cihaz/km ²
Görüntü Aktarım Kalitesi	Gözetim videolarının çözünürlük ve akıcılığı.	4K çözünürlük, 30+ fps
Enerji Verimliliği	Dron ve mobil cihazların uzun görev süresi için düşük enerji tüketimi	Optimize edilmiş, düşük tüketim
Ağ Kesintisine Dayanıklılık	Elektronik harp ya da ağ sıklıkta sistem devamlılığı	%99,999 süreklilik (5-9’lar seviyesi)
Konumlama Hassasiyeti	Dronların ve olay noktalarının konum takibi.	< 1 metre doğruluk
Yapay Zekâ Yanıt Süresi	Video/sensör analizinde karar verme süresi.	Gerçek zamanlı / < 500 ms
Veri Güvenliği	İletilen verinin şifrelenmesi ve saldırılara karşı korunması.	Uçtan uca şifreleme, 256-bit AES
İzleme Alanı Kapsamı	Dronlar veya sabit sistemlerle izlenebilen alan büyüklüğü.	Geniş alan – 2 km ² ve üzeri

5. ELEKTRONİK HARP ORTAMLARINDA 5G VE ÖTESİ SİSTEMLERİNİN DAYANIKLILIĞI (DURABILITY OF 5G AND BEYOND SYSTEMS IN ELECTRONIC WARFARE)

Teknolojideki hızlı gelişmeler, askeri ve güvenlik operasyonlarında dost unsurların lehine avantajlar sağladığı gibi, bu teknolojilere karşı geliştirilen tehditlerin de aynı oranda artmasına yol açmaktadır. Özellikle EH ortamlarında, haberleşmenin tespit edilmesi, dinlenmesi, karıştırılması ya da tamamen engellenmesi, dost birliklerin operasyonel kabiliyetini ciddi ölçüde

tehdit eden bir durum haline gelmiştir [48-49]. Bu durum, görev başarısını sekteye uğratmakta ve zaman açısından kritik olan müdahale süreçlerinde ciddi aksamalara neden olabilmektedir.

Bu tehdit ortamında, güvenli, esnek ve kesintisiz haberleşme altyapılarının sağlanması; kolluk kuvvetleri ve silahlı kuvvetler açısından görev başarısının temel unsurlarından biri haline gelmiştir. Bu bağlamda, 5G ve ötesi (5G/6G) haberleşme teknolojileri, sundukları ileri düzey

ağ mimarileri ve güvenlik odaklı protokol yapıları sayesinde EH tehditlerini minimize edebilme potansiyeline sahiptir [50-51].

Özellikle 5G teknolojisinin sunduğu şu yetenekler öne çıkmaktadır:

-Yönlendirilebilir anten sistemleri (beamforming): Sinyal iletimini hedefe odaklayarak algılanabilirliği azaltır.

-Düşük enerji izi: Düşman unsur tarafından tespiti zorlaştırır.

-Ultra düşük gecikme süreleri: Karar alma ve tepki sürelerini hızlandırır.

-Ağ dilimleme: Görev-kritik iletişim kanallarının izole edilmesini ve önceliklendirilmesini sağlar [52].

Bu özellikler, düşman dinleme veya karıştırma girişimlerine karşı üstünlük sağlamanın ötesinde, zamanla yarışan operasyonlarda dost unsurların iletişim sürekliliğini garanti altına alarak, kritik karar destek süreçlerinin aksamadan yürütülmesini mümkün kılar.

Ek olarak, aldatma ve yönlendirme taktikleri, 5G altyapılarında geliştirilebilecek savunma yöntemleri arasında yer almaktadır. Örneğin, düşman unsurların belirli sinyal kanallarına yönlendirilmesi ve bu kanallarda “sahte trafik” oluşturulması, saldırıların etkisizleştirilmesini sağlayabilir [53]. Ancak, aynı teknolojilere sahip düşman unsurların da benzer yöntemlerle saldırı gerçekleştirilmesi göz önünde bulundurularak, bu teknolojik rekabet ortamında sürekli yenilikçi çözümler geliştirilmesi gerekmektedir.

6G ile birlikte gelecek olan kuantum şifreleme destekli iletişim protokolleri, yapay zekâ tabanlı spektrum optimizasyonu ve dinamik frekans atlamalı haberleşme sistemleri, sinyal güvenliğini çok daha ileri bir seviyeye taşıyacaktır. Bu

teknolojiler sayesinde, sinyalin yönü, içeriği ve taşıyıcı bilgisi düşman unsurlar tarafından tespit edilemeden veri aktarımı mümkün olacak; bu da, özellikle birlik koordinasyonu, merkezi komuta ile iletişim ve gerçek zamanlı istihbarat paylaşımı açısından stratejik avantaj sağlayacaktır [54].

