



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**Akıllı Trafik Sistemlerinde (ITS), Bluetooth
Sensor Verileri Yardımıyla Seyahat Süresi
Tahmini Gerçekleştirme**

Semih KOÇAK

YÜKSEK LİSANS

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Semih KOÇAK tarafından hazırlanan “*Akıllı Trafik Sistemlerinde (ITS), Bluetooth Sensor Verileri Yardımıyla Seyahat Süresi Tahmini Gerçekleştirme*” adlı tez çalışması 08/12/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç. Dr. Rahime CEYLAN

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Levent CİVCİK

Üye

Doç. Dr. Humar Kahramanlı ÖRNEK

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Semih KOÇAK

Tarih:

ÖZET
YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Akıllı Trafik Sistemlerinde (ITS), Bluetooth Sensor Verileri Yardımıyla
Seyahat Süresi Tahmini Gerçekleştirme**

Semih KOÇAK

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Levent CİVCİK

2021, 53 Sayfa

Jüri
Dr. Öğr. Üyesi Levent CİVCİK
Doç. Dr. Rahime CEYLAN
Doç. Dr. Humar Kahramanlı ÖRNEK

Trafik yoğunluğu yönetimi için seyahat süresi önemli bir rol oynar. Bu süreyi saptayabilecek yöntemlerden biri de Bluetooth teknolojisi. Bluetooth teknolojisi, trafik çalışmaları için ucuz ve kolay bir veri toplama yöntemidir. Bu yöntemle toplanan Bluetooth verileri ile; trafik izleme, belirli bir rotadaki araçları belirleyebilme ve seyahat süresi gibi bilgiler elde edilebilmektedir. Bluetooth cihazına özgü MAC adreslerinin tespiti yoluyla hareketlerin izlenmesini sağlar. Bluetooth teknolojisi ile seyahat süresi verilerini etkileyen belirli özellikler analiz edilmiştir. Günümüzde aktif olarak kullanılan Bluetooth sensörleri aracılığıyla, otoyol seyahat süresi yeni ve etkili bir veri toplama aracı olarak kullanılabilir. Merkezi kontrol yazılım sistemi, merkezi konumda verileri toplamak, biçimlendirmek, araçlardaki verileri işlemek ve sürücülere sunmak amacıyla bütünsel bir sistem içermektedir. Merkezi sistem tasarımı, bir veri kaynaştırma işlemi yoluyla, bir dizi kaynaktan örneğin sensörlerden gelen veriler doğrultusunda ilgili otoyol üzerinde yine sisteme bağlı olan trafik bilgilendirme mesaj işaretlerine (VMS) tanımlanan senaryolar, metin mesaj ve görseller olmak üzere sürücüye ilgili tıkanık yol verilerini sunmak için kullanılabilir. Hem ortalama hem de varyans olmak üzere seyahat süresi dağılım bilgilerinin sağlanması, sürücülerin zamanında ulaşma olasılığının yüksek olması ve güvenilir yol seçimlerinde daha etkili bir rol oynayabilmektedir. Bu sebeplerden dolayı seyahat süresi dağılımını belirleyebilmek için heterojen verileri, nokta ve aralık detektörlerinden birleştirerek heterojen bir veri füzyon yöntemi önerilmektedir. Bağlantı seyahat süresi dağılımları önce nokta dedektör gözlemlerinden saptanmaktadır. Karayolu koridorları gibi sınırlı erişim koridorlarına sahip otoyollarda trafik yönetiminde başarıyla kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında üç vaka çalışması geliştirildi; 1) Koridorlar boyunca seyahat süresi/hız tahmini 2) Kaynak-Hedef (OD) matris tahmini 3) Eşzamanlı olarak etkinleştirilen birden çok Bluetooth okuyucudan gelen Bluetooth verilerini kullanarak elektronik hız denetiminin sağlanması (EDS).

Sonuçlar, kentsel koridorların giriş-çıkış ağ yapısından beklendiği gibi, birçok MAC adresinin başka bir gözlem konumunda toplanarak aynı anda bir yerde gözlemlendiğini göstermiştir. MAC toplam verileri, İstanbul trafiğinde Bluetooth özellikli cihazlar için %10'a varan bir penetrasyon oranı önermektedir. Bir kentsel koridor için seyahat süresi tahmini, az sayıdaki MAC eşleşmesine rağmen Bluetooth verileri kullanarak çok etkili olmuştur. Dahası, Bluetooth verileri, EDS'den önce ve sonra beklenen hızlanma davranışının gerçekleştirilmesini sağlamıştır. Açık bir ağ için OD tahmini, Bluetooth'un düşük penetrasyon hızı ve sınırlı sayıda Bluetooth okuyucu kullanıldığından güvenilir değildir. OD tahmin süreci, tekrarlanan veri toplama ve diğer veri kaynakları aracılığıyla daha fazla güvenilirlik ve fayda sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Bluetooth Teknolojisi, Çıkış-Varış Yeri Tahmini, Elektronik Hız Uygulaması, MAC Eşleştirme, Seyahat Süresi Tahmini

ABSTRACT

MS THESIS

Travel Time Prediction with Bluetooth Sensor Data in Intelligent Traffic System (ITS)

Semih KOÇAK

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrical Electronics Engineering**

**Advisor: Assist. Prof. Dr. Levent CİVCİK
2021, 53 Pages**

**Jury
Assist. Prof. Dr. Levent CİVCİK
Assoc. Dr. Rahime CEYLAN
Assoc. Dr. Humar Kahramanlı ÖRNEK**

For traffic density management, travel time plays an important role. One of the methods that can determine this period is Bluetooth technology. Bluetooth technology is an inexpensive and easy method of data collection for traffic studies. With the Bluetooth data collected by this method, information such as traffic monitoring, the ability to identify vehicles on a certain route and travel time can be obtained. It provides tracking of movements through the detection of MAC addresses specific to the Bluetooth device. With the help of Bluetooth technology, certain characteristics affecting the travel time data have been analyzed. Currently, highway travel time can be used as a new and effective data collection tool through actively used Bluetooth sensors. The central control software system includes a holistic system for collecting, formatting data in a centralized location, processing data in vehicles and providing it to drivers. Central system design, data integration, through the process from a number of sources, for example, data from sensors connected to the system, which is again in line with the related traffic information on Highway message signs (VMS) defined scenarios, text message and images, including engorged way to present the data related to the driver can be used. Providing travel time distribution information, both average and variance, can play a more effective role in ensuring that drivers are more likely to arrive on time and choosing reliable roads. For these reasons, a heterogeneous data fusion method is proposed by combining heterogeneous data from point and december detectors in order to determine the travel time distribution. Connection travel time distributions are first determined from point detector observations. It is successfully used in traffic management on highways with limited access corridors, such as highway corridors. Within the scope of this study, three case studies were developed; 1) Estimated travel time/speed along the corridors 2) Origin-Destination (OD) matrix estimation 3) Providing electronic speed control (EDS) using Bluetooth data from multiple Bluetooth readers that are activated simultaneously.

The results showed that, as expected from the entrance-exit network structure of urban corridors, many MAC addresses are observed in one place at the same time by being collected in another observation location. MAC aggregate data suggest up to 10% penetration rate for Bluetooth-enabled devices in Istanbul traffic. Travel time estimation for an urban corridor was very effective using Bluetooth data, despite few MAC pairings. Moreover, the Bluetooth data provided the expected acceleration behavior before and after the EDS. The OD estimation for an open network is unreliable due to the low penetration rate of Bluetooth and the limited number of Bluetooth readers. The OD estimation process will provide greater reliability and benefits through repeated data collection and other data sources.

Keywords: Bluetooth Technology, Travel Time Estimation, MAC Matching, Origin-Destination Estimation, Electronic Speed Enforcement

ÖNSÖZ

Yüksek lisansım boyunca rehberliği ile yardımlarını esirgemeyen çalışmalarımın her aşamasında paylaştığı kıymetli fikir ve önerileri için danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Levent CİVCİK'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Bunun yanında hayatım boyunca yanımda olarak bana hep destek olan aileme ve çalışmama katkı sağlayan Tutku ÖZDEN çalışma arkadaşına çok teşekkür ederim.

Semih KOÇAK
KONYA-2021



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Bluetooth Teknolojisi	3
1.1.1. Bluetooth Kullanımı	3
1.1.2. Bluetooth Çalışma Prensibi	4
1.2. Bluetooth Okuyucu Cihazı.....	5
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	10
2.1. Trafik Analizinde Bluetooth Kullanımı	10
2.1.1. Bluetooth kullanarak Kentsel Seyahat Süresi Tahmini	10
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	13
3.1. Çalışma yapısı.....	13
3.1.1. İstanbul Bölge Çalışması	14
3.1.2. EDS Çalışma Alanı	15
3.1.3. Bluetooth Veri İşleme	16
3.1.3.1. MAC Adresi Eşleşmesi.....	16
3.1.3.2. Seyahat Süresi/Hız Hesaplaması	19
3.1.3.3. Araç Hareketlerinin Tespiti	23
3.1.3.4. Yolculukların ve Seyahat Özelliklerinin Belirlenmesi	25
3.1.4. Veri Toplama Modelleri	27
3.1.4.1. İstanbul Bölgesi	27
3.1.4.2. EDS koridorları.....	28
4. DURUM ÇALIŞMALARI	28
4.1. İstanbul Bölgesinde Seyahat Süresi tahmini.....	28
4.2. EDS Etkisinin Değerlendirilmesi.....	32
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	36
5.1. İstanbul Bölge Çalışmasına Genel Bakış	36
5.2. EDS Çalışmasına Genel Bakış	37
5.3. İstanbul'da Bluetooth Veri Kalitesi.....	38
5.4. Gelecekteki Öneriler	39

KAYNAKLAR	40
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.



SİMGELER VE KISALTMALAR

AMA: Ağır Motorlu Araçlar
APS: Ankara Polatlı Sivrihisar
AVI: Otomatik Araç Tanımlama
CPU: Merkezi İşlem Birimi
EDS: Elektronik Hız Denetimi
FCD: Floating Car Data
FTP: Dosya Aktarım Protokolü
GHz: Gigahertz
GPS: Küresel Konumlandırma Sistemleri
HMA: Hafif Motorlu Araçlar
INRIX: Leading Transportation Analytics Solutions Company
ITS: Akıllı Ulaşım Sistemleri
Linux kernel: Linux Sistemi Çekirdeği
MAC: Medya Erişim Kontrol
OMYH: Ortalama Mutlak Yüzde Hatası
Mbps: Mega Bits Per Second
OD: Kaynak-Hedef
SSH: Secure Shell
USB: Universal Serial Bus
YHA: Yüksek Hızlı Araçlar
2T: İki Tekerlekli
3T: Üç Tekerlekli

1. GİRİŞ

Trafikte iki nokta arasında gidiş-dönüş için geçen akış süresi "seyahat süresi", sürücülerin seyahatlerini daha iyi planlamasına yardımcı olmaktadır. Seyahat süresi bilgisi, akıllı ulaşım ağlarında, trafik taleplerinin modellenmesi ve tahmin edilmesinde, trafik simülasyonunda, trafik sinyal zamanlama kontrolünde, olay tespitinde, tıkanıklık yönetiminde ve dinamik rota atamasında önemli bir parametredir.

Seyahat süresi, tüm seyahat akışı için doğrudan ölçülmesi zor olan dinamik, mekansal bir parametredir. Bir yol güzergahı boyunca hareket eden araçlardan belirlenmiş noktalara takılan sensörler ile doğrudan yapılan seyahat süresi ölçülmektedir. Otomatik araç tanımlama (AVI), Plaka Tanıma Sistemleri, İmza Eşleştirme Sistemleri, Takım Tanımlama Sistemleri, Küresel Konumlandırma Sistemleri (GPS), cep telefonları ve Bluetooth seyahat akışı analizleri için uzamsal sensörler olarak kullanılabilen bazı yaygın cihaz örnekleridir.

Bu sensörlerin görünen uygulanabilirliğine rağmen seyahat süresinin ölçümünde pek çok dezavantajları vardır. Bunlar sayı, doluluk ve akış hakkında bilgi sağlamazlar, kullanıcı katılımını gerektirirler, gizlilik sorunları vardır ve trafikte yalnızca sensör bulunduran noktaları hesaplamaktadır. Nispeten ucuz bir alternatif, çalışma bölgesi çevresindeki ana giriş-çıkış noktalarında bulunan okuyucular aracılığıyla Bluetooth'lu araçları tespit etmektir. Araçlar ve yolcular bu teknolojiyi seyahatleri sırasında giderek daha fazla kullandığından, bu yöntem daha güvenilir verilerle sonuçlanabilir. Karayolları boyunca hareketleri tespit etmek gerçekten basit ve anlaşılır olsa da bu yaklaşımın kentsel yerlerde kullanılması daha zordur. Bu çalışma, öncelikle araç hareketlerini ve seyahat özelliklerini Bluetooth verilerinden ayırmak için bir metodoloji geliştirmeyi, daha spesifik olarak OD matrisinin ve koridor seyahat sürelerinin tahminini amaçlamaktadır. Literatürde erişim kontrollü koridorlar için Bluetooth kullanımına ilişkin örnek çalışmalar varken, bu teknolojinin açık kentsel çevre ağlar için kullanılması bu çalışmanın odak noktalarından biridir. Burada “açık ağ”, olası tüm trafik giriş ve çıkış noktalarını (kavşaklar, dinlenme tesisleri ve otopark girişleri vb.), çevre koridor trafik ağını ifade eder. Sonuç olarak, sistem içindeki toplam giriş ve çıkış akışları mutlaka eşleşemeyebilir ve doğrulanamayabilir.

Bluetooth, seyahat süresi ölçüm uygulamaları için giderek daha fazla araştırma yapılmaktadır. Batı'daki ön çalışmalar, homojen trafik koşullarında uzamsal algılamada Bluetooth'un maliyet-etkinlik faydalarını kanıtlamıştır (Haghani, 2010). ABD'deki

Illinois Ulaşım Departmanı gibi ajanslar ve Houston Transtar (2012), seyahat süresi bilgilerini toplamak için zaten Bluetooth sensörlerini kullanmaktadır.

Yol akış analizi, Bluetooth cihazı bulunduran araçların seyahat sürelerini ölçmek için kullanılabilir. Bu nedenle, bu yöntem kullanılarak verilerin toplanabileceği araçların yüzdesini, yani penetrasyon oranı analizini anlamak önemlidir. Ayrıca, verilerin toplanabileceği araçların sınıf bazında dağılımını bilmek de önemlidir. Bu, Türkiye gibi yolları iki (bisiklet, motosiklet), üç (otomatik çekçek) ve dört tekerlekli (araba) heterojen trafik koşullarıyla karakterize edilen bir ülke için özellikle önemlidir.

