



Akıllı ulaşım sistemleri test ortamı üzerinde kendi kendilerini organize eden araç ağı kullanarak dağıtım ve geri taşıma sorunlarının analizi

An analysis of deployment and backhaul issues a cooperative-intelligent transport systems testbed using vehicular ad-hoc network

Yönel Kırsal^{1,*} , Vishnu V. Paranthaman² 

¹European University of Lefke, Faculty of Engineering, Electrical and Electronics Engineering Department, TRNC

²Product manager, Being Beam Limited London, United Kingdom

Öz

Bu çalışma, akıllı ulaşım sistemleri (ITS–Intelligent Transportation Systems) test ortamında, kendi kendini organize eden araçlara dayalı araçlar arası ağların (VANETs –Vehicular Ad-Hoc Networks) dağıtım ve geri taşıma sorunlarını analiz etmeyi amaçlamaktadır. Middlesex Üniversitesi Hendon Kampüsü ve A41 otoyolu çevresinde kurulan test platformu, 5.9 GHz frekansında çalışan yol kenarı üniteleri ve araç içi üniteler kullanılarak gerçek dünya koşullarında sinyal yayılımını incelemektedir. Çalışmada, Serbest Uzak Yol Kaybı, İki Işınlı Zemin Yansıma, Log-Mesafe Yol Kaybı ve Hızlı Solma ile Serbest Uzak Yolu Kaybı modellerini karşılaştırılarak kentsel ve otoyol ortamlarında en uygun yayılım modeli belirlenmiştir. Bulgular, otoyol senaryolarında Serbest Uzak Yol Kaybı ve de Hızlı Solma ile Serbest Uzak Yol Kaybı modelinin, kentsel alanlarda ise Log-Mesafe Yol Kaybı modelinin daha tutarlı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Ayrıca, kablolu geri taşıma sisteminin düşük gecikme süreleriyle üstün performans sergilediği, LTE tabanlı geri taşımanın ise yüksek gecikmeler nedeniyle ITS uygulamaları için sınırlamalar taşıdığı ortaya konmuştur. Bu sonuçlar, VANET tabanlı ITS altyapısının etkin dağıtım ve optimizasyonu için önemli ipuçları sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Araçlar arası ağ, Akıllı ulaşım sistemi, Yayılım modeli, Geri taşıma

1 Giriş

Kendi kendini organize eden araçların (Ad-Hoc) çağı hızlı bir şekilde ilerlemektedir. Bu ilerleme, hem ulaşım hem de iletişim altyapılarında çok hızlı gelişme göstermesine olanak tanımaktadır[1-3]. Ulaşım açısından, kendi kendini organize eden araçlar, akıllı şehirlerin temel bileşenlerinden biri olan akıllı ulaşım sistemlerini (ITS-Intelligent Transportation Systems) mümkün kılmaktadır. ITS, trafik yönetimi, yolculuk sürelerinin kısaltılması, çarpışma önleme mekanizmaları ve ulaşım felaketlerinin etkin yönetiminde önemli iyileştirmeler sağlamaktadır[4].

Bununla birlikte, kendi kendini organize eden araçlar yalnızca bir ulaşım aracı olmaktan çıkarak, yüksek hızlı iletişim yetenekleriyle donatılmış cihazlar haline gelmiştir. Bu sayede cep telefonu, kullanıcılar için yalnızca bir iletişim aracı olmaktan çıkmış; kullanılan uygulamalar aracılığıyla

Abstract

This study aims to analyze deployment and backhaul issues in an Intelligent Transport Systems (ITS) testbed using Vehicular Ad-hoc Networks (VANETs) based on self-organising vehicles. The test platform is conducted at Middlesex University's Hendon Campus and the A41 highway. It is operated at 5.9 GHz to evaluate signal propagation under real-world conditions. The research compares Free Space Path Loss, Two-Ray Ground Reflection, Log-Distance Path Loss, and Free Space Path Loss Fast-Fading models to identify the most suitable propagation model for urban and highway environments. Findings indicate that the Free Space Path Loss and Free Space Path Loss Fast-Fading models perform consistently in highway scenarios, while the Log-Distance Path Loss model better aligns with urban settings. Additionally, wired backhaul systems demonstrate superior performance with low latency, whereas LTE-based backhaul exhibits high delays, posing limitations for ITS applications. These results provide valuable insights for effectively deploying and optimising VANET-based ITS infrastructure, highlighting the importance of tailored propagation models and reliable backhaul strategies to enhance network performance.

Keywords: Vehicular Ad-hoc network, Intelligent transport system, Propagation model, Backhaul.

telefon ile araç arasında kesintisiz geçiş sağlayarak kullanıcı deneyimini daha akıllı ve bütünlük hale getirmiştir.

Bu, araçlar arası (V2V) ve araçtan altyapıya (V2I) iletişimi destekleyen araç bazlı özel ağlarının (VANET-Vehicular Ad Hoc Network) düşük gecikme süresi ve yüksek bant genişliği sunarak güvenlik, bilgi ve eğlence uygulamalarını mümkün kıldığı bir ekosistem yaratmıştır [5-9]. Ancak, VANET'lerin etkin bir şekilde çalışabilmesi için uygun bir altyapı gereklidir. Bu altyapı, yol kenarı üniteleri (RSU-Road Side Unit) ve araç içi üniteler (OBU-On Board Unit) aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu tip ağlarda kapsama alanı optimizasyonu ve sinyal yayılımı davranışının doğru modellenmesi kritik öneme sahiptir [10-14].

Mevcut sistemler, VANET'lerin sinyal yayılımını modellemede ve altyapı dağıtımında çeşitli sınırlılıklarla karşı karşıyadır [15]. İlk olarak, geleneksel mobil kanal

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: ykirsal@eul.edu.tr (Y. Kırsal)

Geliş / Received: 19.03.2025 Kabul / Accepted: 29.08.2025 Yayınlanma / Published: 15.10.2025

doi: 10.28948/ngumuh.1660581

modelleri (örneğin, hücresel sistemler için geliştirilenler), araç iletişiminin özellikleri (5.9 GHz frekansı, 10-500 m kısa mesafeli iletişim) nedeniyle yetersiz kalmaktadır [16]. Hücresel sistemler genellikle daha düşük frekanslarda (700-2.100 MHz) ve uzun mesafelerde çalışırken, VANET'lerin dinamik ve kısa menzilli doğası farklı yayılım davranışları gerektirir. Simülasyon araçları, bu tür sistemlerin dinamik yapısını tam olarak yansıtmayabilir. Dolayısıyla, elde edilen sonuçlar çoğunlukla dünya koşullarıyla örtüşmemektedir [17-18]. Buna ek olarak, fiziksel test ortamlarının kurulumu, yüksek maliyetler, gerekli ekipman ve personel ihtiyacı ile çevre üzerindeki kontrol eksikliği nedeniyle pratikte zordur [19]. Ayrıca, RSU'ların en uygun konumlara yerleştirilmesi, kapsama alanının maksimizasyonu, maliyet etkinliği ve kaynak kullanımı gibi önemli konular da mevcut çalışmalarda yeterince ele alınmamıştır. Bu sınırlılıklar, VANET'lerin akıllı şehirlerdeki potansiyelini tam anlamıyla gerçekleştirmesini engellemektedir. Bu yüzden güvenilir, uygun maliyetli bir altyapı tasarımı için yeni yaklaşımlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışma, VANET'lerin gerçek dünya performansını optimize etmek ve altyapı dağıtımını iyileştirmek amacıyla Middlesex Üniversitesi Hendon Kampüsü, Londra ve çevresindeki yollar boyunca inşa edilen bir VANET test ortamını sunmaktadır. Çalışmanın temel amacı, dış mekan, kentsel ve otoyol ortamlarında kablosuz sinyal yayılımının davranışını ve sınırlılıklarını analiz ederek en uygun yayılım modelini belirlemek ve RSU'lar için etkili bir dağıtım stratejisi geliştirmektir. Mevcut yaklaşımların aksine, bu çalışma gerçek ölçümlerle desteklenen bir test platformu kullanarak kapsama alanı, RSU konumlandırılması ve geri bildirim teknolojilerini değerlendirmektedir. Özellikle, 5.9 GHz frekansında uzun menzilli iletimlerin uygulanabilirliği incelenmekte, farklı yayılım modelleri (örneğin, İki-Işınlı Zemin Yayılım Modeli, Log mesafe yol kaybı vb.) karşılaştırılmakta ve komşu RSU'larla optimal örtüşme sağlanarak aracın ağda kalma süresi maksimize edilmektedir. Ayrıca, kablolu ve hücresel/LTE geri taşıma yöntemlerinin performansları ayrıntılı olarak analiz edilmektedir. Bu çalışma, mevcut sistemlerin sınırlılıklarını aşarak VANET altyapısının maliyet etkin, güvenilir ve ölçeklenebilir bir şekilde tasarlanmasına katkıda bulunmayı hedeflemektedir.

Makalenin geri kalanı şu şekilde yapılandırılmıştır: Literatür taraması Bölüm 2'de verilmektedir. Yöntem ve test ortamı kurulumu Bölüm 3'te verilmektedir. Bölüm 4, Middlesex VANET test ortamının tasarımını ve uygulamasını açıklamaktadır. Bölüm 5, dört önemli deneysel yol kaybı modelini sunmaktadır. Bölüm 6, test ortamının performans değerlendirmesini ve analiz sonuçlarını içermektedir. Son olarak, Bölüm 7'de sonuçlar ve gelecek çalışmalar tartışılmaktadır.

