



HARRAN ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK DERGİSİ

HARRAN UNIVERSITY JOURNAL of ENGINEERING

e-ISSN: 2528-8733 (ONLINE)
URL: <http://dergipark.gov.tr/humder>

Deneyim Kalitesi odaklı Akıllı İşbirlikçi Çoklu-erişimli Uç Hesaplama Çerçevesi

QoE-based Smart Cooperative Multi-access Edge Computing Framework

Yazar(lar) (Author(s)): Mehmet Fatih TÜYSÜZ¹

¹ORCID ID: 0000-0002-8955-9710

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Tüysüz M.F., “Deneyim Kalitesi odaklı Akıllı İşbirlikçi Çoklu-erişimli Uç Hesaplama Çerçevesi”, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 4(3): 08-18, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/humder/archive>



Deneyim Kalitesi odaklı Akıllı İşbirlikçi Çoklu-erişimli Uç Hesaplama Çerçevesi

Mehmet Fatih TÜYSÜZ

Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Haliliye/Şanlıurfa

Öz

Günümüzün gelişmiş radyo erişim teknolojileri, yüksek-tanımlı büyük veri/video trafiğinin hızlı ve güvenilir iletimini kolaylaştırmış olsa da, kullanıcılar tarafından deneyimlenen/algılanan kalite, kaynak (örneğin, bulut sunucuları) ve uç-nokta arasındaki mesafeye dayalı yüksek gecikme nedeniyle beklenenden düşüktür. 5G ağ erişim teknolojisiyle ivmelenen çoklu-erişimli uç hesaplama (MEC) paradigmasının, bu sorunu MEC sunucularını uç-noktaların yoğunlaştığı ağ kenarlarında dağıtarak, ve hesaplama, içerik dağıtım, depolama ve sanallaştırma işlemlerinin önemli bir kısmını bu uçlar üzerinden gerçekleştirerek çözmesi beklenmektedir. Yalnız, MEC sunucularının kendi aralarında veya kaynaklar ile uç-noktalar arasında iletişim kurmasını sağlamak için de yeni ve karmaşık protokollere ihtiyaç duyulmaktadır. Çalışma kapsamında, haberleşmenin sadece yardımcı bir bilgi alışverişi sağlayacağı varsayımından farklı olarak, araç ağlarda servis ve deneyim kalitesini ve yolcu konforunu artırmayı amaçlayan, yeni nesil kablosuz ve hücresel ağ erişim teknolojileri ile yazılım-tanımlı ağların (SDN), çoklu-erişimli uç hesaplama (MEC) ve makine öğrenmesi (ML) tekniklerinin entegrasyonunun sağlandığı, yeni ve özgün bir mimarinin sisteme olası katkıları tartışılmaktadır. Önerilen çalışmada, sadece 5G/IEEE 802.11ac/p gibi yeni nesil ağ erişim teknolojileri ve özelliklerinin sistem optimizasyonuna dahil edilmesi değil, aynı zamanda sistem tasarımının işbirlikçi ve sistematik bir perspektiften incelenmesi ele alınmıştır. Önerilen mimarinin, temel olarak yüksek güvenilirlik ve düşük gecikme arasındaki ikilemi çözmesi ve sonuç olarak hızlı ve güvenilir olan uygun fiyatlı araç iletişiminin gerçekleştirilmesini ve ticarileştirilmesini hızlandırması hedeflenmektedir.

Makale Bilgisi

Başvuru: 01/12/2019
Düzeltilme: 21/12/2019
Kabul: 23/12/2019

Anahtar Kelimeler

QoE
Araç Ağları
V2X
VANET
MEC
SDN

Keywords

QoE
Vehicular Networks
V2X
VANET
MEC
SDN

QoE-based Smart Cooperative Multi-access Edge Computing Framework

Abstract

Although today's advanced radio access technologies have facilitated fast and reliable transmission of high-definition massive data/video/audio traffic, experienced/perceived quality is mostly lower than expected due to distance-based high latency between sources (e.g. cloud servers) and end-hosts. Multi-access edge computing (MEC) paradigm, which is accelerated with 5G, is expected to address this issue deploying MEC servers at network edges and pushing computation, content delivery, storage and virtualization towards the edges. Yet, it requires a set of complex operations and protocols to enable MEC servers to communicate among themselves, or between resources and end-points. Unlike the current state of the art, in which communications is merely a means of auxiliary information exchange, our work aims to discuss the driving quality of experience and the passenger comfort, by integrating the 5G, Software Defined Networks (SDN), Multi-access Computing (MEC) and Machine Learning (ML) into the design of the vehicular environment. This way, not only the inherent 5G features will be incorporated into the system optimization, but also, the system design will be revolutionized from a cooperative and systematic perspective. This will fundamentally resolve the dilemma between high-reliability and low-latency, and thus ultimately expedite the realization and commercialization of affordable vehicular communications that are fast and reliable.

1. GİRİŞ

Seyir halindeki araçların yüksek hızı ve araç ağı topolojilerinin karmaşıklığı, araç ağlarının (Vehicular Networks) izlenmesini ve verimli bir şekilde yönetilmesini güçleştirmektedir. Bununla birlikte, otomotiv endüstrisindeki Araçtan-Herkese (V2X) gibi yeni nesil bağlanabilirlik teknolojilerinin bir sonucu olarak ortaya çıkan ürün ve uygulamalar kullanıcıların sürüş deneyiminde önemli dönüşümlere yol açmıştır. V2X, akıllı, işbirlikçi ve çevrimiçi bir araç iletişim sistemi aracılığıyla; trafik tahmini, akıllı navigasyon sistemleri, kooperatif çarpışma önleme sistemleri, özerk sürüş vb. yeni uygulamaların etkinleştirilmesini amaçlamaktadır. Bu uygulamaların etkili bir şekilde uygulanabilmesi için ise mevcut temel ağlarla garanti edilemeyen ultra-güvenilir ve düşük-gecikmeli iletişimin sağlanması gereklidir.

