

6G AĞLARDA ARAÇLARIN HABERLEŞMESİ: GELİŞİMİ, ETKİNLEŞTİRİCİ TEKNOLOJİLER VE GÜVENLİK

Serdar Özgür ATA *

Alınma:29.01.2023; düzeltme:07.12.2023; kabul: 13.12.2023

Öz: Yüksek veri hızı, kısa gecikme süresi ve düşük enerji tüketimini içeren amaçlarıyla 5G haberleşme teknolojilerinin standartlaşma çalışmaları sürmekteyken; yüksek bağlantılılığı ve kesintisiz haberleşmeyi esas alan, yeniden konfigüre edilebilir akıllı yüzeylerin yer alabildiği ve çeşitli yörünge seviyelerinde uydu veya insansız hava araçlarının daha etkin şekilde entegre olduğu, aynı zamanda güvenlik unsurunun haberleşme gereksinimleri kadar öne çıktığı ve daha zorlayıcı anahtar performans göstergelerine sahip 6G teknolojileri konusunda kuramsal ve deneysel araştırmalar büyük bir hızla sürdürülmektedir. 6G haberleşme ağlarındaki kritik kullanım senaryolarından biri olarak değerlendirilen araçların haberleşmesi için ortaya çıkabilecek güvenlik problemleri ve olası çözümleri ise önemli araştırma alanlarından birini oluşturmaktadır. Haberleşmenin yüksek veri hızında, kesintisiz ve güvenli şekilde gerçekleşmesi hedeflendiğinde; özellikle otonom araçlar için yol güvenliği ve konvoy sürüşü gibi araçlar arası haberleşmenin doğasından kaynaklanan zorluk senaryolar ortaya çıkmaktadır. Otonom sürüş konusunda haberleşme güvenliği ön planda yer alırken, araçtan her şeye (vehicle-to-everything, V2X) haberleşme ve araçların interneti (internet of vehicles, IoV) sistemlerinin tasarımlarında blok zincir, kuantum hesaplama ve yapay zekâ teknikleri dâhil yenilikçi yöntem ve algoritmaların geliştirilmesinin önemi artmaktadır. Bu makale ile 6G haberleşme sistemlerinin önemli bir parçasını oluşturacak araç haberleşmesinin gelişimi, yenilikçi teknolojileri ve güvenlik konularına odaklanılmakta, literatürde yapılan çalışmalar derlenerek yeni gelişme alanları ve odak noktaları detaylandırılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: 6G Haberleşmesi, Araçtan her şeye (V2X) haberleşme, Araçların interneti (IoV), Blok zincir, Kuantum hesaplama, Birleşik öğrenme.

Vehicular Communications in 6G Networks: Development, Enabling Technologies, and Security

Abstract: While standardization studies of 5G communication technologies aiming for high data rates, low latency, and low-energy consumption are ongoing, theoretical and experimental research on 6G technologies are carried out at a great pace focusing on high connectivity and seamless communications, where reconfigurable intelligent surfaces and unmanned aerial vehicles or satellites at various orbital levels can be integrated, besides having prominent security requirements as communication performance, and more compelling key performance indicators. Security problems and possible solutions constitute an important research area in vehicular communications considered as a critical usage scenario in 6G communication networks. With the aim of realizing communications at high data rates in secure and seamless manner, difficulties arising from the nature of vehicle-to-vehicle communications such as road safety and convoy driving come to the fore. As communication security comes forward in autonomous driving, the importance of developing innovative techniques, including blockchain, quantum computing, and artificial intelligence, is increasing in vehicle-to-everything (V2X) and internet of vehicles (IoV) system designs. This article focuses on the development of vehicular communications, innovative technologies, and security issues, which constitute an important part of 6G communication systems, and the state-of-art studies are compiled and new development areas and focal points are detailed.

Keywords: 6G Communications, Vehicle-to-everything (V2X) communications, Internet of Vehicles (IoV), Blockchain, Quantum computing, Federated learning.

* TÜBİTAK Bilişim ve Bilgi Güvenliği İleri Teknolojiler Araştırma Merkezi, 41470, Gebze/Kocaeli
İletişim Yazarı: Serdar Özgür ATA (serdar.ata@tubitak.gov.tr)

1. GİRİŞ

Günümüzde bir yandan 3GPP tarafından 5. nesil mobil haberleşme (5G) standartları belirlenme ve geliştirilme sürecindeyken, diğer yandan akademide ve endüstride araştırmacılar tarafından 6G haberleşme teknolojilerine yönelik çalışmalar hız kazanmakta ve önemli uygulama senaryoları üzerinde 6G istekleri ve kısıtları tartışılmaktadır (Hong ve diğ., 2022; Serghiou ve diğ., 2022). 6G haberleşme sistemleri ile çok yüksek veri hızları, ultra-güvenilirlik ve düşük gecikme sürelerine erişmenin ötesinde, yüksek mobilitayı destekleyecek şekilde, heterojen ağlarla sürekli ve kesintisiz biçimde bağlantılılığın sağlanması ve dağıtık yapay zekâ çözümlerine dayalı yöntemlerin hayata geçirilmesi temel odak noktalar arasında yer almaktadır. Akıllı ve her yerde sağlanacak haberleşmenin gerçekleştirilebilmesi için hem karasal, hem de uydu ve/veya insansız hava araçlarıyla (İHA) oluşturulan karasal olmayan haberleşme ağlarının birleştirilmesi de hedeflenmektedir (Gismalla ve diğ., 2022).

Telsiz haberleşmedeki başarılı ve hızlı ilerlemelerin bir sonucu olarak çok sayıda araştırma grubu araç haberleşmesi konusunda akademik ve endüstriyel projelerle çalışmalarını sürdürmektedirler. Araç haberleşmesindeki yenilikçi teknolojiler, özellikle yoğun nüfusun yer aldığı kentsel ortamlarda günlük hayatı çok yönlü etkileyen trafik kaynaklı problemlere getirilecek çözüm önerileri ve otonom araçların gereksinimleri bakımından otomotiv ve bilişim endüstrisindeki şirketlerin yanı sıra standart belirleyici organizasyonların ve resmi kurumların da gittikçe artan şekilde dikkatini çekmektedir. Artık günümüzde araç haberleşme teknolojileri, trafik verimliliğini artırma, kazaları azaltma, güvenli sürüş sağlama bakımından akıllı taşıma sistemleri için çekirdek teknoloji konumuna gelmiştir.

Araç haberleşme teknolojileri, standart hücreli haberleşme sistemleriyle karşılaştırıldığında bazı önemli zorluklar içerir. Örneğin, araçlar arası (vehicle-to-vehicle, V2V) haberleşmede, iletişim kuran araçların veya onların çevresindeki diğer araçların yüksek hızlardaki hareketliliği nedeniyle çevresel haberleşme ortamı ve buna bağlı olarak telsiz haberleşme kanallarının karakteristikleri sürekli ve çok hızlı değişmektedir. Bunun yanı sıra araç antenlerinin yüksekliğinin görece daha az olması, yoğun trafik koşulları içinde doğrudan görüş imkânını ortadan kaldırmakta, bu durum da karmaşık işbirlikli haberleşme tekniklerini kaçınılmaz olarak ön plana çıkarmaktadır. Öte yandan işbirlikli haberleşme sistemlerinin birebir haberleşmeye nazaran daha çok zaman dilimi gerektirmesi ise veri iletim hızı noktasında bir dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle veri iletim hızının azalmaması için, iki haberleşme düğümünün aynı zaman aralığında aynı röle üzerinden veri aktarımını sağlayan fiziksel katman ağ kodlama (physical layer network coding, PLNC) tekniklerinin kullanımı yüksek başarılı V2V haberleşme sistemlerinin tasarımında önemli rol oynamaktadır (Ata, 2018).

V2V haberleşme kanallarının istatistiksel özellikleri hücreli telsiz haberleşme kanallarından doğası gereği farklılık gösterir. Dolayısıyla, V2V haberleşmede sönümlemeyi modelleyebilmek için Rayleigh, Rician, Nakagami-*m* gibi bilinen kanal modelleri kullanılamamaktadır. Çeşitli saha ölçümleriyle, V2V haberleşmedeki kanal kazancının, hareketli kaynaklar etrafında her biri ayrı bir işaret kaynağı gibi davranan birbirinden bağımsız saçıcı grupların oluşturduğu kanalların kazançlarının çarpımından meydana geldiği gösterilmiştir. Kanal kazançlarının çarpımsal bağıntılarla elde edilmesinden dolayı, V2V haberleşme kanalları kaskad sönümlemeli kanallar olarak modellenebilmektedir (Ata, 2017a).

5G haberleşme ağlarında V2V veya araçlarla altyapı arasındaki (vehicle-to-infrastructure, V2I) haberleşme teknolojilerinin odağında yüksek veri hızlarına erişilebilmesi ve düşük gecikme sürelerinin sağlanması önem kazanmıştır (Gyawali ve diğ., 2021). 2030 yılı için öngörülen ve 6G haberleşme ağlarıyla birlikte araçtan her şeye (V2X) haberleşme ve bunun da ötesinde araçların interneti (Internet of Vehicles, IoV) teknolojisinde artık ultra-bağlantılılık olarak adlandırılan kesintisiz iletişim, güvenli haberleşme ve makine öğrenmesi yaklaşımları öne çıkmaktadır (Tang, ve diğ., 2020; Kirubasri ve diğ., 2021). Yoğun sayıda ve yüksek hızlara

sahip araçların oluşturacağı 6G araç haberleşmesi sistemleri, çok yüksek sayıda ve yoğunlukta haberleşme düğümünün güvenilir ve güvenli haberleşme gereksinimiyle birlikte yapay zekâ tekniklerinin etkin kullanımını üst düzeye taşıyacaktır. Bu noktada, makine öğrenmesi yöntemleriyle gelişmiş bağlam farkındalığı, kendini toplama, uyarlanabilir koordinasyon ve kendi kendine yapılandırma gibi yeni fonksiyonlar işlerlik kazanabilecektir.