6. 5G TEKNOLOJİSİNİN KULLANIM ALANLARI VE GELECEKTEKİ UYGULAMALAR (USAGE AREAS OF 5G TECHNOLOGY AND FUTURE APPLICATIONS)

5G teknolojisi, yalnızca mobil iletişim alanında değil; aynı zamanda güvenlik, savunma, sağlık, ulaşım ve lojistik gibi çok çeşitli sektörlerde dönüşüm yaratma potansiyeliyle dikkat çekmektedir. Ultra hızlı veri iletimi, düşük gecikme süresi ve yüksek bağlantı yoğunluğu gibi avantajları, bu teknolojiyi kritik görevlerin yürütüldüğü operasyonel ortamlarda vazgeçilmez hale getirmektedir. Özellikle kamu güvenliği ve askeri uygulamalar bağlamında, 5G altyapısıyla desteklenen yenilikçi projeler, sahadaki karar alma süreçlerinin hızlandırılması, kaynak yönetiminin iyileştirilmesi ve tehditlerin daha etkin şekilde bertaraf edilmesi gibi stratejik katkılar sunmaktadır.

Bu bölümde, hem halihazırda uygulamaya alınmış özgün projelere hem de gelecekteki kullanım senaryolarına yönelik öncü araştırma alanlarına odaklanılarak, 5G teknolojisinin güvenlik ve savunma perspektifinden sunduğu imkânlar kapsamlı biçimde ele alınmaktadır. 5G ve 6G teknolojilerinin askeri ve kolluk kullanımı açısından karşılaştırılması Tablo 2’de sunulmuştur.

6.1 Yenilikçi Projeler ve Uygulamalar

5G ve ötesi teknolojiler, sundukları yüksek veri hızı, ultra düşük gecikme süresi ve geniş bant

kapasitesi sayesinde, hem kamu güvenliği hem de askeri operasyonlar için yenilikçi çözümlerin geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır. Aşağıda, bu potansiyeli somutlaştıran ve literatürde yer alan bazı güncel projelere yer verilmiştir.

Güney Kore'de yürütülen “Akıllı Donanma Limanı” projesi kapsamında, Deniz Kuvvetleri için özel bir 5G altyapısı kurulmuştur. Proje, mürettebatsız araç yönetimi, cephanelik ve mühimmat deposu kontrolü gibi onüç ayrı sistemi içeren bir Bilgi ve İletişim Teknolojisi (ICT) altyapısıyla donatılmıştır. Özel 5G çözümleri ile ultra yüksek hızlı ve hiper bağlantılı iletişim olanakları sayesinde, güvenlik artırılmış ve zafiyetler en aza indirilmiştir [55].

Amerikan DARPA tarafından yürütülen SHIELD programı, savaş alanında yaralanan askerler için kan dolaşımındaki patojenleri temizleyebilen profilaktik tedaviler geliştirmeyi hedeflemektedir. Aynı kurumun “Spectral Shield” adlı bir başka girişiminde ise, 5G'nin düşük gecikme ve geniş frekans desteğinden yararlanılarak düşman iletişim ağlarını etkisiz hale getirebilen, aynı zamanda dost ağları koruyan adaptif bir elektronik harp sistemi geliştirilmiştir [56].

NATO, 5G'nin askeri uygulamalarına yönelik çeşitli projelerde, özellikle komuta-kontrol, haberleşme ve lojistik alanlarında bu teknolojiyi entegre etmektedir. IoT cihazları ve yapay zekâ analitiği ile desteklenen akıllı lojistik uygulamaları sayesinde, sahadaki envanter yönetimi ve malzeme takibi gerçek zamanlı olarak yapılabilmektedir. Sensör donanımlı kargo araçları, sevkiyat sürecinde anlık veri iletimi sağlayarak lojistik güvenliği artırmaktadır [57].

Avrupa Savunma Fonu destekli bir projede, 5G tabanlı otonom İHA ağları geliştirilmiştir. Bu sistemler, eş zamanlı keşif, gözetleme ve lojistik operasyonlar yürütmekte; afet bölgelerinde kurtarma operasyonlarında enkaz altı tespit gibi görevlerde insan gücüne destek sunmaktadır.