Kablosuz iletişim, algılama ve bulut bilişim teknolojilerindeki gelişmeler, otomotiv endüstrisinde kullanıcı deneyimini ön plana çıkaran önemli dönüşümlere neden olmuştur [2, 3]. Günümüzde, bir araç diğer araçlarla (V2V), kendisini çevreleyen altyapıyla (V2I), İnternet üzerinden (V2N), yol kenarındaki yayalarla (V2P) ve arka-uç bulut sunucusu ile bilgi alışverişinde bulunabilir [4]. Başka bir deyişle, araçlar neredeyse her şeyle bilgi alışverişinde bulunabilir (V2X). Gartner, Inc. tarafından yapılan tahminler, 2020 yılına kadar yaklaşık 0.25 milyar bağlantılı aracın yollarda olacağını göstermektedir. Ayrıca, Gartner 2020 yılına kadar yaklaşık 20.8 milyar bağlantılı şey'in (Connected Things (ör. IoT)) küresel ağı bir parçası olacağını öngörmektedir [5]. Araç ağları, faydalı bilgilerin paylaşılması yoluyla güvenlik, sürüş kolaylığı, ve daha fazla verimlilik sağlayacağı için popülerliğini giderek artıracaktır. Son on yılda, teknoloji bulut bilişimin yaygınlaşmasıyla dramatik bir şekilde güncellendiğinden, araç ağları da geniş ölçüde bu değişimle güncellenmiş ve gün geçtikçe daha popüler hale gelmiştir. Bu gelişmenin meydana getirdiği ve üzerinde durulması gereken birkaç sonuç da bulunmaktadır. Örneğin, araç ağlarının bulut bilişim üzerinden etkin kullanımı için daha fazla hesaplama yeteneği ve veri iletişimi gereklidir. Intel'e göre [6], güvenli kararlar almak için bir aracın sensörden gelen devasa miktarda veriyi (yaklaşık 1 GB/sn) analiz etmesi ve birleştirmesi gerekmektedir. Özerk sürüş, artırılmış gerçeklik (AR) teknikleri [7] ve benzeri bazı uygulamalar, karmaşık veri işleme yetenekleri ve daha fazla depolama kapasitesi gerektirir. Geleneksel taşıt ağları bu nedenle depolama ve iletişim açısından gereksinimleri karşılamak için büyük zorluklarla karşı karşıyadır.

Küresel karayolu taşımacılığı bağlamında araçların çevrimiçi bağlanabilirliği, şerit değiştirme, otomatik sollama, otonom sürüş, kooperatif olarak çarpışmadan kaçınma, kuş bakışı görüşü ve trafik tahmini gibi yeni vakaların ele alınmasını destekleyen kritik bir olanaktır [8, 9]. Bu nedenle, birçok otomobil üreticisi gelecekteki iş fırsatlarını yakalamak için V2X iletişim teknolojilerinin geliştirilmesi üzerinde çalışmaktadır. Günümüzdeki güncel V2X iletişim ağları, IEEE 802.11p tabanlı araç geçici ağları (VANET'ler) ve gelişen beşinci nesil (5G) tabanlı hücresele ağlardır. V2V iletişimindeki düşük gecikme süresi nedeniyle, VANET, işbirlikçi çarpışmadan kaçınma gibi aktif güvenlik uygulamalarında başarı elde etmiştir. Bununla birlikte, eğer veri iletişimi araçların seyrek olduğu kırsal bir alanda gerçekleştirilirse, haberleşme için yeterli yol kenarı birimleri (RSU'lar) olmayacağı için iletişim bağlantısı kesilebilir. Bu nedenle, bir VANET'in kapsamı RSU'ların yoğunluğu ile sınırlı olacaktır. IEEE 802.11p'nin önemli bir dezavantajı, kanal başına yaklaşık olarak 10 Mb/sn bant genişliği sınırlamasıdır; bu video iletimi sunan artırılmış gerçeklik (AR) uygulamaları [10] için yeterli düzeyin çok altındadır (video aktarımı için gerekli veri hızı yaklaşık 40 Mb/sn'dir). Bununla birlikte, geniş spektrumlu, çoklu girişli çoklu çıkışlı ve ultra yoğun ağ teknolojisine sahip 5G hücresele ağı, sabit bir ortamda 7.5 Gb/s veri hızı gerçekleştirebilir. Mobil ortamda ise 28 GHz spektrumda 100 km/s hızındaki bir araçta 1.2 Gb/s veri hızıyla sabit bir bağlantı sağlayabilir [11]. Yalnız hücresele ağlar temel olarak mobil genişbant trafiği için tasarlandığından, V2V iletişimini desteklememektedir.

Günümüzde, 5G Kamu Özel Ortaklığı (5G-PPP), çevrimiçi bağlı taşıtlarla ilgili araştırma çalışmaları yürütmektedir. Ayrıca, bu çalışmalar neticesinde draft olarak sunulan Sürüm 14'te [12], mevcut altyapının baypas edilmesi ve kullanıcılar arasında doğrudan veri alışverişi için 1 ms'lik gecikme sürelerine sahip olacak cihazdan cihaza (D2D) veri iletişimi önerilmiştir. V2V ile araçlar arası doğrudan iletişiminin önümüzdeki yıllarda 5G tarafından da desteklenmesi beklenmektedir. Literatürde gerçekleştirilen ve şimdiye kadar bahsedilen teknolojilerden hiçbiri V2X iletişiminin tüm gereksinimlerini karşılayamamaktadır; bu nedenle, hem erişim teknolojilerinin avantajlarını birleştiren hem de yüksek

güvenilirlik ve düşük gecikmeli V2X iletişimini gerçekleştirebilecek yeni bir yöntem ihtiyacı bulunmaktadır.

SDN, hem hüresel ağlara hem de VANET'lere katılma potansiyeli olan yeni bir ağ paradigmasını [13] temsil eder. SDN kontrol, trafik yönlendirme ve işleme varlıklarının bağımsız olarak konuşlandırılmalarını mümkün kılar. RF alıcı-vericileri gibi kaynakların veri düzleminde oldukları varsayılır, bu da platform teknolojisi ve yazılım yaşam döngüleri için ayrı optimizasyonları mümkün kılar. Ayrıca SDN sayesinde gerçekleştirilebilen mantıksal merkezi kontrol, kaynakların hizmet verimini artırır. Programlanabilirlik ağı daha çevik hale getirir, böylece uygulamalar veri alımı/gönderimi için kendilerine uygun olan radyo erişim ara-yüzünü seçebilirler [14]. Aslen SDN, veri merkezi ağları ve kampüs ağları gibi yüksek hızlı anahtarlamaya sahip kablolu ağ ortamları için tasarlanmıştır [15]. Buna rağmen günümüzde araştırmacılar kablosuz algılayıcı ağlarda da SDN çözümleri uygulamış ve başarılı sonuçlar elde etmiştir [16, 17]. Bununla birlikte, araç hareketliliği ve ağ topolojisindeki hızlı değişiklikler, ağ bölümlenmesi, dağıtılmış SDN kontrol üniteleri arasındaki veri senkronizasyonu ve hızlı hareket eden araçlar ve kontrol üniteleri arasındaki kesintisiz el-değiştirme gibi konular yeni ve çetrefilli araştırma konularını temsil etmektedir. Her ne kadar heterojen bir araç ağında SDN uygulamak karmaşıklığı artıracak olsa da, SDN; sağlayacağı çeviklik, güvenilirlik, ölçeklenebilirlik ve gecikme performansını iyileştirme potansiyeli nedeniyle araç ağlarına yeni bir bakış açısı kazandıracaktır.