5G Yeni Radyo (NR) V2X alanında spektral ve donanımsal geliştirmeler söz konusuysen, sistem mimarisi olarak hâlâ LTE-tabanlı V2X haberleşme yapısı izlenmiştir (Sehla ve diğ., 2022). Yakın gelecekte kesintisiz şekilde bağlantılı otonom araçların yaygınlaşması beklentisiyle birlikte kullanıcı deneyiminde önemli farklılıklar yaratacak derinlik duygusu veren 3-boyutlu ekranlar, holografik kontrol görüntüleme sistemleri, geliştirilmiş araç içi eğlence ve bilgilendirme sistemleri gibi değişikliklerin yanı sıra; yeniden konfigüre edilebilir akıllı yüzeyler (*reconfigurable intelligent surface*, RIS) (Wang ve diğ., 2022b; Dinan ve diğ., 2022), uydu/insansız hava aracı (İHA) destekli V2X (Maraqa ve diğ., 2021; Jia ve diğ., 2021), entegre hesaplama, mobil uç bilişim (*mobile edge computing*, MEC) (Ma ve diğ., 2020) gibi yenilikçi teknolojilerin ve yapay zekâ algoritmaları gibi yeni tekniklerin uygulamaya konulması beklenmektedir. Tüm bu teknolojik yenilikler telsiz haberleşme sistemlerinin kapasite sınırlarını zorlayacak şekilde saniyede terabitler mertebesinde veri hızları, birbirine bağlı milyarlarca haberleşme düğümü ve milisaniyenin altında gecikme süreleriyle yoğun ve ultra-hızlı telsiz erişim, üç boyutlu kapsama hacmi, çok daha düşük enerji sarfiyatıyla yeşil haberleşme, akıllı sistemler, çeşitlendirilmiş ağ ihtiyacı ve en önemli unsurlardan biri olarak güvenlik gereksinimlerini öne çıkarmaktadır.

6G haberleşme sistemlerinde V2X haberleşmesi kapsamında dokuz farklı kullanım senaryosu veya yenilikçi teknoloji Şekil 1'de gösterilmektedir. Burada, çeşitli destekleyici teknolojiler ve kullanım senaryoları bir arada bulunmaktadır (Noor-A-Rahim ve diğ., 2022). Öncelikle, 6G haberleşme için önemli destekleyici birimler olarak uydu ve İHA destekli haberleşme yer almaktadır. Araçların birbirleriyle olduğu kadar yayalarla da doğrudan haberleşmesini sağlayan araç-yaya arası (V2P) haberleşme senaryosu verilmektedir. Araçların konvoy sürüşü veya toplu halde hareketlerine imkân sağlayan akıllı peloton senaryosunun 6G haberleşmesiyle birlikte yaygınlaşması beklenmektedir. Dördüncü senaryo, makine öğrenmesi tekniklerinin ön plana çıkacağı otonom sürüş teknolojileri ve uzaktan kontrol edilen araçların haberleşmesi için yoğun veri iletiminin önem kazanmasına ilişkindir. Acil mesajların dağıtımının hem karasal, hem de karasal-olmayan araçların haberleşmesinde yaygınlaşabilecek bir senaryo olarak beşinci sırada verilmiştir. Yine V2X sistemlerde görünür ışığın haberleşme amacıyla kullanıldığı görünür ışık haberleşmesi (*visible-light communications*, VLC) tabanlı sistemlerin 6G sistemlerle birlikte yaygınlaşması beklenmektedir. Araçların güvenli haberleşmesini sağlamak amacıyla blok zincire dayalı sistemler yenilikçi teknolojiler olarak güvenli haberleşmeyi destekleyici unsurlar olarak ön plana çıkacaktır. Sekizinci sırada gösterilen RIS destekli haberleşme ve son olarak dokuzuncu sırada belirtilen mobil uç birim hesaplama (*mobile edge computing*, MEC) veya sis hesaplama dayalı sistemlerin de kentsel ortamlarda yoğun şekilde yer alması beklenmektedir.

6G haberleşmesi alanında haberleşme, hesaplama ve güvenlik üç önemli boyut olmakla birlikte, 6G-V2X için güvenlik boyutu özel önem kazanmakta, mevcut V2X sistemlerin çok daha ötesinde güvenlik koşullarının sağlanmasına gereksinim duyulmaktadır. Özellikle yüksek hızlı otonom araçların haberleşmesinde oluşabilecek herhangi bir gecikme, bir hesaplama problemi veya güvenlik açığı hayati sorunlara neden olabilecektir (Lee ve diğ., 2022). Güvenlik alanıyla ilgili etkinleştirici teknolojilerin başında blok zincir tabanlı V2X haberleşmesi (Khan ve diğ., 2021; Meijers ve diğ., 2022; Agudo ve diğ., 2021), kuantum hesaplama (Zeydan ve diğ., 2022) ve yapay zekâ (Fu ve diğ., 2022) gelmektedir. Güvenliğin sağlanması sayesinde, gelişmiş kaynak tahsisi ve bütünleşmiş bir yapıda algılama, hesaplama ve haberleşmenin gerçekleşmesi mümkün olacaktır. Bu makale ile sağlanan katkılar,

- V2V haberleşme ve V2I haberleşmeyi de kapsayan V2X haberleşme teknolojilerinin gelişiminin değerlendirilmesi ve literatürde yapılan çalışmaların derlenmesi,
- 6G haberleşme sistemlerinin önemli bir bileşeni olan araç haberleşmesi ve IoV konusunda etkinleştirici anahtar teknolojilerin ve güncel çalışmaların ortaya konulması,
- Bu alanda geliştirilebilecek yenilikçi yöntem ve uygulamaların öne çıkarılıp, geleceğe yönelik çalışma alanlarının ortaya konulması,

olarak özetlenebilir.

Bu makalede, Bölüm 2’de araç haberleşme teknolojilerinin gelişimi ile güncel çalışmalar ortaya konulmaktadır. Bölüm 3’te 6G ağlarında araç haberleşme teknolojileri açısından zorluklar ve ulaşılması beklenen hedefler değerlendirilmektedir. Bölüm 4’te 6G haberleşmesinde araçların birbirleriyle, çevrelerindeki altyapılarla veya yayalar dâhil geniş kapsamda her şeyle haberleşmesine odaklanılarak, güvenlik konusunda geliştirilen yenilikçi çözümler detaylandırılmaktadır. Bölüm 5’te 6G ağlarında araç haberleşmesi alanında gelecek vizyonu ve araştırma yönelimleri değerlendirilmekte ve makale sonuçlandırılmaktadır. Makalede kullanılan kısaltma ve ilgili terimlerin açık ifadesi Tablo 1’de listelenmektedir.



Şekil 1:

6G haberleşme sistemlerinde araç haberleşmesi örnek kullanım senaryoları (1) uydu ve İHA destekli haberleşme, (2) araçların yayalarla haberleşmesini sağlayan V2P haberleşme, (3) araçların toplu halde hareketlerine imkân sağlayacak şekilde akıllı peloton, (4) uzaktan kontrol edilen veya otonom sürüş teknolojileri, (5) acil mesaj dağıtım, (6) görünür ışığın haberleşme amacıyla kullanıldığı VLC tabanlı sistemler, (7) araçların güvenli haberleşmesini sağlamak amacıyla blok zincire dayalı sistemler, (8) RIS destekli haberleşme ve son olarak (9) uç birim hesaplama veya sis hesaplama yöntemleridir (Noor-A-Rahim ve diğ., 2022).

Tablo 1: Makalede kullanılan kısaltmalar ve açık ifadeleri

Kısaltma	Terim	Kısaltma	Terim
3GPP	3. Nesil Ortaklık Projesi (<i>The 3rd Generation Partnership Project</i>)	NOMA	Dikgen Olmayan Çoklu Erişim (<i>Non-Orthogonal Multiple Access</i>)
AR / VR / MR	Arttırılmış gerçeklik / Sanal gerçeklik / Karma gerçeklik (<i>Augmented Reality / Virtual Reality / Mixed Reality</i>)	NR	Yeni radyo (<i>New Radio</i>)
DSRC	Özel kısa menzilli haberleşme (<i>Dedicated Short-Range Communication</i>)	PLNC	Fiziksel katman ağ kodlama (<i>Physical Layer Network Coding</i>)
DL	Derin öğrenme (<i>Deep Learning</i>)	RF	Radyo frekansı
FCC	Federal Haberleşme Komisyonu (<i>Federal Communication Commission</i>)	RIS	Yeniden konfigüre edilebilir akıllı yüzey (<i>Reconfigurable Intelligent Surface</i>)
FL	Birleşik öğrenme (<i>Federated Learning</i>)	RSU	Yol kenarındaki birim (<i>Road-Side Unit</i>)
IoV	Araçların interneti (<i>Internet of Vehicles</i>)	SON	Kendi kendini organize eden ağ (<i>Self-Organizing Network</i>)
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>	uRLLC	Ultra-güvenilir düşük gecikme süreli haberleşme (<i>Ultra-Reliable Low-Latency Communication</i>)
ITS	Akıllı ulaşım sistemleri (<i>Intelligent Transportation Systems</i>)	V2I	Araç-altyapı arası (<i>Vehicle-to-Infrastructure</i>)
İHA	İnsansız Hava Aracı	V2N	Araç-ağ arası (<i>Vehicle-to-Network</i>)
KPI	Anahtar performans göstergesi (<i>Key Performance Indicator</i>)	V2P	Araç-yaya arası (<i>Vehicle-to-Pedestrian</i>)
LDPC	Düşük yoğunluklu parite kontrol (<i>Low Density Parity Check</i>)	V2V	Araçlar arası (<i>Vehicle-to-Vehicle</i>)
LTE	<i>Long-term Evolution</i>	V2X/ eV2X	Araçtan her şeye / Gelişmiş V2X (<i>Vehicle-to-Everything / Enhanced V2X</i>)
MAC	Ortam erişim kontrol (<i>Medium Access Control</i>)	VEC	Araçlar için uç birim hesaplama (<i>Vehicular Edge Computing</i>)
MEC	Mobil uç birim hesaplama (<i>Mobile Edge Computing</i>)	VLC	Görünür ışık haberleşmesi (<i>Visible-Light Communication</i>)
MIMO	Çok girişli çok çıkışlı (<i>Multiple Input Multiple Output</i>)	WAVE	Araç çevresinde telsiz erişim (<i>Wireless Access in Vehicular Environment</i>)

2. ARAÇ HABERLEŞME TEKNOLOJİLERİNİN GELİŞİMİ

Araç haberleşmesinde araştırma ve geliştirme çalışmaları son 20 yılda gittikçe artan bir ivmeyle sürdürülmektedir. Bu amaçla radyo erişim teknolojileri olarak özel kısa-menzilli haberleşme (dedicated short-range communication, DSRC) ve hücresele-V2X ve ardından 5G NR V2X olmak üzere iki ana doğrultuda standartlaşma faaliyetleri öne çıkmaktadır. Her iki teknoloji de düşük gecikme süresi, güvenilirlik ve veri hızları bakımından belirli ortak amaçlarına sahip olsa da, tasarım ilkeleri bakımından önemli farklılıkları barındırmaktadır.