Çin'in Shenzhen şehrinde, 5G destekli bir akıllı trafik yönetimi sistemi geliştirilmiş olup; trafik akışını optimize etme, acil durum müdahalelerini kolaylaştırma ve güvenlik ihlallerini önlemeye yönelik yenilikçi çözümler uygulanmaktadır. Sistem, CCTV, sensörler ve araç içi iletişim birimleri ile entegre çalışmakta; yüz tanıma ve plaka analiz teknolojileri sayesinde suçluların hızlı şekilde tespit edilmesine olanak tanımaktadır.

İngiltere Savunma Bakanlığı, 5G altyapısını sanal gerçeklik (VR) ve artırılmış gerçeklik (AR) sistemleriyle birleştirerek askeri eğitim ortamlarında önemli bir dönüşüm gerçekleştirmiştir. Askerler, sanal savaş senaryolarına anlık olarak adapte olabilmekte; bu da hem maliyet hem de operasyonel verimlilik açısından büyük kazanımlar sağlamaktadır.

Güney Kore'de hayata geçirilen bir başka projede, 5G altyapılı akıllı ambulans sistemleri kullanarak olay yerinden hastaneye anlık veri aktarımı yapılmaktadır. Bu sistemler, doktorların hasta hakkında olay yerindeyken karar vermesine ve yönlendirme yapmasına olanak tanımaktadır. Ambulans içerisindeki medikal cihazlardan elde edilen veriler, gecikmesiz olarak hastane sistemlerine iletilerek hızlı ve etkili müdahale sağlanmaktadır.

Tablo 2: 5G ve 6G teknolojilerinin askerî ve kolluk kullanımı açısından karşılaştırılması.

Kriter	5G Teknolojisi	6G Teknolojisi (Beklenen)	Askerî Katkı Açıklaması
Veri Aktarım Hızı	1–10 Gbps	100 Gbps – 1 Tbps	Yüksek çözünürlüklü haritalama, anlık görüntü aktarımı ve komuta yeteneği.
Gecikme Süresi	Yaklaşık 1 milisaniye	≤ 0.1 milisaniye	Kritik müdahale ve otonom silah sistemlerinde gerçek zamanlı tepki.
Bağlantı Yoğunluğu	1 milyon cihaz/km ²	10 milyon cihaz/km ²	Yoğun operasyon sahalarında entegre sistem ağı (İHA, İKA, sensör).
Konumlama Hassasiyeti	< 1 metre	< 1 santimetre	Mikrotaktik yönlendirme, hassas mühimmat ile hedef imhası.
Enerji Verimliliği	Düşük güç modları ile optimizasyon	Yapay zekâ ile enerji tüketiminin görev bazlı uyarlanması	Uzun süreli keşif/gözetim görevlerinde pil ömrünün artırılması.
Ağ Mimarisi	Beamforming, Ağ dilimleme (network slicing)	Holografik beamforming, akıllı yüzey destekli yönlendirme	Düşman elektronik harp faaliyetlerine karşı daha esnek, gizli ve güvenli ağ yapıları.
Veri Güvenliği	Uçtan uca şifreleme, 256-bit AES	Kuantum şifreleme, blockchain tabanlı güvenlik	Kritik verilerin yüksek güvenlikle iletilmesi ve saldırılara karşı üst düzey koruma.
Yapay Zekâ Entegrasyonu	Görev temelli analiz ve destek sistemleri	Tahmine dayalı karar sistemleri, tam otonom görev yapısı	Komuta merkezine ihtiyaç duymadan bağımsız taktik kararlar alınabilmesi.
İletişim Ortamı	Karasal baz istasyonları, uydu destekli	Uydu, yüksek irtifa platformları (HAPS), akıllı reflektör yüzeyler	Coğrafi kısıtlardan bağımsız kesintisiz haberleşme altyapısı.
Elektronik Harp Direnci	Beamforming ve sinyal daraltma teknikleri	Dinamik frekans atlama, yapay zekâ ile yönlendirme	Düşman karıştırımlarına karşı üstün sinyal gizleme ve yedekleme stratejileri.

6.2 5G'nin Savunma ve Kamu Güvenliğindeki Gelecekteki Kullanım Potansiyeline Dair Araştırma Alanları

5G ve ötesi iletişim teknolojileri, yalnızca yüksek veri aktarım hızına değil, aynı zamanda görev-kritik güvenlik senaryolarının yapısal dönüşümüne olanak tanıyan stratejik altyapılar sunar. Bu potansiyelin etkili, güvenli ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılabilmesi için aşağıda belirtilen disiplinler arası ve uygulama bütünlüklü araştırma alanlarına odaklanmak hayati önem taşımaktadır.