VANET'ler ağırlıklı olarak bulut bilişim teknolojisine bağlıdır [18, 19]. Bulut bilişim, bir bulut sunucusu veya bir sürü uzak sunucu kullanarak merkezi bilgi işlem ve depolama hizmetleri sunmaktadır. Bulut bilişim, kullanıcılara uzaktan depolama kapasitesi ve hesaplama olanakları sağlayan sanal sunucular da sunmaktadır. Saklanan veriler, taşıtlarda büyük miktarda depolama ve hesaplama özelliğine sahip olmadan herhangi bir yerden alınabilir. Bu nedenle, kullanıcılar araçlar arasında büyük miktarda veri paylaşabilirler. Bulut bilişim ile uğraşırken karşılaşılan en önemli sorun, veriyi araçlardan bulut sunucusuna aktarırken, ve saklandıktan ve işlendikten sonra bilgileri geri alırken meydana gelen yüksek gecikme süreleridir. Bu faktöre ve ek olarak gelecekteki araç sayısının ve araçlardaki bağlanabilirlik oranının artmasına bağımlı olarak, düşük gecikme süresi ve kesintisiz hizmet sağlayan uygulamalara ihtiyaç duyulmaktadır. Ek olarak, mobil araç ile bulut sunucusu arasındaki iletişim için yüksek bant genişliğine ihtiyaç duyulur. Ayrıca yoğun trafik yükü kablosuz cihazlarda daha fazla enerji tüketimine ve yüksek bant genişliği maliyetine sebep olur. Dolayısıyla, araç uygulamalarının gittikçe artan gelişimi neticesinde hesaplama ve iletişim taleplerini karşılamak zorlayıcı hale gelmektedir. İletişim ve hesaplama sırasında gerekli olan servis ve deneyim kalitesinin (QoS, QoE) karşılanması bulut bilişim hizmetini VANET'lerle bütünleştiren araç bulut bilişim [20-23] hizmetlerinin karşılaştığı bir diğer hayati zorluktur.

Merkezileştirilmiş araç bulut bilişim hizmetlerinin aksine, Araç uç bilişim (VEC) hizmetleri, oldukça dağıtık olarak konuşlandırılmış farklı kaynaklar üzerinden uygulamalara hizmet vermeyi amaçlamaktadır. VEC, bulut bilişim servislerinin sağladığı faydaları ağı kenarına yayarak daha yakın mesafeden ve daha hızlı olarak sağlar [23-25]. Bu nedenle uç hesaplama, araç ağlarındaki hesaplama yeteneklerini geliştirmek için daha uygun bir çözüm sunmaktadır [26]. Uç hesaplamada, verilerin işlenmesi ve analizi, uç cihazlara yakın bir yerde gerçekleştirilir. Uç, bulut ve araçlar arasında aracı görevi görür. Hesaplama ve depolama yetenekleri (uç düğümleri) olan sunucular araç ağlarına yakın bir yerde konuşlandırılmıştır. Hesaplama ve depolama hizmetleri kullanıcıya yakın bir yerde (kenarda) sağlandığından, düşük iletim gecikmesi nedeniyle kullanıcılara daha iyi bir QoS seviyesi sunulur. Örneğin araçlarda bulunan sensörlerin topladığı veriler uç sunucular tarafından düşük gecikme ile işlenip, saklanabilir ya da araca/farklı araçlara geri iletebilir. Bu nedenle, uç hesaplamalı hizmetler düşük gecikmeli iletişim ve daha fazla bağlam farkındalığı sağlar. Sonuç olarak, uç hesaplama, düşük gecikmeye duyarlı uygulamalar için (örneğin güvenlik uygulamaları (sürüş güvenliği ve bağlam farkındalığı) ve güvenlik dışı uygulamalar (video akışı, AR ve bilgi-eğlence) vb.) önemli avantajlara sahiptir.

Sonuç olarak, yeni nesil araç ağları, SDN ve MEC gibi ileri teknolojilere sahip heterojen ağların varlığına ihtiyaç duymaktadır. SDN, beşinci nesil (5G) mobil iletişim ağları için önemli bir teknolojidir. Bu teknoloji, kontrol katmanını ve veri katmanını ayıran yeni bir ağ topolojisi konseptine dayanmaktadır [28]. Kontrol katmanı bir dizi kontrol cihazından oluşur. Hareketlilik yönetimi ve kaynak yönetimi gibi kontrol fonksiyonları kontrolörler tarafından yürütülür. Öte yandan MEC, merkezi bulut bilişimin bir uzantısıdır. Daha az gecikme ve daha iyi bir performans sağlanması için MEC bir radyo erişim ağına (RAN) entegre edilir, ve merkezi nokta tarafından depolanan verinin kendisi, yönetimi ve bilgi işlem

yeteneği ağın mantıksal kenarına itilir. Kısacası MEC; önbellekleme (caching) yeteneği ve esnek yönetimi nedeniyle 5G mobil iletişim için umut verici bir erişim mimarisi haline gelmiştir [29].

SDN ve MEC tabanlı araç ağları konusu endüstriden, telekom operatörlerinden ve akademiden son zamanlarda yoğun ilgi görmüş ve bu kapsamda araştırmalara/fonlar alınmaya başlanmıştır. [30] 'da yazarlar 5G mobil iletişim teknolojilerine ve SDN'e dayanarak erişim noktaları ve araçlar arasındaki sık geçişleri azaltmak için fog hücreleri temelli yeni bir araç ağı mimarisi önermektedir. [31] 'de ise yazarlar SDN tabanlı bir araç ad-hoc ağı önermektedir. Bu çalışmada SDN'in küresel bilgi toplama ve kontrol fonksiyonları sayesinde, komşu araçlar trafik akışına bağlı olarak uyarlamalı olarak kümelenmektedir. [32]'de ise, global optimizasyonun için Karush-Kuhn-Tucker koşullarının uygulandığı bulutlar arasında kaynak paylaşımını dikkate alan bir kaynak yönetimi yaklaşımı tartışılmıştır. [33] 'de, çok hücreli cihazdan cihaza (D2D) iletişimi temel alan etkili bir kaynak tahsisi şeması yoğun biçimde yerleştirilmiş küçük hücrelerle önerilmiştir. [34]'te kooperatif karışım (interference) azaltma ve el-değiştirme kontrolü problemi tartışılmış ve hücre uçlarında bulunan kullanıcıların karışım azaltmak için koordineli çalışan çok noktalı (CoMP) bir kümeleme düzeni heterojen bulut ağları için önerilmiştir. [35]'te ise yazarlar C/U düzlemine bölünmüş heterojen ağlara dayanan yüksek hızlı bir demiryolu iletişim sisteminde el-değiştirme prosedürleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu kapsamda makalede, inter-macro eNB'ler arasında başarılı devir olasılığını artırmak için etkili bir el-değiştirme tetikleyici karar yöntemi önerilmektedir.