Araç haberleşmesinde 1999 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) Federal Haberleşme Komisyonu (Federal Communication Commission, FCC) tarafından 5.9 GHz merkez frekansı etrafında 75 MHz'lik bir frekans bandının araç haberleşmesi amacıyla ayrılması önemli bir adım olarak görülmektedir. Bunu takiben çalışmalar hızlanmış ve 2003 yılında akıllı ulaşım sistemleri (Intelligent Transportation Systems, ITS) uygulamalarındaki haberleşme düğümlerini tasarlamak üzere standardizasyon çalışmaları derinleştirilerek araç ağları üzerinde DSRC standart çalışması ortaya konulmuştur. DSRC, fiziksel katman ve ortam erişim kontrol (medium access control, MAC) katmanlarında IEEE 802.11p standardına dayalı olarak geliştirilmiştir. DSRC'de fiziksel katmanda dikgen frekans bölmeli çoğullama (OFDM) tekniği kullanılmaktadır. Öte yandan, araçlar için LTE temelli bir radyo erişim teknolojisi olarak hücresele-V2X standartlaşma çalışmaları 3GPP tarafından Sürüm 14'ten itibaren yoğunlaşarak yürütülmüştür.

DSRC'nin ortam erişim kontrol (Medium Access Control, MAC) katmanı dağıtık işlemlere izin verecek yapıda kurgulanmış olmasına rağmen, çok sayıda aracın bulunduğu ve yüksek hızlı bir trafikte, sınırlı kapsama, düşük veri hızı, düşük servis kalitesi ve kanal erişiminde gecikmeler nedeniyle DSRC'nin yetersiz kaldığı gözlenmiştir. IEEE 802.11 standardı temel alınarak geliştirilen IEEE 802.11p Araç Çevresinde Telsiz Erişim (Wireless Access in Vehicular Environment, WAVE) standardı 2010'da yayınlanmıştır. Ayrıca, kaynak yönetimi, güvenlik, ağ servisi ve çok kanallı yapı için IEEE 1609.1.4 standardı geliştirilmiştir. DSRC ile hücresele ağlar için 3GPP tarafından geliştirilen V2X haberleşme standardı arasındaki performans açığını kapatmak üzere Mart 2018'de IEEE 802.11 Yeni Nesil V2X çalışma grubu kurulmuş, hemen ardından Ocak 2019'da IEEE 802.11bd Görev Grubu oluşturulmuştur.

IEEE 802.11p standardı geliştirilirken araç güvenliği ve trafik yönetiminin iyileştirilmesi esas alınarak temel anahtar performans göstergeleri (KPI'lar) belirlenmiş ve bu çerçevede yaklaşık 200 km/sa hızlarında araçların desteklenmesi, 100 ms cevap süresi ve 1 km haberleşme mesafesinin olması hedeflenmiştir. Daha sonra geliştirilen IEEE 802.11bd standardıyla karşılaştırıldığında, ikisinin de 5.9 GHz bandında yayın yaptığı, 802.11bd standardında ise ayrıca 60 GHz radyo bandının da kullanılabilirdiği görülmektedir. 802.11p'de alt taşıyıcıların aralıkları 156.25 kHz iken, 802.11bd standardında üç farklı değerde taşıyıcı aralıkları tayin edilebilir. Kanal kodlama yöntemi olarak 802.11p'de ikili konvolüsyonel kodlama yapısı kullanılırken, 802.11bd'de düşük yoğunluklu parite kontrol (*Low Density Parity Check*, LDPC) kodlama yöntemi kullanılmıştır. 802.11p yaklaşık 200 km/sa hızları destekleyebilirken, 802.11bd'de bu hızın 500 km/sa değerlerine kadar ulaşabildiği görülmektedir. 802.11bd için birlikte çalışabilirlik (*interoperability*) ve bu kapsamda geriye dönük uyumluluk, 802.11p standardında çalışan cihazlarla birlikte var olma (*coexistence*) ve dolayısıyla onları tespit edip, kanal erişim fırsatlarını adil şekilde birlikte kullanma gibi ek özellikleri desteklemesi de esas alınmıştır (Naik ve diğ., 2019).

3GPP tarafından mobil haberleşme standartları geliştirilmeye devam ederken, önemli bir adım olarak Mart 2017'te 3GPP Sürüm 14 kapsamında yayınlanan yeni hücresele-V2X standardıyla birlikte ilk olarak hücresele ağlar üzerinde V2N haberleşmesi ile V2V ve V2I haberleşme arasındaki ara yüzler ortaya konmuştur. Sürüm 14 kapsamında, temel yol güvenliği için işbirlikli farkındalık mesajları, temel güvenlik mesajları ve merkezi olmayan çevresel bildirim mesajları gibi verilerin taşınması hizmetlerini sunmak amaçlanmıştır. Bu yıllarda

standartlaşma çalışmaları bir yandan sürdürülürken, araç haberleşmesi alanında, ABD’de desteklenen IntelliDrive projesi, Avrupa’da Avrupa Komisyonu tarafından desteklenen CAR2CAR Communication Consortium, NEARCTIS ve Secure Vehicular Communication gibi büyük ölçekli çeşitli projeler ve Japonya’da Japon Otomobil Teknolojileri Araştırma Enstitüsü tarafından çeşitli çalışmalar yürütülmüştür. Bu esnada yeni nesil haberleşme ağlarındaki araçlar arası haberleşme sistemlerinde sönmlemeli kanalların kaskad yapıda modellendiği ve PLNC yapılan sistem tasarımları konusunda öncül çalışmalar da yazar tarafından 2016 ve 2017’de gerçekleştirilmiş ve yayınlanmıştır (Ata ve Altunbaş, 2016; Ata 2017a; Ata ve Altunbaş, 2017b). İşbirlikli bir haberleşme ortamında öncelikle tek anten ve tek röleli bir sistemde röle üzerinde sabit kazançlı kuvvetlendirir-ve-aktar tekniği kullanılarak PLNC yapan bir sistem tasarlanmış ve çift Rayleigh, kaskad Rayleigh, çift Nakagami- m ve genelleştirilmiş-K kanal modellerini kapsayan kaskad Nakagami- m kanal modeli varsayımı altında performans analizleri gerçekleştirilmiştir. Ardından çok girişli çok çıkışlı (multi input multi output, MIMO) bir V2V sistemi tasarlanarak değişken kazançlı röleler ile PLNC yapılmıştır. PLNC yapılan çok antenli çok röleli araç haberleşme sisteminde uzay-zaman kafes kodlama yöntemi sayesinde sistem performansının artırıldığı gösterilmiştir (Ata, 2017a). Sonrasında, Ata (2019) tarafından araç haberleşmesinde fiziksel katman güvenliği konusunda kaskad sönmlemeli kanallarda gizlilik performans analizi detaylarıyla ortaya konulmuş ve ardından araçlar arası bilişsel radyo ağlarında gizlilik kesintisi olasılığının hesaplandığı bir çalışma yayınlanmıştır (Ata ve Erdoğan, 2020).

3GPP Sürüm 14 ile birlikte hücresele-V2X haberleşmedeki düşük gecikme süresini sağlayabilmek için eNodeB ile oluşturulan arayüzün yanı sıra PC5 arayüzü üzerinden iki yeni yan-bağlantı iletim modu daha oluşturulmuştur. PC5 hava arayüzü sayesinde kullanıcı üniteleri arasında doğrudan iletim mümkün olabilmekte, her bir paketin eNodeB’den geçmesi gerekmemektedir. Hücresele-V2X haberleşmenin temel zaman-frekans kaynak yapısı LTE ile benzer tasarlanmıştır. Buna göre, birim zaman-frekans kaynağı olarak zamanda bir alt-çerçeve 14 OFDM sembolünden oluşan 1 ms zaman aralığına ve frekansta her biri 15 kHz banda sahip 12 alt-taşıyıcıyı içeren 180 kHz’lik banda sahiptir. Her bir OFDM alt-taşıyıcısında modülasyon yöntemi olarak QPSK veya 16-QAM modülasyonu ile turbo kodlama kullanılır. Hücresele V2X kullanıcıları, veri sembollerinin yanı sıra kontrol bilgisi ve referans işaretleri iletirken de özelleşmiş yöntemler kullanırlar. Örneğin, kanal kestiriminde kullanılan demodülasyon referans işareti, LTE’de 14 OFDM işaretinin ikisine yerleştirilirken, hücresele-V2X alt-çerçevelerinde dört tanesine yerleştirilerek yüksek hareketlilikte oluşan çevresel değişime karşı dayanıklılık sağlanması hedeflenmektedir (3GPP, 2022).

Haziran 2018’de yayınlanan Sürüm 15’le birlikte 5G-NR gelişmiş V2X (eV2X) teknolojisi ortaya konularak, uzaktan sürüş ve gelişmiş sensör verilerinin iletiminin desteklenmesi mümkün hale getirildi (Ghosh ve diğ., 2019). Ayrıca, vericide çeşitlemeye izin verilerek, haberleşmede daha yüksek güvenilirlik sağlanabildi. Taşıyıcıların toplanması ve yüksek modülasyon dereceleri sayesinde yüksek veri hızlarına erişim gerçekleştirildi. 3GPP tarafından 2020 yılında 5G-NR’nin ikinci versiyonunun Sürüm 16 olarak yayınlanmasıyla birlikte zenginleştirilmiş ultra-güvenilir düşük gecikme süreli haberleşme (ultra-reliable low-latency communication, uRLLC) ve yüksek veri hızı hedeflendi. Mart 2022’de yayınlanan Sürüm 17 ile birlikte eV2X servisleri geliştirilmeye devam etti, ek olarak İHA’lar konusunda da standart çalışmaları ortaya konuldu. Aralık 2021’de başlayan Sürüm 18 çalışmaları halen devam etmektedir (3GPP, 2022).