6.2.1 Siber Güvenlik ve 5G Entegrasyonu

5G ağlarının yüksek bağlantı yoğunluğu ve ultra düşük gecikme özellikleri, siber saldırılara karşı geniş bir saldırı yüzeyi oluşturur. Kamu güvenliği

ve savunma ortamlarında kullanılan uçtan uca bağlantılar, DDoS, man-in-the-middle ve zararlı yazılım enjeksiyonları gibi saldırılar açısından kritik riskler altındadır. Araştırma vurguları aşağıdaki konularla öne çıkmaktadır.

- 5G çekirdek ağlarında yapay zekâ temelli tehdit tespit sistemlerinin geliştirilmesi
- Ağ dilimleme (network slicing) teknolojilerinde dilim izolasyonunun sağlamaştırılması
- 5G mimarisine quantum-safe şifreleme protokollerinin entegrasyonu

Jorquera Valero ve arkadaşları tarafından önerilen bir güvenlik ve güven çerçevesi, 5G çoklu alanlarda blockchain ve makine öğrenimi

stratejilerini birleştirerek güvenliğini artırmayı hedeflemektedir [58].

6.2.2 Otonom Sistemler ve Yapay Zekâ Tabanlı Koordinasyon

5G'nin URLLC ve kenar bilişim olanakları, kara, hava ve deniz platformlarının gerçek zamanlı karar alma süreçlerini destekler. Gelecekteki çalışmalar, otonom sistemlerin birbirleriyle koordineli çalışmasını sağlayan kolektif görev mimarilerine odaklanmalıdır. Araştırma vurguları aşağıdaki konularla öne çıkmaktadır.

- Otonom sistemler arasında 5G üzerinden eş zamanlı karar senkronizasyonu
- Uçtan uca AI ile görev planlaması
- Merkezi kontrolü minimize eden dağıtık karar verme mekanizmaları

5G-DRIVE projesinde gerçekleştirilen V2X çalışmaları, araçlar arasında 5G aracılığıyla senkronize karar mekanizmalarını test ederek otonom sistemlerin koordineli görev yürütmesine dair bulgular sunmaktadır [59].

6.2.3 Akıllı Şehir Güvenliği ve Olay Tahmini

5G'nin çok katmanlı bağlantı kapasitesi; şehir genelindeki kameraların, sensörlerin ve IoT birimlerinin eşzamanlı çalışmasını mümkün kılar. Bu altyapının sürdürülebilirliği için yerel yönetim sistemlerine entegre karar destek mekanizmaları gereklidir. Araştırma vurguları aşağıdaki konularla öne çıkmaktadır.

- 5G destekli gözetim sistemlerinde AI ile olay tahmin kapasitesinin artırılması
- Acil durumlara yönelik otomatik müdahale protokolleri
- Sosyal davranış temelli suç örüntüsü analitiği

5GENESIS projesinin Malaga denemeleri, 5G destekli CCTV sistemleri ve AI analizleri ile trafik ve davranış örüntülerini gerçek zamanlı olarak analiz ederek akıllı şehir güvenliğine katkı sağlamıştır [60].

6.2.4 Uydu-5G Entegrasyonu

Karasal altyapının yeterli olmadığı kırsal ve afet bölgelerinde, 5G ile uydu iletişiminin entegrasyonu kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda hibrit ağ yapılarına yönelik modeller gereklidir. Araştırma vurguları aşağıdaki konularla öne çıkmaktadır.

- LEO uyduların 5G ağ geçidi olarak kullanımı
- Uydu bazlı ağ dilimleme senaryoları
- Gecikmeyi minimize eden hibrit (uydu + 5G) modeller

5G-EMERGE girişimi, ESA destekli bir proje olup belirli coğrafyalarda 5G içeriğinin uydu aracılığıyla iletimini ve entegrasyonunu başarı ile test etmiştir [61].

6.2.5 VR/AR ile Askeri Eğitim ve Simülasyon

5G'nin düşük gecikmesi ve yüksek bant genişliği, sanal ve artırılmış gerçeklik temelli eğitim sistemlerinin görev öncesi simülasyonlarda etkinliğini artırır. Araştırma vurguları aşağıdaki konularla öne çıkmaktadır.