2 Literatür taraması

Araştırmacılar, kendi kendini organize eden araçların ağ performansını en üst düzeye çıkarmak ve bu araçların yeteneklerini değerlendirmek amacıyla, farklı yaklaşımlar içeren çeşitli çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Yapılan çalışmalarda, VANET'leri analiz etmek ve incelemek amacıyla sanal simülasyon yazılımları ile araç trafiği modelleyicileri tercih edilmektedir. [17] numaralı çalışmada, farklı sürüş senaryolarında İki-Işınlı, Gölgeleme ve Nakagami gibi üç farklı radyo yayılım modelinin etkisi, açık kaynaklı VanetMobiSim aracıyla değerlendirilmiş ve IEEE 802.11p protokolünün performansı analiz edilmiştir. Yapılan analizde elde edilen bulgular, şehir dışındaki kentsel alt ortamlar için Gölgeleme Modeli'nin, gölgelenmiş sinyalin ve görüş hattının sönümleme özelliklerine bağlı olarak yerleşim alanlarına uygun olduğunu; ancak İki Işınlı Zemin Modeli'nin en uygulanabilir model olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, daha fazla sayıda parametrenin yönetilmesine olanak tanıyan Nakagami Modeli, bu özelliği sayesinde çok yönlü yayılım ve engellerin yoğun olduğu kentsel ortamlar için daha elverişli olduğu sonucuna varılmıştır.

Çalışma [18]'de ise yazarlar, boş alan yol kaybı ve farklı araç hızları dikkate alınarak, İki Işınlı Yer Yansıma Modeli, bir yol kaybı sabiti ve verici güç parametrelerini kullanarak, Milan şehir merkezine ait bir arazi haritası üzerinde paket kaybı ve yayılma gecikmelerini ölçmeye yönelik bir simülasyon senaryosu sunmuşlardır. Elde edilen sonuçlar, araç hızının artmasıyla birlikte paket kaybının da arttığını; ancak İki Işınlı Yer Yansıma Modeli'nin, yayınlanan mesajların alınmasına ilişkin oldukça temkinli (konservatif) sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, verici gücünün artırılmasının, diğer düğümlerle yaşanan girişim nedeniyle paket kaybını daha da yükselttiği belirlenmiştir.

Gerçek saha testlerinin uygulanması, gereken araç sayısının fazlalığı, çevresel faktörler üzerinde yeterli kontrolün sağlanamaması ve ihtiyaç duyulan ekipman ile personelin yüksek maliyetli olması nedeniyle oldukça zordur. Ancak simülasyon araçları, araç senaryosunun son derece dinamik ve karmaşık özelliklerini gerektiği gibi yansıtmayabilir [19]. Bu nedenle çalışma [20]'de yazarlar, bu tür mimariyi göstermek ve ağ performansını değerlendirmek için test platformu oluşturmuşlardır. Önerilen test ortamı, bunlara ek olarak güvenlik uygulamaları ve trafik sıkışıklığı sistemlerinin değerlendirilmesini sağlamak amacıyla, araç gecikmeye toleranslı ağlar (VDTN-Vehicular Delay Tolerant Networks) için tasarlanmıştır. Çalışmada, 2.4 GHz frekans bandında çalışan IEEE 802.11b/g/n standardı kullanılmıştır. Bununla birlikte, zaman içerisinde farklı hız ve paket boyutlarıyla aktarılan veri miktarı da analiz edilmiştir. Diğer bir taraftan çalışma [21]'de Portekiz'deki Leixoes limanında uygulanan test platformu, araç ağları için gerçek veriler sunmaktadır. Bulut tabanlı kod dağıtımı, uzaktan ağ kontrolü ve hareketli unsurlardan (kamyonlar, vinçler, botlar, yol kenarı birimleri) veri toplama imkanı ile çeşitli analizlere olanak tanımaktadır. Mimari ve kullanım örnekleri açıklanarak, kablosuz ağ test platformlarının tasarımı için öneriler sunulmuştur. Bu çalışma, hareketli araçlar üzerinden gerçekleştirilen ağ araştırmaları için yenilikçi ve sağlam bir temel sunmaktadır. Buna ek olarak, [22] numaralı çalışmada yazarlar, VANET ortamlarında kullanılmak üzere yoğunluk duyarlı güvenilir bir yayın protokolü (DECA) önermiş; bu kapsamda, paket iletim oranı temel alınarak Chulalongkorn

Üniversitesi toplu taşıma sistemi üzerinden protokolün performansını değerlendirmiştir. [23] numaralı çalışmada, DSRC alıcı-vericilerinin kullanıldığı bir V2I (Araçtan Altyapıya) senaryosunda, gerçek zamanlı video iletim performansı incelenmiş ve özellikle yeni bir kullanıcının ağı dahil edilmesi durumunda, yüksek paket kaybı nedeniyle görsel kalitenin tatmin edici düzeyde olmadığı sonucuna varılmıştır. Çalışmada, kullanıcılar arasındaki koordinasyonun bant genişliği tahsisini daha adil hâle getirebileceği ve bu sayede video kalitesinin artırılabilirliği öne sürülmektedir. Bu bulgular, altyapının yalnızca fiziksel dağılımının değil, aynı zamanda uygulama gereksinimlerinin karşılanması ve daha istikrarlı bağlantı olanaklarının sağlanması gerektiğini de ortaya koymaktadır.

Test platformları kullanılarak bu tür sistemlerin gerçek performanslarını ölçmeye yönelik çalışmalar oldukça sınırlıdır. [24]'de simülasyon yazılımından daha doğru sonuçlar elde etmek için gerçek dünya ölçümleri kullanılmıştır. Avusturya'nın Tirol kentindeki A12 otoyolunda, iki RSU kullanılarak altyapıdan araca iletişim denemeleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı, RSU sinyalinin aşağı akış kapasitesini ve yayılma mesafesini farklı parametreler altında belirlemektir. Kullanılabilir yayılım aralığı, Çerçeve Başarı Oranı (FSR – Frame Success Ratio) kullanılarak değerlendirilmiş; FSR'nin belirli bir eşik değerin üzerinde kaldığı mesafe ölçülerek kabul edilebilir iletim aralığı tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, farklı paket uzunluklarının genel kapsama alanını etkilemediğini; ancak araç daha yüksek hızlarda seyrettiğinde, uzun paket uzunlukları için alınan veri miktarında belirgin dalgalanmalar oluştuğunu ortaya koymuştur. Bu durum, kullanıcıların ağ kapsama alanında kalma süresinin azalmasından kaynaklandığını göstermektedir. [25] numaralı çalışmada yazarlar, 802.11a standardı için tasarlanmış donanımı kullanarak, parametreleri değiştirip 802.11p standardına mümkün olduğunca yakınlaştırmak suretiyle saha testleri gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada üç senaryo incelenmiştir. Birincisi RSU ve OBU'nun doğrudan görüş hattına sahip olduğu bariyersiz deneyler, ikincisi RSU ve OBU arasında değişen RSU yüksekliğine sahip bir şeritte hafif engelleme testleri ve son olarak statik görüş hattı sinyalinin engelleyen bina ve ağaçlarla yapılan testler. Engelsiz senaryolar için ilgili paket kaybının olmadığı bulunmuştur. İkinci senaryoda, minimum gecikmeye sahip olmak için RSU anteninin, görüş hattı menzilini artırmak amacıyla, yol kenarına tüm sürüş araçlarından daha yüksek bir yüksekliğe yerleştirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Son olarak üçüncü senaryoda, daha iyi bir Güvenilir Bağlantı Aralığı (RCR - Reliable Connectivity Range) elde etmek için anten kazancının artırılmasının faydalı olacağı bulunmuştur. Bu araştırmada elde edilen maksimum RCR ise 180 metredir. Bu, dış mekânda 802.11p kullanımına yönelik ticari RSU'ların ulaşabileceği aralıktan çok daha düşüktür.

Önceki çalışmalar genellikle belirli çevresel koşullara (örneğin, yalnızca kentsel veya otoyol ortamları) ve sınırlı yayılım modellerine (örneğin, yalnızca tek bir model üzerine odaklanan simülasyonlar) odaklanırken, bu çalışma, Middlesex Üniversitesi Hendon Kampüsü, Londra ve çevresindeki yollar boyunca oluşturulan gerçek dünya

VANET test ortamında, kentsel, dış mekân ve otoyol gibi farklı çevresel koşullarda çoklu yayılım modellerini sistematik bir şekilde karşılaştırmaktadır. Gerçek ölçümlerle desteklenen bu test platformu, 5.9 GHz frekansında uzun menzilli iletimlerin uygulanabilirliğini değerlendirirken, kapsama alanı, RSU konumlandırılması ve geri bildirim teknolojilerinin (kablolu ve hücresel/LTE) performansını analiz etmektedir. Çalışmamız, komşu RSU'lar arasında optimal örtüşme sağlayarak araçların ağda kalma süresini maksimize etmeye yönelik etkili bir dağıtım stratejisi geliştirmekte ve maliyet etkin, güvenilir ve ölçeklenebilir bir VANET altyapısı tasarımı sunmaktadır.