Sürüm 15’le birlikte fiziksel katmanda önemli geliştirmeler yapılmıştır. Bunların başında Kodlama yöntemi olarak LDPC kullanılması gelmektedir. Ayrıca, OFDM alt-taşıyıcılarının faz-genlik modülasyonu olarak 64 QAM kullanılmaya başlanmıştır. Demodülasyon referans işaretleri bir önceki sürümde alt-çerçevede 4 tane iken, NR V2X ile birlikte daha esnek bir yapıya kavuşturulmuş, alt-taşıyıcı aralıkları sabit 15 kHz’den 6 GHz altı için 15, 30, 60 kHz’e, milimetre-dalga boyunda ise 60, 120 kHz değerlerine çıkarılmıştır (3GPP, 2022).

Araç haberleşmesi için temel teşkil eden her iki radyo erişim teknolojisi olan NR V2X standardı, IEEE 802.11bd ile kıyaslandığında, fiziksel katmanda her ikisinin de OFDM tabanlı olduğu, MAC katmanında ise IEEE 802.11bd'de CSMA kullanılırken, NR V2X'de iki farklı mod (gNodeB çizelgeleme veya esnek alt modlar) kullanıldığı görülmektedir. Her iki standart da milimetre dalga boylarında haberleşmeyi destekleyebilecek yapıda tasarlanmıştır.

3. 6G AĞLARINDA ARAÇ HABERLEŞMESİ İÇİN HEDEFLER VE ZORLUKLAR

Günümüzde otonom sürüş konusunda araç haberleşmesinin önemi ve radyo erişim teknolojilerindeki gelişim ihtiyacı derinleşerek artmaktadır. Özellikle manevra değişiklikleriyle ilgili mesajların iletimi, araçların peloton oluşturması, algılayıcılar arasında bilgi ve veri alışverişi veya araç yörüngelerinin birbirleriyle hizalanması gibi çeşitli amaçlar doğrultusunda araçların haberleşmesi gerekmektedir. Aynı zamanda yakın gelecek için araç haberleşmesi uygulamalarına yönelik haberleşme gereksinimleri de çalışılmakta ve bu gereksinimler sadece güvenli sürüş için değil, trafik yönetiminden, yolcuların bilgilendirilmesi ve eğlence sistemlerine kadar geniş bir alanı kapsamaktadır.

5G haberleşmesi ile birlikte milimetre dalga haberleşmesi, yoğun MIMO, kanal kodlama yöntemleri olarak LDPC ve kutupsal kodlar, daha esnek çerçeve yapıları, ultra-yoğun ağlar, NOMA teknikleri, yazılım tanımlı ağlar, ağ fonksiyonlarının sanallaştırılması ve ağ dilimleme teknikleri ön plana çıkmış, bu teknik ve yöntemler çeşitli kapsamlarda standart tanımlarına girmişlerdir. 6G ağlarla birlikte ise öne çıkması beklenen teknoloji, yöntem ve algoritmalar, terahertz (THz) haberleşme, süper-yoğun MIMO, yeniden konfigüre edilebilir akıllı yüzeyler, holografik dalga şekillendirme, yörüngesel açısal momentum çoğullama (orbital angular momentum multiplexing), VLC, blok zincir tabanlı spektrum paylaşımı, kuantum hesaplama, yapay zeka ve makine öğrenmesi şeklinde sıralanabilir.

6G ağlar bağlamında, yüksek hacimli verinin iletimi ve düşük gecikme sürelerinin sağlanmasıyla süper yüksek tanımlı (*super-high-definition*) ve son derece yüksek çözünürlüklü (*extremely-high-definition*) videoların aktarımı, endüstriyel internet için 10 μ s'ler mertebesinde gecikme süreleri, nano-şeylerin interneti (*Internet of Nanothings*), akıllı giyilebilir cihazlar veya vücut-içi nano-cihaz ve nano-algılayıcılar için aşırı düşük seviyede güç tüketimi, su altı ve uzay haberleşmesi teknolojileriyle sınırları zorlayabilecek şekilde derin denizlerde ve uzayda haberleşmenin sağlanması, hiper-yüksek-hızlı demiryolu uygulamaları gibi yeni gelişen ulaşım teknolojilerine uygun servislerin sağlanması dâhil çeşitli yüksek beklentiler söz konusudur. 6G sistemler için tanımlanan KPI'lar genel olarak veri hızları, gecikme süreleri, harcanan enerji ve haberleşme düğümü yoğunluğu bakımından tarif edilmekle birlikte, 6G ağların güvenliği bakımından da önemli beklentiler bulunmaktadır. Süreç içinde ön plana çıkan KPI'lar ve onlara ilişkin beklenen hedef değerleri aşağıdaki şekilde değerlendirilmektedir.

- *Yukarı ve aşağı bağlantıda yüksek veri hızı:* Yaklaşık 1 Tb/s veri hızları beklenmekte olup, bu değer 5G'nin yaklaşık olarak 100 katına karşılık gelmektedir. Bazı özel kullanım durumu senaryoları için bu değer 10 Tb/s seviyesine çıkması da hedeflenmektedir.
- *Ultra-düşük gecikme süreleri:* Gecikme sürelerinin 0.1ms veya daha düşük olması hedeflenmektedir. Özellikle yüksek hareketliliğin olduğu ortamlar için çok kritik bir parametre olup 10 μ s'ler mertebesine inilmesi önemlidir.
- *Enerji-verimli haberleşme:* 6G ağlarda harcanan enerjinin 1 pJ/bit olarak hedeflenmekte olup, enerji verimliliğinin 5G'nin 10-100 katı olması amaçlanmaktadır.
- *Yoğun cihaz sayısı:* 100 cihaz/m³ gibi yoğun sayıda kullanıcıya servis verebilme ve heterojen kullanıcıların desteklenmesi istenmektedir.
- *Çok güvenli haberleşme,*
- *Yüksek güvenilirlik*

şeklinde sıralanabilir (Tataria ve diğ., 2021; Duong ve diğ., 2022).

6G haberleşme ağlarının getireceği teknolojik özellikler sayesinde çok yüksek veri iletim hızlarında ve çok düşük gecikme sürelerinde haberleşmeyle, tamamen birbirine bağlı otonom araçların dünyasına doğru hızla ilerlemeler sağlanması beklenmektedir (Noor-A-Rahim ve diğ., 2022). V2V, V2I, V2P ve araçların bulut ağlarla haberleşmesini (V2N) içeren V2X haberleşme teknolojisi ve IoV, ITS'in etkinleştirici anahtar teknolojileri olarak ön plana çıkmaktadır. 6G haberleşmesinin son derece iddialı olan hedefleri ve erişilmesi beklenen performans göstergeleri düşünüldüğünde, yüksek hızda hareketliliği destekleyen 6G-V2X haberleşmesi alanında karşılaşılabilecek olası zorluklar üzerine çok sayıda araştırma çalışması yapılmaya başlanmıştır. Bunların başında, akıllı radyo ortamı oluşturması ve araç haberleşme sistemlerinde iletilen radyo dalgaları üzerinde kontrol sağlayabilecek yenilikçi teknolojilerin geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmalar gelmektedir.

Araç haberleşmesi, telsiz haberleşme alanında doğası bakımından önemli zorluklar barındıran konuların başında yer alır. Telsiz haberleşme sistemleri içinde maruz kalınan en zorlu kanal etkileri ve alınan işaret üzerinde en etkili sönümlenme ve bozucu etkiler araç haberleşmesinde oluşmaktadır. V2X sistemlerde, hem alıcının ve hem de vericinin genellikle yüksek hızlara çıkabilecek şekilde hareket halinde olması nedeniyle kanal etkileri çok daha zorlayıcı bir hale bürünür. Bunlara ek olarak, kentsel alanlarda yüksek binaların varlığı ve kırsal alanlardaki doğal yükseltiler ve yüksek ağaçlar gölgeleme etkilerine neden olmaktadır. Öte yandan, yüksek hızlarda Doppler kaymasından kaynaklanan frekans yayılması da bir diğer bozucu etken olarak V2X sistemlerde karşımıza çıkmaktadır. Tüm bu etkiler, eğitim periyodu için ekstra süre gerektirmesi ve kanal kapasitesinin daha çok sınırlanması dezavantajlarını da içinde barındırmaktadır.

LTE veya 5G NR tabanlı V2X sistemlerde bu etkileri azaltabilmek için, fiziksel katmanda alt taşıyıcılar arasına nisbeten daha büyük aralıklar bırakılması ve pilot işaretlerin daha sıklaştırılması kaçınılmaz bir durum olarak ortaya çıkmakta olup, bu önlemler spektral verimliliği önemli ölçüde düşürmektedir. Bu konuda mevcut teknolojik sınırlandırmaları aşım, karşılaşılan problemin üstesinden gelebilmek üzere farklı ve yıkıcı bir teknolojik çözüm sayılabilecek RIS'ların kullanılması önerilmiş ve bu öneri gittikçe artan sayıda araştırmacının dikkatini çekmiştir (Wu ve Zhang, 2020). RIS'lar sayesinde çok sayıda yansıtıcı yüzey bir arada kullanılarak, telsiz işaretin iletiminin yeniden konfigüre edilmesine imkân sağlandığı ve radyo dalgalarının genliği, frekansı, fazı veya polarizasyonunun kontrol edilebildiği gösterilmiştir. Di Renzo ve diğ. (2020) çalışmalarında RIS'lı sistemlerin röleli sistemlere göre üstünlüğünü, Cui ve diğ. (2022) ise düşük güçle haberleşme üzerine somut sonuçlarını ortaya koymuştur.

6G sistemlerde yüksek performanslı haberleşme, hesaplama ve güvenlik gibi üç temel odak noktası olduğu değerlendirilebilir. Yüksek performanslı haberleşme konusunda fiziksel katmanda RIS'ların yanı sıra RF-VLC'ye dayalı sistemlerin geliştirilmesi, büyük ölçekli dikgen olmayan çoklu erişim (non-orthogonal multiple access, NOMA) yöntemlerinin kullanılması, yenilikçi kaynak tahsis yaklaşımları, yeni çoklu erişim mimarisi, uydu ve İHA destekli haberleşme konularındaki çalışmalar derinleştirilmektedir. Aday haberleşme teknikleri arasında yer alan VLC ile birlikte 400-800 THz frekans aralığında görünür ışık kullanılarak özellikle kapalı alanlarda yüksek veri hızlarına erişim imkânı sağlanabilecektir. NOMA tekniğinde bir kaynak bloğunun zaman veya frekanstan farklı bir bölgede çoğullama yapılması sayesinde, aynı anda birden fazla kullanıcı tarafından kullanılması mümkün olmaktadır. NOMA kullanılmasıyla, başta spektral verimliliğin artması olmak üzere, daha çok sayıda cihaz veya kullanıcı ünitesinin bağlantısının sağlanması, hücre kenarlarında daha yüksek veri hızlarına erişimin sağlanması ve daha düşük gecikme süresi ve kullanıcılar arasında daha dengelenmiş ve adil kaynak kullanımı gibi avantajlar oluşabilecektir. Bu bakımdan özellikle güç bölgesinde NOMA kullanımı 6G haberleşmesi için aday teknikler arasında değerlendirilmektedir.