İkinci olarak, Bluetooth teknolojisi aracılığıyla araç hareketlerinin tespiti, hız yönetimi ve yaptırımın etkisi gibi diğer şehir içi trafik olaylarının değerlendirilmesine de yardımcı olabilir. En popüler hız yönetimi tekniklerinden biri, araç hızlarını kontrol etmeyi, sürücüleri güvenli sürmeye zorlamayı ve trafik güvenliğini artırmayı amaçlayan "Hız Yaptırımı" dır. Geleneksel insanlı hız sınırı uygulamasının (radar vb. ile) yanı sıra, teknolojiye gelişmeler Elektronik Hız Denetimi (EDS) uygulamalarının geliştirilmesine yol açmıştır. Ancak, "hız" tanımı uygulamadan uygulamaya değiştiğinden, bazı EDS sistemleri nokta hız limiti uygulamasına odaklanırken, diğerleri koridor hızı (ortalama) denetimini kontrol etmeyi amaçlamıştır. Daha kolay ve daha ucuz sistem gereksinimleri nedeniyle nokta hız limiti uygulaması daha çok tercih edilmekle birlikte, bu sistemlerin etkisini, özellikle seyahat hızı olmak üzere seyahat özellikleri açısından analiz etmek aynı derecede önemlidir. Bu, Bluetooth teknolojisiyle mümkün olan bir EDS uygulamasından önce ve sonra hızlı veri toplamayı gerektirmektedir. Araç seyir özellikleri, aynı Bluetooth cihazının algılama bilgilerinin bir EDS konumunda, öncesinde ve sonrasında birden fazla gözlem noktası üzerinde işlenmesiyle tahmin edilebilmektedir.

Bir EDS uygulama noktasından önce ve sonra birbirini izleyen bölümler üzerinden araç hızlarının analizi ile birlikte elektronik hız limiti uygulamasıyla araç seyir hızları üzerindeki etkisini de ölçmemizi sağlamaktadır. EDS uygulama noktasından önce ve sonra hız profillerinin belirlenmesinde, trafik çalışmalarında hız ölçümü için bir başka yenilikçi yöntem olan Bluetooth teknolojisi kullanılmaktadır. Önerilen metodoloji ile her araç için hız tespit etmek için, aktif Bluetooth cihazlarına sahip araçlar tespit edilerek bir örnek oluşturulur. Araç yolculuk özellikleri, aynı Bluetooth cihazının algılama bilgilerinin bir EDS konumunda, öncesinde ve sonrasında birden fazla gözlem noktasında işlenmesiyle tahmin edilecektir.

Bu çalışma, Bluetooth sensörünün Türkiye karayolları trafik koşullarında trafik veri kaynağı olarak uygulanabilirliğini değerlendirerek trafik yoğunluğunu ve güvenliğini sağlamayı amaç edinmektedir.

1.1. Bluetooth Teknolojisi

Kısa mesafeler arasındaki verilerin kablosuz ağ üzerinden hızlı bir şekilde aktarılması Bluetooth teknolojisi sayesinde gerçekleşir. Bu teknoloji ilk olarak 1994 yılında kullanılmıştır. İlk kez kullanıldığı günden beri de yaygın olarak dünya genelinde kullanılmaya devam edilmektedir. Bluetooth temelde radyo frekansları üzerinden iletişim kurulmasına imkân tanımaktadır. 24 GHz hızında iletişim kurulurken, iki cihaz arasındaki mesafenin de 10 metre kadar olması iyi bir performans elde edebilmek için gereklidir. Bluetooth kullanılarak yapılan veri aktarım hızı cihazların kapasitesine göre 1 Mbps ile 721 Mbps arasında değişiklik göstermektedir.

Bluetooth teknolojisinin bu denli benimsenmesinin nedeni herhangi bir kabloya ihtiyaç duyulmaksızın hızlı ve kolay bir şekilde veri aktarım olanağı sağlamasıdır.

1.1.1. Bluetooth Kullanımı

Bluetooth her cihaz için farklı şekillerde kullanılabilir. Ancak genel bir prensip olarak iki farklı cihazın birbirine Bluetooth kanalıyla bağlantılı olabilmesi için ikisinde Bluetooth özelliğinin aktif olması gerekir. Öncelikle cihaz eşleşmeleri yapılarak Bluetooth çalışmaya başlamaktadır. Eşleşmenin tamamlanabilmesi için her bir cihaza da parola girişi yapılarak güvenlik unsuru tanımlanmış olmaktadır. Bunun ardından veri paylaşımı, dosya aktarımı başlatılmaya hazır hale gelmektedir.

Bluetooth özelliklerine sahip olan cihazların birbirine olan mesafesi en az 10 metre en fazla ise 100 metre kadar olmalıdır. Esasen Bluetooth teknolojisinde telsiz tabanlı bir bağlantı sistemi kullanılmaktadır. Bluetooth sayesinde dizüstü bilgisayardan yan odadaki yazıcıya çıktı elde edebilmek için komut gönderilebilmekte veya akıllı ev sistemi dahilinde evin alarmı kontrol edilebilmektedir.

Bluetooth kullanıcıya kablosuz bağlantı özellikleri sayesinde büyük kolaylıklar sunan bir teknolojidir. Telsiz frekansı sayesinde işlev gösterdiği için dünya üzerindeki

tüm kablosuz ağı sorunsuz, güvenli ve hızlı bir şekilde bağlanabilmektedir. Bluetooth teknolojisi düşük enerji tüketimine ihtiyaç duyan, ucuz, tüm cihazlarla kolayca entegre olabilen, kullanıcı dostu bir sistemdir. Ayrıca en iyi performans gösteren kablosuz veri aktarımı ve sesli iletişim aracıdır.

Trafik durumu, geleneksel endüktif döngülerden gelişmiş Bluetooth MAC Tarayıcılara kadar çeşitli sensörlerden alınan veriler kullanılarak tahmin edilebilmektedir. Döngü dedektör verilerinden seyahat süresini (veya hızları) (Coifman, 2009; Bhaskar, 2015; Cortes, 2002; Dailey, 1999; Wang, 2003) ve yoğunluğu (Qian, 2012; Sharma, 2007) tahmin etmek için modeller önerilmiştir. Bluetooth, çeşitli elektronik cihazları kısa mesafelerde (1-100 m) kablosuz olarak bağlamak için düşük güçlü radyo dalgaları kullanılmaktadır.



Şekil 1.1. Trafikte kullanılan Bluetooth sensor modülü

1.1.2. Bluetooth Çalışma Prensipleri

Bluetooth teknolojisinde aynı frekans bandı içinde yer alan cihazların birbiriyle karışmasını engellenmesi amacıyla frekans zıplama adı verilen bir teknoloji

kullanılmaktadır. Bu sayede mevcut frekans bandı 79 ayrı kanala bölünerek saniyede 1600 defa random yani rastgele olacak şekilde kendi arasında değişmektedir.

Bluetooth aygıtları pasif ve aktif olmak üzere iki farklı türde ayarlanabilmektedir. Akıllı telefon veya tablet kullanılırken Bluetooth özelliğini istek dahilinde devre dışı konuma getirilebilmekte, kullanımdayken aktifleştirilebilmektedir. Bluetooth aktif hale geldiğinde iletişim kurulacak diğer cihazın arayışına başlamaktadır. Birbiriyle eşleşen Bluetooth aygıtları global kimlik olarak adlandırılan farklı kimliklere bürünmektedirler.

İki farklı türde Bluetooth ağı bulunmaktadır. Bunlardan biri Piconets olarak adlandırılan ağıdır. Bir Piconet ağı kullanılarak toplam 8 adet Bluetooth cihazı işlev gösterebilmektedir. Piconet ağında bir adet yönetici cihaz ile 7 tane de yönetilen cihaz mevcuttur. Diğer Bluetooth ağı ise Scatternets olarak adlandırılır. Scatternets sayesinde Bluetooth aygıtları daha esnek bir şekilde kullanılmaktadır. Birden fazla Piconetin bir araya gelmesi ile işlev göstermektedir. Sayıca fazla olan küçük Bluetooth cihazlarının aynı alan içinde haberleşmesini sağlayan bir sistemdir.

Bluetooth cihazı, Medya Erişim Kontrol adresi veya MAC adresi adı verilen 12 basamaklı bir elektronik tanımlayıcı kullanmaktadır.

Bu her araç için elektronik bir takma ad görevi görmektedir. Bu sorgulama, MAC kimlikleri arasında sürekli bağlantı kurmaktadır. MAC kimliğinin anonim olarak gizliliğini sağlar (Young, 2008) ve trafik bilgilerini elde etmek için bir işlem olarak kullanılmaktadır.

1.2. Bluetooth Okuyucu Cihazı

Bluetooth trafik izleme, bir karayolu ağındaki noktalar arasındaki seyahat sürelerini ve hızları belirlemek için sorgulama tabanlı bir tekniktir. Bluetooth teknolojisi kısa menzilli kablosuz iletişim için kullanılmakta ve genellikle cep telefonları, GPS üniteleri, bilgisayarlar ve araç navigasyon sistemleri dahil olmak üzere elektronik cihazlara gömülmektedir. Her Bluetooth aygıtı, aygıtın üreticisi tarafından atanan ortam erişim denetimi adresi olarak bilinen benzersiz bir tanımlayıcı içermektedir. MAC adresi için standart biçim, tire veya iki nokta üst üste ile ayrılmış iki onaltılık

basamaktan oluşan altı gruptur. MAC adresinin temsili bir örneği “01:54:48:57:69:01” gösterilmiştir.

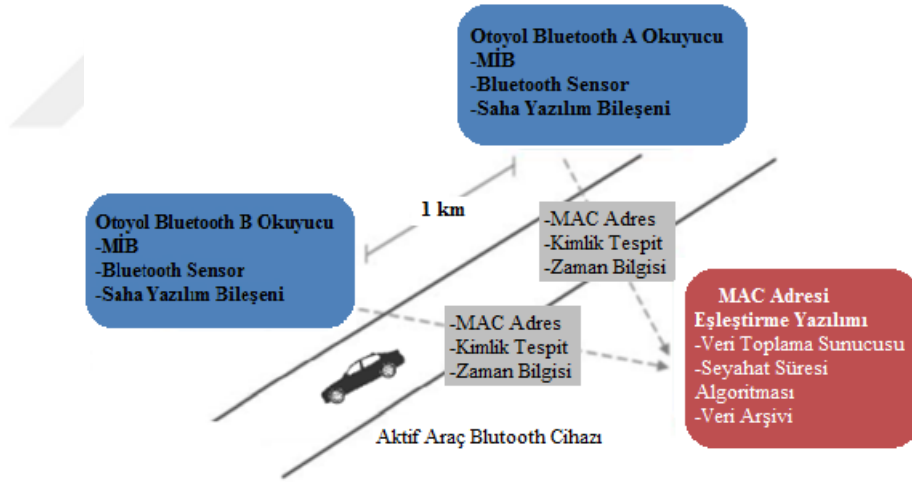
Bluetooth özellikli bir cihaz bir yol boyunca ilerlerken, yol kenarındaki bir cihaz “okuyucu”, cihazın algılandığı konumu ve günün saati ile birlikte benzersiz Bluetooth MAC adresini kaydeder. Aynı MAC adresi, belirli bir mesafenin bir karayolu kesimindeki farklı noktalarda algılandığında, bu noktalardaki algılama sürelerindeki fark hesaplanarak bir seyahat süresi belirlenmektedir. Bir yol boyunca noktalar arasındaki bilinen mesafeyi kullanarak, daha sonra ortalama bir hız belirlenmiştir.

Bir sistemin, Bluetooth cihazlarını sorgulama olarak kullanarak araç seyahat sürelerini ve hızlarını tahmin edebilmesi için aşağıdakiler de dahil olmak üzere birkaç temel bileşene ihtiyacı vardır:

- Yol kenarındaki bir sistem, izlenen yol boyunca araç ilerlerken Bluetooth MAC adreslerini algılayabilmeli ve işleyebilmelidir. Tipik olarak, bir yol kenarı sistemi, izlenen karayoluna yakın bir trafik ekipmanı kabini içine yerleştirilmektedir.
- Sistem ayrıca Bluetooth cihazlarının MAC adresini okuyabilen bir radyo frekans sistemi içermektedir. Radyo frekans sistemi, merkezi işlem birimi (CPU) sistem kartına veya harici bir adaptör şeklinde gömülüdür. Harici bağdaştırıcılar genellikle MBI işlem aygıtının Ethernet bağlantı noktasına bağlanmıştır. Radyo frekans sistemi, Bluetooth ekipmanının algılama aralığını genişletmek için harici bir antene de bağlanmıştır.
- Bluetooth cihazlarının okunması ve işlenmesi için, Bluetooth cihaz adreslerini ve diğer bilgileri merkezi bir konuma iletmek ve işlemek için yazılım çalıştırabilen, sahadaki yerleşik bir MBI üzerinde gerçekleştirilmektedir.

Seyahat sürelerini belirlemek için kullanılan diğer sorgulama tabanlı tekniklere benzer şekilde, bir karayolundan trafik verileri sağlamak için birden fazla yol kenarı sistemi gerekmektedir. Birden fazla okuyucu konumundan alınan veriler, bitişik konumlardaki MAC adreslerinin yeniden tanımlanmasına izin vermektedir ve ardından geçen seyahat sürelerinin tahminini mümkün kılmaktadır. Bu modelde, merkezi bir yazılım bileşeni, yol kenarındaki her okuyucu konumundan MAC adresi verilerini almakta ve işlemektedir. Merkezi ana bilgisayar yazılımı daha sonra bireysel seyahat sürelerini belirlemek ve yol kenarındaki Bluetooth okuyucu sistemlerinin verilen konumlarına dayalı olarak yapılandırılmış karayolu segmentleri için zaman aralıkları üzerinden ortalama seyahat sürelerini tahmin etmek için kullanılmaktadır.