- VR temelli eğitim senaryolarında 5G performans analizleri
- Gerçek zamanlı davranış analizlerine dayalı kişiselleştirilmiş eğitim
- Çoklu katılımcılı kolektif eğitim senaryoları

K-Defense XR Platformu, 5G tabanlı VR senaryolar ile askeri eğitimde gerçek zamanlı etkileşim ve analiz olanakları sunarak bu yaklaşımın uygulanabilirliğini ortaya koymuştur [62].

7. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

5G ve ötesi elektronik haberleşme teknolojileri, sundukları düşük gecikme süresi, yüksek veri iletim hızı ve geniş bağlantı kapasitesi ile yalnızca bir iletişim devrimi değil, aynı zamanda kolluk kuvvetleri ve askeri uygulamalar açısından derin yapısal bir dönüşüm sürecinin kapısını aralamaktadır. Bu teknolojiler, operasyonel verimliliği artırmakta; gerçek zamanlı karar alma süreçlerine hız ve doğruluk kazandırmaktadır. Özellikle yapay zekâ destekli sistemlerle, IoT uygulamaları ve otonom platformlarla sağlanan entegrasyon sayesinde, esnek, uyarlanabilir ve görev odaklı çözümler geliştirilmesi mümkün hale gelmiştir.

Güvenlik güçleri açısından 5G'nin etkisi, yalnızca teknik kapasitenin artışıyla sınırlı kalmayıp, stratejik ve operasyonel düzeyde de paradigma değişimini beraberinde getirmektedir. Kolluk kuvvetleri açısından daha etkili suç önleme ve müdahale kapasitesi sağlarken; askeri birlikler için ise gelişmiş elektronik harp kabiliyetleri, hassas güdümlü sistemleri ve ileri düzey lojistik yönetim yetenekleri sunmaktadır. Bununla birlikte, siber güvenlik tehditleri, yüksek maliyetli altyapı ihtiyaçları ve çok bileşenli entegrasyon süreçleri gibi yapısal zorluklar da dikkate alınması gereken temel başlıklardır.

Bu dönüşümden maksimum fayda sağlanabilmesi için, yalnızca teknik değil stratejik bir planlama yaklaşımı da benimsenmelidir. Güvenlik güçlerinin ihtiyaçlarına özel çözümler geliştirilmesi, altyapı yatırımlarının doğru yönlendirilmesi, insan kaynağının bu dönüşüme uyum sağlayacak şekilde eğitilmesi ve siber tehditlere karşı sürekli güncellenen koruma protokolleri oluşturulması büyük önem

taşımaktadır. Kamu-özel sektör iş birliklerinin artırılması ve bu süreçte uluslararası standartların ve etik ilkelerin dikkate alınması, teknolojinin güvenli, sürdürülebilir ve bütüncül biçimde uygulanmasını sağlayacaktır.

Akademik perspektiften bakıldığında, 5G ve ötesi teknolojilerin savunma ve güvenlik alanındaki etkilerinin çok boyutlu olarak incelenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda; etik, ekonomik sürdürülebilirlik, veri gizliliği ve siber güvenlik gibi konular, gelecekteki disiplinler arası araştırmaların temel alanlarını oluşturmaktadır. Ayrıca, pilot uygulamalardan elde edilecek saha verileri ve etki analizleri, teknolojinin somut faydalarının anlaşılmasını kolaylaştıracak ve politika geliştirme süreçlerine katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, 5G ve ötesi elektronik haberleşme teknolojileri, kamu güvenliği ve askeri stratejilerin şekillenmesinde belirleyici bir rol oynamaya adaydır. Bu potansiyelin başarıyla hayata geçirilebilmesi, yalnızca teknolojik yeniliklerin uygulanmasıyla değil, aynı zamanda bu yeniliklerin sosyal, ekonomik ve etik boyutlarıyla birlikte değerlendirilmesiyle mümkündür. Doğru planlama, bütüncül uygulama ve sürdürülebilir iş birlikleri sayesinde, 5G ve ötesi teknolojiler geleceğin daha güvenli, daha etkin ve daha dirençli bir savunma altyapısının inşasına öncülük edecektir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu araştırma hiçbir dış finansman almamıştır.

YAZAR KATKILARI (AUTHOR CONTRIBUTIONS)

Kazım DURAKLAR: Kavramsal tasarım, araştırma, görselleştirme, yazma ve düzenleme.

Vedat YILMAZ: Kavramsal tasarım, araştırma, kaynaklar, yazma-gözden geçirme.