6G sistemlerinde ikinci odak alan olan hesaplama alanında ise makine öğrenmesi teknikleri, kuantum hesaplama, bütünleşik olarak algılama-hesaplama-haberleşme yapısının öne

çıkacağı değerlendirilmektedir. 6G haberleşmesinde makine öğrenmesi yöntemlerinin geniş bir kullanım alanına sahip olması planlanmaktadır. Araçlar üzerinde yer alan çok sayıda algılayıcıdan alınacak verinin anlamlandırılması ve sınıflandırılması gibi uygulamaların yanı sıra, spektrum paylaşımı veya radyo erişim teknolojilerinde NOMA destekli sistemlerde optimizasyon problemlerinin çözümü için de makine öğrenmesi tekniklerinin kullanımı değerlendirilmektedir.

6G haberleşmesinin üçüncü odak alanı olarak kabul edilebilecek güvenlik konusu ise hem yüksek performanslı haberleşme ve hem de yüksek performanslı hesaplama alanlarını kapsayacak nitelikte olup, yenilikçi ve yıkıcı teknolojik yöntemlere gereksinim duymaktadır. Bölüm 4'te bu konuda yapılan çalışmalar ve teknolojik gelişim süreci detaylarıyla açıklanmaktadır.

4. 6G ARAÇ HABERLEŞMESİNDE GÜVENLİK

6G V2X haberleşme teknolojileri için üç temel boyut olan haberleşme, hesaplama ve güvenlik gereksinimlerinin hedeflenen KPI'ları karşılayacak şekilde gerçekleştirilmesi amacıyla endüstride ve akademide yoğun çalışmalar yürütülmektedir. V2V/V2I/V2P/V2N/V2X haberleşme teknolojilerinin ve IoV'nin temel kullanım amacı artık güvenli sürüş ve sağlıklı bir trafik akışı için gerçek zamanlı bilgi ve mesaj paylaşımının sağlanmasının ötesinde algılama, hesaplama ve haberleşmenin entegrasyonunu yapmak, üç boyutlu görüntüleme araçları dâhil kullanıcı deneyimlerini en üst düzeye çıkarmak, kesintisiz bağlı kullanıcı ve kesintisiz bağlı araçlardan sonra Chen ve diğ. (2020) tarafından ifade edilen kesintisiz "bağlantılı zekâyı" (*connected intelligence*) üretmektir. Otonom araçlara olan talep arttıkça araç haberleşmesi konusundaki araştırmaların ve etkinleştirici teknolojilerin gelişim hızının artması beklenmektedir.

V2X ağlarda verinin içeriğine bağlı olarak güvenlik gereksinimlerinin farklılaşması, öncelikle kaynak tahsisi konusunda özelleştirilmiş çözümlere ihtiyaç duyulmasına sebep olmaktadır. Örneğin, görev-kritik mesajların potansiyel kötü niyetli ataklara veya karıştırıcı işaretlere karşı çok yüksek seviyede dirençli olması beklenirken, çok daha büyük hacimli multimedya veri servisleri için daha hafif bir güvenlik seviyesi yeterli olabilecektir. Farklılaşan güvenlik ihtiyaçları, farklılaşan çerçeve yapılarına, yönlendirme veya röleme stratejilerine, değişen güç ve spektrum tahsis yaklaşımlarına neden olacaktır. Güvenlik artırıcı yöntemlerin geliştirilmesi kadar, 6G sistemler için oluşabilecek olası tehdit ve güvenlik atakları da önemli bir araştırma konusudur. Yakın zamanda RIS'lı sistemler üzerinde güvenlik tehditleri olarak oluşabilecek meta yüzey manipülasyon atakları Alakoca ve diğ. (2023) tarafından yapılan çalışmada tanıtılmış ve sonuçları detaylı olarak irdelenmiştir.

Araç ağlarında geleneksel açık anahtar altyapısına dayalı kimlik doğrulama yapıları kullanılarak kimlik doğrulama ve koşullu gizlilik koruması sağlanabilse bile, mesajların güvenilirliğini değerlendirmek bakımından bunlar yeterli değildir. 5G ağlarında veri hızlarının önemli ölçüde artmasına rağmen, karmaşık çift-doğrusal eşleşme işlemlerine dayalı kimi kimlik doğrulama yöntemleri gerçek-zamanlı çalışmada yetersiz kalabilmektedir. Bu sorunu çözebilmek için Cui ve diğ. (2019) tarafından yapılan bir çalışma ile yeni bir yaklaşım önerilerek, tanınırlık yönetimine dayalı bir sistem oluşturulması önerilmiştir. Sistemdeki tanınırlık değerlendirmesi güvenilir bir otoriteye dayandırılmakta, güvenilirlik puanı belirli bir eşik değerinin üstünde olduğu takdirde ilgili araç haberleşmeye katılabilmekte ve araç ağlarındaki güvenilmez mesajlar kaynaktan engellenebilmektedir. 5G sistemlerin bu tür kısıtlarının 6G'de kullanılması önerilen blok zincir gibi yıkıcı teknolojiler sayesinde aşılması mümkün olabilecektir.

Bu bölümde 6G-V2X ağlarda güvenliğin sağlanması amacıyla önerilen yenilikçi yaklaşımlar üç temel başlık altında irdelenmektedir. Bunlar sırasıyla blok zincir tabanlı, makine

öğrenmesi tabanlı ve kuantum hesaplama destekli geliştirilen güvenlik sağlayıcı yöntem ve tekniklerdir.

4.1. Blok Zincir Tabanlı Araç Haberleşmesi ve Araçların İnterneti

6G-V2X sistemlerinde yenilikçi bir teknoloji olarak, birden çok tarafı içeren ve merkezi olmayan güvenli işlemlerin gerçekleştirilebilmesi için önemli bir çözüm yöntemi olarak blok zincirin kullanılması öne çıkmaktadır. Blok zincir teknolojisi, V2X/IoV ortamında hem karşılıklı güvenin oluşturulması ve hem de sistem güvenliğini sağlayabilecek; kurcalamaya dayanıklı (*tamper-proof*) olarak herhangi bir cihaza yetkisiz erişimi veya bir güvenlik sisteminin atlatılmasını engelleyip, caydırmayı veya tespit etmeyi mümkün kılacak önemli bir araçtır. Ayrıca, merkeziyetçi olmayan dağıtık bir çerçeve ortaya koyması bakımından da büyük ölçekli ağlarda kullanım için uygundur (Kang ve diğ., 2019).

Blok zincir sistemlerinde işlemlerin kayıtları güvenli bir şekilde dağıtılmış bir defter üzerinde tutulmaktadır. Araç haberleşme sistemlerinde ortamdaki haberleşme düğüm sayısının yoğun şekilde artmasıyla, blok zincirin araç ağlarında pratik uygulaması konusunda önemli zorluklar ortaya çıkabilir (Nguyen ve diğ., 2020). Kötü niyetli bir düğüm tarafından gerçekleştirilmemiş bir olayla ilgili gerçek dışı bir mesaj yayınlandığında, mesajların güvenilirliğini değerlendirmek için çevresel düğümlerden bir uzlaşma aranır, sonuç değerlendirilmelisi uygun olabilir. Ancak bu durumda da sistemde önemli gecikme süreleri oluşabilir. Düğümlerden gelen mesajların güvenilirliği, düğümün güvenilirliğine dair geliştirilen bir kararla, olaydan önce (pre-event) veya diğer düğümlerden gelen mesajlara da bakılarak olaydan sonra (post-event) veyahut da iki yaklaşımı yakınlaştıran hibrit bir yaklaşımla değerlendirmeye tabi tutulabilir. Sistemde güvenilirlik değerlendirmesi merkezi bir birimde yapılabileceği gibi, blok zincir tabanlı dağıtık bir şekilde de gerçekleştirilebilir.

Blok zincir ağında uzlaşma mekanizmaları çeşitli yöntemlerle çalıştırılabilir, bunlardan biri hisse ispatı (proof-of-stake) yöntemi olup, güvenilmeyen düğümlerden gelen mesajları doğrulamak için kullanılacak bir yöntemdir (Han ve diğ., 2020). Benzer şekilde mesajların güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla oylamaya dayalı uzlaşma da kullanılabilir (Ayaz ve diğ., 2020). Üçüncü bir mekanizma ise, emek ispatı (proof-of-work) olup, haberleşme düğümleri kendi aralarında en uygun röleyi belirlemek için düğümler arasındaki mesafeyi ilgili işaret-girişim ve gürültü oranını çarparak oluşturulan kalite faktörünü hesaplayabilirler (Ayaz ve diğ., 2021). Bu alanda Yang ve diğ. (2019) tarafından yapılan bir diğer çalışmayla ise, komşu araçlardan alınan mesajların güvenilirliğini doğrulayabilmek için Bayesçi çıkarım modeli kullanılmış olup, bir araç kendisine gelen mesajların kaynağı olan araçlar için derecelendirme yapmaktadır. Araçlardan yüklenen derecelendirme sonuçlarına göre, yol kenarındaki birimler (*road-side unit*, RSU) bir güven değeri hesaplamakta ve bu veri bir blokta paketlemektedir. Daha sonra bu bloklar, RSU tarafından bir blok zincire eklenerek, işbirlikli bir sistemle güncel, güvenilir ve tutarlı bir blok zincir yapısı oluşturulmaktadır. Tüm bu süreçlerde blok zincir kullanımıyla doğrulama ile birlikte gizlilik de sağlanmaktadır (Kang, 2019).

Araç haberleşmesinde blok zincir tabanlı yöntemler çok farklı amaçlarla kullanılabilir. Dağıtık güvenlik yönetiminin yanı sıra, araçlar için uç birim hesaplaması (Vehicular Edge Computing, VEC) veya sis/bulut hesaplama ile belirli görevlerin tamamen veya kısmen hesaplayıcı birimlere aktarılması veya çeşitli içeriklerin ön belleğe aktarılmasında kullanılabilirler (Hui ve diğ., 2022).