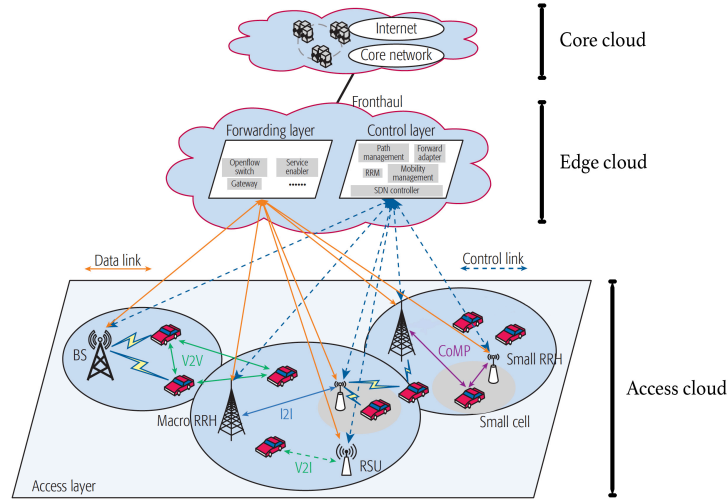
SDN ve MEC'in araç ağlarına entegrasyonuna ek olarak, makine öğrenmesi (ML) yöntemlerini kullanarak araç ağlarında sistem performansını artırmayı amaçlayan çalışmalar da mevcuttur. Örneğin, [36]'da yazarlar, hücresel ağlar için uç denetleyici (controller) tabanlı bir mimari önermekte ve önerilen çalışmanın performansını büyük bir ABD merkezli operatörün yüzlerce baz istasyonundan gelen gerçek verilerle değerlendirmektedir. Bu bağlamda yazarlar, kullanıcıların genel mobilite modellerine göre, baz istasyonlarını ve kontrol cihazlarını dinamik olarak nasıl kümelendirebilecekleri ve ilişkilendirebilecekleri konusunda fikir vermektedirler. Yazarlar ayrıca kontrolörlerin her bir baz istasyonundaki kullanıcı sayısını tahmin etmek için ML algoritmalarını nasıl kullanılabileceğini ve tahminleme sonucunda trafiğin nasıl yönlendirilebileceğini açıklamaktadır.

Yukarıda bahsi geçen tüm çalışmalara rağmen, mobilite yönetimini ve kaynak tahsisini optimize etmeyi amaçlayan, hizmet ve deneyim kalitesi çerçevesinde sürüş deneyiminin ve yolcu konforunun iyileştirilmesine odaklanan ve bu kapsamda literatürde sunulan düşük gecikme süreli ve yüksek güvenilirlikli bir araç ağı mimarisi bulunmamaktadır. Bu alanda yapılan mevcut araştırmalara rağmen, MEC ve VANET gibi karmaşık ortamlar için SDN-temelli sunulan pratik uygulama ve konuşlandırma eksikliği söz konusudur. Bu bağlamda çalışma kapsamında, 5G-VANET ortamında düşük iletim gecikmesi ve yüksek güvenilirlik gereksinimlerini karşılayarak sürüş deneyiminin ve yolcu konforunun iyileştirilmesi için, yeni bir yazılım tanımlı ve çoklu-erişimli uç hesaplama tabanlı araç ağı mimarisi tartışılmaktadır.

2. SDN VE MEC TABANLI AKILLI İŞBİRLİKÇİ BİR ARAÇ AĞI ÖNERİSİ

2.1. Sistem Mimarisi

MEC ve SDN konularıyla alakalı literatürde yapılan araştırmaların çokluğuna rağmen, SDN'in MEC ve VANET gibi karmaşık ortamlar üzerinde konuşlandırılan pratik uygulamalarının olmayışı olası bir çözümün başarısının incelenmesini zorlaştırmaktadır. Çevrimiçi bağlanabilir araçlar için kablosuz altyapıların heterojenliği (örneğin, IEEE 802.11p, 5G, LTE-A, vb.) ve araç uygulamalarının çeşitliliği (örneğin güvenlik, trafik yönetimi, bilgi-eğlence vb.) nedeniyle geleneksel ağ çözümleri, düşük gecikmeli iletişim gereksinimlerini karşılayacak verimli kaynak yönetimini sağlayamamaktadır. Bu bağlamda, çalışma kapsamında önerilen model, heterojen araç ağları üzerinden ultra-güvenilir ve düşük-gecikmeli iletişimi sağlamak için 5G, SDN, MEC ve ML'yi birleştiren birleşik bir platformu temsil eder. Önerilen platform, 5G'nin ultra güvenilir ve düşük gecikmeli iletişimlerle ilgili yaşamış olduğu temel zorluğa yenilikçi bir yaklaşım getirerek, çok çeşitli güvenlik ve güvenlik dışı uygulamalar için düşük gecikmeli erişimi desteklemek üzere tasarlanmalıdır.



Şekil 1. Önerilen Sistem Mimarisi

Önerilen platforma ilişkin sistem mimarisi Şekil 1'de gösterilmektedir. Sistemin tamamı, üç bulut alanına karşılık gelen üç mantıksal bölümden oluşmaktadır; (i) çekirdek bulut, (ii) uç bulutu ve (iii) erişim bulutu. Geleneksel çekirdek ağı ve İnternet, çekirdek bulutta yer almaktadır. Uç bulutu, çekirdek bulutun kenarında yer alacaktır ve çekirdek bulutla olan bağlantılar front-haul bağlantısı üzerinden gerçekleştirilecektir. Uç bulut, ağ kenarındaki veri depolama, hesaplama ve veri iletimini ayrılan zaman slotları içerisinde, oldukça verimli ve koordineli bir şekilde yönetme görevi üstlenecektir. Mantıksal ağ mimarisinin en altında bulunan erişim bulutu, araçlar için bağlanabilirliği sağlayacak ve mobil ve dinamik ortamların düzensiz/aralıklı bağlantı sorunlarını aşmak için farklı kablosuz ağ teknolojilerini bir arada kullanacaktır. Şekil 1'de gösterildiği gibi, önerilen mimari; kontrol katmanı, iletim katmanı ve erişim katmanı olmak üzere üç katmana bölünebilir. Kontrol ve iletim katmanları mantıksal olarak uç bulutta konuşlandırılacaktır, erişim katmanı ise erişim bulutunda konuşlandırılacaktır. Kontrol katmanı, radyo kaynak yönetimi, mobilite yönetimi, trafik yönetimi ve benzeri kontrol fonksiyonları sağlamak için SDN kontrol cihazından (SDN controller) oluşacaktır. İletim katmanı, çeşitli yüksek-hızlı veri iletim birimleri ve servis sağlayıcıları içerecektir. Bu sağlayıcılar veri akışları için yüksek-hızlı iletim ve işlem gücü sağlayacaktır. Araç verileri yalnızca erişim katmanı ve iletim katmanı üzerinden akarken, kontrol sinyali kontrol katmanı üzerinden akacaktır. Erişim katmanındaki geleneksel iletişim modu ile araçlar Şekil 1'de gösterildiği gibi üst ağa doğrudan baz istasyonları (BS'ler), makro uzak radyo kafaları (mRRH'ler), küçük RRH'ler (sRRH'ler) ve yakındaki yol kenarı üniteleri (RSU'lar) üzerinden erişebilecektir.