ÇIKAR ÇATIŞMALARI (CONFLICTS OF INTEREST)

Yazarlar, herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. Bhardwaj, "5G for military communications," *Procedia Computer Science*, vol. 171, pp. 2665–2674, 2020.
- [2] J. Liao and X. Ou, "5G military application scenarios and private network architectures," in *Proc. 2020 IEEE Int. Conf. Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA)*, Aug. 2020, pp. 726–732.
- [3] S. Sicari, A. Rizzardi, and A. Coen-Porisini, "5G in the internet of things era: An overview on security and privacy challenges," *Computer Networks*, vol. 179, p. 107345, 2020.
- [4] J. Śliwa and M. Suchański, "Security threats and countermeasures in military 5G systems," in *Proc. 2022 24th Int. Microwave and Radar Conf. (MIKON)*, Sep. 2022, pp. 1–6.
- [5] D. Zmysłowski, P. Skokowski, K. Malon, K. Maślanka, and J. M. Kelner, "Naval use cases of 5G technology," *TransNav: Int. J. on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 17, no. 3, 2023.
- [6] U.S. Department of Homeland Security, *Mapping of 5G Technologies and Use Cases to DHS S&T Customer Needs*. Science and Technology Directorate, 2021. [Online]. https://www.dhs.gov/sites/default/files/publications/5g_mapping_may2021_0.pdf (Erişim: 03 Tem. 2025).
- [7] K. K. Samanta, "Cost-Effective Technologies for Next-Generation System on Package: Multilayer Transmission Lines and Interconnects for 5G and Millimeter-Wave," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 23, no. 8, pp. 50–65, 2022.
- [8] A. Kaur and S. Gupta, "A complementary Sierpinski gasket fractal antenna array for wireless MIMO portable devices," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 61, no. 2, pp. 436–442, 2019.
- [9] L. E. Milner et al., "A 25 to 45 GHz SiGe receiver MMIC," in *Proc. 2016 11th European Microwave Integrated Circuits Conf. (EuMIC)*, Oct. 2016, pp. 548–551.
- [10] A. Mohammed, H. Nahom, A. Tewodros, Y. Habtamu, and G. Hayelom, "Deep reinforcement learning for computation offloading and resource allocation in blockchain-based multi-UAV-enabled mobile edge computing," in *Proc. 2020 17th Int. Computer Conf. on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP)*, Dec. 2020, pp. 295–299.
- [11] G. Velusamy and R. Lent, "Delay-Packet-Loss-Optimized Distributed Routing Using Spiking Neural Network in Delay-Tolerant Networking," *Sensors*, vol. 23, no. 1, p. 310, 2022.
- [12] R. Bajracharya, R. Shrestha, S. A. Hassan, H. Jung, and H. Shin, "5G and beyond private military communication: Trend, requirements, challenges and enablers," *IEEE Access*, 2023.
- [13] A. Özduman, G. Ö. K. Başak, and H. A. D. İ. Gökçen, "Mobil telefon kullanıcılarının mobil bağımlılık durumu ve 5G teknolojisi kabullenme niyeti modellerinin geliştirilmesi," *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, vol. 13, no. 3, pp. 269–288, 2020.
- [14] G. R. Patil and P. S. Wankhade, "5G wireless technology," *Int. J. Comput. Sci. Mobile Comput.*, vol. 3, no. 10, pp. 203–207, 2014.
- [15] H. A. Kholidy, "Dynamic network slicing orchestration in open 5G networks using multi-criteria decision making and secure federated learning techniques," *Cluster Computing*, 2025.
- [16] C. Barz et al., "Enabling adaptive communications at the tactical edge," in *Proc. MILCOM 2022—IEEE Military Communications Conf.*, Nov. 2022, pp. 1038–1044.