Bu bağlamda, mevcut yaklaşımların sınırlılıklarını aşarak, farklı çevresel koşullar ve yayılım modelleri altında optimum haberleşme stratejilerinin belirlenmesine olanak tanıyan özgün bir çerçeve sunmakta ve VANET'lerin gerçek dünya performansını optimize etmeye yönelik literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

3 Yöntem

3.1 Test ortamı kurulumu

Bu çalışma kapsamında oluşturulan VANET test ortamı, Middlesex Üniversitesi Hendon Kampüsü ve çevresindeki yolları kapsayan bir bölgede kurulmuştur. Testler, kentsel, banliyö ve otoyol segmentlerini içerecek şekilde üç farklı çevresel koşulda gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan araçlar, 5.9 GHz frekans bandında çalışan ve IEEE 802.11p protokolünü destekleyen OBU cihazlarıyla donatılmıştır. Her OBU, GPS modülü, hız sensörleri ve gerçek zamanlı veri kaydediciler içermektedir. Araçlarla iletişim kurmak ve veri toplamak amacıyla yol kenarına yerleştirilen RSU cihazları ise hem fiber optik kablolu hem de LTE/5G gibi hücresel geri taşıma yöntemlerini destekleyecek şekilde yapılandırılmıştır. RSU'lar, özellikle kavşaklar ve ana yollar gibi stratejik noktalara konumlandırılarak sinyal kapsama alanı en üst düzeye çıkarılmıştır.

3.2 Yayılım modelleri

Gerçekçi bir iletişim ortamı simülasyonu oluşturmak amacıyla farklı yayılım modelleri test edilmiştir. Otoyol senaryolarında zeminden yansıyan sinyallerin etkisini dikkate alan İki-Işınlı Yer Yayılım Modeli kullanılmıştır. Kentsel alanlarda ise, bina ve diğer fiziksel engellerin neden olduğu sinyal zayıflamasını modelleyebilmek adına Log-Mesafe Yol Kaybı Modeli tercih edilmiştir. Dinamik araç hareketlerine karşı hassas olan ortamlarda ise, Serbest Uzay Yol Kaybı ve Hızlı Solma ile Serbest Uzay Yolu Kaybı modelleri uygulanmıştır. Tüm kullanılan modeller hem simülasyon ortamında hem de gerçek ölçümlerle kıyaslanarak farklı çevresel senaryolarda performansları analiz edilmiştir.

3.3 Veri toplama süreci

Veri toplama süreci iki ana bileşenden oluşmaktadır. Gerçek dünya ölçümleri ve simülasyon tabanlı analizler. Gerçek dünya testleri sırasında kullanılan araçlar, DSRC protokolünü destekleyen haberleşme modülleriyle donatılmıştır. RSU cihazları, sinyal gücü (RSSI), paket teslim oranı (PDR), iletişim gecikmesi (Latency) ve ağda

kalma süresi (Network Dwell Time) gibi metrikleri yüksek hassasiyetle ölçmek için gelişmiş alıcı-vericiler içermektedir. Testler, üç farklı çevresel senaryoda uygulanmıştır. Kentsel senaryolar, kampüs çevresindeki yoğun trafikli yolları kapsamış ve araçlar genellikle 30 ila 50 km/s hız aralığında hareket etmiştir. Otoyol testleri, M25 gibi çevre yollarında gerçekleştirilmiş ve araçlar 80 ila 120 km/s hızlara ulaşmıştır. Banliyö senaryoları ise Hendon çevresinde daha az yoğunlukta trafiğin olduğu alanlarda 50 ila 70 km/s hız aralığında yapılmıştır. Kullanılan iletişim protokolleri arasında IEEE 802.11p'nin yanı sıra AODV ve DYMO gibi reaktif yönlendirme protokolleri de yer almaktadır [26]. Veri kaydı, her bir aracın OBU'su aracılığıyla GPS konumu, hız, yön ve sinyal metrikleri gibi bilgilerle sürekli olarak gerçekleştirilmiş, RSU'lar ise bu verileri merkezi sunucuya ileterek analiz süreci için kaydetmiştir.

Simülasyon süreci, gerçek dünya ölçümlerini destekleyecek ve daha geniş kapsamlı senaryoları test edebilecek şekilde tasarlanmıştır. Araç hareketliliğini modellemek için SUMO kullanılmış, bu araç OMNeT++ ve INET Framework ile entegre edilerek ağ iletişimi simüle edilmiştir [26-28]. SUMO'ya Hendon bölgesinin dijital haritası entegre edilmiş, böylece simülasyonlar gerçek dünya topolojisine uygun biçimde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Veins Framework ile SUMO ve OMNeT++ arasındaki entegrasyon sağlanarak araç hareketliliği ile ağ protokollerinin senkronize çalışması mümkün kılınmıştır. Simülasyon parametreleri kapsamında farklı yoğunluklardaki araç senaryoları (10, 50 ve 100 araç/km²), çeşitli RSU konumlandırmaları (kapsama alanları 100 ila 1000 metre arasında değişen ve örtüşme oranları %20 ile %50 arasında olan) ve daha önce tanıtilen yayılım modelleri test edilmiştir. Ölçülen metrikler arasında RSSI, PDR, gecikme, ağda kalma süresi ve enerji tüketimi yer almaktadır.

Veri toplama süreci planlama, kalibrasyon, uygulama, işleme ve simülasyon entegrasyonu olmak üzere beş adımdan oluşmuştur [29]. Planlama aşamasında test rotaları belirlenmiş, RSU'ların konumları sinyal kapsama alanını maksimize edecek şekilde seçilmiştir. Cihazların kalibrasyonu, 5.9 GHz bandında güvenilir veri üretimi sağlamak amacıyla yapılmıştır. Uygulama aşamasında veri toplama işlemi farklı saatlerde (yoğun ve sakin trafik saatleri) ve farklı hava koşullarında gerçekleştirilmiştir. Ardından toplanan veriler, gürültü filtreleme ve hata düzeltme işlemlerinden geçirilmiş, MATLAB yazılımı ile analiz edilmiştir. Son olarak, elde edilen gerçek dünya verileri, simülasyon modellerinin kalibrasyonunda kullanılarak örneğin kentsel ortamda ölçülen RSSI değerleri, kullanılan modelinin parametrelerini güncellemek amacıyla simülasyonlara entegre edilmiştir.

4 Araçlar arası ağ test ortamı tasarımı ve uygulaması

4.1 MDX ve A41 kapsama haritası

Bu bölümde, Middlesex Üniversitesi kampüsü çevresindeki yollarda seyreden araç kapsama haritasını oluşturmak için yapılan çalışmaları göstermektedir. MDX VANET test ortamı ilk etapta yedi RSU ile oluşturulmuştur.

MDX VANET sunucusu tarafından alınan paketlerden elde edilen GPS koordinatlarını ve kapsama haritası sırasıyla, Tablo 1 ve Şekil 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. RSU Bilgileri

RSU	Enlem	Boylam	Yükseklik (m)	Zemin yüksekliği (m)
1	51.590494	-0.228594	20.70	90.40
2	51.590808	-0.228594	7.10	79.80
3	51.589073	-0.228374	11.10	88.00
4	51.588837	-0.230769	18.00	86.40
5	51.586145	-0.231452	11.27	83.20
6	51.591779	-0.234701	11.27	61.60
7	51.599255	-0.233245	11.27	53.30



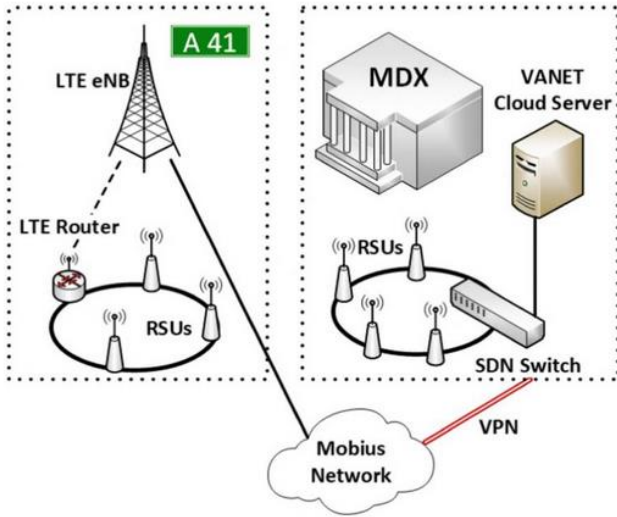
Şekil 1. MDX ve A41 kapsama haritası [6, 26-28]

İlk dört RSU (RSU1-4), Hendon Kampüsü ve çevresindeki yolları kapsamaktadır [26]. Bu, yaklaşık 1.1 kilometrekarelik bir alanı içermektedir. Diğer RSU'lar (RSU5-7), A41'i kapsamaktadır [27]. Kapsama alanı, Great Northern Way'in girişinden (kahverengi çizginin üstü) Hendon Central tube istasyonu'na kadar (mavi çizginin altı) uzanmaktadır [28]. Bu, 3.2 kilometrelik bir mesafedir. Dolayısıyla, test alanının toplam kapsama alanı 4.31 kilometredir [29]. Oluşturulan test ortamında paketler, bir araca yerleştirilen OBU'lar tarafından gönderilmektedir. Kapsama haritası, her binada bulunan RSU'lar ve A41 yolundaki farklı renkteki noktalarla belirtilen RSU'lar tarafından elde edilen bireysel kapsamayı göstermektedir.

Önceki çalışmaların da ortaya koyduğu üzere, açık görüş hattına (Line-of-Sight, LoS) sahip ve yüksek noktalara konumlandırılan RSU'lar, daha geniş kapsama alanı

sağlamaktadır [30]. Bu çalışmada kullanılan RSU ve OBU cihazları, Lear Corp. tarafından üretilmiş olup IEEE 802.11p WAVE (Wireless Access in Vehicular Environment) standartlarını desteklemektedir. Cihazların maksimum çıkış gücü 200 mW (+23 dBm) olarak belirlenmiştir [31].