İki yol kenarı Bluetooth algılama modülü, 5 km arayla trafik sinyal kabinlerine monte edilmiştir. Bluetooth özellikli cep telefonu vb. cihaz içeren bir araç ilk yol kenarı algılama noktasından geçtiğinde, ilk okuyucu tarafından MAC adresi, algılama zamanı ve okuyucunun konumu ile ilgili bu bilgiler okunmaktadır. Bu bilgiler anında merkezi yazılım bileşenine iletilmektedir. Merkezi yazılım bileşeni bilgileri depolayıp ve ardından ilk konumda tespit edilen MAC adresinin sonraki oluşumları için sistem girişlerini taramaktadır. Aynı araç ikinci yol kenarı algılama noktasından geçtiğinde, MAC adresi, algılama zamanı ve okuyucunun konumu kaydedilmekte ve merkezi yazılım bileşenine iletilmektedir. Algılama noktaları arasındaki mesafe tanımlanan merkezi yazılım bileşeni, o bireysel MAC adresi için her noktada algılama süresindeki farkı hesaplayarak segment seyahat süresini ve hızını hesaplayabilmektedir. İki nokta arasındaki birden fazla aracın toplu gözlemleri, genel trafik akışına ilişkin oldukça doğru tahminler üretmektedir. Şekil 1.2, Bluetooth Trafik İzleme konseptinde gerekli bileşenlerin ve kullanılan konseptin bir diyagramını göstermektedir.



Şekil 1.2. Bluetooth ile Trafik İzleme

Bu tez çalışmasında ilk olarak, Bluetooth okuyucu fizibilite çalışmaları kapsamında, yol kenarındaki MBİ olarak basit, ucuz, tüketici sınıfı dizüstü bilgisayarlar kullanılmıştır. Bu cihazlar, taşınabilirliği ve fonksiyonelliği nedeniyle Bluetooth cihazlarını tespit etmek için kullanılmıştır.

Bununla birlikte, çevre sıcaklığı 32 °C üzerine çıkmaya başladığında testlerde kullanılan kabinlerin iç sıcaklığı daha üst sıcaklık seviyelerine ulaşmış ve bu sebeple

dizüstü bilgisayarların aşırı ısınması kapanmaya neden olmuştur. Bluetooth tabanlı trafik izleme sistemi için önemli gereksinimlerden biri, Bluetooth algılama cihazının trafik kabinindeki sıcaklıklara dayanabilmesidir. Bu nedenle, projenin bu ilk aşamasında, uzun vadeli veya kalıcı çevresel taleplerini karşılayacak çeşitli cihazlar araştırılmıştır.

Prototip çalışma için, yol kenarındaki Bluetooth aygıtlarını algılamak ve işlemek için kullanılan saha yazılımı Microsoft Windows © işletim sistemi altında geliştirilmiş ve MAC adresini sorgulayan radyo modülüyle arabirim oluşturmak için Microsoft Bluetooth yazılımı kullanılmıştır.

Uygulama için başlangıç kriterleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

- 1) Bir trafik kabininde tipik olarak yaşanan aşırı sıcaklık değişimlerine dayanabilen cihaz (-20 °C ila 75 °C).
- 2) En yaygın iletişim cihaz türlerini kullanmak için bir Ethernet portu ve mevcut en yaygın harici Bluetooth adaptörlerini kullanmak için bir USB bağlantı noktası.
- 3) Cihazın, mevcut ekipmana müdahale etmeden, aksatmadan ve/veya yerinden oynatmadan mevcut bir trafik kabininin içine sığacak şekilde oldukça kompakt boyutta olması.
- 4) Kullanılacak cihaz maliyetinin düşük olması.
- 5) Cihaz üzerinde saha yazılımını çalıştırmak için işletim sistemi içermesi.
- 6) Aygıtın, işletim sisteminin bir parçası olarak Secure Shell (SSH) ve Dosya Aktarım Protokolü (FTP) gibi yaygın uygulamaları kullanarak uzaktan erişilebilirliğe sahip olması.

Bluetooth MAC adreslerini işlemekten ve merkezi yazılım ana bilgisayarına aktarmaktan sorumlu olan saha yazılımı, çok az sistem belleği kullanmakta ve gelişmiş performansa sahip bir MBI gerektirmemektedir.

Laird Wireless tarafından üretilen BT 700 modeli, yukarıda belirtilen gereksinimleri karşılayan gömülü bir proses kontrolörüne sahiptir. Bu aygıt, standart bir çevre birimi seti (ağ için bir Ethernet bağlantı noktası) ve Bluetooth modülü gibi harici çevre birimleri ile iletişim için USB bağlantı noktası barındırmaktadır. Buna ek olarak, kontrol kartı üzerinde bulunan flaş entegresine Linux sistem çekirdeği birimine yüklenmiştir ve gerektiğinde cihazların bakımı ve sorun giderme için merkezi bir konumdan SSH ve FTP gibi uzak istemciler de dahil olmak üzere çok çeşitli hizmetleri çalıştırabilmektedir.

Kullanılan tüm cihazlar, Laird Wireless Inc. sınıf 1 tipi Bluetooth modüle sahip (BT 700) yaklaşık 300 metrelik bir menzil sağlayan saplama anteni (Şekil 1.3) ve geliştirme kartına sahiptir. Bu okuma aralığı, bordürden bordüre genişliklerin olduğu çalışma bölgelerindeki yollarda ve hatta yaklaşık 400mx300m'lik bir alana yerleştirilmiş eğimli kavşakta araç hareketlerini yakalamak için uygundur.



Şekil 1.3. Ortalama seyahat süresi ve EDS koridorları vaka çalışmalarında kullanılan antenli sınıf 1 tipi Bluetooth okuyucu cihazı (300m menzil)



Şekil 1.4. Yol kenarı direklere uygulanan Bluetooth sensörler

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Trafik Analizinde Bluetooth Kullanımı

Welsh ve ark. (2002), hareketli cihazlar arasındaki Bluetooth teknolojisi bağlantı sürelerinin iyileştirilmesi üzerinde çalışmış ve Bluetooth bağlantılı cihazlardan oluşan bir örgü ağı oluşturulmasını önermiştir.

Ahmed ve ark. (2008), AUS veri toplama için statik bir ağ oluşturmak amacıyla Bluetooth teknolojisinin kullanımını öngören konsepti daha detaylı araştırmıştır. Bluetooth algılama teknolojisinin birçok araştırma çalışmasında etkili olduğu gösterilmiştir (Sharifi, 2011). Otoyollar ve arterler için yapılan analizler, Bluetooth dedektörleri tarafından kaydedilen verilere dayanan metodolojilerin, döngü dedektörleri gibi kesintili yöntemler ve araç verileri gibi kesintisiz yöntemler de dahil olmak üzere diğer veri kaynakları kadar doğru trafik koşullarını yakalayabildiğini göstermiştir (Quayle, 2010; Wasson, 2008).

Jaume ve ark. (2010), Kalman Filtrelemeye dayalı olarak zamana bağlı Kaynak Hedef matrislerini tahmin etmek için mobil cihazların Bluetooth ve Wi-Fi tespiti tarafından üretilen verilerin kalitesini incelemişlerdir.

2.1.1. Bluetooth kullanarak Kentsel Seyahat Süresi Tahmini

Seyahat süresi, iki konumdaki MAC kimlikler eşleştirilerek Bluetooth sensör verilerinden hesaplanmaktadır. Trafik uygulamaları için Bluetooth ile ilgili mevcut çalışmaların çoğu, Bluetooth verilerinin kalite kontrolüne ve ortalama hız veya başlangıç-varış yerinin tahminine odaklanmaktadır (Haghani, 2010; Young, 2008). Bu çalışmaların çoğunda, trafik akışının yalnızca bir yüzdesi örnekleme oranı veya penetrasyon oranı yakalanmakta ve trafik veri kaynağı olarak kullanılmaktadır. Örneğin Maryland Üniversitesi'nde yapılan bir çalışmada, saatte bir Bluetooth için %2-%4 gibi düşük örnekleme oranı gözlenmiştir (Haghani, 2010). Bu çalışmada, Bluetooth sensörleri kullanılarak elde edilen seyahat sürelerinin GPS kullanılarak elde edilenlerle karşılaştırılabilir olduğu bulunmuştur.

Çalışma ayrıca seyahat süresinin dağılımından, üst ve alt sınırları tahmin etmek için iki aşamalı bir seyahat süresi filtreleme mekanizması önermektedir. Ölçülen seyahat süresinin doğruluğunun, iki Bluetooth dedektörü arasındaki mesafenin artması ve araç hızının azalmasıyla daha iyi olduğu bildirilmiştir.

Stevanovic ve Martin (2008), Bluetooth MAC okuyucuları tarafından ölçülen seyahat sürelerini, GPS donanımlı araçlardan elde edilenlerle verilerle karşılaştırmıştır. Toplanan verilerin %83'ü için, Bluetooth okuyuculardan gelen seyahat süreleriyle, GPS bulunduran araçlardan elde edilen seyahat süreleri arasında (%95 düzeyinde) değişmediğini bildirmiştir.

Wang ve ark. (2011), Bluetooth sensörlerinden elde edilen örneklenmiş verilerle ve döngü dedektörlerinden tahmin edilen seyahat süresinin kabaca benzer olduğunu göstermişlerdir.

Sadabadi ve ark. (2011), segment uzunluğu, ortalama hız ve seyahat süresi arasındaki ilişkiyi kullanarak hataların üst sınırlarını tahmin etmiş, ortalama hız 45 km/s olduğunda ve iki dedektör arasındaki mesafe 2–3 mil olduğunda seyahat süresi ölçüm hatasının ihmal edilebilir olduğunu göstermiştir.

Quayle ve ark. (2010), hareketli bir standart sapma kullanarak bir Bluetooth sensörüyle ölçülen seyahat sürelerinin üst ve alt sınırlarını belirlemişlerdir.

Sawant ve ark. (2004), karayolu yolculuğunun güvenliğini artıran yeni bir yaklaşım geliştirmek için kablosuz sensör ağları ve Bluetooth protokolleri kavramlarını kullanmıştır.

Bullock ve ark. (2010), Bluetooth'un güvenlik tarama sıralarında bekleme, güvenlik tarama kontrol noktasından geçme ve havalimanlarında yolcu salonuna yürüme için harcanan zamanı ölçmede uygulanabilirliğini incelemiştir.

Tüm seyahat süresi ölçüm yöntemlerinde olduğu gibi, doğru seyahat sürelerinin raporlanmasını sağlamak için hata kaynakları mevcuttur ve dışarıdaki veri noktaları ele alınmalıdır. Sinyal gecikmesi ve tek tip olmayan trafik akışının bir sonucu olarak,

arterlerdeki Bluetooth seyahat süresi ölçümlerinde hatalar görülebilmektedir (Van Boxel, 2011). Bluetooth sorgulama sürecini tamamlamak için gereken 10.24s, büyük bir hata kaynağı oluşturabilir ve yanlış yolculuk sürelerine neden olabilir, ancak Bluetooth istasyonları arasındaki mesafe arttıkça bu hata azalmaktadır (Malinovskiy, 2011; Puckett, 2010). Son yıllarda, Bluetooth ve cep telefonu uygulamaları, seyahat süresini tahmin etme konusunda birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Sonuç olarak, aykırı değerleri tespit etmek ve ele almak için çeşitli çalışmalar sunulmuştur (Van Boxel, 2011; Horn, 2014). Bluetooth gibi noktadan noktaya veri kaynaklarının, seyahat sürelerinin öngörülmesi söz konusu olduğunda kendi kendine yeterli olduğu geniş çapta rapor edilmiştir (Khoei, 2013; Qiao, 2013). Bununla birlikte, sıklıkla yapılan varsayım, veri örneklerinin ilgili istatistikleri hesaplamak için yeterince büyük olduğudur (Nantes, 2015). Öte yandan seyahat süresi tahmin yönteminde veri toplanan birkaç yöntem vardır.

Liu ve ark. (2012), TRANSMIT okuyucuları, Bluetooth sensörleri ve INRIX tarafından toplanan verileri, her biri GPS tabanlı navigasyon cihazları taşıyan sonda araçları tarafından toplanan "gerçek referans" seyahat süreleri ile karşılaştırılarak değerlendirmişlerdir.

Yukarıda bildirilen tüm çalışmalar, doğası gereği büyük ölçüde homojen olan Avrupa trafik standartlarına göre yapılmıştır.

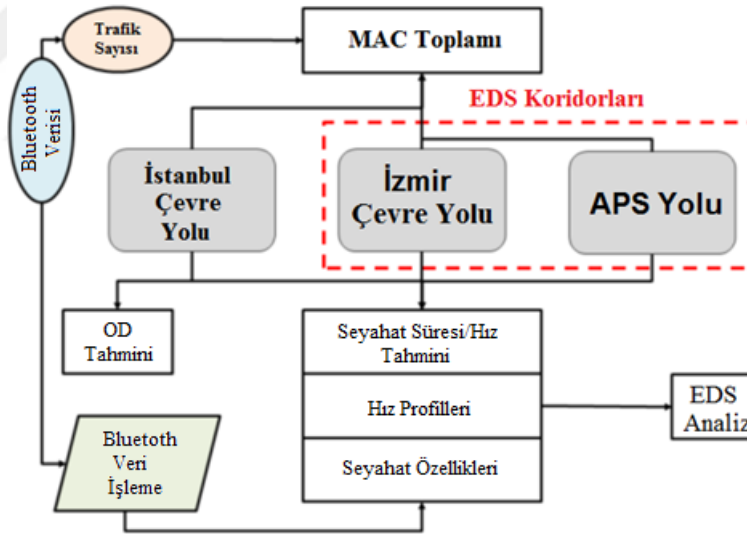
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Çalışma yapısı

Kentsel trafik yönetiminde Bluetooth teknolojisinin kullanımını değerlendirmek için materyal ve yöntemler şu şekilde sıralanmaktadır:

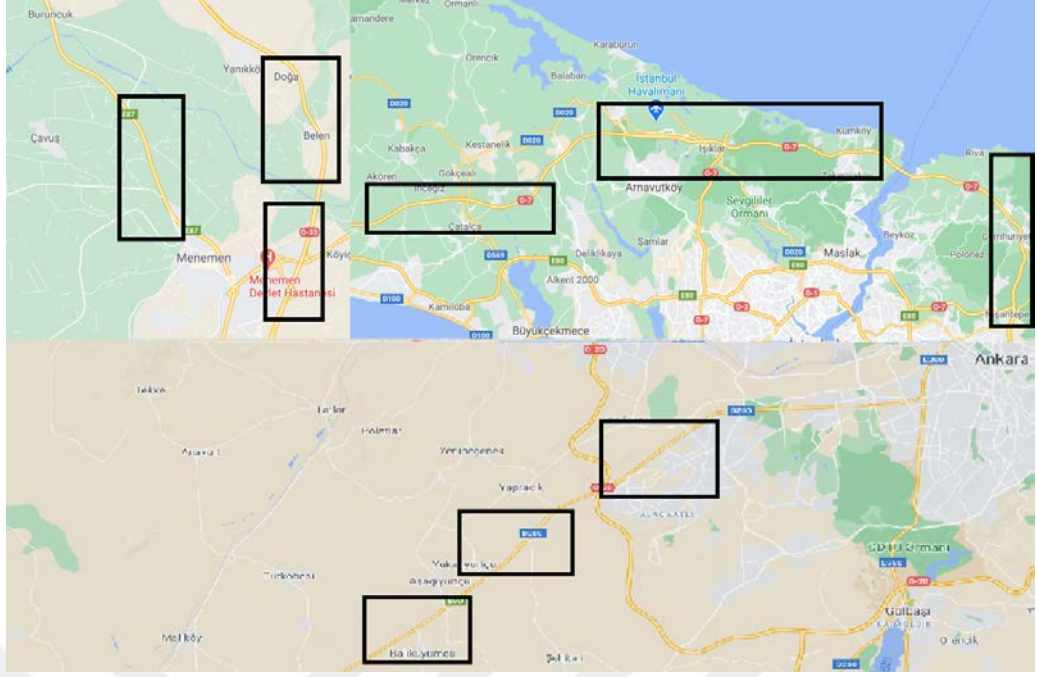
- i. Seyahat süresi tahmini
- ii. OD tahmini/Normal Dağılım/Penetrasyon analizi
- iii. Bluetooth verileriyle ortalama hız etkisinin değerlendirilmesi
 - a) İstanbul çevre yolu bölgesinde
 - b) İzmir çevre yolu üzerindeki ortalama hız koridoru ve
 - c) Ankara-Polatlı-Sivrihisar yolu üzerindeki ortalama hız koridoru

boyunca üç pilot çalışma alanında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.1. Çalışma algoritması

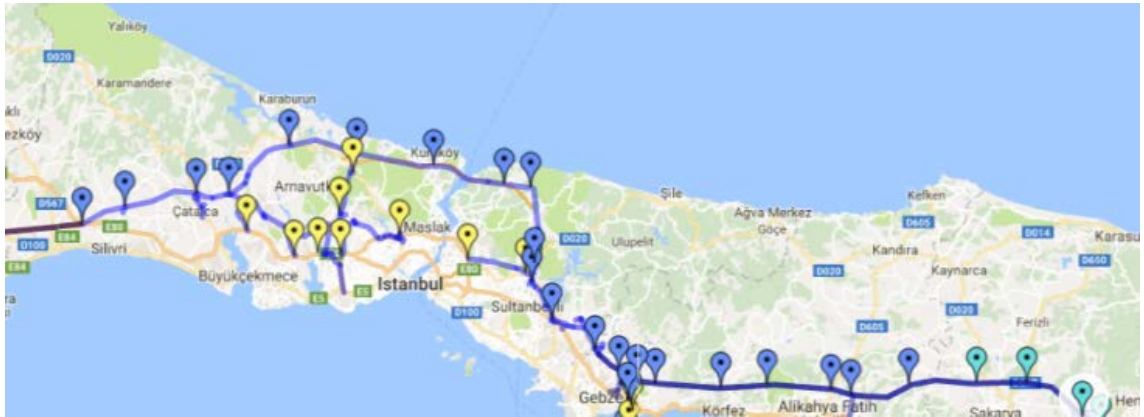
MAC-Hacim analizi, seyahat süresi/hız tahmini, OD tahmini, hız profillerinin ve seyahat özelliklerinin belirlenmesi ve son olarak ortalama hızın etkisinin ölçülmesi pilot çalışmaların ana çıktılarıdır. Bluetooth verilerini ve trafik sayımlarını, Şekil 3.1'de gösterilen çalışma çerçevesi için girdiler olarak kullanılmıştır. Pilot çalışma bölgeleri, İstanbul, Ankara ve İzmir şehir merkezinde ana kentsel arterler olarak seçilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Pilot çalışma yerleri; A) İzmir çevre yolu B) İstanbul çevre yolu C) Ankara Polatlı Sivrihisar yolu

3.1.1. İstanbul Bölge Çalışması

Şekil 3.3'te gösterildiği gibi dört Bluetooth cihazından gelen MAC adres verileri, iki kentsel koridor sırasıyla 15546 m ve 14987 m uzunluğundaki çalışma bölgesinin seyahat süresini ve OD matrisini tahmin etmek için analiz edilmiştir.

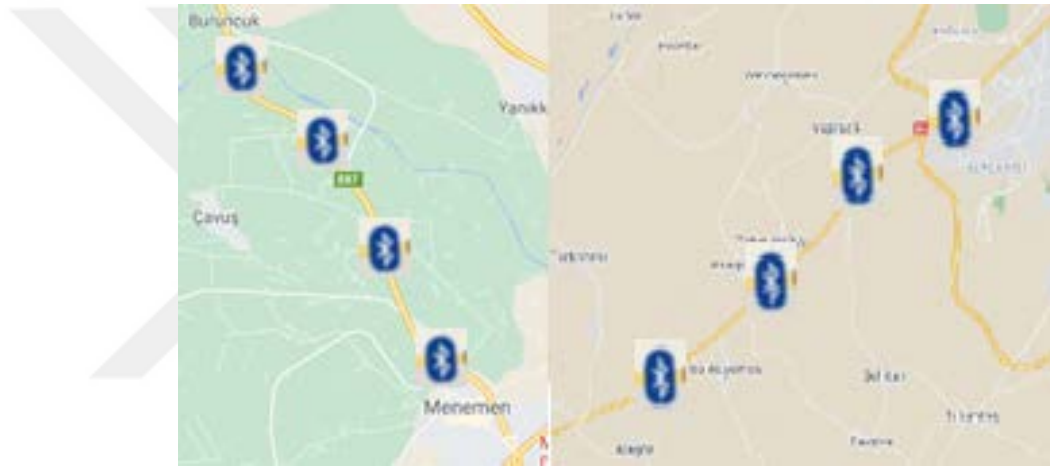


Şekil 3.3. İstanbul çevre yolu Bluetooth sensor uygulaması

3.1.2. EDS Çalışma Alanı

EDS koridor çalışmaları kapsamında Ankara ve İzmir’de iki çevre yolu EDS koridoru kullanıldı: APS Yolu ve İzmir Çevre yolu. Bu koridorlar şehir kapılarına giriş yolu üzerinde olduğundan, bu koridorlara büyük bir talep ve yoğun saatlerde trafik sıkışıklığı vardır (Şekil 3.4). Bu durum, aktif Bluetooth cihazına sahip araçların yakalanma olasılığını artırmaktadır.

Bu vaka çalışmasının temel amacı, EDS'nin sürücü davranışı üzerindeki etkisini değerlendirmektir. Çalışma koridoru boyunca araç hareketlerini ve hız değişikliklerini tespit etmek için EDS uygulama lokasyonundan önce ve sonra en az iki segment kullanılmıştır. Bluetooth okuyucu konumları Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. EDS koridorları ve Bluetooth okuyucu konumları

Sırasıyla 50 km ve 35 km uzunluğundaki APS yolu ve İzmir Çevre yolu, her yönde en az 3 şeritli ve bir refüj ile ayrılmış ana arterlerdir. Çalışma koridorları boyunca uzanan uydu fotoğrafları, çevrelerinde çok az ve dağınık arazi kullanımı olan, sınırlı erişimli ana arterler olduklarını göstermektedir (Şekil 3.5). İki Bluetooth okuyucu arasındaki her bölüm yaklaşık 1500 m uzunluğa sahiptir.



Şekil 3.5. Çalışma koridorları; A) Ankara Polatlı Sivrihisar yolu B) İzmir çevre yolu

3.1.3. Bluetooth Veri İşleme

Bluetooth Teknolojisinin trafik uygulamalarında kullanılması nedeniyle, araç dışı hareketleri ortadan kaldırmak, seyahat süresini/hızını kesin olarak tahmin etmek ve eksik veya beklenmedik verileri yönetmek için Bluetooth verilerini analiz etmek önemlidir. Literatürde daha önce yapılan çalışmalar ve sunulan yöntemlerle ilgili olarak veri işleme adımları şu şekilde özetlenmiştir:

- i) MAC adresi uyumu
- ii) Seyahat süresi/hız hesaplaması
- iii) Araç hareketlerinin tespiti
- iv) Gezileri ve seyahat özelliklerini belirlemek

Bu metodolojinin arkasındaki mantık; i) bir çalışma alanındaki farklı konumlarda bir MAC adresinin yeniden tespit kabiliyetini, ii) potansiyel araç hareketlerini diğerlerinden ayırmak için bölgesel seyahat özelliklerini (yani koridor hızı) ve iii) seyahat modellerini (seyahat rotaları, OD matrisi ve koridor seyahat süreleri) çıkarmaktır. Bu prosedürün ayrıntıları sonraki bölümlerde sunulmuştur.

3.1.3.1. MAC Adresi Eşleşmesi

Yalnızca tek bir Bluetooth okuyucudan veya birden çok okuyucudan toplanan Bluetooth verilerini analiz etmek mümkündür. Aynı cihaz, okuyucunun menziline olduğu sürece birden çok kez taranabilir. Bir MAC adresi, tek bir Bluetooth okuyucunun menziline birden çok kez gözlemlenirse, bu okuyucu için, MAC eşleştirmesi yoluyla, "Yeniden tarama süresi" ve "Kalma süresi" gibi performans analizi parametreleri yürütebilir. Aynı MAC Adresinin iki ardışık okuması arasındaki fark

"Yeniden tarama süresi" olarak tanımlanır. Aralık içindeki birden fazla okuma, "kalma süresi" bilgisi üretir. Tek okuyuculu veri analizi bu çalışmanın kapsamında değildir, ancak Bluetooth performans parametrelerini ileride yapılacak bir çalışma olarak analiz etmek önemlidir.

Birden fazla Bluetooth okuyucusu varsa, okuyucular arası analiz için MAC adresi eşleştirme kullanılır. Birden fazla okuyucunun kullanılması, bir ağdaki araçların/yolcuların hareketleri hakkında ortalama seyahat süresi/hız, yolculuk algılama, OD tahmini vb. gibi verileri toplar. Etkin bir Bluetooth cihazına sahip bir aracın bir segment veya birden fazla segment üzerindeki hızını tahmin etmek için, MAC adresini iki veya daha fazla okuyucuda gözlemlemek için gereklidir; ancak aktif cihaz bir okuyucu tarafından birçok kez gözlemlenebilir. Bu nedenle, i) bir okuyucudaki benzersiz MAC adresleri ve ardından ii) bu kaydedilen adresleri okuyucular arasında eşleştirmek önemlidir.

Bir MAC adresi yalnızca bir okuyucuda okunursa, bunun sabit bir noktadaki bir Bluetooth cihazından mı yoksa bölgede seyahat eden hareketli bir nesneden mi olduğunu bilmek mümkün değildir. Bu nedenle, seyahat bilgisi oluşturmak için, aynı MAC adresinin çalışma bölgesi içinde en az iki yerde okunması gerekir.

Bluetooth sensörleri, "Batch Interface Program" yazılımı yüklenmiş dizüstü bilgisayarlara bağlanmış ve iki konuma yerleştirilmiştir (Şekil 3.6). Bluetooth cihazlı bir araç sensörlerin yanından geçtiğinde, MAC kimlik ve zaman bilgisi yazılım tarafından otomatik olarak kaydedilmiştir (Şekil 3.7). Eşleşen çiftler iki konumdan toplanan verileri kullanılarak tespit edilmiştir.

The screenshot displays the Bacth interface program. At the top, it shows the 'Current IP Number' as 192.168.10.37 and the date/time as 19.08.2020 17:31:49. Below this is a table with columns 'Index', 'Description', and 'IP Number'. To the right of the table are buttons for '24 Hour Report', '24 Hour St. Report', 'Last Day's Report', and 'Last Day St. Report'. Below these buttons are 'Save IP List To File', 'Close Socket', 'Scan IP's', and 'Extra Time' buttons. The main area is divided into several sections: 'Road Statistics' (Vehicle Counts for Road 1-4, Lane 1-8 Count), 'Long Vehicles' (Lane 9-16 Count), 'Extra Statistics' (Lane 1-16 Av Sp, Lane 1-16 Occup), and a 'Bluetooth-MacId List for Device @192.168.10.37' showing two MAC addresses. At the bottom, there are buttons for 'Erase File', 'Reset Counter Values', 'Enable Configuration', 'Current Counters', and 'Bluetooth Report'.

Şekil 3.6. Bacth interface programı

```

root@myd-am335x opt# ./Deneme1
Road configuration file is opened
noOfRoads 3
3 1 3 0
0 0 1 0
0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
8 11 14 17 20 23 26 0 0 0 0 0 0 0 0
bin numbers for roads and lanes:
8 11 14 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
17 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
20 23 26 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
Nelo init OK.
FFT config alloc OK!
File Handle=3
Output Baud Rate=4110
Input Baud Rate=4110
Output Baud Rate=4103
Input Baud Rate=4103
Socket successfully created..
Socket successfully binded..
Output Baud Rate=13
Input Baud Rate=13
Server listening..
Bluetooth1 thread Running
Output Baud Rate=13
Input Baud Rate=13
Btl: D868C31A10D0,
Comm.Error # =1
Btl: D868C31A10D0,
Btl: E0338EAF84A,
Btl: E0338EAF84A,
Comm.Error # =2
Btl: E0338EAF84A,
Bluetooth2 thread Running
Btl: E0338EAF84A,

```

Şekil 3.7. Araçlardan toplanan MAC kimlik listesi

İki konumdaki karşılıklı eşleşen MAC kimliklerinden alınan varış zamanları arasındaki fark, aracın seyahat süresi olarak kabul edilmiştir. Tüm veri toplama faaliyetlerinde, toplam araç hacmi, sınıflandırma ve seyahat süresinin gerçek değerini

manuel olarak çıkarmak için trafikte aynı zamanda video kaydı alınmış ve bu bilgiler, sızma analizi, sınıf tanımlama ve tahmini seyahat sürelerinin doğrulanması için yararlı olmuştur.

Veriler penetrasyon analizi için iki yoğun trafik döneminde (08:00-12:00 ve 15:00-19:00) toplanmıştır ve ayrıca (08:00-19: 00) araçların sınıf tanımlaması için bir gün daha fazla veri toplanmıştır.

Simülasyon çalışmalarından elde edilen tahmini akış seyahat süresi, sahadan veri toplanması yorucu ve zaman alıcı olduğundan doğrulama için kullanılmıştır. Verileri oluşturmak için Batch Interface Programı kullanılmıştır. Otomatik bir sensörden 16-19 Ağustos 2021 tarihlerinde elde edilen gerçek alan akışı bilgileri kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Seyahat süresi, sınıflandırılmış hız ve akış verileri her iki günde de 24 saatlik periyotlar için oluşturulmuş ve akış seyahat süresini tahmin etmek ve modelleri geliştirmek ve doğrulamak için kullanılmıştır.