Araç ağlarında genel olarak, araç kullanıcıları ilk önce RSU'larla iletişim kurar. RSU'ların kablosuz kaynağı yeterli olmadığında, araçlar BS'lere erişir. Uç hesaplama tabanlı araç ağlarında, tüm erişim düğümleri (BS'ler, RRH'ler ve RSU'lar) ve araçlar, gerçek zamanlı araç hızı, trafik durumu ve yol durumu bilgilerini toplayıp bunları küresel yönetim ve koordinasyon için SDN kontrolörüne gönderebilen bilgi toplama mekanizmalarına sahiptir. Ayrıca, D2D ve CoMP iletişim modları araç ağları için de uygun bir iletişim yöntemidir. Şekil 1'de gösterildiği gibi, araçtan araca (V2V), araçtan altyapıya (V2I) ve altyapıdan altyapıya (I2I) bağlantılar D2D teknolojisine aittir. Erişim düğümlerinden gelen geri bildirim bilgilerine göre, SDN kontrol cihazı, araçların mobil hızı, iletişim mesafesi, QoS gereklilikleri vb. hakkındaki mevcut bilgilere dayanarak araçlar için en uygun iletişim modunu seçecektir. Ayrıca araçlar iletişim gecikmesini azaltan ve ağ iletim yükünü hafifleten önbelleklenmiş veriyi toplamak için D2D ve uç hesaplama teknolojilerini birleştirerek diğer araçlarla iletişim kurabileceklerdir [37].

SDN, ağın altyapısını merkezi ve programlanabilir bir şekilde kontrol edebilme yeteneğinden ötürü araç ağları için cezbedici bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle, 5G hücreli sistemler ve araç WiFi sistemleri arasındaki birlikte çalışabilirlik ve ara bağlantı sağlama görevlerini, etkin sistem yönetimini ve heterojen araç ortamının merkezi kontrolünü sağlamak için SDN kullanımı önerilmektedir. Konu ile ilgili gerek literatürde yapılan [38] [39] gerekse de tarafımızca yapılmış [40] çalışmalar, SDN kullanarak mevcut bant genişliğinden en iyi şekilde yararlanan ve yüksek kullanım ve performans sağlayabilen akıllı ve verimli bir ağ yönetim sisteminin mümkün olduğunu göstermiştir.

Ayrıca, önerilen mimari, ML’i kaynak planlama sürecine dahil ederek ve hizmet teslimini optimize etmek için heterojen araç sistemlerinin her mekan ve zamanda etkinleştirilmesini sağlayarak erişim düzeyinde sisteme zeka katacaktır. Makine Öğrenimi, literatürde farklı QoS gereksinimlerinin karşılanmasını sağlamak için, hücresele ağlarda homojen trafik için kullanılmıştır [41]. Çalışma kapsamında önerilen mimari de ise, ML teknikleri dinamik bir araç ağı ortamında heterojen trafik akışına/yoğunluğuna göre QoS seviyesini koruyan/artıran akıllı bir 5G downlink zamanlama yaklaşımı oluşturmak için kullanılacaktır. Bahsi geçen yaklaşım ise, anlık ağ koşullarına göre trafik sınıfı önceliklendirme ve kaynak optimizasyonu ile gerçekleştirilecektir.

Çalışma kapsamında çoklu erişim olarak mevcut bant genişliğinin Kaynak Bloklarına (RB'ler) bölündüğü OFDMA downlink iletiminin kullanımı öngörülmektedir. RB, tek bir TTI içindeki bir araç kullanıcısına tahsis edilebilecek en küçük kaynak birimini temsil eder. Geleneksel OFDMA erişim yöntemi, ortogonal olmayan şemalara kıyasla daha az karmaşık ve çok daha verimli olarak kabul edilir. Bir kullanıcı birden fazla taşıyıcı bileşen üzerinde programlanabildiğinden, hem zaman hem de frekans alanı önceliklendirmeleri, birden fazla taşıyıcı bileşen üzerinde ortak zamanlamayı destekleyebilmelidir. Bir araç kullanıcısı, belirli bir trafik sınıfı (örneğin güvenlik, trafik yönetimi, bilgi-eğlence) ile karakterize edilir ve bu trafik türlerinin her biri, Garantili Bit Hızı (GBR), Paket Kaybı Oranı (PLR) ve paket gecikmesi gibi bilinen QoS gereksinimleriyle sınırlandırılır.

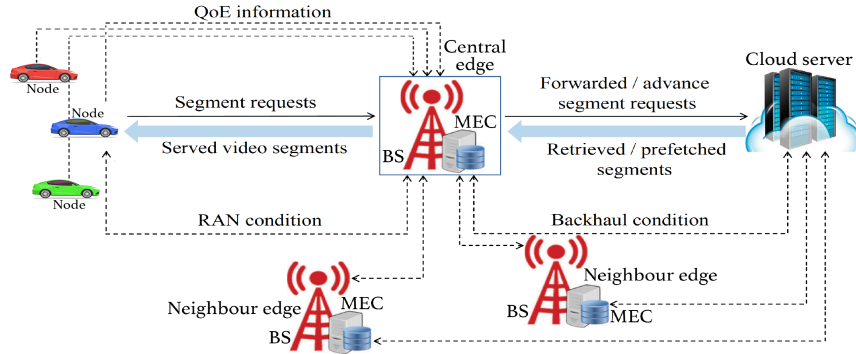
Önerilen akıllı çizelgeleme yönteminde, algoritmanın her TTI’de, zaman domeyninde önceliklendirilecek trafik sınıfına ve frekans domeynindeki kaynak tahsisi için uygulanacak çizelgeleme kuralına, heterojen QoS gereksinimlerinin sağlanmasının mümkün olan en yüksek sonuçla elde edileceği şekilde, karar vermesi sağlanmalıdır. Bu çözümü gerçek hayatta uygulanabilir kılmak için, her anlık çizelgeleme durumunda önceliklendirilmesi en muhtemel trafik sınıfının ve kaynak tahsisi için uygulanacak en uygun çizelgeleme kuralının hangisi olduğunu öğrenmemiz gerekir. Geleneksel kaynak ve kullanıcı tahsisi problemi ile karşılaştırıldığında, önerilen yaklaşımın optimizasyon çerçevesinin gerçek zamanlı çizelgeleme ile çözümünün daha zor olduğu anlaşılmaktadır. Bunun nedeni ise, hem trafik sınıfının önceliklendirilmesinin hem de zamanlama kuralı atamalarının aynı anda yapılması gerektiridir. Buradaki amaç ise, bazı tanımlanmış kısıtlamalara tabi olarak optimizasyon problemini maksimize edebilecek en uygun karar değişkenlerini (örneğin, çizelgeleme kuralı, trafik sınıfı, araç kullanıcısı seçimi ve RB ataması) bulmaktır.