MDX Üniversitesi kampüsünde RSU konumlandırılmasında en önemli kriterlerden birisi, RSU'lar ile üniversite ağındaki yönlendirici ögeleri arasındaki mesafenin en aza indirilmesidir. Bu yaklaşım, verilerin RSU'lardan doğrudan Sheppard Kütüphanesi'nin bodrum katında bulunan merkezi MDX VANET sunucusuna üniversite ağı üzerinden iletilmesini mümkün kılmaktadır (Şekil 2) [26]. Bu doğrultuda, RSU1, RSU2, RSU3 ve RSU4 sırasıyla Williams, Hatchcroft ve Grove binalarının çatılarına yerleştirilmiştir. Ayrıca RSU4, kampüs içindeki yaya hareketlerini destekleyerek, Araç-Üstü-Yaya (V2P-Vehicle-to-Pedestrian) iletişimini temel alan uygulamaların geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.



Şekil 2. MDX VANET test ortamı ağ şeması [6]

Transport for London (TfL) iş birliğiyle, üniversite kampüsünün arkasında yer alan A41 yolu boyunca uzanan üç elektrik direğine RSU5, RSU6 ve RSU7 yerleştirilmiştir. Bu kurulum, Middlesex test ortamının kapsamını genişleterek, şehir genelinde ITS 5G/VANET sistemlerinin değerlendirilmesine ve daha gelişmiş yayılım modellerinin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Elektrik direklerinde mevcut bir iletişim altyapısı bulunmadığından, RSU'lar tarafından toplanan veriler LTE yönlendiriciler aracılığıyla iletilmiştir. Ayrıca, üniversite ağındaki güvenlik kısıtlamaları nedeniyle, veri aktarımı Şekil 2'de gösterildiği gibi Vodafone üzerinden Mobius ağına ait VPN tüneli aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.

4.2 Uygulama anlatımı

RSU ve OBU'lar arasında, işbirlikçi farkındalık mesajları (CAMs-Cooperative Awareness Messages), temel güvenlik mesajları (BSMs-Basic Safety Messages), yol kenarı uyarıları (RSAs- Road Side Alerts), kavşak çarpışma uyarıları (ICAs- Intersection Collision Alerts) ve sorgulama araç verileri (PVD-Probe Vehicle Data) gibi çeşitli iletişim

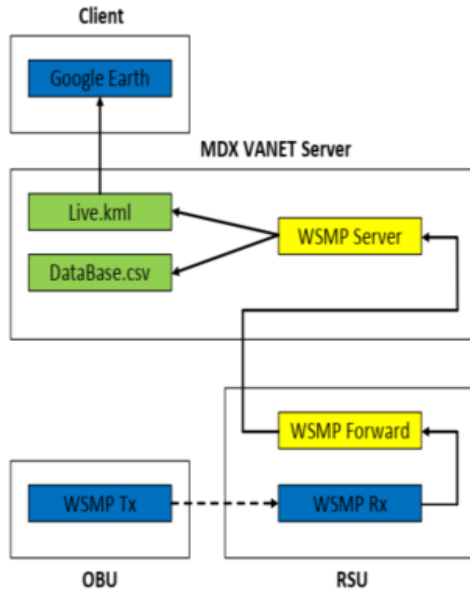
türleri kullanılmaktadır [6, 26-28]. Bu çalışmada, güvenlik uygulamalarına yönelik ayrı bir analiz planlandığı için veri toplama amacıyla yalnızca BSM türü tercih edilmiştir. BSM'ler, OBU'lar tarafından saniyede 10 kez (10 Hz) periyodik olarak RSU'lara iletilmekte olup, her mesaj paketi 41 bayttır. Şekil 3'te gösterildiği üzere bu mesajlar, aracın konumu, hareket durumu, zaman bilgisi ve genel sistem durumu gibi temel verileri içermektedir [6]. Ancak bu çalışmada analiz için yalnızca mesaj kimliği ile aracın üç boyutlu konumu (enlem, boylam ve yükseklik) kullanılmıştır. Diğer alanlara ait veriler (örneğin, direksiyon açısı, hızlanma, frenleme durumu) doğrudan araçtan sensörler aracılığıyla alınarak BSM paketlerine eklenmeyi gerektirdiğinden, bu bileşenler kapsam dışı bırakılmış ve ileri çalışmalar kapsamında ele alınması planlanmıştır.

DSRC Message ID (1 byte)
Message Count (1 byte)
Temporary ID (4 bytes)
D Second (4 bytes)
Latitude (4 bytes)
Longitude (4 bytes)
Elevation (2 bytes)
Positional Accuracy (4 bytes)
Transmission and Speed (2 byte)
Heading (2 byte)
Steering Wheel Angle (1 bytes)
Acceleration Set (7 bytes)
Brake System Status (2 bytes)
Vehicle Size (3 bytes)
Vehicle Safety Extension (OPTIONAL)
Vehicle Status (OPTIONAL)

Şekil 3. BSM paket formasyonu [6]

Dalga Kısa Mesaj Protokolü (WSMP-Wave Short Message Protocol), bu çalışmada OBU'ların BSM paketlerini yayınlamak için kullanılan protokoldür. RSU'lar, bu mesajları WSMP Rx uygulaması ile almakta ve ardından WSMP Forward uygulaması aracılığıyla Şekil 4'te gösterildiği gibi sunucunun IPv6 adresine iletmektedir. MDX VANET sunucusu, gelen mesajları WSMP sunucu uygulamasıyla kaydederken, her pakete ait zaman damgası ve ilgili RSU'nun IP adresi gibi ek bilgileri de saklamaktadır.

Toplanan veriler iki ana dosya formatında depolanmaktadır. *Live.kml* dosyası, her OBU'nun anlık konum bilgisini içerir ve Apache web sunucusu üzerinden erişime açılarak Google Earth ile canlı takip imkânı sunar. *Database.csv* dosyasında ise OBU'nun MAC adresi, alınan sinyal gücü (RSSI), GPS koordinatları, zaman damgası ve RSU IP bilgileri yer almaktadır. Bu dosya her gün MySQL veritabanına yedeklenerek analizlerde kullanılmaktadır. Verilerin yorumlanabilmesi ve RSU yerleşim stratejilerinin değerlendirilebilmesi için, bu bilgiler eldeki yayılma modelleriyle karşılaştırılmıştır.



Şekil 4. RSU'dan sunucuya paket yönlendirme [6]

5 Yol kaybı modelleri

Yayılma analizi, elektromanyetik sinyallerin müdahale eden engellerle birlikte ortamlarda nasıl davranacağını öngörmek için iyi bir araçtır. Özellikle de saha ölçümleri maliyetli ve hava durumu ile çevresel değişkenlere duyarlı olduğu için kablosuz radyo yayılma modelleri iki ana kategoriye ayrılabilir: İstatistiksel (ya da deneysel modeller) ve deterministik modeller (ya da belirli yer modelleri) [32].

Ampirik yayılma modelleri, yayılan sinyalin frekans, faz, kat edilen mesafe, anten yüksekliği ve diğer koşullar gibi özelliklerini kullanarak matematiksel formasyonlardır. Bu modeller, daha az hesaplama çabası gerektirdikleri için uygulanması daha kolaydır. Öte yandan, belirli yer modelleri, arazi profili, geometri düzeni, yapıların yüksekliği, malzeme, hava durumu ve atmosfer koşulları gibi verilere ihtiyaç duyar ve bu nedenle daha fazla hesaplama gerektirir. Bu bölümde, bu çalışmada kullanılan deneysel yol kaybı modelleri verilmektedir.

5.1 Serbest uzay yolu kaybı (Free space path loss)

Serbest uzay yol kaybı modeli (FSPL), temel ve bilinen modellerden biridir. Bu model, alıcı ve verici arasındaki mesafe ile işlem frekansını gerektirir. Denklem 1'de gösterildiği gibi alınan sinyal gücünü hesaplamak için kullanılır.

$$FSPL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (1)$$

Burada, $\lambda = c/f$, λ dalga boyunu, d mesafeyi, c ışık hızını ve f frekansı temsil eder. Kullanılan RSUların çalışma frekansı, Kanal 172'de 5.86 GHz'dir.

5.2 İki ışınlı zemin yansıma modeli (Two-ray ground reflection model)

İki ışınlı zemin yansıma modeli, [33]'de belirtildiği gibi, serbest uzay yol kaybı Model'inin geliştirilmiş bir versiyonudur. Mevcut formülü genişleterek, alıcı ve verici antenlerin doğrudan görüş hattı arasındaki yer yansımasını dikkate alır. Ek olarak, verici ve alıcı anten yüksekliklerinin sırasıyla h_t ve h_r sabitleri olduğunu varsayalım, o zaman aşağıdaki geçiş mesafesi, Denklem 2'de gösterildiği gibi olacaktır.

$$d_{Th} = \frac{4\pi h_t h_r^2}{\lambda} \quad (2)$$

İki ışınlı zemin yansıma modelinin geçiş mesafesi, serbest uzay yol kaybı modeline eşit olduğu noktayı tanımlar. Bu mesafeye ulaşmadan önce, yer yüzeyinden yansıyan ışınlar, doğrudan görüşle yıkıcı bir şekilde etkileşir ve alınan gücü azaltır. Bu nedenle, elde edilen denklemler şu şekilde yazılabilir:

$$\text{If } d < d_{Th}: P_{r,TR} = \frac{G_t G_r \lambda^2 P_t}{4\pi d^2} = P_{r,FS} \quad (3)$$

$$\text{If } d < d_{Th}: P_{r,TR} = \frac{G_t G_r h_t^2 h_r^2 P_t}{d^4} \quad (4)$$

Önceki modelin tümü için açıklanan tek parametre, mesafe, frekans ve yükseklik idi. Elde edilen modellemeli yayılma, verici etrafında mükemmel bir daire şeklinde bir kapsama alanına sahiptir ve ardından bu sınırdan uzaklaştıkça alımın mümkün olmadığı diğer bir deyişle menzil sınırı bulunmaktadır.