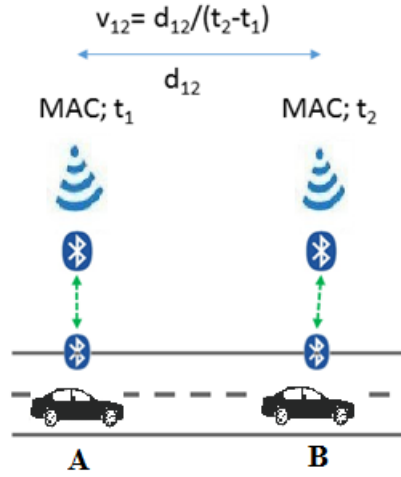
@ A "2012-04-07 16:22:05", "A0:71:AB:42:84:C2", " "2012-04-07 16:22:07", "00:00:1E:1A:0C:66", " "2012-04-07 16:22:08", "6C:83:34:2E:08:20", " Araç1	@ B "2012-04-07 16:24:43", "00:ED:0C:87:6B:3D", " "2012-04-07 16:24:43", "00:00:1E:1A:0C:66", " "2012-04-07 16:24:49", "00:2F:6D:6D:00:64", " "2012-04-07 16:23:14", "28:D1:AF:4F:F8:A1", " "2012-04-07 16:23:15", "00:02:CT:87:78:88", " "2012-04-07 16:23:15", "78:CA:04:09:06:8D", " Araç1 Araç2
@ C "2012-04-07 16:19:24", "60:A4:C1:7D:64:12", " "2012-04-07 16:19:24", "00:02:CT:87:78:88", " "2012-04-07 16:19:28", "00:07:80:9B:8C:AB", " Araç2	@ D "2012-04-07 16:18:46", "3C:8B:FE:4E:FE:1F", " "2012-04-07 16:18:49", "00:02:CT:87:78:88", " "2012-04-07 16:18:52", "04:A8:2A:E4:C8:72", " Araç2

Şekil 3.8. Dört okuyucudan MAC okuma veri örnekleri

3.1.3.2. Seyahat Süresi/Hız Hesaplaması

Eşleşen MAC adreslerinin tespit süresi, Bluetooth özellikli bir cihazla donatılmış her bir aracın seyahat sürelerini tahmin etmek için kullanılmıştır. İki ardışık okuyucu konumunda eşleşen bir MAC adresi için seyahat süresi, temel olarak algılama sürelerinin farkı alınarak hesaplanmıştır. Bluetooth verilerini kullanarak seyahat süresi tahmini yapılmıştır (Yücel ve ark., 2013).

Araç hızlarının aritmetik olarak ortalamasını alarak, segment üzerinden bir aracın “ortalama seyahat hızını” elde etmek mümkündür. Oysa “koridor hız” ulaştırma mühendisliği açısından daha anlamlı bir tanımdır. Koridor ortalama hızı, segment mesafesini ortalama seyahat süresine bölerek hesaplanmıştır.



Şekil 3.9. A-B konumları için bağımsız hız tanımları

Bluetooth teknolojisinin doğru seyahat süresi tahmininde uygulanabilirliğini sağlamak için bu Bluetooth cihazlarının çeşitli araç sınıfları arasında dağılımını anlamak önemlidir. Bu çalışmada dört ana araç sınıfı ele alınmıştır:

- İki tekerlekli (2T),
- Üç tekerlekli (3T),
- Hafif motorlu araçlar (HMA) ve
- Ağır motorlu araçlar (AMA).

Bluetooth'un Türkiye koşullarında ortalama penetrasyon oranının %10 olduğu ve bu çalışmada Yüksek Hızlı Araçlar (YHA) olarak gruplandırılan ağırlıklı olarak 2T ve HMA yakaladığı penetrasyon hızı analizi ve sınıf tanımlama çalışmalarından anlaşılmaktadır. Bluetooth tarafından yakalanan seyahat süresi bu nedenle YHA'nin ortalama seyahat süresidir. Tam akış seyahat süresini hesaplamak için, yavaş hareket eden araçların seyahat süresi ölçülen seyahat süresinden tahmin edilmelidir.

YHA'nin ortalama hızları, aşağıdaki gibi veri toplama noktaları arasındaki bilinen mesafe kullanılarak ölçülen YHA ortalama seyahat sürelerinden hesaplanmıştır.

$$V_{YHA} = D_{12} / T_{Bluetooth}, \quad (1)$$

Burada $T_{Bluetooth}$, Bluetooth sensörü tarafından ölçülen seyahat süresi, yüksek hızlı araçların HMA hızı ve iki dedektör istasyonu arasındaki mesafe D_{12} 'dir.

Tüm akışın hızı, YHA'nın bu hızından tahmin edilmelidir. Çalışma koridorundaki trafik kompozisyonunun %45 2T, %6 3T, %47 HMA ve %2 AMA olduğu görülmüştür. Böylece tüm akışın ağırlıklı ortalama hızı şöyle yazılabilmektedir:

$$V_{akış} = 0.45V_{2T} + 0.06V_{3T} + 0.02V_{AMA} + 0.47V_{HMA}, \quad (2)$$

burada V_{2T} , 2 tekerlekli araçların hızı, 3 tekerlekli araçların V_{3T} hızı, ağır motorlu araçların V_{AMA} hızı, hafif motorlu araçların V_{HMA} hızı ve $V_{akış}$ ortalama akış hızıdır.

Aşağıdaki gibi karşılık gelen akış seyahat süresi ifade edilebilir:

$$T_{akış} = D_{12} / V_{akış}, \quad (3)$$

$T_{akış}$, yolun akış seyahat süresidir.

YHA'nın seyahat süresi verilerinden yavaş hareket eden 3T ve AMA'nın hızını tahmin etmek için ağırlıklı doğrusal regresyon benimsenmiştir. 3T/AMA'nın hızı bağımlı değişken olarak ve YHA'nın hızı bağımsız değişken olarak alınmıştır.

$$V_{3T} = \alpha_1 V_{YHA}, \quad (4)$$

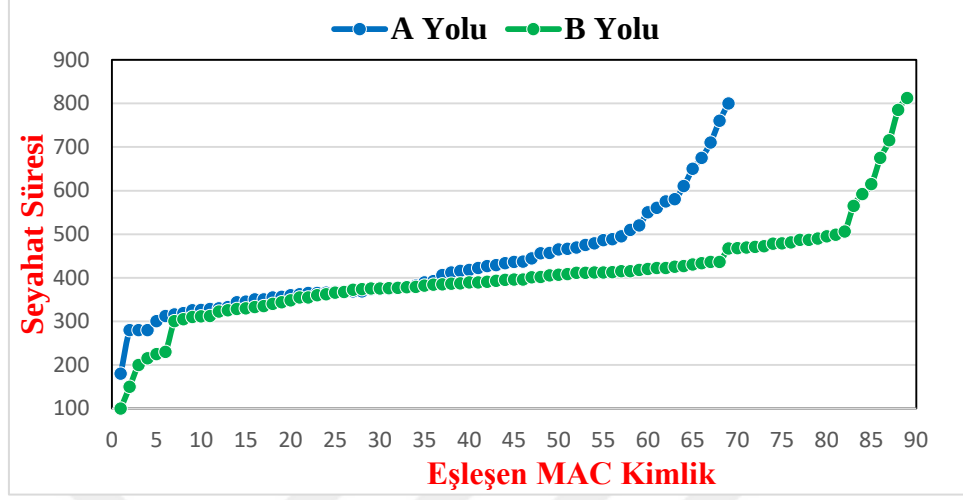
$$V_{AMA} = \alpha_2 V_{YHA}, \quad (5)$$

Burada α_1 , 3T ve YHA arasındaki regresyondan elde edilen katsayıdır; AMA ve YHA arasındaki regresyondan elde edilen α_2 katsayısıdır.

Bununla birlikte, doğrusal regresyonda, her veri noktasının tam olarak eşit bilgi sağladığı varsayılır, bu her zaman böyle olmayabilir. Bu gibi durumlarda, hatayı azaltmak için ağırlıklı doğrusal regresyon kullanılabilir, burada her noktaya, tahmin sürecindeki etkisini düzenleyen bir ağırlık atanmaktadır.

AMA'ye karşı YHA durumunda da benzer bir şekil gözlemlenmiştir. Bu nedenle, ağırlıklı doğrusal regresyon, 3T, YHA, AMA ve HMA hızları arasındaki ilişkiyi kurmak için kullanılmıştır. Ayrıca, trafik koşulları günün saatine bağlıdır ve yoğun dönemler ile yoğun olmayan dönemler ve gece süreleri arasında farklılıklar olmaktadır. Bu rejimleri belirlemek için, Batch Interface'den elde edilen tam günlük veriler çizilmiştir. Yolculuk süresinin örnek bir grafiği Şekil 3.10'da verilmiştir. Yoğun

ve yoğun olmayan akış rejimleri arasında bir eşik olarak 150 saniyelik bir seyahat süresi seçilmiştir.



Şekil 3.10. Bir günlük trafik akış grafiği

Buna dayanarak, sıkışık ve normal akış rejimleri belirlenmiştir ve YHA ile 3T ve AMA hızları arasındaki ilişki, akış rejimlerinin her biri için ayrı ayrı formüle edilmiştir. Şekil 3.10'da yeterli örnek büyüklüğünü elde etmek için simüle edilmiş veriler kullanılarak uygulanmıştır. YHA'nın hızının HMA ve 2T'nin ortalama hızı olduğu varsayılmıştır.

Doğrusal regresyondan farklı taşıt sınıflarının hızları arasındaki doğrusal ilişkinin bir tahmini yapılmıştır. Ortalama akış hızı Denklem 2 kullanılarak tahmin edilmiştir. YHA'nın bilinen hızını ve tahmini 3T ve AMA hızlarını kullanarak, günün farklı zamanları için YHA hızından ortalama akış hızını tahmin etmek için kullanılan farklı katsayılar Çizelge 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Farklı akış zamanlarında 3T (α_1) ve AMA (α_2) sabitleri

Lineer sabitler	8: ⁰⁰ /12: ⁰⁰	13: ³⁰ /16: ⁰⁰	15: ⁰⁰ /19: ⁰⁰
α_1	0.84	0.783	0.81
α_2	0.83	0.793	0.83

Doğrulama, farklı bir günde toplanan simüle edilmiş veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm gün için sınıflandırılmış seyahat süresi ve hız verileri

oluşturulmuş ve YHA'nın hızı, YHA'nın seyahat süresine (HMA ve 2T'nin ortalama seyahat süresi) bölünmesiyle hesaplanmıştır. 3T ve AMA'nın hızı, yukarıdaki gibi elde edilen α_1 ve α_2 katsayıları kullanılarak tahmin edilmiş ve toplam akış hızı eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (Denklem 2).

Tahmin edilen hızlar, gerçek hız değerleriyle uyumludur. Karşılık gelen akış seyahat süresi Denklem 3 kullanılarak hesaplanmıştır. Aşağıdaki Denklem 6'da verilen Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (OMYH), hataları ölçmek için kullanılmıştır.

$$OMYH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{T_e - T_o}{T_o} \right| \times 100 ; \quad (6)$$

T_e ve T_o tahmini ve gözlemlenen seyahat süreleridir.

Aynı Bluetooth cihazının algılama süresi karşılaştırılarak araç hareketlerinin yönünün belirlenmesi mümkün olduğundan, her iki yön için araç hızları ayrı ayrı hesaplanabilmektedir. Bluetooth verileri yayalara, bisikletlere, park etmiş araçlara veya dolambaçlı yollara ait olabilecek çok düşük değere sahip aykırı değerleri içerebileceğinden, daha güvenilir sonuçlar elde etmek için bunları ortadan kaldırmak gerekir. Eliminasyon yöntemleri bir sonraki bölümde sunulmaktadır.

3.1.3.3. Araç Hareketlerinin Tespiti

Ardışık konumlarda bir MAC adresinin gözlemlenmesi bir hareketi ortaya çıkarmıştır. Bununla birlikte, kentsel yerlerde, Bluetooth teknolojisine sahip bir cihazın hareketi farklı durumlara (potansiyel yaya veya aktif Bluetooth cihazına sahip bisikletçiler) atfedilebilir ve yalnızca bazıları araç hareketleriyle ilgili olacaktır. Taşıtları diğerlerinden ayırmanın en kolay yolu, ardışık MAC okuyucu konumları arasında ortalama koridor seyahat hızları elde etmek ve araçları işaretlemek için uygun bir düşük hız (veya bir üst seyahat süresi) sınırı kullanmaktır.

Araç dışı hareketleri ortadan kaldırmak için, işlenmemiş verileri filtrelemek ve sezgisel filtreleme yerine yalnızca araç verilerini ayırt etmek için uygun bir hız sınırına ihtiyaç vardır. Ayrıca, menzil üst üste binmesi, okuma sorunları, anten sorunları gibi beklenmedik Bluetooth verilerini yönetmemiz gerekir. Bu durum için, bir araç hareketinde gerçekleşmesi imkansız olan anormal yüksek hızları (çok kısa seyahat süreleri) ortadan kaldırmak da gereklidir. Sonuç olarak, araç hareketlerini tespit etmek için uygun düşük ve yüksek hız sınırlarının her ikisi de gereklidir.

Her türden veriyi filtrelemek ve aykırı değerlerden kurtulmak için geliştirilmiş birçok istatistiksel olarak onaylanmış filtreleme yaklaşımı vardır. Bu çalışmada toplanan Bluetooth verileri, aşağıda verilen en yaygın filtreleme yaklaşımları kullanılarak filtrelenmiştir:

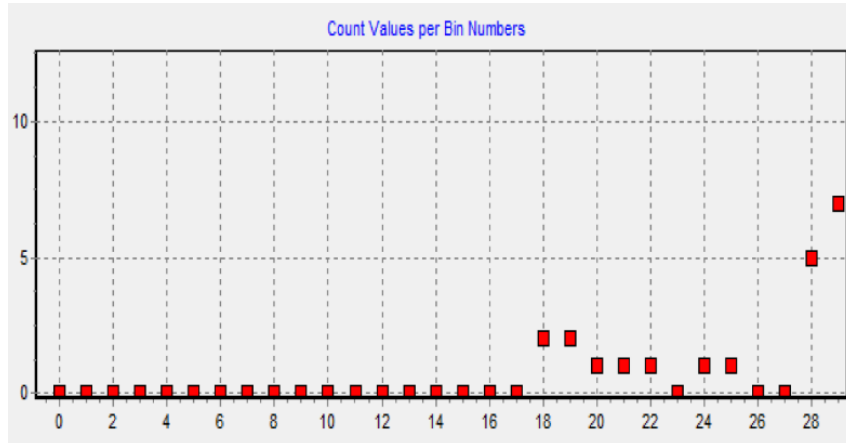
i) Normal Dağılım Filtresi:

İlk olarak, hesaplanan seyahat süresi ve hız değerleri, segment ortalamasından daha düşük ve daha yüksek olan bu 2 standart sapma ortadan kaldırılarak istatistiksel olarak filtrelenmiştir.