VANET ortamındaki gecikmeyi daha da azaltmak için gelecek vaat eden bir başka çözüm de mobil uç hesaplama çerçevesinin sisteme entegrasyonudur. MEC, araç kullanıcısı için ultra güvenilir düşük gecikmeli iletişimi ve geliştirilmiş Deneyim Kalitesini (QoE) mümkün kılmak üzere, önemli depolama, kontrol, yönetim ve iletişim mekanizmalarını ağ kenarına veya kullanıcı ekipmanı üzerine iterek çekirdek ağın yükünü hafifletmek üzere çalışmaya entegre edilmelidir. Bu bağlamda, önerilen platformunun amaçları, kaynak optimizasyonu sağlanarak kullanıcılara katma değerli hizmetler (örneğin, bilgi-eğlence, ticari kullanım, vb.) sunulması, ulaşım verimliliği için tasarlanacak QoE-tabanlı gelişmiş sürüş deneyimi (örneğin, gaz emisyonlarının azaltılması, ulaşım süresinin azaltılması, tıkanıklık kontrolü, akıllı navigasyon, vb.) kazandırması, ve trafik yönlendirme uygulamaları için kullanıcıların güvenliğini artırmak (örneğin işbirlikçi çarpışmadan kaçınma, acil ve kaza durumlarında navigasyon güncellemesi, vb.) olarak özetlenebilir.

2.2. QoE Modelleme

Sistemin u adet düğümden oluştuğunu varsayalım. Her düğüm bir baz istasyonuna ve bu baz istasyonunda konuşlandırılan MEC sunucuya bağlı olacaktır. Şekil 2’de görüldüğü gibi bulut sunucu ile düğümler arasındaki iletim için kullanılabilir r adet farklı bitrate seçeneği olduğunu varsayalım. Düğümün bağlı olduğu uç sunucunun $e-1$ adet komşu uç sunucusu olduğunu ve bazı ön şartların gerçekleşmesi halinde düğümün bu uç sunuculara el-değiştirme yolu ile bağlanabileceğini veya önyükleme yöntemi ile bazı verilerinin farklı sunuculardan alabileceğini varsayalım. Bu durumda, $x_{i,j,k}$ ikili değişkeni i kullanıcısının k bitrate’ini j sunucusundan alıp almadığını temsil eder. Burada $i \in [1; u]$; $j \in [1; e]$; $k \in [1; r]$ durumu söz konusudur. b_k and QoE_k değerleri sırasıyla k ’inci bitrate değeri ve bu bitrate’e ait QoE değeridir. Ayrıca her düğümün birim zamanda bir bitrate’i bir kablosuz ağ arayüzünden indirebildiğini (düğümler aynı anda farklı bitrate’lerde veri indiremeyecek ve bir veri aynı anda farklı arayüzler üzerinden indirilemeyecek), her uç sunucunun kendisine has bir iş-atama ve hafıza kapasitesinin

C_j ; $j \in [1; e]$ olduğunu ve kullanıcı i ile uç sunucu j arasındaki her radyo arayüzünün de bir link kapasitesi l_{ij} olduğunu varsayalım.



Şekil 2. QoE Modelleme

Buradaki temel amaç, tüm oturumlar boyunca tüm düğümlerin QoE değerlerinin toplamını mümkün olan en üst düzeye çıkarmaktır. Bunu başarmak için önerilen yaklaşım ilk önce her oturum için mümkün olan en yüksek QoE değerini ayrı ayrı bulmak zorundadır. Sonuç olarak, düğüm-bitrate-eldeğiştirme metrikleri arasındaki maksimizasyon, aşağıdaki gibi kısıtlamalara tabi olarak modellenebilir;

$$\text{Maximize} \quad \sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^e \sum_{k=1}^r x_{i,j,k} QoE_k \quad (1)$$

probleme ait kısıtlamalar aşağıda verilmiştir,

$$\sum_{i=1}^u \sum_{k=1}^r x_{i,j,k} b_k \leq C_j, \forall j \in [1, e] \quad (2)$$

$$x_{i,j,k} b_k \leq l_{ij}^j, \forall i \in [1, u], \forall j \in [1, e], \forall k \in [1, r] \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^r \sum_{j=1}^e x_{i,j,k} \leq 1, \forall i \in [1, u] \quad (4)$$

$$x_{i,j,k} \in \{0, 1\}, \forall i \in [1, u], \forall j \in [1, e], \forall k \in [1, r] \quad (5)$$

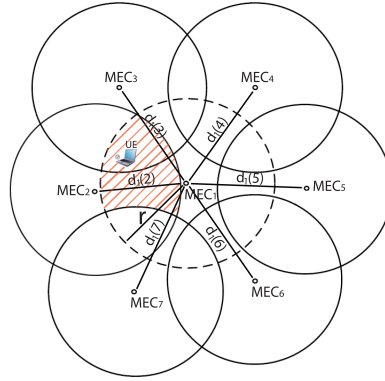
burada Denklem 2 ile belirtilen kısıtlamalarla; uç sunucu j 'nin kapasitesinin iş-atama yükünü aşmaması garanti edilir. Denklem 3 ile belirtilen kısıtlamalarla; seçilen bir bitrate düğümün link kapasitesi tarafından karşılanamayacak ise, o bitrate'in j uç sunucusundaki i düğümüne atanmaması sağlanır. Denklem 4 ile belirtilen kısıtlamalarla; bir düğümün birim zamanda en fazla bir bitrate ile tahsis edilmesi sağlanır. Nihayet Denklem 5 ile belirtilen kısıtlamalarla; her araç kullanıcısının veri iletimi/alımı için birim zamanda sadece bir uç sunucuya bağlı olabileceği garanti edilir.

2.3. QoE-bilinçli yük dengeleme ve El-değiştirme

BS'ler arasındaki yük dengeleme ve el-değiştirme, RAN-bazlı tıkanıklığı ve paket hatalarını önlemek/sınırlamak için temel faktörlerdir. BS'lerden birinin çok yüklü olması durumunda, yüklerinin bir kısmı (bazı oturumlarının el-değiştirilmesi) farklı BS'lere aktarılabilir ve böylece yük dengelemesi sağlanabilir. El-değiştirme işlemi ilk adım, civardaki mevcut BS'lerin keşfidir. Bunu yapmanın en kolay yolu ise BS'ler üzerinde kurulu olan MEC sunucuları arasında periyodik veya anlık mesaj alışverişidir. Bağlanabilir çevrimiçi araçların yüksek düzeyde mobil olması durumunda, BS'ler arasında sık sık mesaj alışverişi yapılması değişen kanal durumunun erkenden teşhisi nedeniyle çok yararlı olacaktır. Ancak sık mesaj alışverişi statik bir ortamda önemli bir ek yüke neden olabilir. Belirtilen ek yükü azaltmak için, el-değiştirme prosedürünü (i) bir MEC sunucusunun kapasitesini belirli bir eşik (τ_c) üzerinde kullanması veya (ii) bir oturumun sinyal gücü değerinin ön-tanımlı bir seviyenin (τ_s) altına düşmesi durumunda aktifleştiren yeni bir akıllı keşif ve el-değiştirme algoritması gerçekleştirilmelidir. Bu

şekilde, kapasite veya sinyal gücü ile ilgili sorunların varlığında bile, araçları yeterli kapasiteye sahip ve yüksek sinyal gücü sağlaması beklenen uygun bir BS ile eşleştirerek her oturumun için QoE seviyelerini korumak amaçlanmaktadır. Başka bir deyişle, önerilen yaklaşım araçların iş-gücü değerini maksimum seviyeye çıkarabilmesi için bazı oturumları düşük kapasite ve yüksek sinyal gücü sağlaması beklenen diğer MEC sunucularına devrederek, MEC sunucuları (dolayısıyla BS'ler) arasında yük dengelemeye yardımcı olacaktır.