5.3 Log mesafe yol kaybı modeli (Log-distance path loss model, LDPLM_{PL})

Log mesafe yol kaybı modeli, diğer iki önceki model gibi benzer şekilde hesaplanır; ancak, bu model diğer deneysel modellerden iki farklı yönü vardır. Birincisi, referans değeri kullanır ve rasgele bir değişkeni tanıtır. Denklem 5'e bakıldığında, bu yayılma modeli, PL₀ olarak kullanılan bir referans değeri içerir, bu değer RSU'da alınan en yakın paket olarak alınır (OBU'nun minimum mesafeye sahip olduğu durum). Bu değeri dizin içinde elde etmek için minDist fonksiyonu yazılmıştır; bu fonksiyon, MATLAB kütüphanesinden min fonksiyonunu kullanarak o RSU'nun tüm örneklerinin en küçük mesafesini (metre cinsinden) elde etmek için kullanılmıştır.

$$PL = PL_0 + 10\gamma \log_{10} \frac{d}{d_0} + X_g \quad (5)$$

$$PL_0 = \frac{P_{r,min}}{23dBm} \quad (6)$$

X_g terimi, ortalaması sıfır ve standart sapması σ olan normal dağılımı takip eden rasgele bir değişkendir. Bu rasgele değişken, MATLAB kütüphanesinden randn

fonksiyonu ve σ değerleri kullanılarak hesaplanır. Bu standart sapma değeri için, [25] kaynağına göre açık hava ortamı için 4 ile 12 değeri arasında (dB cinsinden) atanabilir. Standart sapma için çevresel değerler Tablo 2'de detaylı bir şekilde verilmiştir.

Tablo 2. Standart sapma için çevresel değerler

Çevre	Değerler σ_{dB}
Açık hava için	4-12
Ofis, sert bölme için	7
Ofis, yumuşak bölme için	9,6
Fabrika, görüş hattı için	3-6
Fabrika, engellenmiş için	6.8

Standart sapmayı randn fonksiyonuna uygulamak için Denklem 7 kullanılmıştır:

$$rand(n, k) \times \sigma_{dB} + \mu_{dB} \quad (7)$$

Bu durumda, n ve k (dizi boyutu) 1'e eşittir. $\mu_{dB} = 0$ olduğunda, standart sapma, σ değeri, Tablo 2'ye göre 4 ile 12 aralığından seçilmelidir. RSU ayarları için en uygun değeri seçmek için, her çalıştırmada σ_{dB} için 4 ile 12 arasında bir set değer kullanarak yapı dizisinin her girişini rasgele bir değer setiyle test ederek yaklaşım düzeyi değerlendirilmiştir.

Bu doğrultuda, log-mesafe modelinde kullanılan referans mesafe d_0 , ortam sabiti (n) ve gölgeleme varyansı (σ_{dB}) gibi parametreler, gerçek dünya ölçümlerinden elde edilen RSSI verilerine regresyon uygulanarak tahmin edilmiştir. Ölçüm yapılan her ortam (kentsel, banliyö, otoyol) için ayrı ayrı kalibrasyon gerçekleştirilmiş ve parametreler istatistiksel uygunluk dikkate alınarak seçilmiştir [34].

5.4 Hızlı solma ile serbest uzay yolu kaybı (Free space path loss with fast fading)

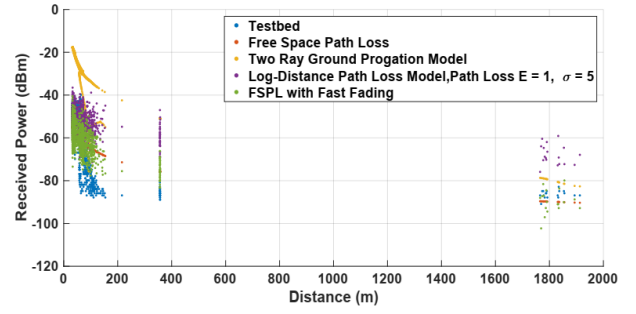
Hızlı solma ile serbest uzay yolu kaybı, Denklem 8 kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu, Denklem 1 ile benzerlik göstermektedir ancak rastgele bir Gaussian değişkeni (X_g) eklenmiştir. Bu, VANET'lerde tipik olarak hızla değişen topoloji nedeniyle ortaya çıkan hızlı zayıflama fenomenini hesaba katmak içindir.

$$FSPL_{FF} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 + X_g \quad (8)$$

6 Performans değerlendirmesi

6.1 Yol kaybı modelleri analizi

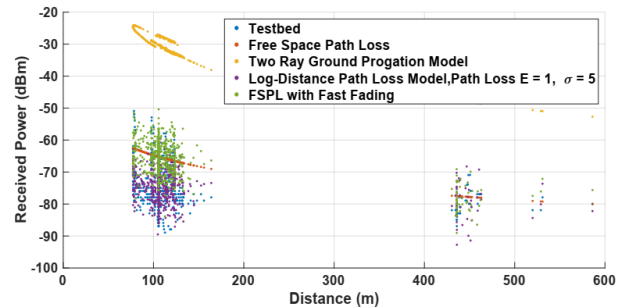
MDX VANET test platformunda gerçekleştirilen yayılma analizi, yukarıda açıklanan dört deneysel yayılma modeli ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Analiz sürecinde, RSU'ların omnidireksiyonel anten özelliklerine sahip olması nedeniyle, yalnızca her bir RSU'nun kapsama yarıçapı dikkate alınmış ve yönlü etkiler göz ardı edilmiştir. Bu yaklaşım, modellerin karşılaştırılabilirliğini sağlamak ve çevresel faktörlere bağlı sinyal zayıflamasını daha doğru analiz edebilmek amacıyla tercih edilmiştir.



Şekil 5. RSU1 için toplam alınan gücün mesafeye ilişkisi ve farklı yol kayıpları ile analizi

Her bir RSU için tüm paketler için alınan gücün mesafeye ilişkisi farklı yol kayıpları ile analizi Şekil 5-11'de detaylı şekilde gösterilmiştir. Şekil 5'te toplam alınan gücün mesafeye ilişkisi ve farklı yol kayıpları ile analizi Sheppard kütüphanesinde konumlandırılmış RSU1 için gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere önerilen test ortamı, FSPL modeli ile tutarlı sonuçlara sahiptir. Genellikle RSU1'e daha yakın olan sinyaller çok güçlü sonuçlar vermektedir. Ancak RSU1'den uzaklaştıkça LoS sorunları nedeniyle keskin bir düşüş yaşanmaktadır. Bunun diğer bir nedeni de ağaç ve arada bulunan binaların haberleşme yolunu engellediği ve büyük bir kapsama alanını etkilediği saptanmıştır. Sonuç olarak, RSU1 analizinde MDX test ortamı hızlı solma ($FSPL_{FF}$) ile log-mesafe yol kaybı modeli ($LDPLM_{PL}$) ile daha yakın değerler vermektedir.

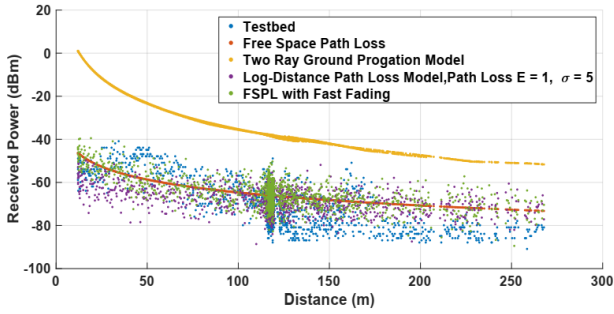
Bununla birlikte RSU2 için farklı yol kayıpları analizi Şekil 6'da gösterilmiştir. RSU2 Williams binasına yerleştirilmiştir. Burada, tekrar RSU2'ye yakın iyi bir kapsama alanı olduğunu görüyoruz, ancak Greyhound Hill boyunca iniş yapan yolun yüksekliğindeki dik düşüş nedeniyle kapsama alanında ve toplam alınan güçte büyük bir düşüş oluşmuştur. Karşılaştırıldığında, Greyhound Hill'in aşağısındaki trafik ışıklarında ve A41 boyunca daha fazla değer elde edildiği görülmüştür. Şekil 6'dan görüldüğü üzere RSU2, MDX test ortamı $LDPLM_{PL}$ ile çok yakın değerler vermektedir. Ancak binanın çatısının kenarından uzak bir konuma yerleştirildiği için performansının azaldığı gözlenmektedir.