Blok zincirin farklı bir kullanım senaryosu da aynı spektrumu kullanabilecek farklı kullanıcılar arasında lisanssız spektrum paylaşımının yönetilmesidir. Blok zincir tabanlı spektrum paylaşımıyla daha güvenli ve daha verimli bir dağıtık yapı elde edilebileceği önerilmiştir (Zhang ve diğ., 2019).

4.2. Makine Öğrenmesi ve Birleşik Öğrenmeye Dayalı Güvenlik Yönetimi

Makine öğrenmesi ve çeşitli derin öğrenme (deep learning, DL) tekniklerinin haberleşme ağlarında çok farklı amaçlarla kullanılabilme potansiyeli mevcuttur. Kendi kendini organize eden ağlarda (self-organizing networks, SON) makine öğrenme yöntemlerinin kullanımı üzerine detaylı bir literatür analizi Klaine ve diğ., (2017) tarafından yayınlanan çalışmada yer almaktadır. 6G ağlarında dağıtık makine öğrenmesi teknikleri üzerine bir değerlendirme ise Muscinelli ve diğ., (2022)'de yayınlanmıştır. Öte yandan, kaynakların kısıtlı olduğu telsiz haberleşme sistemlerinde dağıtık makine öğrenmesi tekniklerinin uygulanması önemli zorluklar da içermektedir. Bu bakımdan, makine öğrenmesi teknikleri içerisinde araç haberleşmesine en uygun ve elverişli olan yöntem ve yaklaşımların benimsenmesi son derece kritik öneme sahiptir.

Birbirleriyle, altyapılarla ve çevrelerindeki her şeyle haberleşebilen araçların arasında özellikle otonom sürüş özelliği bulunan araçlarda çok sayıda sensöre ait verinin iletilmesi büyük bir veri akışı gereksinimi doğuracaktır. Bunun yerine, veriden elde edilen öğrenme modeli bilgisinin güvenli şekilde iletilmesini sağlayan dağıtık bir yapay zekâ çözümünün blok zincirle birlikte kullanılmasının çok daha etkin sonuçlar üretmesi beklenmektedir. Sensörlerden üretilen büyük verinin çeşitliliği ve gizlilik gereksinimleri göz önüne alındığında, birleşik öğrenme (*federated learning*, FL) yöntemlerinin IoV'deki işbirlikli öğrenme teknikleri içinde en uygunu olarak öne çıktığı görülmektedir (Huang ve diğ., 2020; Pokhrel ve diğ., 2020). Blok zincir ve FL çözümlerinin bir arada kullanımı akıllı, güvenli ve hızlı cevap üretebilen bir IoV ağı oluşturmaya katkı verecektir. FL'de, düğümler yerel modelleri kendi özel verileri üzerinde ayrı ayrı eğitmektedir ve tüm ham veriyi bir merkezi düğüme iletmek yerine kendi lokal modellerini bir merkezi birim veya toplayıcıya (*aggregator*) iletmektedir. 6G araç haberleşmesinde bu toplayıcılar genellikle RSU'lar olup, global bir model oluşturmak üzere tüm lokal modelleri birleştirebilmektedirler.

6G sistemleri için araçların internetinin güvenli şekilde gerçekleşebilmesi için blok zincir kullanımı ve aynı zamanda FL yaklaşımıyla kişisel gizliliği artıran bir yöntem Ayaz ve diğ., (2022a ve 2022b) tarafından önerilmektedir. Bu yapıda, merkezde bir modelin eğitimi için tüm düğümlerde üretilen lokal verilerin iletimi ve paylaşımı yerine, her düğümden lokal veri kullanılarak eğitilen lokal modellerin merkezi düğüme iletilmesi söz konusu olmakta; bu durumda yoğun miktarda ham veri iletilme gereksinimi ortadan kaldırılmaktadır. Araç ağlarında FL yöntemleriyle birlikte hesaplama kaynaklarının uç birimlerdeki altyapılar üzerinde kullanılmasını destekleyen araç uç bilişimi yapısı umut verici bir yapı olarak ortaya konulmuştur (Ye ve diğ., 2020). Lu ve diğ. (2020) tarafından IoV'de güvenli veri paylaşımı amacıyla blok zincir destekli asenkron FL yapısı önerilmiştir. Karasal araçlarda olduğu kadar insansız hava araçları için de blok zincir tabanlı FL yapısının uygulaması yakın zamanda önerilmiş ve farklı uygulama alanlarına yönelik yenilikçi mimariler tanıtılmıştır (Saraswat ve diğ., 2022).

4.3. Kuantum Hesaplama Destekli Araç Haberleşmesi

6G sistemlerinin daha zorlu KPI'ları karşılama beklentisi nedeniyle önceki teknolojilerin üzerine gerçekleştirilecek inovasyonlar yerine tamamen yenilikçi teknoloji ve ağ mimarilerinin geliştirilmesi gerekecektir. Son yıllarda ilerlemeler kaydedilen kuantum bilgi teknolojileri, hem kuantum haberleşme, hem de kuantum hesaplama alanlarında gösterdiği gelişimle, 6G teknolojilerindeki güvenlik unsuru için önemli bir araç olarak ortaya çıkmaktadır (Wang ve Rahman, 2022a).

Klasik hesaplamada bilgi bitler cinsinden ifade edilir ve milyarlarca transistörden oluşan entegre devreler kullanılır. Hesaplama gücü, transistörlerin sayısı arttıkça doğrusal orantıyla artar. Öte yandan, kuantum bilgisayarlarda çok boyutlu hesaplama problemlerini çözmek üzere *kubit* denilen kuantum bitler kullanılır. Kubitler "0 ve 1" in eşfazlı süperpozisyonu şeklinde

birleşiminden oluşan üçüncü bir durumla tanımlanırlar. Kubit sayısı arttıkça, kuantum bilgisayarın hesaplama kapasitesi üstel olarak artar ve dolayısıyla klasik bilgisayarlara göre yüksek işlem karmaşıklığına sahip problemlerin çözümü mümkün hale gelir ve sonuca erişme süreleri üstel olarak hızlanır (Imre ve Balazs, 2005). Kuantum hesaplama ile öğrenme ve yapay zekâ problemlerinin çözümünde önemli bir seviye atlanacağı öngörülmektedir (Acampora, 2019). Duong ve diğ. (2022) çalışmasıyla, 6G ağları için kuantumdan ilham alan gerçek zamanlı optimizasyondaki fırsatlar ve zorluklar ele alınmış ve bu alandaki yol haritası irdelenmiştir.

6G ağların temel amacı zaman gecikmesine ve hesaplama gücüne hassas görev-kritik uygulamalara imkân tanınması ve çok hızlı büyüyen veri üzerinde analitik yöntemler ve makine öğrenmesi teknikleri kullanarak gerçek-zamanlı optimizasyon yapabilmesidir. Sanal gerçeklik (*virtual reality*, VR), artırılmış gerçeklik (*augmented reality*, AR), gerçek dünya ortamı ile bilgisayar tarafından oluşturulan ortamı birleştiren karma gerçeklik (*mixed reality*, MR) ve dokunsal internet (*tactile internet*) uygulamaları kuantum hesaplama sayesinde 6G ağlar üzerinden etkin şekilde gerçekleştirilebilir. 6G ağlar üzerinde optimum kaynak tahsisi yapılması amacıyla kuantum hesaplama ilham alan gerçek zamanlı bir optimizasyon yöntemi Duong ve diğ. (2022) çalışmasında tanıtılmaktadır.

Yeni bir hesaplama yöntemi olarak, kapalı ortamda konum belirleme problemini çözmek amacıyla Euclid uzaklığına dayalı bir kuantum hesaplama yaklaşımı ise Urgelles ve diğ. (2022) çalışmasında önerilmiş ve IBM Quantum Experience'da bir kuantum bilgisayar üzerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma ile büyük boyutlu vektörler için kuantum yaklaşımının klasik yaklaşıma göre daha yüksek bir doğrulukta ve daha yüksek bir başarımla sonuçlar elde ettiği gösterilmiştir.

Makine öğrenmesinde kuantum hesaplamanın kullanılması konusunda gelecek projeksiyonları DeBenedictis (2018) ile Nawaz ve diğ. (2019) çalışmalarında verilirken, 6G'de denetimli öğrenme için kuantum hesaplama yöntemleri Kulkarni ve diğ., (2021)'de, sezgisel kuantum optimizasyon yöntemleri ise Kim ve diğ. (2021)'de detaylandırılmıştır.

Bir yandan güçlü kuantum bilgisayarlarının blok zincir güvenliğini riske etmesi söz konusuysen, öte yandan kuantum teknolojileri sayesinde blok zincirlerin performansının ve güvenliğinin artırılması için fırsatlar da sunulmaktadır (Fedorov ve diğ., 2018; Wu, C. ve diğ., 2021). Klasik dijital imzaların yerini almak ve bir blok zincir ağında düğümler arası haberleşmeyi şifrelemek için kuantum kriptografi kullanılabilir. Teorik olarak kuantum haberleşmeyle mutlak güvenliğe erişilebilir. Çünkü kuantumda klonlanamama teoremi ve belirsizlik ilkesi sayesinde kuantum anahtarlar kullanılarak güvenlik sağlanması söz konusudur. Ayrıca kuantum haberleşmesinde yasal olmayan bir dinleyicinin varlığı kuantum durumunu bozacağı için kolaylıkla tespit edilebilecektir (Zhang ve diğ., 2019).

5. SONUÇLAR VE GELECEK ARAŞTIRMA ALANLARI

6G ağlarında araç haberleşmesinin pek çok alanında yürütülen teorik çalışmaların derinleştirilmesi ve fiziksel gerçeklemeye yönelik çalışmaların artması öngörülmektedir. Özellikle yüksek veri hızlarında kesintisiz haberleşmeyi destekleyecek şekilde tam çift yönlü (*full duplex*) NOMA tabanlı V2X haberleşmede blok zincirlerin kullanımıyla fiziksel katman güvenliğinin sağlandığı sistemler konusunda öncül çalışmalar mevcut olup (Ayaz ve diğ., 2022b), bu konuda araştırmaların geliştirilmesi beklenmektedir. 6G haberleşme için önemli bir etkinleştirici olarak kabul edilen RIS çalışmalarının artması ve RIS destekli araçlar arası haberleşme ve araçların interneti konusunda birleşik öğrenme yaklaşımlarının daha da ilettilmesi söz konusudur (Wang ve diğ., 2021).