τ_c değeri aşıldığında veya bir oturumun τ_s değeri eşliğinin altına düştüğünde, önerilen yaklaşım ilk önce çevredeki BS'lerden bağlamsal bilgileri (uçların lokasyonu, boş arabellek oranları, sağlayabilecekleri hizmetler, kanal kullanım oranları, vb.) talep ederek yeterli kapasiteye sahip komşu uçları (E_n) keşfedecektir. Önerilen yaklaşım daha sonra oturumları sinyal güçlerine göre artan sırayla listeleyecektir (yani, sinyal gücü en düşük olan oturum listenin başına gelir). Daha sonra, BS'lerin konumuna ve her bir BS'den alınan araçların sinyal gücü değerlerine dayanarak listenin tepesindeki oturum için Şekil 4'te gösterildiği gibi mesafe-bazlı bir bağlanabilirlik haritası oluşturulacaktır. Oturum için daha yüksek sinyal gücü sağlaması beklenen başka bir BS (yeterli kapasiteye sahip) olması durumunda el-değiştirme işlemi başlatılacaktır. Bu işlem, sinyal gücü eşliğinin altındaki tüm oturumlar için gerçekleştirilecektir. Yukarıda belirtilen oturumların el-değiştirme işlemlerinden sonra uç sunucu kapasitenin hala τ_c 'yi aşması durumunda el-değiştirme işlemi, kapasite tekrar eşğin altına düşene veya liste boş kalana kadar devam edecektir.



Şekil 4. Mesafe bazlı örnek bir bağlanabilirlik haritası

Bir el-değiştirme işleminin bir oturum için başlatılmasına karar verilmesi durumunda, merkezi uç sunucuda bulunan o oturuma ait ön-yükleme ile alınmış veriler (sonraki turlara ait veriler), el-değiştirme işlemi başlamadan önce oturumun bağlanacağı yeni uç sunucuya burst öbekler olarak iletilecektir. Bu sayede el-değiştirme işlemi devam ederken, kullanıcının duraksamadan öncelikle arabelleğinde bulunan öbekleri tüketmesine/oynatmasına ve el-değiştirme işleminden sonra da hızlı bir şekilde yeni uç sunucusundan bir sonraki turun öbeklerini ön-yükleme ile hızlıca indirebilmesine imkan sağlanacaktır.

3. SONUÇ

Çalışma kapsamında, haberleşmenin sadece yardımcı bir bilgi alışverişi sağlayacağı varsayımından farklı olarak, araç ağlarda servis ve deneyim kalitesini ve yolcu konforunu artırmayı amaçlayan, yeni nesil kablosuz ve hücrel ağ erişim teknolojileri ile yazılım-tanımlı ağların (SDN), çoklu-erişimli uç hesaplama (MEC) ve makine öğrenmesi (ML) tekniklerinin entegrasyonunun sağlandığı, yeni ve özgün bir mimari önerilmektedir. Önerilen çalışma ile, sadece 5G/IEEE 802.11ac/p gibi yeni nesil ağ erişim teknolojileri ve özellikleri sistem optimizasyonuna dahil edilmeyecek, aynı zamanda sistem tasarımı işbirlikçi ve sistematik bir perspektiften köklü değişikliklere uğrattırılacaktır. Önerilen çözümün, temel olarak yüksek güvenilirlik ve düşük gecikme arasındaki ikilemi çözmesi ve sonuç olarak hızlı ve güvenilir olan uygun fiyatlı araç iletişiminin gerçekleştirilmesini ve ticarileştirilmesini hızlandırması hedeflenmektedir.

Çalışma kapsamında önerilen mimarinin gerçekleştirilebilmesi için, araç ağlarının etkin yönetimini ve merkezi kontrolünü sağlayan SDN, baz istasyonlarının (BS) ve Yol Tarafı Ünitelerinin (RSU) trafik takibi, müşterek çalışma ve ağlar arası bağlanabilirlik için kullanılmalıdır. MEC, çekirdek ağın

yoğunluğunu (depolama, hesaplama ve iletişim mekanizmalarının önemli bir bölümünü) ağ kenarına veya kullanıcı ekipmanı üzerine itmek için kullanılmalıdır. Son olarak, ML algoritmaları bağlam bilincini derinlemesine kullanmak ve kaynak optimizasyonunu sağlamak için BS/RSU üzerlerinde kullanılmalıdır (ör. her baz istasyonundaki kullanıcı sayısı tahmini, araç trafiğini yeniden yönlendirme, hesaplama ve veri boşaltma, mobilite yönetimi vb.). Sonuç olarak çalışma kapsamında araç ağlarında SDN ve MEC'i ML ile birleştirerek, programlanabilir, esnek ve kontrol edilebilir bir ağ mimarisi tanıtılmıştır. Önerilen mimarinin ağ yönetimini basitleştirmesi, kaynak kullanımını verimlileştirmesi ve sürdürülebilir ağ gelişimi sağlaması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Information and communications technology, Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Information_and_communications_technology.
- [2] J. Wan, et al., "VCMIA: A Novel Architecture for Integrating Vehicular Cyber-Physical Systems and Mobile Cloud Computing," *Mobile Networks and Applications*, vol. 19, no. 2, 2014, pp. 153–60.
- [3] J. Jiang et al., "An Efficient Distributed Trust Model for Wireless Sensor Networks," *IEEE Trans. Parallel and Distrib. Sys.*, vol. 26, no. 5, 2015, pp. 1228–37.
- [4] J. Liu et al., "A Survey on Position-Based Routing for Vehicular Ad Hoc Networks," *Telecommun. Sys.*, vol. 62, no. 1, 2016, pp. 15–30.
- [5] Gartner's report, <http://www.gartner.com/newsroom/id/3165317>.
- [6] Technology and requirements for self-driving cars, <https://www.intel.com/content/www/us/en/automotive/driving-safetyadvanced-driver-assistance-systems-self-driving-technologypaper.html>
- [7] S. Tachi, M. Inami, and Y. Uema, "Augmented reality helps drivers see around blind spots," *IEEE Spectrum*, vol. 31, 2014.
- [8] J. Wan et al., "Mobile Crowd Sensing for Traffic Prediction in Internet of Vehicles," *Sensors*, vol. 16, no. 1, 2016, pp. 88.
- [9] G. Han et al., "Green Routing Protocols for Wireless Multimedia Sensor Networks," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 23, no. 6, Dec. 2016, pp. 140–46; DOI 10.1109/MWC.2016.1400052WC.
- [10] J. Wu et al., "Augmented Reality Multi-View Video Scheduling Under Vehicle-Pedestrian Situations," *Proc. ICCVE*, 2015, pp. 163–68.
- [11] M. Nekovee, "Radio Technologies for Spectrum above 6 GHz — A Key Component of 5G," *Proc. 5G Radio Tech. Seminar: Exploring Technical Challenges in the Emerging 5G Ecosystem*, IET, 2015, pp. 1–46.
- [12] J. Lee et al., "LTE-Advanced in 3GPP Rel-13/14: An Evolution Toward 5G," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 3, Mar. 2016, pp. 36–42.
- [13] J. Wan et al., "Software-Defined Industrial Internet of Things in the Context of Industry 4.0," *IEEE Sensors J.*, vol. 16, no. 20, 2016, pp. 7373–80.
- [14] S. Sezer et al., "Are We Ready for SDN? Implementation Challenges for Software-Defined Networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 7, July 2013, pp. 36–43.
- [15] N. McKeown et al., "OpenFlow: Enabling Innovation in Campus Networks," *ACM SIGCOMM Comp. Commun. Rev.*, vol. 38, no. 2, 2008, pp. 69–74.
- [16] T. Luo et al., "Sensor OpenFlow: Enabling Software-Defined Wireless Sensor Networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, no. 11, 2012, pp. 1896–99.