Şekil 6. RSU2 için toplam alınan gücün mesafeye ilişkisi ve farklı yol kayıpları ile analizi

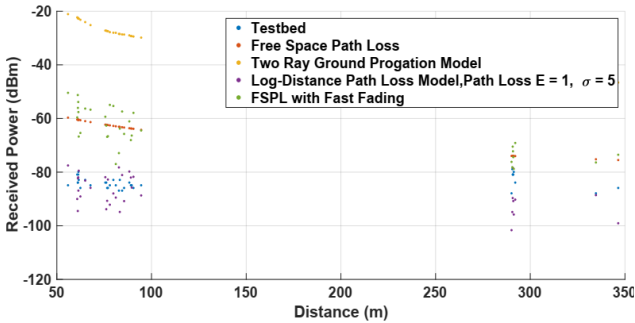
Aynı şekilde RSU3 için farklı yol kayıpları analizi Şekil 7'de gösterilmiştir. Ölçümler, Hatchcroft binası'nın önünde 120 metreye kadar çok iyi bir kapsama alanına ulaştığını

göstermektedir. Ancak bundan sonra, yol Church End yoluna doğru sola dönmeye başlar ve bu da daha az etkili bir kapsamı beraberinde getirmektedir. Fakat Greyhound Hill boyunca inildikçe daha fazla değer elde edilmektedir. RSU3, yaklaşık olarak sokak seviyesine monte edilmiştir ve beklenenden daha fazla mesafeyi kapsamaktadır. FSPL, FSPL_{FF} ve LDPLM_{PL} modelleri MDX test ortamı ile çok yakın değerler vermektedir. Ancak mesafe arttıkça MDX test ortamı LDPLM_{PL} modeline benzemektedir.



Şekil 7. RSU3 için toplam alınan gücün mesafeye ilişkisi ve farklı yol kayıpları ile analizi

RSU4, konumu nedeniyle genişletilmiş yollara göre çevre binalar tarafından engellendiği için çevre yollarını pek kapsamamıştır. Bu nedenle, genişletilmiş kapsama ait çoğu değer, serbest alan yol kaybı, FSPL model hesaplamalarından daha düşüktür. Ancak, RSU4, çoğu değer aşımını doğudan batıya doğru kapsamaya izin vermektedir. Fakat Şekil 8'den görüldüğü gibi RSU4'den toplanan örneklerden herhangi bir sonuca varılamamaktadır.

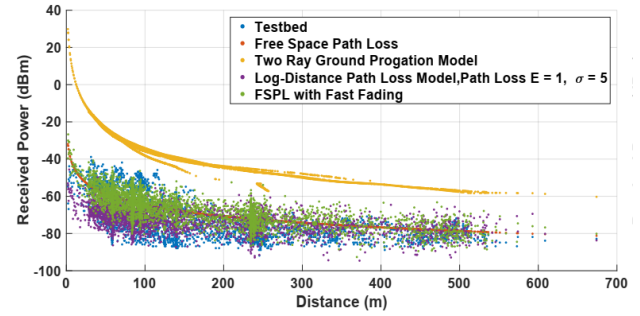


Şekil 8. RSU4 için toplam alınan gücün mesafeye ilişkisi ve farklı yol kayıpları ile analizi

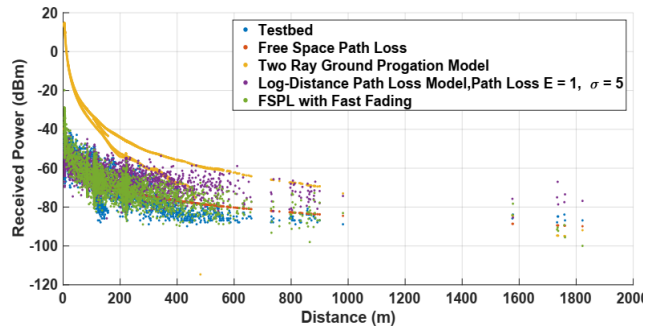
Kapsama alanı bölgedeki ağaçlardan ciddi şekilde etkilenmiş ve sinyal alımı eşik değeri içinde olsa da diğer RSU'lara kıyasla hala düşüktür. Banliyö alanları için genelleme yapılırsa, genellikle uzun mesafe yol kaybı modeli tarafından daha iyi bir şekilde servis edilebilecekleri sonucuna varılabilir. Ancak RSU4 bu varsayıma uymamış olsa da, ağaçların ve bitki örtüsünün varlığının potansiyel gönderilen paketlerin birçoğunu etkilediği görülmektedir. Bu nedenle, yolun geri kalan segmentinin RSU tarafından tam görüş hattında olması durumunda, elde edilen tam veri örneğindeki eğilimin diğer banliyö RSU'larıyla benzerlik

göstereceği ve bu eğilimin LDPLM_{PL} tarafından yüksek doğrulukla temsil edileceği varsayılabilir.

Buna ek olarak RSU5 ise A41 otoyolu ile Burroughs yolunun kesişimi ile Londra ulaşımına ait lamba direklerinden birine monte edilmiştir. Bu direklerin yüksekliği, çalışma [25] tarafından önerildiği gibi yol boyunca geçen çoğu aracın üzerinde olan 11.27 metre yüksekliğindedir ve bu kavşaktan geçen her şey için görüş hattını sağlamaktadır. RSU5, yolun yükseltilmiş konumundan kaynaklanan kapsama alanını yaklaşık 830 metrelik bir uzunluğa kadar genişletmeyi sağlamaktadır. Şekil 9'da görüldüğü gibi RSU5'te elde edilen veriler, LDPL_{PL} ve FSPL_{FF} ile yakından ilişkili ve de mesafe arttıkça LDPL_{PL} model değerlerine çok yakın sonuçlar vermektedir. Burada, değerlerin çok tutarlı olduğunu ve MDX kampüs binalarına kurulan RSU'lara kıyasla iyi bir kapsama alanının olduğunu görmekteyiz. Ancak, A41 boyunca dağıtılan diğer RSU'larla karşılaştırıldığında kapsanan mesafenin daha az olduğu görülmektedir. Bunun nedeni yoldaki eğim ve diğer RSU'lara doğru azalan yol yüksekliğidir.



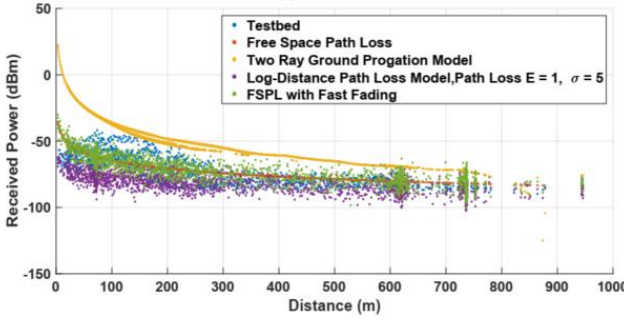
Şekil 9. RSU5 için toplam alınan gücün mesafeye ilişkisi ve farklı yol kayıpları ile analizi



Şekil 10. RSU6 için toplam alınan gücün mesafeye ilişkisi ve farklı yol kayıpları ile analizi

RSU6 da Londra A41 otoyolundaki lamba direklerinden birine monte edilmiş ikinci RSU dur. Elde edilen değerler Şekil 10'da gösterilmektedir. Bu RSU'da yer zemin seviyesine göre yüksek bir konumda bulunduğundan, yaklaşık olarak otoyolun 1.28 km'lik bir kısmını kapsamaktadır. Ancak kuzeyden güneye doğru yükselen eğim nedeniyle RSU6 A41'in sonuna kadar olan yol kesiminin tamamını kapsamayı başaramamaktadır. Buda kayıplara neden olmaktadır. RSU1'e benzer şekilde, MDX test ortamı, FSPL_{FF} ile en iyi yaklaşık sonuçları elde etmiştir.

Buna ek olarak da MDX test ortamı LDPLM_{PL} özellikle kısa mesafe de benzer sonuçlar vermektedir.



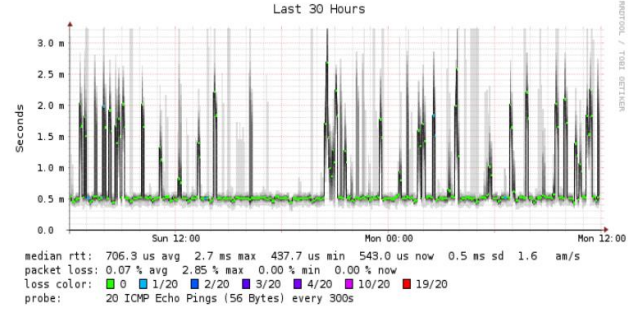
Şekil 11. RSU7 için toplam alınan gücün mesafeyle ilişkisi ve farklı yol kayıpları ile analizi

Diğer taraftan, A41 üzerine monte edilmiş üçüncü RSU da RSU7'dir. Şekil 11'de analiz sonuçları gösterilmektedir. RSU7, toplamda 1.03 km'lik bir alanı kapsamaktadır. RSU6'dan daha az kapsama alanına sahiptir. Fakat hala araçlar için kesintisiz iletişimi sağlamak ve RSU değiştirme tekniklerini kullanmak için yeterli kapsama alanını sağlamaktadır. Sonuçlar, RSU5 ile benzerlik göstermektedir ve en doğru yayılma modelinin FSPL_{FF} olduğu görülmektedir. Bir kez daha görüldüğü üzere, İki Raylı Yer Yansıma Modeli hiçbir şekilde iyi bir yaklaşım sunmamaktadır.