Ayrıca, 6G haberleşmesinin önemli odak alanlarından biri de, başlangıçta endüstriyel ve imalat uygulamaları için tasarlanmış olan dijital ikiz teknolojisi olacaktır (Kuruvatti ve diğ., 2022; Liu ve diğ. 2022). Dijital ikiz, bir nesne, sistem veya sürecin birebir olarak dijital alanda tam olarak, yüksek bir kesinlikle ve gerçek-zamanlı tasarlanıp, temsil edilmesidir. Dijital ikiz ile

fiziksel dünya ve fiziksel dünyadan gelen nitelikler arasında iki yönlü bir iletişim vardır (Tao ve diğ., 2019; Barricelli ve diğ., 2019). Dijital ikiz veri depolama, modelleme, öğrenme, veri analitiği, kestirim ve/veya benzetim yaparak fiziksel ikizine geribildirimlerde bulunabilir. Buna ek olarak çok sayıda dijital ikiz birbiriyle haberleşebilir. Bu yönüyle IoV'nin güvenilir bir şekilde sürdürülmesi amacıyla dijital ikiz ağlarla entegrasyon üzerine yapılan mevcut çalışmaların (Wu, Y. ve diğ., 2021) gelecekte de geliştirilmesi beklenmektedir.

Sonuç olarak, 6G haberleşme sistemlerine yönelik ve yüksek sayıda haberleşme düğümü arasında hızlı mobilitayı destekleyecek şekilde V2V/V2I/V2X/IoV haberleşme çalışmaları gelişerek devam edecektir. Heterojen ağlar arasında bağlantının sürekli sağlanmasının yanı sıra düşük gecikme süresi gereksinimleri de değerlendirildiğinde, güvenli haberleşme konusunda önemli zorluklar ortaya çıkabilecektir. RIS, blok zincir, FL gibi yenilikçi yöntemlerin araç haberleşmesi için geliştirilmesi anlamında önemli fırsatlar mevcuttur. Bu makale ile yakın zamanda yapılan çalışmalar irdelenmiş ve bu alanda yapılan çalışmaların gelişimi açıklanmıştır. Dağıtık makine öğrenme tekniklerinden FL yaklaşımlarının V2X haberleşmede geliştirilmesi ve dönüştürülmesi, kuantum hesaplamaya dayalı blok zincirler gibi yenilikçi çalışmalar ve araç haberleşmesinde gelecekte önem kazanacak araştırma alanları ortaya konulmuştur.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Yazar Serdar Özgür ATA, çalışmanın tüm süreçlerinde katkıda bulunmuştur ve çalışmanın her yönünden sorumludur.

KAYNAKLAR

1. Acampora, G. (2019) Quantum Machine Intelligence. Cham, Switzerland: Springer, 2019, pp. 1–3.
2. Agudo, I., Montenegro-Gómez, M. ve Lopez, J. (2021) A Blockchain Approach for Decentralized V2X (D-V2X), *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(5), 4001-4010. doi:10.1109/TVT.2020.3046640
3. Alakoca, H., Namdar, M., Aldirmaz-Colak, S., Basaran, M., Basgumus, A., Durak-Ata, L. ve Yanikomeroglu, H. (2022) Metasurface Manipulation Attacks: Potential Security Threats of RIS-Aided 6G Communications, *IEEE Communications Magazine*. doi:10.1109/MCOM.005.2200162
4. Ata, S. Ö. (2017a) Design of Vehicular Communication Systems Employing Physical Layer Network Coding over Cascaded Fading Channels, *PhD Thesis, Istanbul Technical University, Graduate School of Science, Engineering, and Technology*
5. Ata, S. Ö. ve Altunbas, I. (2018) STTC design for vehicular communication systems employing fixed-gain AF PLNC over cascaded fading channels, *IET Communications* 12 (11), 1283-1289. doi: 10.1049/iet-com.2017.0702
6. Ata, S. Ö. (2019) Secrecy performance analysis over cascaded fading channels, *IET Communications*, 13(2), 259-264. doi: 10.1049/iet-com.2018.5676
7. Ata, S. Ö. ve Erdogan, E. (2020) Secrecy outage probability of inter-vehicular cognitive radio networks, *International Journal of Communication Systems*, 33(4), e4244. doi: 10.1002/dac.4244

8. Ayaz, F., Sheng, Z., Tian, D., Guan, Y.L. ve Leung, V. (2020) A Voting Blockchain based Message Dissemination in Vehicular Ad-Hoc Networks (VANETs). *International Communications Conference*, Dublin, Ireland, 7–11. doi:10.1109/ICC40277.2020.9148823
9. Ayaz, F., Sheng, Z., Tian, D. ve Guan, Y.L. (2021) A Proof-of-Quality-Factor (PoQF) based Blockchain and Edge Computing for Vehicular Message Dissemination, *IEEE Internet Things Journal*, 8(4), 2468–2482. doi:10.1109/JIOT.2020.3026731
10. Ayaz, F., Sheng, Z., Ho, I., Tian, D. ve Ding, Z. (2022a) Blockchain-enabled FD-NOMA based Vehicular Network with Physical Layer Security, *Proceedings of the IEEE 95th VTC-Spring*, Helsinki, Finland, 1-6. doi:10.1109/VTC2022-Spring54318.2022.9860421
11. Ayaz, F., Sheng, Z., Tian, D., Nekovee, M. ve Saeed, N. (2022b) Blockchain-Empowered AI for 6G-Enabled Internet of Vehicles, *MDPI Electronics*, 11(3339), 1-12. doi:10.3390/electronics11203339
12. Barricelli, B. R., Casiraghi, E. ve Fogli, D. (2019) A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications, *IEEE Access*, 7, 167653–167671. doi:10.1109/ACCESS.2019.2953499
13. Chen, Y., Zhu, P., He, G., Yan, X., Baligh, H. ve Wu, J. (2020) From Connected People, Connected Things, to Connected Intelligence, *2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 1-7. doi:10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083770
14. Cui, J., Zhang, X., Zhong, H., Ying, Z. ve Liu, L. (2019) RSMA: Reputation System-Based Lightweight Message Authentication Framework and Protocol for 5G-Enabled Vehicular Networks, *IEEE Internet Things Journal*, 6(4), 6417–6428. doi:10.1109/JIOT.2019.2895136
15. Cui, M., Wu, Z., Chen, Y., Xu, S., Yang, F. ve Dai, L. (2022) Demo: Low-power Communications Based on RIS and AI for 6G, *IEEE International Conference on Communications Workshops*, 1-2. doi:10.1109/ICCWshops53468.2022.9915019
16. DeBenedictis, E. P. (2018) A future with quantum machine learning, *Computer*, 51(2), 68–71. doi: 10.1109/MC.2018.1451646
17. Di Renzo, M., Ntontin, K., Song, J., Danufane, H., Qian, X., Lazarakis, F., De Rosny, J., Phan-Huy, D.-T., Simeone, O., Zhang, R., Debbah, M., Lerosey, G., Fink, M., Tretyakov, S., ve Shamai, S. (2020) Reconfigurable intelligent surfaces vs. relaying: Differences, similarities, and performance comparison, *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 1, 798-80. doi:10.1109/OJCOMS.2020.3002955
18. Dinan, M. H., Perović, N. S. ve Flanagan, M. F. (2022) RIS-Assisted Receive Quadrature Space-Shift Keying: A New Paradigm and Performance Analysis, *IEEE Transactions on Communications*, 70(10), 6874-6889. doi:10.1109/TCOMM.2022.3198117
19. Duong, T. Q., Nguyen, L. D., Narottama, B., Ansere, J. A., Huynh D. V. ve Shin, H. (2022) Quantum-Inspired Real-Time Optimization for 6G Networks: Opportunities, Challenges, and the Road Ahead, *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 3, 1347-1359. doi:10.1109/OJCOMS.2022.3195219
20. Fedorov, A.K., Kiktenko, E.O., Lvovsky, A.I. (2018) Quantum Computers put Blockchain Security at Risk, *Nature*, 563, 465-467. doi: <https://doi.org/10.1038/d41586-018-07449-z>
21. Fu, Y., Li, C., Yu, F. R., Luan, T. H. ve Zhang, Y. (2022) A Survey of Driving Safety With Sensing, Vehicular Communications, and Artificial Intelligence-Based Collision Avoidance, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(7), 6142-6163. doi:10.1109/TITS.2021.3083927

22. Ghosh, A., Maeder, A., Baker, M. ve Chandramouli, D. (2019) 5G Evolution: A View on 5G Cellular Technology Beyond 3GPP Release 15, *IEEE Access*, 7, 127639-127651. doi:10.1109/ACCESS.2019.2939938
23. Gismalla, M. S. M., Asrul, I. A., Bin Salim, M. R., Abdullah, M. F. L., Iqbal, F., Mabrouk, W. A., Othman, M. B., Ashyap, A. Y. I. Ve Supa'at, A. S. M. (2022) Survey on Device to Device Communication for 5GB/6G Networks: Concept, Applications, Challenges, and Future Directions, *IEEE Access*, 10, 30792-30821. doi:10.1109/ACCESS.2022.3160215
24. Gyawali, S., Xu, S., Qian, Y. ve Hu, R. Q. (2021) Challenges and Solutions for Cellular Based V2X Communications, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 23(1), 222-255. doi:10.1109/COMST.2020.3029723
25. Han, Q., Yang, Z., Ma, Z., Li, J., Shi, Y., Zhang, J. ve Yang, S. (2020) CMBIoV: Consensus Mechanism for Blockchain on Internet of Vehicles, *International Conference on Blockchain and Trustworthy Systems*, Dali, China, Springer: Singapore, 2020. doi: 10.1007/978-981-15-9213-3_27
26. Hong, E. K., Lee, I., Shim, B., Ko, Y.-C., Kim, S.-H., Pack, S., Lee, K., Kim, S., Kim, J.-H., Shin, Y., Kim, Y., ve Jung, H. (2022) 6G R&D vision: Requirements and candidate technologies, *Communications and Networks*, 24(2), 232-245. doi:10.23919/JCN.2022.000015
27. Hui, Y ve diğ., (2022) Secure and Personalized Edge Computing Services in 6G Heterogeneous Vehicular Networks, *IEEE Internet of Things Journal*, 9(8), 5920-5931, doi: 10.1109/JIOT.2021.3065970
28. Imre, S. ve Balazs, F. (2005) Quantum Computing and Communications: An Engineering Approach. Hoboken, Wiley, NJ, USA.
29. Jia, Z., Sheng, M., Li, J., Niyato, D. ve Han, Z. (2021) LEO-Satellite-Assisted UAV: Joint Trajectory and Data Collection for Internet of Remote Things in 6G Aerial Access Networks, *IEEE Internet of Things Journal*, 8(12), 9814-9826. doi:10.1109/JIOT.2020.3021255
30. Kang, J., Xiong, Z., Ye, D., Kim, D. I., Zhao, J. ve Niyato, D. (2019) Toward secure blockchain-enabled Internet of Vehicles: Optimizing consensus management using reputation and contract theory, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 68(3), 2906–2920. doi: 10.1109/TVT.2019.2894944
31. Khan, M. A., Ghosh, S., Busari, S. A., Huq, K. M. S., Dagiuklas, T., Mumtaz, S., Iqbal, M., ve Rodriguez, J. (2021) Robust, Resilient and Reliable Architecture for V2X Communications, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(7), 4414-4430. doi:10.1109/TITS.2021.3084519
32. Kim, M., Kasi, S., Lott, P. A., Venturelli, D., Kaewell, J. ve Jamieson, K. (2021) Heuristic quantum optimization for 6G wireless communications, *IEEE Network*, 35(4), 8–15. doi: 10.1109/MNET.012.2000770
33. Kirubasri, G., Sankar, S., Pandey, D., Pandey, B. K., Singh, H. ve Anand, R. (2021) A Recent Survey on 6G Vehicular Technology, Applications and Challenges, *2021 9th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO)*, Noida, India, 1–5, doi: 10.1109/ICRITO51393.2021.9596147
34. Klaine, P. V., Imran, M. A., Onireti, O. ve Souza, R. D. (2017) A survey of machine learning techniques applied to self-organizing cellular networks, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(4), 2392–2431. doi:10.1109/COMST.2017.2727878