- [17] K. Demertzis, P. Kikiras, and L. Iliadis, "A blockchained secure and integrity-preserved architecture for military logistics operations," in *Int. Conf. on Engineering Applications of Neural Networks*, Cham, Switzerland: Springer, 2022, pp. 271–283.
- [18] R. C. Voicu and Y. Chang, "Cooperative networking using passive discovery for dynamic environments," in *Proc. 2022 Int. Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, May 2022, pp. 1279–1284.
- [19] M. A. Asar and F. K. Ail, "Review of artillery smart ammunition," in *The Int. Undergraduate Research Conf.*, vol. 6, no. 6, pp. 1–6, Sep. 2022.
- [20] U. Rubin, *Israel and the Precision-Guided Missile Threat. Perspectives Paper*, no. 1607, 2020.
- [21] D. Domoń, S. Duda, and M. Łabno, "PILICA anti-aircraft rocket-artillery system: a V-SHROAD system," *Problemy Mechatroniki: Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa*, vol. 11, no. 1(39), pp. 103–112, 2020.
- [22] A. G. Bruzzone and M. Massei, "Simulation-based military training," in *Guide to Simulation-Based Disciplines: Advancing Our Computational Future*, 2017, pp. 315–361.
- [23] S. Robinson, "Modes of simulation practice: Approaches to business and military simulation," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 10, no. 8, pp. 513–523, 2002.
- [24] V. G. Goecks et al., "On games and simulators as a platform for development of artificial intelligence for command and control," *The Journal of Defense Modeling and Simulation*, vol. 20, no. 4, pp. 495–508, 2023.
- [25] X. Liu, J. Zhang, G. Hou, and Z. Wang, "Virtual reality and its application in military," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 170, p. 032155, Jul. 2018.
- [26] A. Lele, "Virtual reality and its military utility," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 4, pp. 17–26, 2013.
- [27] G. Udeanu, A. Dobrescu, and M. Oltean, "Unmanned aerial vehicle in military operations," *Sci. Res. Educ. Air Force*, vol. 18, no. 1, pp. 199–206, 2016.
- [28] J. Pokorny et al., "Prototype design and experimental evaluation of autonomous collaborative communication system for emerging maritime use cases," *Sensors*, vol. 21, no. 11, p. 3871, 2021. doi: 10.3390/s21113871.
- [29] P. Mehta, R. Gupta, and S. Tanwar, "Blockchain envisioned UAV networks: Challenges, solutions, and comparisons," *Computer Communications*, vol. 151, pp. 518–538, 2020.
- [30] T. Lagkas, V. Argyriou, S. Bibi, and P. Sarigiannidis, "UAV IoT framework views and challenges: Towards protecting drones as 'Things'," *Sensors*, vol. 18, no. 11, p. 4015, 2018.
- [31] S. A. H. Mohsan, M. A. Khan, F. Noor, I. Ullah, and M. H. Alsharif, "Towards the unmanned aerial vehicles (UAVs): A comprehensive review," *Drones*, vol. 6, no. 6, p. 147, 2022.
- [32] J. Ni, J. Hu, and C. Xiang, "A review for design and dynamics control of unmanned ground vehicle," *Proc. IMechE Part D: J. Automobile Eng.*, vol. 235, no. 4, pp. 1084–1100, 2021.
- [33] C. Barrera, I. Padron, F. S. Luis, and O. Llinas, "Trends and challenges in unmanned surface vehicles (USV): From survey to shipping," *TransNav: Int. J. on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 15, 2021.
- [34] "SEA-KIT: Complete First ever International Commercial Unmanned Transit," *Ocean News & Technology*. [Online]. <http://www.oceannews.com> (Erişim: 05 Tem. 2025).
- [35] "Ocean Infinity: Armada Fleet." [Online]. <https://oceaninfinity.com/marine-robotics/> (Erişim: 06 Tem. 2025).
- [36] Z. Khosravi et al., "Designing high-speed directional communication capabilities for unmanned surface vehicles," in *Proc. 2019 16th*

Int. Symp. Wireless Communication Systems (ISWCS), Aug. 2019, pp. 651–655.

[37] M. AnkurBansal, A. Sharma, and A. Gupta, “A review paper on facial recognition,” *Int. J. Recent Innov. Trends Comput. Commun. (IJRITCC)*, vol. 1, no. 4, pp. 224–228, 2013.

[38] A. Portilla-Figueras, S. Llopis-Sánchez, S. Jiménez-Fernández, and S. Salcedo-Sanz, “Examining 5G technology-based applications for military communications,” in *ESORICS 2022 International Workshops*, Cham, Switzerland: Springer, 2022, pp. 433–445. doi: 10.1007/978-3-031-25460-4_26.

[39] I. Adjabi, A. Ouahabi, A. Benzaoui, and A. Taleb-Ahmed, “Past, present, and future of face recognition: A review,” *Electronics*, vol. 9, no. 8, p. 1188, 2020.

[40] Y. Kortli, M. Jridi, A. Al Falou, and M. Atri, “Face recognition systems: A survey,” *Sensors*, vol. 20, no. 2, p. 342, 2020.

[41] K. Ahmad et al., “Developing future human-centered smart cities: Critical analysis of smart city security, data management, and ethical challenges,” *Computer Science Review*, vol. 43, p. 100452, 2022.

[42] L. Filipponi et al., “Smart city. An event driven architecture for monitoring public spaces with heterogeneous sensors,” in *Proc. 2010 Fourth Int. Conf. on Sensor Technologies and Applications*, 2010.