- [17] J. Liu et al., “High-Efficiency Urban Traffic Management in Context-Aware Computing and 5G Communication,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 1, Jan. 2017, pp. 34–40.
- [18] M. Vouk, “Cloud computing issues, research and implementations,” *Journal of Computing and Information Technology*, vol. 16, pp. 235–246, 2008.
- [19] D. Rountree and I. Castrillo, *e basics of cloud computing: Understanding the fundamentals of cloud computing in theory and practice*, 2013.
- [20] S. Olariu, I. Khalil, and M. Abuelela, “Taking VANET to the clouds,” *International Journal of Pervasive Computing and Communications*, vol. 7, no. 1, pp. 7–21, 2011.
- [21] M. Shojafar, N. Cordeschi, and E. Baccarelli, “Energy-efficient adaptive resource management for real-time vehicular cloud services,” *IEEE Transactions on Cloud Computing*, pp. 1-1, 2016.
- [22] M. Whaiduzzaman, M. Sookhak, A. Gani, and R. Buyya, “A survey on vehicular cloud computing,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 40, no. 1, pp. 325–344, 2014.
- [23] V. G. Menon and P. Joe Prathap, “Moving from vehicular cloud computing to vehicular fog computing: Issues and challenges,” *International Journal of Computer Science and Engineering*, vol. 9, no. 2, 2017.
- [24] M. Chiang and T. Zhang, “Fog and IoT: an overview of research opportunities,” *IEEE Internet of things Journal*, vol. 3, no. 6, pp. 854–864, 2016.
- [25] A. V. Dastjerdi and R. Buyya, “Fog Computing: Helping the Internet of Things Realize Its Potential,” *e Computer Journal*, vol. 49, no. 8, Article ID 7543455, pp. 112–116, 2016.
- [26] F. Bonomi, R. Milito, J. Zhu, and S. Addepalli, “Fog computing and its role in the internet of things,” in *Proceedings of the ACM conference on Mobile cloud computing first edition of the MCC workshop*, pp. 13–16, 2012.
- [27] J. Feng, Z. Liu, C. Wu, and Y. Ji, “AVE: Autonomous vehicular edge computing framework with ACO-based scheduling,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 12, pp. 10660–10675, 2017.
- [28] X. Hou, Y. Li, M. Chen, D. Wu, D. Jin, and S. Chen, “Vehicular fog computing: a viewpoint of vehicles as the infrastructures,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 6, pp. 3860–3873, 2016.
- [29] D. J. Deng et al., “Latency Control in Software-Defined Mobile-Edge Vehicular Networking,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 8, Aug. 2017, pp. 87–93.
- [30] X. Ge, Z. Li, and S. Li, “5G Software Defined Vehicular Networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 7, July 2017, pp. 87–93.
- [31] X. Duan, Y. Liu, and X. Wang, “SDN Enabled 5G-VANET: Adaptive Vehicle Clustering and Beamformed Transmission for Aggregated Traffic,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 7, July 2017, pp. 120–27.
- [32] R. Yu et al., “Optimal Resource Sharing in 5G-Enabled Vehicular Networks: A Matrix Game Approach,” *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, vol. 65, no. 10, Oct. 2016, pp. 7844–56.
- [33] J. Huang et al., “Resource Allocation for Multi-Cell Device-to-Device Communications Underlying 5G Networks: A Game-Theoretic Mechanism with Incomplete Information,” *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, vol. 67, no. 3, Mar. 2018, pp. 2557–70.
- [34] H. Zhang et al., “Cooperative Interference Mitigation and Handover Management for Heterogeneous Cloud Small Cell Networks,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 22, no. 3, June 2015, pp. 92–99.

- [35] H. Song, X. Fang, and L. Yan, "Handover Scheme for 5G C/U Plane Split Heterogeneous Network in High-Speed Railway," *IEEE Trans. Vehic. Tech.*, vol. 63, no. 9, Nov. 2014, pp. 4633–46.
- [36] Polese, Michele, et al. "Machine learning at the edge: A data-driven architecture with applications to 5G cellular networks." *arXiv preprint arXiv:1808.07647* (2018).
- [37] Zhang, Yaomin, et al. "Software-defined and fog-computing-based next generation vehicular networks." *IEEE Communications Magazine* 56.9 (2018): 34-41.
- [38] R. Trestian, K. Katrinis, and G. M. Muntean, 'OFLoad: An OpenFlow-based Dynamic Load Balancing Strategy for Datacenter Networks', *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. PP, no. 99, pp. 1–1, 2017.
- [39] A. Al-Jawad, P. Shah, O. Gemikonakli, and R. Trestian, 'Policy-based QoS Management Framework for Software-Defined Networks', in *2018 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, 2018, pp. 1–6.
- [40] Tuysuz MF, Ankarali ZK, Gozüpek D., (2017) "A Survey on Energy Efficiency in Software Defined Networks", *Computer Networks*, Vol. 113, Pages 188-204.
- [41] I. Comşa et al., 'Towards 5G: A Reinforcement Learning-Based Scheduling Solution for Data Traffic Management', *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 15, no. 4, pp. 1661–1675, Dec. 2018.
- [42] O. A. Ezenwigbo, V. V. Paranthaman, G. Mapp, and R. Trestian, 'Exploring Intelligent Service Migration in Vehicular Networks', in *Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities*, 2019, pp. 41–61.
- [43] Tuysuz M.F., (2014)"An Energy-efficient QoS-based Network Selection Scheme over Heterogeneous WLAN – 3G Networks", *Computer Networks* 75, 113-133.
- [44] Tuysuz, M. F., & Uçan, M. (2017). Energy-aware network/interface selection and handover application for android-based mobile devices. *Computer Networks*, 113, 17-28.