İkinci olarak, seyahat süresi ve hız verilerinde negatif değerlerin olmaması nedeniyle normal dağılım (Gauss) yerine lognormal dağılım seçilmiştir. 2-sigma ile segment ortalamasından daha düşük ve yüksek olanlar ortadan kaldırılarak istatistiksel olarak filtrelenmiştir.

ii) Penetrasyon Analizi:

Bluetooth sensörü tarafından yakalanan gerçek trafiğin yüzdesi genellikle örnekleme hızı veya penetrasyon hızı (Young, 2008) olarak adlandırılır ve analiz için örnek boyutunun yeterliliğini belirlemek önemli bir parametredir. Giriş ve çıkış lokasyonlarında penetrasyon hızı analizi ayrı ayrı yapılmıştır. Bluetooth sensörü kullanılarak elde edilen ham verilerden, her lokasyonda Bluetooth ile yakalanan araç sayısı elde edilmiştir. Bu lokasyonların her birinden geçen toplam araç sayısı videodaki araçların manuel olarak sayılmasıyla elde edilmiştir. Bu tür sayımlar, tüm veri toplama süresi boyunca 5 dakikalık aralıklarla yapılmıştır. Bluetooth tarafından yakalanan örnek sayısının belirli bir 5 dakikalık süre boyunca toplam araç akışına bölümü, o dönem için penetrasyon oranı olarak alınmıştır. Sabah ve akşam saatlerinde iki lokasyondaki maksimum ve minimum penetrasyon hızları Şekil 3.11'de gösterilmektedir.



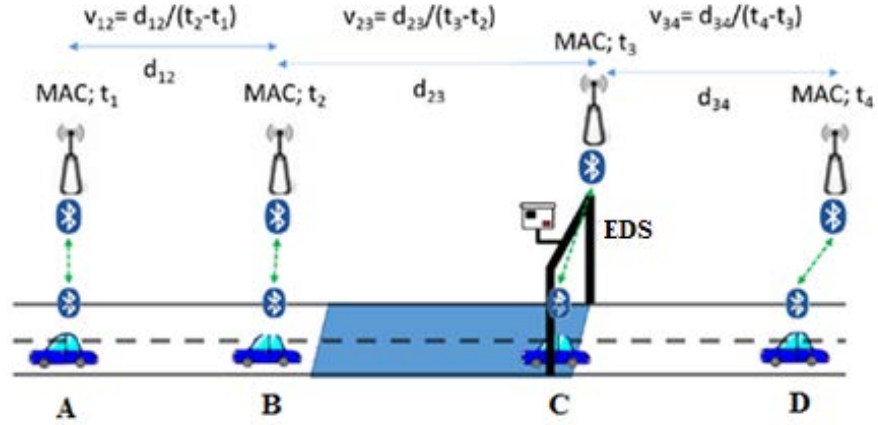
Şekil 3.11. YHA ve 3T Penetrasyon hızı dağılım grafiği

3.1.3.4. Yolculukların ve Seyahat Özelliklerinin Belirlenmesi

Bir seferde iki ardışık Bluetooth okuyucu verisine bakılarak her zaman bölgedeki gerçek araç-yolcu bilgisini üretilmez; bir araç, Şekil 3.12'deki araç örneğinde olduğu gibi ikiden fazla okuyucu konumunu ziyaret eden bir rotayı izleyebilir. İstanbul Çevre yolu otoyolunda, bölgedeki bir araç yolculuğunun gerçek OD konumlarını tespit etmek için, aktif MAC adresi olan bir aracın rotasını tespit etmek önemlidir. Bir yolculuğu tespit etmek için, olası rota boyunca ardışık okuyucu konumlarındaki bir MAC adresinin zaman damgaları süreklilik açısından kontrol edilmelidir: ardışık okumalar arasındaki hızlar seçilen eşik üzerindeyse, aracın sürekli bir yolculuğa sahip olduğu varsayılmıştır. Tahmin edilen seyahat süreleri eşik altındaysa, araçların arada durması veya daha uzun bir rota kat etmesi anlamına gelmektedir. Ancak yolculuk sürekliliğinin dikkatli kontrolünden sonra, bölgedeki araç yolculuklarının olası başlangıç (başlangıç) ve bitiş (varış) noktalarını belirlemek mümkündür. Sonunda, Bluetooth okuyucuları olan konumlar için OD Matrisini elde etmek için aynı OD noktalarına sahip toplam yolculuk sayısı toplanmıştır. OD matrisinin boyutu, bir çalışmada ihtiyaç duyulan minimum Bluetooth okuyucu sayısını da belirler; bu nedenle, otoyol koridorlarının OD tahmininde, Bluetooth okuyucularının tüm açık ve kapalı rampalarda konumlandırılması gerekmektedir.

EDS koridorları gibi kentsel koridorlar için, yolculukların algılanması, koridor boyunca seyahat özelliklerini ve sürücü davranışını anlamak açısından yararlıdır. Bluetooth okuyucuları EDS konumunda, öncesinde ve sonrasında bulunuyorsa, araçları ayrı ayrı izlemek mümkündür. Bu, EDS uygulamasından önce veya sonra ciddi değişiklikler olup olmadığını ortaya çıkarmıştır. EDS'den önceki segmentlere bakıldığında, sürücülerin “yavaşlama” davranışları hakkında yorum yapmak mümkün olabilir; benzer şekilde, EDS'den sonra segmentler üzerindeki hız değişikliği, "yaptırımın ötesinde" davranışla ilgili içgörüler ortaya çıkarabilmiştir.

Koridor boyunca EDS etkisini iki yaklaşımla görmek mümkündür: seyahat hızı profilleri ve ardışık bölümler boyunca bireysel hız yolu. Seyahat hızı profilleri için, ardışık bölümler boyunca uzay ortalama hızları hesaplanır. Şekil 3.12 için uzay ortalama hızları V_{12} (A-B), V_{23} (B-C) ve V_{34} (C-D) 'de gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Ardışık bölümler için hız tanımları

Hız değişim profilleri için, ardışık bölümler boyunca bireysel araç hızları hesaplanmıştır. Çizelge 3.2'de gösterildiği gibi seyahat modellerini tanımlamak mümkündür. Koridor boyunca olası tüm sürücü davranışlarını kapsar. Her araç MAC eşleştirmesi ile izlenmiş ve iki ardışık segment arasındaki hız farkları hesaplanmıştır. Bu şekilde tanımlanan modellerden birine kaç aracın sığıldığını görmek mümkündür.

Çizelge 3.2. Hız modeli tanımları ve EDS konumları

TİP	V ₁		V ₂	
TİP 1	→	EDS1	→	EDS2
TİP 2	→		↘	
TİP 3	→		↘	
TİP 4	↘		↘	

TİP 5				
TİP 6				
TİP 7				
TİP 8				
TİP 9				

3.1.4. Veri Toplama Modelleri

Bu çalışmada, Bluetooth verileri iki farklı vaka çalışması olarak ele alınmıştır: "İstanbul çevre yolu" ve "EDS koridorları: APS yolu ve İzmir çevre yolu. İlk vaka çalışmasında, İstanbul bölgesindeki iki otoyol koridorun belirli noktalarına dört Bluetooth okuyucu yerleştirilmiştir. İkinci vaka çalışmasında, Bluetooth okuyucularının yerini belirlemek için EDS uygulamasına sahip iki otoyol koridor kullanılmıştır. Ayrıca aynı okuyucu lokasyonlarında aynı anda trafik videoları kaydedilmiştir.

3.1.4.1. İstanbul Bölgesi

Bluetooth gözlemlerinden önce, önerilen arter çevresindeki 2 gişe arasındaki trafik sayımları iki hafta içi sabah, öğle ve akşam saatlerinde alınmıştır. Bu çalışmalar büyük giriş ve çıkış akışlarının gözlemlendiğini göstermiştir. Blok etrafındaki toplam seyahat süresi yaklaşık 20 dakikadır (25 km için), bu da yoğun olmayan dönemlerde ortalama 80 km/s hıza tekabül etmiştir. Motorsuz yolculukta ise, çalışma alanlarının kesişme noktalarında önemli yaya faaliyetleri varken, uzun yürüyüş mesafeleri ve aralarında yaya çekim noktalarının bulunmaması nedeniyle kavşaklar arasında sınırlı yaya hareketi olmuştur.

Bu noktalar arasında beklenen ana akışları yakalamak için 2 gişe arasına 10 adet Bluetooth okuyucu cihazı yerleştirilmiştir. Bu koridorlar, her yönde en az 3 şeritli ve bir refüj ile ayrılmış ana arterlerdir.

Bluetooth okuyucular hem cuma hem de cumartesi günleri en yoğun akşam saatlerinde kullanılmıştır. Aynı zamanda trafik sayımlarını almak için aynı lokasyonlarda eş zamanlı trafik videoları kaydedilmiştir. Arabalar, dolmuşlar (minibüslerle toplu taşıma), minivan/otobüsler, kamyon, tanker gibi büyük araçlar gibi farklı araç türlerini tespit etmek için trafik video kayıtları kullanılmıştır.

3.1.4.2. EDS koridorları

2013 yılında, zorunlu hız limitleri özel araçlar için 70 km/s ve bu alandaki diğerleri için 50 km/s idi (Şu anda hız limitleri özel araçlar için 82 km/s ve diğerleri için 60 km/s'dir). Bu nedenle, Şekil 3.12'de gösterildiği gibi (Elliot, 2004) A, B, C ve D olarak adlandırılan dört gözlem noktası (EDS uygulaması) okuyucu lokasyonları olarak seçilmiştir. Yalnızca 4 Bluetooth okuyucunun mevcudiyeti nedeniyle, veri almak için daha dinamik bir plan geliştirilmiştir; 2 saatlik bir gözlem süresi için, bunlardan ikisi, EDS konumunda ve 500 m önce; geri kalanlar, EDS lokasyonundan 1000 m önce ve sonraki EDS lokasyonundan 1000 m sonra konumlandırılmıştır. Bluetooth okuyucuları, gözlem süresi boyunca yakalanan cihazın okuyucu kimliğini, MAC adresini, zaman damgasını ve sinyal gücü bilgilerini birlikte kaydetmiştir.

Kullandıkları teknoloji, yolların üst kısımlarında bulunan sabit trafik kameralarıdır. Bluetooth okuyucuları iki saatlik yoğun olmayan öğle ve öğleden sonra (salı günü 11:00-13:00 ve 16:00-18:00; çarşamba günü 12:00-14:00 ve 17:00-19:00) pik saat faktörlerini ortadan kaldırmak için seçilmiştir. Eksik verilerle başa çıkmak için veri toplama süreci ertesi gün tekrarlanmıştır.