35. Kulkarni, V., Kulkarni, M. ve Pant, A. (2021) Quantum computing methods for supervised learning, *Quantum Machine Intelligence*, 3(2), 1–14. doi:10.1007/s42484-021-00050-0
36. Kuruvatti, N. P., Habibi, M. A., Partani, S., Han, B., Fellan, A. ve Schotten, H. D. (2022) Empowering 6G Communication Systems With Digital Twin Technology: A Comprehensive Survey, *IEEE Access*, 10, 112158-112186. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3215493
37. Lee, S., Jung, Y., Park, Y.-H. ve Kim, S.-W. (2022) Design of V2X-Based Vehicular Contents Centric Networks for Autonomous Driving, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(8), 13526-13537. doi:10.1109/TITS.2021.3125358
38. Liu, J., Zhang, L., Li, C., Bai, J., Lv, H. ve Lv, Z. (2022) Blockchain-Based Secure Communication of Intelligent Transportation Digital Twins System, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(11), 22630-22640. doi:10.1109/TITS.2022.3183379
39. Lu, Y., Huang, X., Zhang, K., Maharjan, S. ve Zhang, Y. (2020) Blockchain Empowered Asynchronous Federated Learning for Secure Data Sharing in Internet of Vehicles, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(4), 4298-4311. doi: 10.1109/TVT.2020.2973651
40. Ma, H., Li, S., Zhang, E., Lv, Z., Hu, J. ve Wei, X. (2020) Cooperative Autonomous Driving Oriented MEC-Aided 5G-V2X: Prototype System Design, Field Tests and AI-Based Optimization Tools, *IEEE Access*, 8, 54288-54302. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2981463
41. Maraqa, O., Rajasekaran, A. S., Al-Ahmadi, S., Yanikomeroglu, H. ve Sait, S. M. (2020) A Survey of Rate-Optimal Power Domain NOMA With Enabling Technologies of Future Wireless Networks, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22(4), 2192-2235. doi: 10.1109/COMST.2020.3013514
42. Meijers, J., Jayatungai E.i Nag, A. Ve Jurcut, A. D. (2022) Blockchain for V2X: Applications and Architectures, *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, 3, 193-209. doi: 10.1109/OJVT.2022.3172709
43. Muscinelli, E., Shinde, S. S. ve Tarchi, D. (2022) Overview of Distributed Machine Learning Techniques for 6G Networks, *Algorithms*, 15(6), 210. doi: 10.3390/a15060210
44. Naik, G., Choudhury, B. ve Park, J.-M. (2019) IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of radio access technologies for V2X communications, *IEEE Access*, 7, 70169–70184. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2919489
45. Nawaz, S. J., Sharma, S. K., Wyne, S., Patwary, M. N. ve Asaduzzaman, M. (2019) Quantum machine learning for 6G communication networks: State-of-the-art and vision for the future, *IEEE Access*, 7, 46317–46350. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2909490
46. Nguyen, D. C., Pathirana, P. N., Ding, M. ve Seneviratne, A. (2020) Blockchain for 5G and beyond networks: A state of the art survey, *Journal of Network and Computer Applications*, 166, 102693. doi: 10.1016/j.jnca.2020.102693
47. Noor-A-Rahim, M., Liu, Z., Lee, H., Khyam M. O., He, J., Pesch, D., Moessner, K., Saad, W. ve Poor, H. V. (2022) 6G for Vehicle-to-Everything (V2X) Communications: Enabling Technologies, Challenges, and Opportunities, *Proceedings of the IEEE*, 110(6), 712-734. doi : 10.1109/JPROC.2022.3173031
48. Pokhrel, S.R. ve Choi, J. (2020) Federated Learning with Blockchain for Autonomous Vehicles: Analysis and Design Challenges, *IEEE Transaction on Communications*, 68(8), 4734–4746. doi: 10.1109/TCOMM.2020.2990686

49. Saraswat, D., Verma, A., Bhattacharya, P., Tanwar, S., Sharma, G., Bokoro, P.N. ve Sharma, R. (2022) Blockchain-Based Federated Learning in UAVs Beyond 5G Networks: A Solution Taxonomy and Future Directions, *IEEE Access*, 10, 33154–33182. doi : 10.1109/ACCESS.2022.3161132
50. Sehla, K., Nguyen, T. M. T., Pujolle, G. ve Velloso, P. B. (2022) Resource Allocation Modes in C-V2X: From LTE-V2X to 5G-V2X, *IEEE Internet of Things Journal*, 9(11), 8291–8314. doi: 10.1109/JIOT.2022.3159591
51. Serghiou, D., Khalily, M., Brown, T. W. C. ve Tafazolli, R. (2022) Terahertz Channel Propagation Phenomena, Measurement Techniques and Modeling for 6G Wireless Communication Applications: A Survey, Open Challenges and Future Research Directions, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 24(4), 1957–1996, doi: 10.1109/COMST.2022.3205505
52. Tang, F., Kawamoto, Y., Kato, N. ve Liu, J. (2020) Future Intelligent and Secure Vehicular Network Toward 6G: Machine-Learning Approaches, *Proceedings of the IEEE*, 108(2), 292–307, doi: 10.1109/JPROC.2019.2954595
53. Tao, F., Zhang, H., Liu, A. ve Nee, A. Y. C. (2019) Digital twin in industry: State-of-the-art, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415. doi: 10.1109/TII.2018.2873186
54. Tataria, H., Shafi, M., Molisch, A. F., Dohler, M., Sjoland, H. ve Tufvesson, F. (2021) 6G wireless systems: Vision, requirements, challenges, insights, and opportunities, *Proceedings of the IEEE*, 109(7), 1166–1199. doi: 10.1109/JPROC.2021.3061701
55. <https://www.3gpp.org/>, Erişim Tarihi:01.01.2023, Konu: *The 3rd Generation Partnership Project (3GPP)*
56. Urgelles, H., Picazo-Martínez, P. ve Monserrat, J. F. (2022) Application of Quantum Computing to Accurate Positioning in 6G Indoor Scenarios, *ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications, 2022*, 643–647. doi: 10.1109/ICC45855.2022.9838523
57. Wang, C. ve Rahman, A. (2022a) Quantum-Enabled 6G Wireless Networks: Opportunities and Challenges, *IEEE Wireless Communications*, 29(1). doi: 10.1109/MWC.006.00340
58. Wang, H.-F., Huang, C.-S. ve Wang, L.-C. (2021) RIS-assisted UAV Networks: Deployment Optimization with Reinforcement-Learning Based Federated Learning, *30th Wireless and Optical Communications Conference (WOCC)*, Taipei, Taiwan, 257–262. doi: 10.1109/WOCC53213.2021.9602993
59. Wang, Y., Zhang, W., Chen, Y., Wang, C. -X. ve Sun, J. (2022b) Novel Multiple RIS-Assisted Communications for 6G Networks, *IEEE Communications Letters*, 26(6), 1413–1417. doi: 10.1109/LCOMM.2022.3163587
60. Wu, C., Ke, L. ve Du, Y. (2021) Quantum Resistant Key-Exposure Free Chameleon Hash and Applications in Redactable Blockchain. *Information Science*, 548, 438–449. doi: 10.1016/j.ins.2020.10.008
61. Wu, Q. ve Zhang, R. (2020) Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network, *IEEE Communication Magazine*, 58(1), 106–112. doi: 10.1109/MCOM.001.1900107
62. Wu, Y., Zhang, K. ve Zhang, Y. (2021) Digital twin networks: A survey, *IEEE Internet of Things Journal*, 8(18), 13789–13804. doi: 10.1109/JIOT.2021.3079510

63. Yang, Z., Yang, K., Lei, L., Zheng, K. ve Leung, V.C.M. (2019) Blockchain based Decentralized Trust Management in Vehicular Networks, *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2), 1495–1505. doi: 10.1109/IIOT.2018.2836144
64. Ye, D., Yu, R., Pan, M. ve Han, Z. (2020) Federated Learning in Vehicular Edge Computing: A Selective Model Aggregation Approach, *IEEE Access*, 8, 23920–23935. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2968399
65. Zeydan, E., Turk, Y., Aksoy, B. ve Tasbag, Y. Y. (2022) Post-Quantum Era in V2X Security: Convergence of Orchestration and Parallel Computation, *IEEE Communications Standards Magazine*, 6(1), 76-82. doi: 10.1109/MCOMSTD.0001.2100060
66. Zhang, Z., Xiao, Y., Ma, Z., Xiao M., Ding, Z., Lei, X., Karagiannidis, G. K. ve Fan, P. (2019) 6G wireless networks: Vision, requirements, architecture, and key technologies, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 14(3), 28–41. doi: 10.1109/MVT.2019.2921208