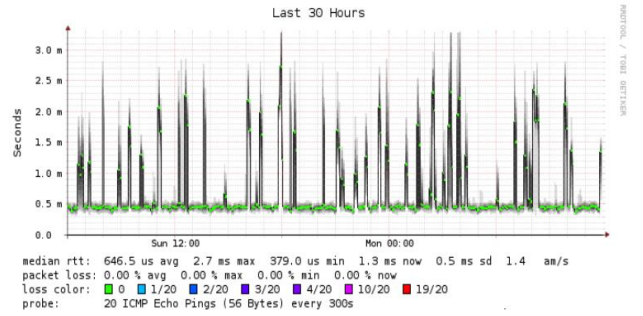
Karayolu kategorisi için en uygun yayılma modelinin belirlenmesine yönelik genel değerlendirmede, FSPL_{FF} modelinin öne çıktığı görülmektedir. Üç test RSU'su da bu modeli yüksek doğrulukla takip etmiş olup, özellikle uzun mesafeli ve açık görüş hattına sahip ortamlarda istikrarlı sonuçlar sunmuştur. Yükseklik değişimleri, beklenen kapsama alanını ciddi ölçüde etkileyebileceğinden, bu tür analizlerde kritik bir parametre olarak değerlendirilmektedir. Örneğin, RSU5'in yalnızca birkaç metre yükseltilmesi, kuzey yönündeki yayılma mesafesini artırarak otoyol boyunca kesintisiz kapsama sağlamaktadır. Ayrıca, uzun mesafelerde açık görüş hattının bulunması, sinyal alımında yüksek tutarlılık elde edilmesine katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, tüm RSU'larda gözlemlenen sinyal gücü değerlerinin yalnızca kısa mesafelerde FSPL ve FSPL_{FF} modelleriyle uyumlu olduğu, mesafe arttıkça bu uyumun azaldığı ve özellikle FSPL modeline kıyasla anlamlı sapmalar olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, çok yollu yansıma ve gölgeleme etkilerinin uzun mesafelerde daha belirgin hale geldiğini göstermektedir.

6.2 Arka taşıma (backhaul) performans analizi

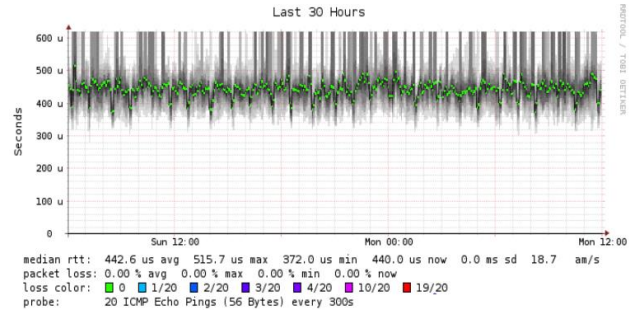
Bu bölümde, MDX test ortamında kullanılan kablolu (1000Mbps) ve LTE/Hücresel geri ağ taşıma teknolojisinin RSU performansını inceleyeceğiz. Test, SmokePing aracı kullanılarak VANET sunucusunda gerçekleştirilmiştir. Her biri 56Byte olan 20ICMP Echo Ping'i tüm RSU'lara gönderilmiş ve araç tarafından kayıt altına alınmıştır. Şekil 12, 13, 14 ve 15'te, 30 saatlik süre boyunca ortalama gidiş dönüş zamanı (RTT) sırasıyla RSU1, RSU2, RSU3 ve RSU4 için gösterilmiştir.



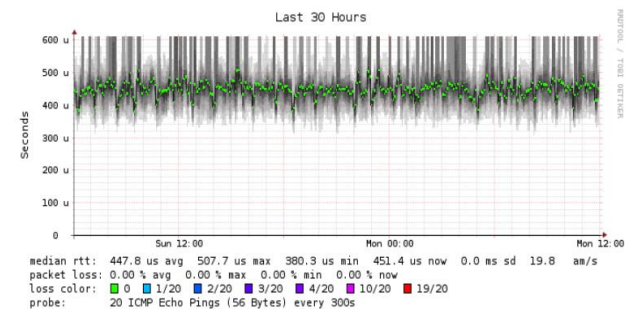
Şekil 12. RSU1 için ortalama RTT değerleri



Şekil 13. RSU2 için ortalama RTT değerleri



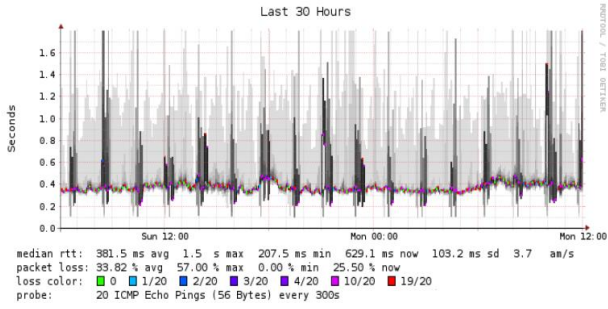
Şekil 14. RSU3 için ortalama RTT değerleri



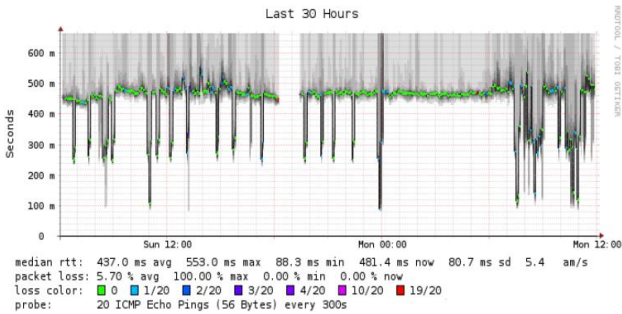
Şekil 15. RSU4 için ortalama RTT değerleri

Önceki açıklamalarda belirtildiği gibi, RSU1'den RSU4'e kadar olanlar, Gigabit Ethernet ağı kullanılarak veri trafiğini sağlamıştır. Şekil 12, 13, 14 ve 15'ten de görüldüğü üzere, 30 saatlik süre boyunca ortalama RTT 442.6µs ile 706.3µs arasında değişmektedir. Maksimum RTT, hem RSU1 hem de RSU2 için 2.7ms'dir. Minimum RTT, RSU2, RSU3 ve RSU4 için 372 ile 380µs arasında değişmektedir. RSU1 kütüphanede olduğundan dolayı, ağı öğrenciler tarafından yoğun bir şekilde kullanılmasından kaynaklı olarak RSU1'in minimum, maksimum ve ortalama RTT'sinin diğer MDX

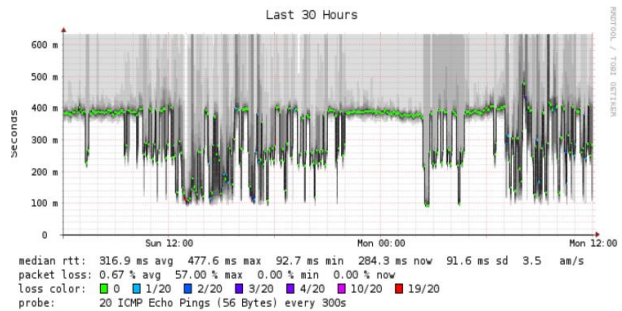
kampüs RSU'larına kıyasla yüksek olduğunu gözlemleyebiliriz.



Şekil 16. RSU5 için ortalama RTT değerleri



Şekil 17. RSU6 için ortalama RTT değerleri



Şekil 18. RSU7 için ortalama RTT değerleri

Şekil 16, 17 ve 18 incelendiğinde, RSU5, RSU6 ve RSU7'ye ait ortalama RTT değerlerinin 316.9ms ile 437.0ms arasında değiştiği gözlemlenmektedir. Bu, MDX kampüsüne konuşlandırılan RSU'larla (RSU1-4) kıyaslandığında çok yüksektir. RSU6 ve RSU7'nin maksimum RTT'si sırasıyla 553.0ms ile 477.6ms iken, RSU 5'in maksimum RTT'si 1.5 saniyedir ki bu, gerçek zamanlı güvenlik uygulamaları için altyapıya dayalı herhangi bir ITS için çok yüksek gecikme süresidir. Ayrıca, RSU6 ve RSU7'nin minimum RTT'si sırasıyla 88.3ms ve 92.7ms iken, RSU5'in minimum RTT'si 207.5ms'dir ki bu, diğer iki RSU'nun iki katıdır. Bu durum, LTE ağının kapsama alanının RSU'ları etkilediğini açıkça göstermektedir ve aynı zamanda ITS uygulamaları için gecikmenin çok yüksek olduğu ortaya çıkmıştır.

Sonuç olarak, backhaul üzerindeki düşük RTT, genel ağ performansını iyileştirir ve kullanıcı deneyimini olumlu yönde etkiler. Özellikle günümüzde hızlı ve güvenilir veri iletiminin önem kazandığı birçok uygulama ve hizmete yönelik olarak, RTT'nin düşük olması kritik bir faktördür.

Bu nedenle, sonuç olarak yapılan deneylerde, LTE backhaul için gecikme üzerine daha fazla inceleme yapılmalıdır. Bununla birlikte sonuçlar, ITS ve akıllı şehir uygulamaları için gecikmeye dayalı detaylı bir backhaul çalışmasının yapılmasının gerekliliği gözlenmektedir.

7 Sonuçlar

Bu çalışma, Middlesex Üniversitesi Hendon Kampüsü ve A41 otoyolu üzerinde kurulan akıllı ulaşım sistemleri test ortamında, araçlar arası ağların dağıtım ve geri taşıma zorluklarını incelemiştir. Gerçek dünya ölçümleriyle, Serbest Uzak Yol Kaybı (FSPL), İki Işınlı Zemin Yansıma, Log-Mesafe Yol Kaybı (LDPLM_{PL}) ve Hızlı Solma ile Serbest Uzak Yolu (FSPL_{FF}) kaybı modelleri analiz edilmiş; kentsel ve otoyol ortamlarında farklı performans özellikleri ortaya konmuştur. FSPL ve FSPL_{FF} modelleri, otoyol senaryolarında tutarlı sinyal kapsama tahminleri sunarak etkili modeller olurken, LDPLM_{PL} modeli, binalar ve bitki örtüsü gibi engellerin etkilediği kentsel alanların karmaşıklığını daha iyi yansıtmıştır. Geri taşıma performans analizi, kablolu Gigabit ethernet'in 442.6µs ile 706.3µs arasında düşük gidiş-dönüş süreleri (RTT) ile üstün olduğunu göstermiştir. Buna karşılık, LTE tabanlı geri taşıma, 1.5 saniyeye varan yüksek gecikmelerle ITS uygulamaları için yetersiz kalmıştır.