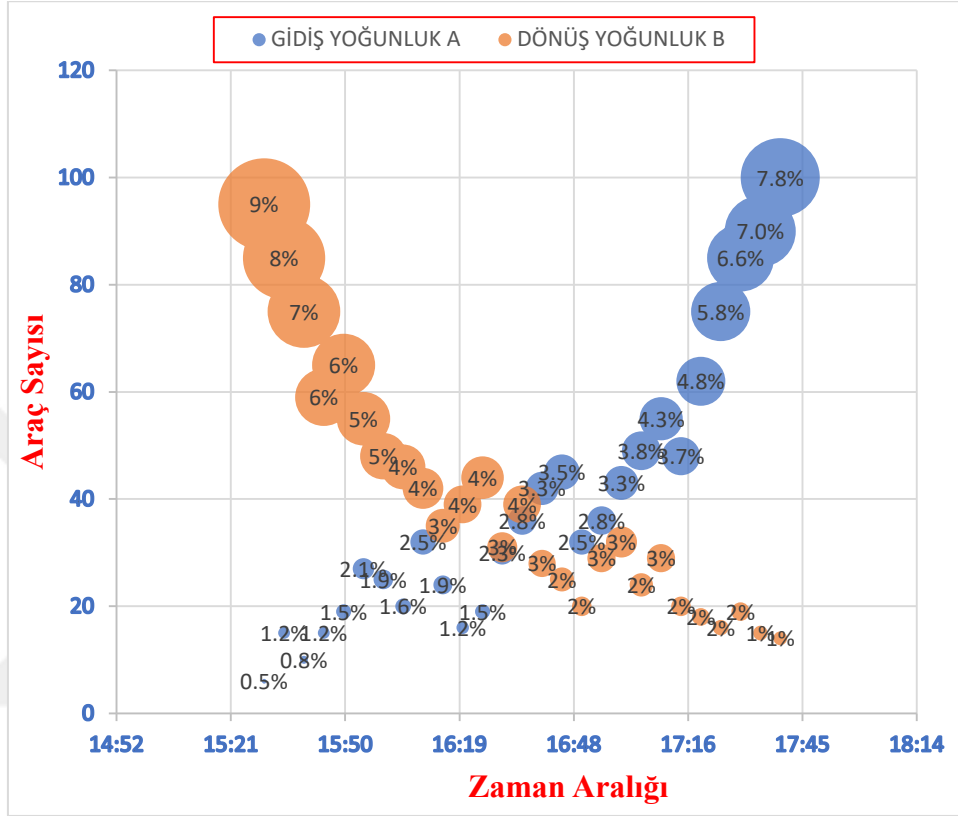
4. DURUM ÇALIŞMALARI

4.1. İstanbul Bölgesinde Seyahat Süresi tahmini

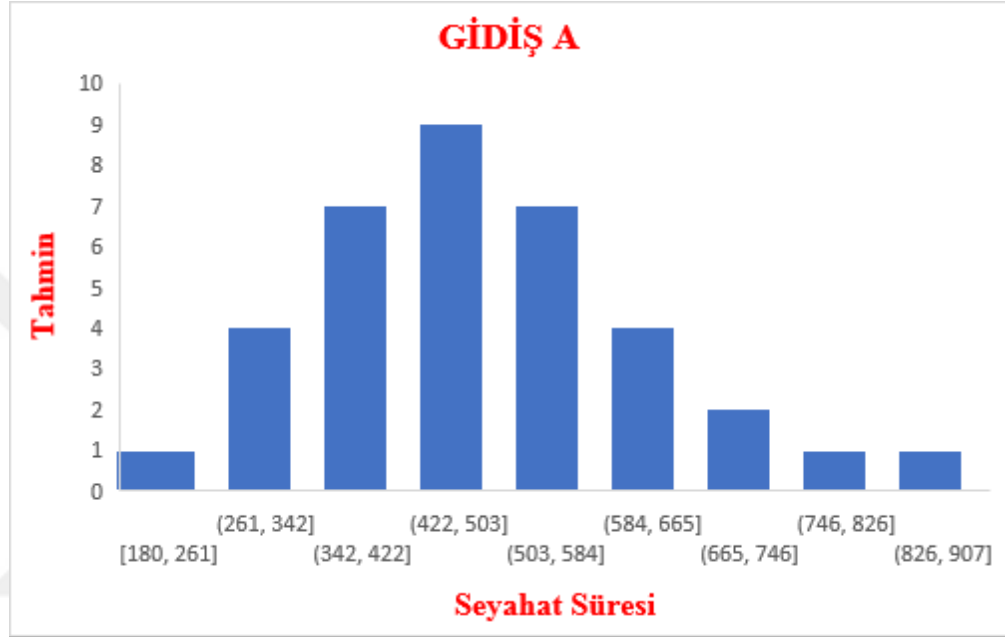
Bölüm 3'te açıklanan metodolojiyi uygulamadan önce, araçlarda kaç tanesinde etkin Bluetooth cihazı olduğu sorusuna cevap vermekte fayda vardır. Bluetooth teknolojisi ile örnekleme yeteneği hakkında bir fikir sahibi olmak için, gözlem noktalarında MAC-hacim oranlarını (benzersiz MAC adresi numarası trafik sayısına bölünür) görmek yararlıdır. 120 dakikalık gözlem süresi boyunca, trafik sayımları ve MAC adresi saptamaları, Blogg ve ark., (2010), tarafından yapıldığı gibi MAC-Hacim oranlarını oluşturmak için incelenmiştir. Pazartesi günü yapılan ölçüm için zaman aralığı 5 dakika olarak kullanıldı. Beklendiği gibi, A'daki yüksek trafik sayıları, %9'luk

bir MAC-Hacim oranı ile daha yüksek MAC tespitleriyle sonuçlandı. MAC-Hacim oranı %7,8 olan B'de biraz daha az MAC adresi tespit edildi. Bu oranlar, diğer çalışmalarda bildirilen penetrasyon oranlarından çok farklı değildi (Blogg, 2010).

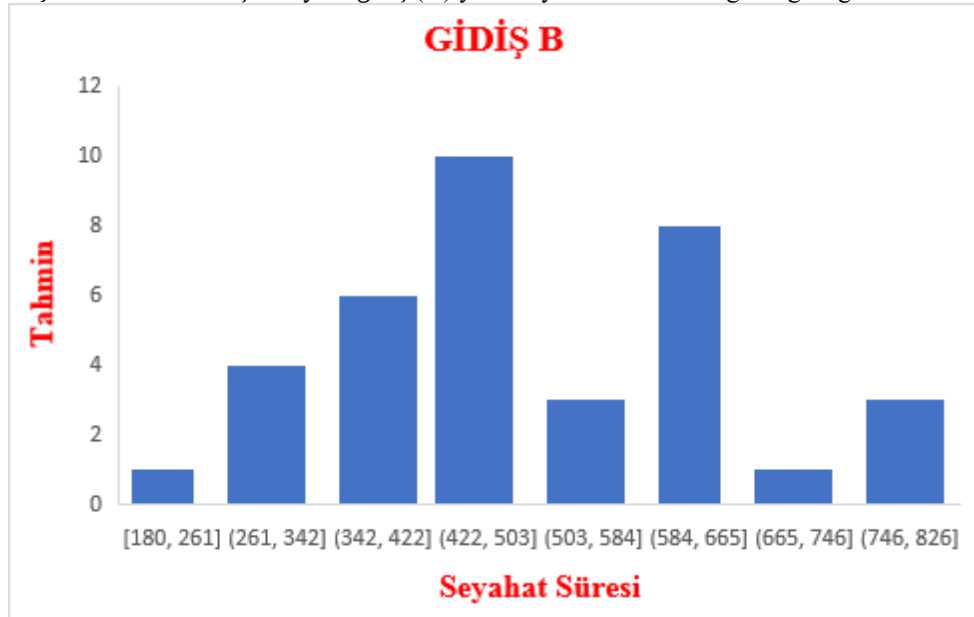
Hafta içi için MAC-hacim oranı grafikleri Şekil 4.1'de verilmiştir.



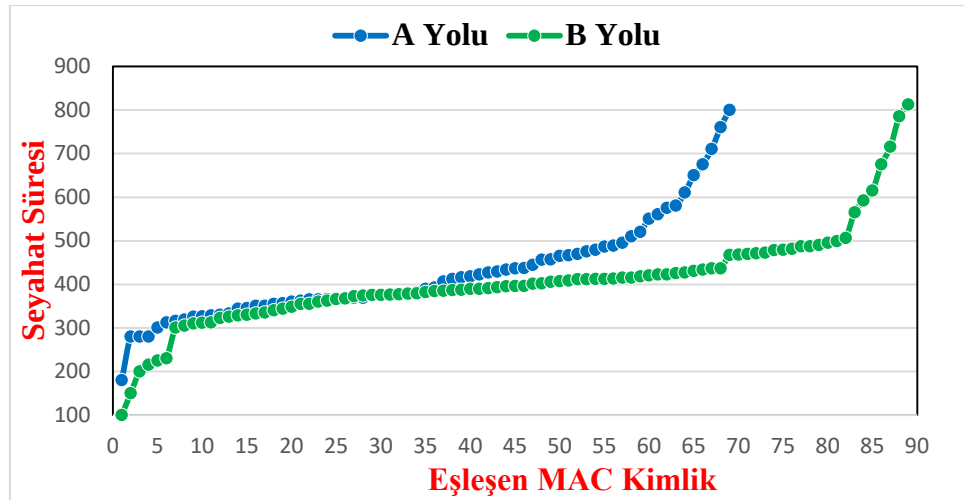
Her koridorun her iki yönü için hafta içi için seyahat süresi histogram grafikleri Şekil 4.2 ve 4.3'de verilmiştir. Bu nedenle, seyahat süresi değerleri veri temizlemesinden sonra artan bir şekilde sıralanmıştır. Oluşturulan grafikler, veri temizlemesinden sonra (Bölüm 3), verilerin yaklaşık %16'sının aykırı değerler olarak değerlendirildiğini ve elendiğini gösterdi. Sıralanmış seyahat süresi grafikleri Şekil 4.2 ve 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.2. İstanbul çevre yolu gidiş (A) yönü seyahat süresi histogram grafiği



Şekil 4.3. İstanbul çevre yolu dönüş (B) yönü seyahat süresi histogram grafiği



Şekil 4.4. İstanbul çevre yolu MAC kimliği eşleşen araçların seyahat süresi grafiği

Son olarak, OD matrisini tahmin etmek için Bölüm 3'te sunulan metodolojideki açma tespiti İstanbul çevre yolu verilerine uygulanmıştır. Bloğun etrafından dolaşmak için 10 dakikalık seyahat süresi göz önüne alındığında, çalışma koridorları boyunca olası hareket eden araçları belirlemek için 7 dakikalık konservatif bir üst sınır kabul edilmiştir. 7 dakikalık eşik, A-B ve C-D koridorları için 70 km/saat ve 80 km/saat minimum araç hız sınırlarına karşılık gelmektedir. 7 dakikalık (420 saniye) eşik değerinin uygunluğu, Şekil 4.2 ve 4.3'de gösterildiği gibi okuyucu konumları arasında seçilen tüm hareketlerin seyahat süreleri analiz edilerek doğrulanmıştır. Yüzdelik grafiklerde, yatay eksen yakalanan hareketlerin seyahat süresini saniye cinsinden, dikey eksen ise toplam araç yüzdesini göstermektedir. Grafikler, A ve B koridorlarındaki hareketlerin %75-80'inin hafta sonu ve hafta içi 10 dakikadan çok daha az sürdüğünü göstermektedir.

Bundan daha uzun seyahat süreleri, konumlar arasında bölge dışı geziler veya motorsuz geziler olarak kabul edilmiş ve OD tahmininden çıkarılmıştır. Kalan MAC adresi eşleşmeleri, aktif Bluetooth'a sahip araçların rotalarını almak için yolculuk sürekliliği aramak için manuel olarak gözden geçirilmiştir. Hafta içi yapılan ölçümde toplam 5840 araç yolculuğu tespit edilmiş; beklendiği gibi hareketlerin çoğu (A-C) ve (A-D) koridorları arasındadır. Tahmini OD matrisi Çizelge 4.1'de sunulmuştur.

Çizelge 4.1. MAC adres eşleşmelerine göre hafta içi toplanan araç sayısı

OD (Sayıma Göre) Hafta içi					
	A	B	C	D	Toplam X
A		250	500	910	1660
B	400		200	450	1050
C	700	250		220	1170
D	1200	500	260		1960
Toplam Y	2300	1000	960	1580	5840

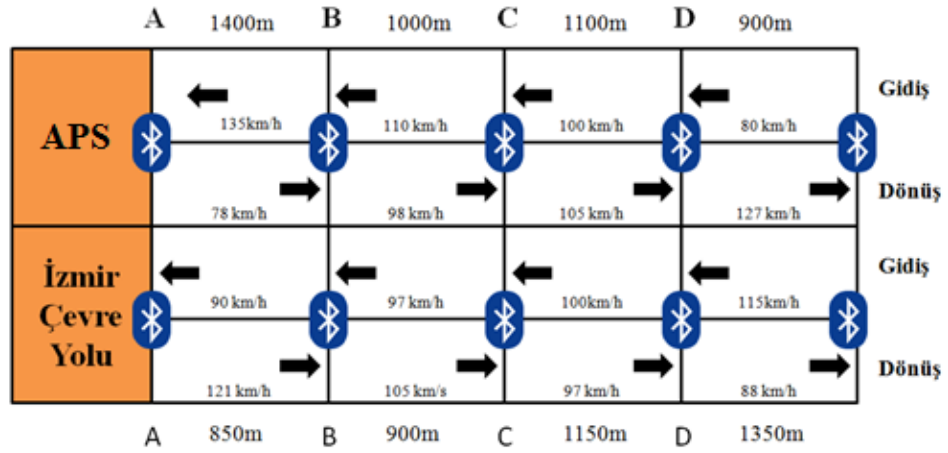
4.2. EDS Etkisinin Değerlendirilmesi

Bölüm 4.1'de belirtildiği gibi, veri işleme adımlarını uygulamaya başlamadan önce MAC-Hacim oranlarını bilmek önemlidir. EDS koridorları vaka çalışması sırasında, ilk gün toplam 1612 benzersiz MAC adresi, ertesi gün ise 1848 benzersiz MAC adresi yakalanmıştır. Her konum için MAC-Hacim oranlarını hesaplamak için benzersiz MAC adresi sayıları ve trafik sayımları kullanılmıştır. Sonuçlar, MAC-Hacim oranlarının yaklaşık %7-9 olduğunu ve birbirlerine çok yakın olduklarını göstermektedir. Bu beklenen bir sonuçtur, çünkü çalışma bölgesi APS bölgesi gibi açık bir ağ değil, daha az giriş ve çıkış noktası olan kentsel koridorlardır.

EDS koridorlarında segmentler boyunca sürücü davranışını değerlendirmek için seyahat süresi ve hızları hesaplandı ve aykırı değerler veri temizleme yoluyla elimine edilmiştir. Sonuçlar, araçların büyük bir kısmının APS Yolu'nda 500 saniyeden az seyahat süresine sahip olduğunu, İzmir Çevre Yolu'nda ise 400 saniye olduğunu göstermiştir. Bir diğer önemli sonuç da EDS uygulama noktasına yaklaşan araçların EDS sonrasına göre daha yüksek seyahat sürelerine sahip olmasıdır.

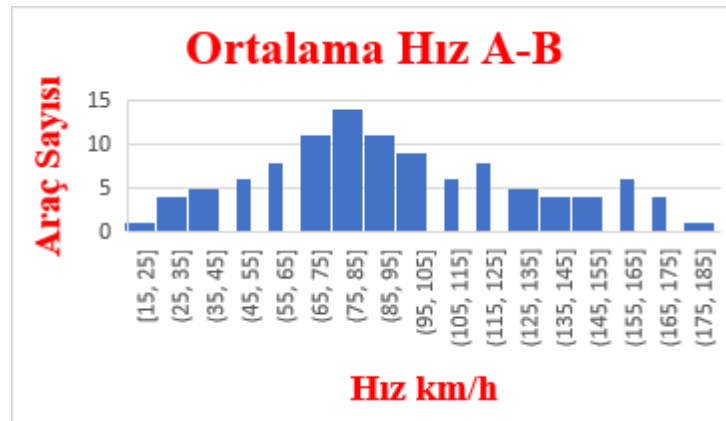
Bu vaka çalışması EDS koridorlarını içerdiğinden, seyahat süresi değerlerinden ziyade hız sonuçlarını değerlendirmek daha anlamlıdır. Trafik Mühendisliği açısından, uzay ortalama hız, çeşitli trafik çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır ve koridor boyunca sürücü hız davranışını değerlendirmek daha anlamlıdır. Segment uzunlukları kısa olduğu için, harmonik ortalama hızı uzay ortalama hız olarak kullanmıştır. Bu nedenle, harmonik ortalama hızlar Bölüm 3'te tartışıldığı gibi elde edilmiş ve Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da görüntülenmiştir. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'nın ilk yarısı, EDS çalışma koridorları üzerindeki segment ortalama değerlerinin değişimini göstermektedir. Rakamlar, yoğunlukla EDS'den sonra aniden artan hız sınırlarına uymak için ani yavaşlamaların (EDS'den neredeyse ilk 1500 m'de) yaygın beklentisini