[43] A. Gaur, B. Scotney, G. Parr, and S. McClean, “Smart city architecture and its applications based on IoT,” *Procedia Computer Science*, vol. 52, pp. 1089–1094, 2015.

[44] K. Zhang et al., “Security and privacy in smart city applications: Challenges and solutions,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 1, pp. 122–129, 2017.

[45] J. Laufs, H. Borrión, and B. Bradford, “Security and the smart city: A systematic review,” *Sustainable Cities and Society*, vol. 55, p. 102023, 2020.

[46] C. K. Toh, “Security for smart cities,” *IET Smart Cities*, vol. 2, no. 2, pp. 95–104, 2020.

[47] R. Bajracharya, R. Shrestha, S. A. Hassan, H. Jung, and H. Shin, “5G and beyond private military communication: Trend, requirements, challenges and enablers,” *IEEE Access*, 2023.

[48] F. Deruelle, “Microwave radiofrequencies, 5G, 6G, graphene nanomaterials: Technologies used in neurological warfare,” *Surgical Neurology International*, vol. 15, p. 439, 2024.

[49] Z. M. Miličević and Z. S. Bojković, “Review of 5G and 6G applications for mobile wireless communication in the military environment,” *Vojnotehnički glasnik/Military Technical Courier*, vol. 72, no. 1, pp. 435–451, 2024.

[50] H. Alakoca et al., “Metasurface manipulation attacks: Potential security threats of RIS-aided 6G communications,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 61, no. 1, pp. 24–30, 2022.

[51] A. Portilla-Figueras, S. Llopis-Sánchez, S. Jiménez-Fernández, and S. Salcedo-Sanz, “Examining 5G technology-based applications for military communications,” in *European Symposium on Research in Computer Security*, Cham, Switzerland: Springer, Sep. 2022, pp. 449–465.

[52] P. Lohan, B. Kantarci, M. A. Ferrag, N. Tihanyi, and Y. Shi, “From 5G to 6G networks: A survey on AI-based jamming and interference detection and mitigation,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2024.

[53] L. Bastos, G. Capela, A. Koprulu, and G. Elzinga, “Potential of 5G technologies for military application,” in *Proc. 2021 Int. Conf. on Military Communication and Information Systems (ICMCIS)*, May 2021, pp. 1–8.

[54] R. Bajracharya, R. Shrestha, S. A. Hassan, H. Jung, and H. Shin, “5G and beyond private military communication: Trend, requirements, challenges and enablers,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 83996–84012, 2023.

[55] “Akıllı Donanma Limanı’nın 5G altyapısını kuracak,” *Analiz Gazetesi*. [Online]. <https://www.analizgazetesi.com.tr/haber/akilli-donanma-limaninin-5g-altyapisini-kuracak-7704/> (Erişim: 08 Tem. 2025).

[56] “Synthetic Hemo-technologies to Locate and Disinfect (SHIELD)—DARPA.” [Online]. <https://www.darpa.mil/program/SHIELD> (Erişim: 09 Tem. 2025).

[57] “NATO ve 5G,” NATO Dergisi. [Online]. <https://www.nato.int/docu/review/tr/articles/2020/09/30/nato-ve-5g/index.html> (Erişim: 10 Tem. 2025).

[58] J. M. Jorquera Valero et al., “Design of a security and trust framework for 5G multi-domain scenarios,” J. Netw. Syst. Manage., vol. 30, no. 7, 2022. doi: 10.1007/s10922-021-09623-7.

[59] 5G-DRIVE: Final Report of V2X Trials, Deliverable D4.4, 5G-DRIVE Project, EU-China 5G Collaboration, 2021. [Online]. https://5g-drive.eu/wp-content/uploads/2021/08/5GD-D4.4_Final-report-of-V2X-trials.pdf (Erişim: 12 Tem. 2025).

[60] 5GENESIS D7.10 – Innovation and Exploitation Activities Report, 5GENESIS Consortium, 2021. [Online]. https://5genesis.eu/wp-content/uploads/2022/01/5GENESIS_D7.10_v1.0.pdf (Erişim: 14 Tem. 2025).

[61] 5G-EMERGE Technology Overview, European Space Agency. [Online]. <https://www.5g-emerge.com/technology> (Erişim: 16 Tem. 2025).

[62] K-Defense XR Platform Capabilities, Biomojo. [Online]. <https://biomojo.com/capabilities/xr/> (Erişim: 18 Tem. 2025).