Bu bulgular, VANET performansını optimize etmek için ortama özgü yayılım modelleri ve güvenilir geri taşıma çözümleri gerekliliğini vurgulamaktadır. Geliştirilen test ortamı ve sonuçları, daha güvenli ve verimli akıllı ulaşım sistemleri için pratik bir temel sunmaktadır.

Teşekkür

Yazarlar, Middlesex Üniversitesi VANET ekibine ve Dr. Glenford Mapp'a rehberlikleri, önerileri ve yardımları için teşekkür etmektedir. Dr. Glenford Mapp, Ulaştırma Bakanlığı'ndan (DfT) fon almış olup, Middlesex Üniversitesi VANET araştırma ekibinin başıdır. Dr. Yönel Kırsal, MDX VANET araştırma ekibinin misafir üyesidir.

Çıkar Çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik Oranı (iThenticate): %6

Kaynaklar

- [1] M. N. Tahir, K. Mäenpää, T. Sukuvaara and P. Leviäkangas, Deployment and Analysis of Cooperative Intelligent Transport System Pilot Service Alerts in Real Environment, IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems, 2, 40-148, 2021, <https://doi.org/10.1109/OJITS.2021.3085569>.
- [2] K. Ali *et al.*, Review and Implementation of Resilient Public Safety Networks: 5G, IoT, and Emerging Technologies, IEEE Network, 35, 2, 18-25, <https://doi.org/10.1109/MNET.011.2000418>.
- [3] D. Dias, M. Luís, P. Rito and S. Sargento, A Software Defined Vehicular Network Using Cooperative Intelligent Transport System Messages, IEEE Access, 12, 93152-93170, 2024, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3421338>.

- [4] R. Ranjbar Motlagh, O. Ameri Sianaki, H. Shee, A Survey on Cooperative Intelligent Transportation Systems (C-ITS): Opportunities and Challenges, Complex, Intelligent and Software Intensive Systems. CISIS 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, 87, 2024 Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70011-8_23
- [5] S. Hira, and S. Hira, Smart energy management using vehicle-to-vehicle and vehicle-to-everything. In Artificial Intelligence-Empowered Modern Electric Vehicles in Smart Grid Systems, 253-290, 2024, <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23814-7.00010-9>
- [6] V. Paranthaman, Exploiting user contention to optimize proactive resource allocation in future networks. Ph.D. Thesis, Middlesex University, London, UK, 2019.
- [7] D. Serghiou, M. Khalily, T. W. C. Brown and R. Tafazolli, 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, 957-1996, 2022, <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3205505>.
- [8] M. A. Naeem, S. Chaudhary, and Y. Meng, Road to Efficiency: V2V Enabled Intelligent Transportation System. Electronics, 13, 13, 2673, 2024. <https://doi.org/10.3390/electronics13132673>
- [9] K. Ali *et al.*, Review and Implementation of Resilient Public Safety Networks: 5G, IoT, and Emerging Technologies, IEEE Network, 35, 2, 8-25, 2021, <https://doi.org/10.1109/MNET.011.2000418>.
- [10] A. Al-Mohtaseb, et al. A Comprehensive Review of VANET Attacks: Predictive Models, Vulnerability Management, and Defense Selection. 25th International Arab Conference on Information Technology (ACIT), pp. 1-9. Zarqa, Jordan, 2024.
- [11] H. F. Atlam, A. Alenezi, A. Alharthi, R. J. Walters and G. B. Wills, Integration of Cloud Computing with Internet of Things: Challenges and Open Issues, International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData), pp. 670-675, Exeter, UK, 2017,
- [12] V. V. Paranthaman, Y. Kirsal, G. Mapp, P. Shah and H. X. Nguyen, Exploiting Resource Contention in Highly Mobile Environments and Its Application to Vehicular Ad-Hoc Networks, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 68 (4), 3805-3819, 2019, <https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2902245>.
- [13] N. H. Hussein, C. T. Yaw, S. P. Koh, S. K. Tiong and K. H. Chong, A Comprehensive Survey on Vehicular Networking: Communications, Applications, Challenges, and Upcoming Research Directions, IEEE Access, 10, 86127-86180, 2022, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3198656>.
- [14] M. Ayyub, A. Oracevic, R. Hussain, A. A. Khan, and Z. Zhang. A comprehensive survey on clustering in vehicular networks: Current solutions and future challenges. Ad Hoc Networks, 124, 102729, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2021.102729>
- [15] D. Chen, Y. Liang, L. Li and Y. Liu, Physically Secure and Privacy-Preserving Authentication Scheme for VANET, 2024 International Conference on Artificial Intelligence of Things and Systems (AIoTSys), Hangzhou, China, 1-6, 2024.
- [16] T. Pal, R., Saha, and S., Biswas, Design and Implementation of a Routing Protocol for VANET to Improve the QoS of the Network. Journal of Network and Systems Management, 32 (3), 45, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10922-024-09821-z>
- [17] N. Pramuanay, K. N. Nakorn, and K. Rojviboonchai, Preliminary study of reliable broadcast protocol on 802.11p public transport testbed, 12th International Conference in Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), pp. 1-6, 2015.
- [18] N. Baloch and L. Reggiani, Study on communication reliability in VANETs, International Conference on Innovations in Electrical Engineering and Computational Technologies (ICIEECT), Karachi, Pakistan, pp. 1-5, 2017.
- [19] M. I. Sanchez, M. Gramaglia, C. J. Bernardos, A. De la Oliva, and M. Calderon, On the implementation, deployment and evaluation of a networking protocol for VANETs: The Varon case, Ad-Hoc Networks, 19, 9-27, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2014.02.001>
- [20] M. C. Paula, J. J. Rodrigues, J. A. Dias, J. N. Isento, and A. Vinel, Performance evaluation of a real vehicular delay tolerant network testbed, International Journal of Distributed Sensor Networks, 11 (3), p. 219641, 2015, <https://doi.org/10.1155/2015/219641>
- [21] C. Ameixieira et al., Harbornet: a real-world testbed for vehicular networks, IEEE Communications Magazine, 52 (9), pp. 108-114, <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6894460>
- [22] K. N., Nakorn, and K. Rojviboonchai, DECA-bewa: Density-aware reliable broadcasting protocol in VANETs. IEICE transactions on communications, 96 (5), 1112-1121, 2013.
- [23] E. Belyaev, S. Moreschini, and A. Vinel, Uncoordinated multi-user video streaming in vanets using skype, IEEE 22nd International Workshop on Computer aided modeling and design of Communication Links and Networks (CAMAD), pp. 1-3, 2017.
- [24] A. Paier et. al., Average downstream performance of measured IEEE 802.11p infrastructure-to-vehicle links, International Conference on Communications Workshops, pp. 1-5, 2010.
- [25] Y. Zhao, H. Zhang, W. Sun, Z. Bai, and C. Pan, Performance evaluation of ieee 802.11p vehicle to infrastructure communication using off the shelf ieee 802.11 a hardware, IEEE 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp. 3004-3009, 2014.
- [26] A. Ghosh, V. V. Paranthaman, G. Mapp, O. Gemikonakli and J. Loo, Enabling seamless V2I

- communications: toward developing cooperative automotive applications in VANET systems, IEEE Communications Magazine, 53 (12), 80-86, Dec. 2015, [https://doi: 10.1109/MCOM.2015.7355570](https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7355570).
- [27] Building an Intelligent Transport Information Platform for Smart Cities, Report, <http://www.vanet.mdx.ac.uk/>, 2024. Accessed: 2024-09-29
- [28] Building a Connected Vehicle Testbed to study the development and deployment of C-ITS in the UK, <http://www.its-ukreview.org/building-a-connected-vehicle-testbed-to-study-the-development-and-deployment-of-c-its-in-the-uk/2016>, Accessed: 2023-09-30.
- [29] Y. Kırşal, "Exploring Analytical Model to Performance Optimization for Mobile Application Using End-to-End Network Slicing in Cloud-Based Vehicular Networks", SAUJS, 23 (1), pp. 22–34, 2019.
- [30] J. Gozalvez, M. Sepulcre, and R. Bauza, IEEE 802.11p vehicle to infrastructure communications in urban environments, IEEE Communications Magazine, 50 (5), 176-183, 2012, <https://doi.org/10.1109/MCOM.2012.6194400>
- [31] (2024, Feb) Arada systems. [Online]. Available: <http://www.aradasystems.com>
- [32] T. K. Sarkar, Z. Ji, K. Kim, A. Medouri, and M. Salazar-Palma, A survey of various propagation models for mobile communication, IEEE Antennas and Propagation Magazine, 45 (3), 51–82, 2003, <https://doi.org/10.1109/MAP.2003.1232163>
- [33] T. S. Rappaport et al., Wireless communications: principles and practice. Prentice hall PTR New Jersey, 1996, vol. 2
- [34] Allen C. Newell, Near Field Antenna Measurement Theory, Planar, Cylindrical and Spherical, Nearfield Systems Inc.