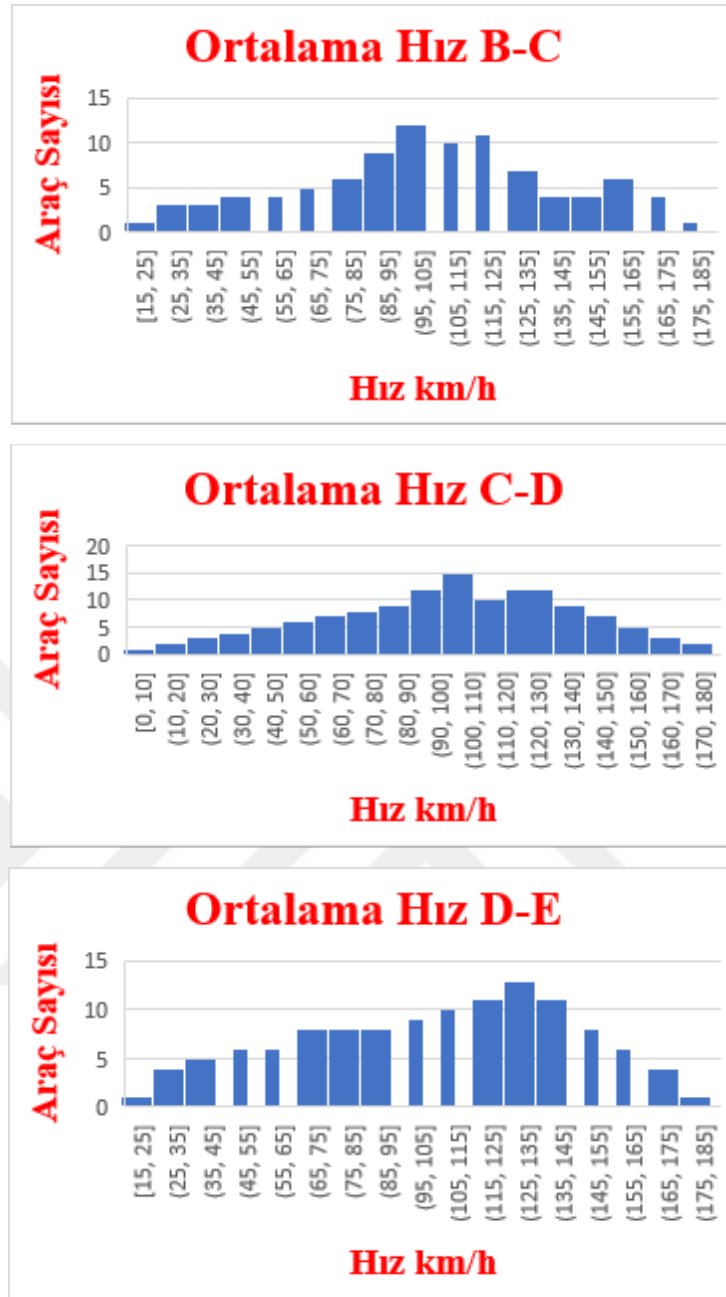
desteklemiştir. Benzer davranış hem APS hem de İzmir Çevre Yolu otoyolunda görülmektedir.



Şekil 4.5. EDS Koridoru üzerindeki her bölümün harmonik ortalama hızları

Daha fazla bilgi vermek için, APS üzerindeki EDS konumunun (C) hemen öncesi ve sonrasındaki iki segmentteki hız dağılımı Şekil 4.5'in ikinci yarısında verilmiştir. Bu grafikte, EDS'nin hemen ardından daha dağınık bir desen göstermektedir. Bunun nedeni, bazı agresif sürücülerin bir EDS noktasından hemen önce geçici olarak yavaşlaması, ancak bir EDS noktasında daha tekdüze bir hız izleyenlerin aksine hemen ardından hızlanmaları olmuştur.





Şekil 4.6. EDS Koridorlarında her konumun harmonik ortalama hızları

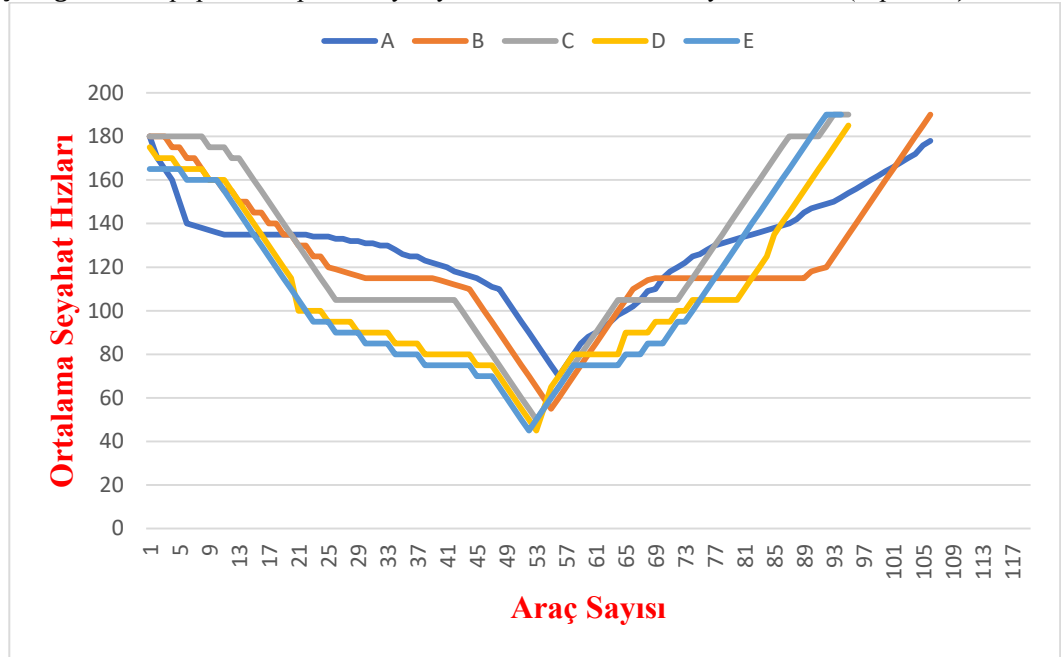
Son değerlendirme, EDS koridorları boyunca bireysel araç hareketleriyle ilgilidir. Bölüm 3'teki metodolojide tartışıldığı gibi Bluetooth özellikli cihaza sahip her aracı izlemek mümkündür. Koridor boyunca olası tüm sürücü davranışlarını açıklamak için 9 tip model tanımlanmıştır. Daha sonra her araç MAC eşleştirmesi ile takip edilmiş ve iki ardışık segment arasındaki hız farkları hesaplanmıştır. Bu şekilde, hangi modelin izlenen sürücü davranışına uyduğunu görmek mümkündür.

Sonuçlar, sürücülerin büyük çoğunluğunun EDS konumundan önce hızının düşürülmesini içeren Tip 7-8-9'u tercih ettiğini göstermektedir. Bunlardan 68'i Tip 7'yi,

102'si Tip 9'u takip ederken, 49'u EDS konumunun hemen ardından hızlarını artırmayı tercih etmiştir (Tip 8). Hız modelleri ve bireysel ortalama seyahat hızı grafikleri Çizelge 4.2 ve Şekil 4.7'de verilmiştir.

TİP	V ₁		V ₂		A'DAN E'YE	E'DEN A'YA
TİP 1	→		→		10	9
TİP 2	→		↘		0	3
TİP 3	→		↘		23	24
TİP 4	↗		↗		0	0
TİP 5	↗	EDS1	→	EDS2	10	0
TİP 6	↗		↘		7	13
TİP 7	↘		→		35	33
TİP 8	↘		↗		27	22
TİP 9	↘		↘		45	57

Çizelge 4.2. En popüler kalıpları izleyen yolculukların ortalama seyahat hızları (Tip 7-8-9)



Şekil 4.7. Tip 7-8-9'u (A'dan E'ye) izleyen yolculukların ortalama seyahat hızları



5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın amacı Bluetooth ve hız tespit cihazlarını, çevreyolu trafik akışını incelemek için kullanmaktır. İstanbul bölgesindeki yoğun bir yoldan toplanan Bluetooth verileri, trafik sensörü olarak olası kullanım için analiz edilmiştir. Bluetooth kullanarak penetrasyon hızı analizi, sınıf tanımlaması ve akış seyahat süresinin tahmini gösterilmiştir.

5.1. İstanbul Bölge Çalışmasına Genel Bakış

İstanbul bölgesinde, biri kuzey-güney yönüne olmak üzere, diğeri ise doğu-batı yönüne hizmet eden iki arter üzerinde GPS ile donatılmış örnek araç hareketleri ile trafik akışı gözlemlenmiştir. Sonuçların çoğunda hafta sonu ve hafta içi için aynı sonuçlar elde edilmiş fakat bazı farklı sonuçlar da bulunmuştur. Bunlara örnek olarak; Hafta sonu, ana arter güneydeki şehir merkezi yönüne giden çalışma bölgesinin kuzeye yönündekine göre daha yoğun bir talebe hizmet ettiği. Ancak hafta içi ana akım bölgenin doğu kısmını batıya bağlayan arter üzerindeydi. Gözlemlenen araçlarda

seyahat süreleri çoğunlukla dar bir aralıkta olduğu gözlemlenmiş, koridorlarda dur-kalk durumları ve çok yavaş hareketleri hariç tutulmuştur. Karşıt yönlerdeki akışlarda ise, ortalama koridor hız değerlerinde ve hız dağılımlarında da sonuç görülmüştür ve bu sonuçlar neticesinde, Bluetooth verilerinin şehir otoyollarında seyahat süresi ölçümü için kullanımının uygunluğunu kanıtlanmıştır.

Bir aracın bir arter koridorundaki ortalama hızını hesaplamak mümkün olsa da seyahat süresinin tespiti, trafik çalışmalarında daha sık ihtiyaç duyulan koridorlar için alan ortalama hızının tahmin edilmesini sağlamıştır.

5.2. EDS Çalışmasına Genel Bakış

Bu çalışma, EDS'nin etkisini değerlendirmek için Bluetooth tabanlı bir metodolojinin potansiyelini göstermiştir. Bluetooth verileri, koridordaki toplam akışların bir örneği olsa da Bluetooth tabanlı veriler aracılığıyla trafik davranışındaki ana eğilimleri gözlemlemek mümkün olmuştur. Ayrıca, Bluetooth Teknolojisi, trafikle ilgili çalışmalar için ucuz ve zaman kazandıran bir alternatiftir. EDS etkilerini düşük maliyetlerle değerlendirmek için bu tür izleme sistemleri uygulanmalıdır. Buna ek olarak araçlar doğrudan tanımlanmadığından dolayı bu metodoloji gizlilik haklarını da ihlal etmemektedir. Bununla birlikte, daha ileri düzeyde veri işleme oluşturma, Bluetooth tabanlı örnekleme olasılık dağılımı ile belirlenmesine ışık tutması nedeniyle Bluetooth etkinleştirmesini (araçta birden fazla etkin Bluetooth cihazı olup olmadığı vb.) anlamak için önemlidir. Ayrıca, MAC-hacim oranlarının örnekleme oranı hakkında da bir fikir sahibi olacak şekilde hesaplanması daha bilgilendiricidir. Bu teknolojinin giderek artan kullanımı hesaba katıldığında bu yöntemin daha anlamlı sonuçlar sağlayabileceği düşünülmelidir. Değerlendirmelerin güvenilirliği açısından Bluetooth veri toplama planı önemlidir; segmentlerin çok uzun alınması, hesaplanan ortalama seyir hızlarını, segmentlerin yavaşlamasını veya hızlanmasını doğru şekilde yansıtmamasına neden olmuştur. Çalışmanın temel eksiklikleri, eksik Bluetooth verileri, beklenmedik ortalama hız değerleri ve sınırlı sayıda Bluetooth okuyucu, olarak kabul edilmiştir. Bu eksiklikler ve sınırlamaların önlemek için, daha karmaşık filtreleme teknikleri, sonda aracı ve GPS gibi destekleyici veri toplama teknikleriyle doğrulama uygulanmalıdır. Ayrıca Bluetooth teknolojisinin hız tahmininde kullanımı detaylı bir şekilde çalışılmalı ve daha güvenilir hız sonuçları elde etmenin yolları tartışılmalıdır.

Segment üzerindeki ortalama ve standart sapma değerlerindeki değişimi, Segment bazlı hız dağılımlarını çizerek görmek mümkündür. Bu yöntem, EDS

uygulamasından önce veya sonra ciddi değişiklikler olup olmadığını ortaya çıkarmıştır. EDS'den önceki segmentlere bakıldığında, sürücülerin “yavaşlama” davranışları hakkında yorum yapmak mümkün da olmuş; benzer şekilde, EDS'den sonra segmentler üzerindeki hız değişikliği, "yaptırımın ötesinde" davranışla ilgili görüşler ortaya çıkarmıştır. Bu modeller, eğer varsa, bir “koridor yaptırımından” elde edilecek olanlarla karşılaştırılabilir. Ancak, EDS sistemlerinin gerçek etkisi kesinlikle trafik güvenliği uzmanları tarafından yorumlanmalıdır. Rastgele olmayan veriler veya düşük örnekleme oranı, sonuçların güvenilirliğini doğrudan etkilediğinden, etki değerlendirme sürecinde rastlantısallık ve örnekleme oranı konuları da dikkate alınmalıdır.

5.3. İstanbul'da Bluetooth Veri Kalitesi

Sınırlı erişim koridorlarında(otoyol) seyahat süresi tahmini, çok fazla giriş ve çıkış olmadığı için daha verimlidir. Tespit edilen araçların çoğunluğunun hafif motorlu ve ağır motorlu araçlardan olduğu kameralar ile tespit edilmiştir.

Sınırlı Bluetooth verilerinden bir akışın tamamı için akış seyahat süresini tahmin etmek bir zorluktur ve şimdiye kadar pek çok çalışma bu sorunu ele almamıştır. Akış seyahat süresinin gerçek tahmini ve analizi, yoğun ve yoğun olmayan trafik akış koşulları için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Çalışma, ağırlıklı doğrusal regresyon analizi ile farklı araç sınıflarının hızları arasında doğrusal ilişkiler kurmuş ve akış hızına bölünen mesafenin tahmini akış seyahat süresi hesaplanmıştır. Bu teknik, ortalama %3 OMYH ile akış seyahat süresini doğru bir şekilde tahmin etmede başarılı olmuştur.

Bu çalışma, Bluetooth'un heterojen trafik koşulları için seyahat süresinin tahmini için uygun maliyetli bir teknoloji olduğunu göstermiştir.

Özetlemek gerekirse, bu yöntemin gücü, bir hareketin zaman ve mekan üzerinden izleme kabiliyetidir. Sıkışık trafik koşullarında, koridor hızlarına bakıldığında hareketli araçlar diğerlerinden ayırt edilmiştir. Ancak, basit bir koridor hızı (veya seyahat süresi) değerine dayalı filtreleme, yoğun saatler için doğru olmayabilir. Bunun yerine, zamana bağlı hız eşikleri, farklı dönemlerdeki trafik rejimini temsil edecek şekilde seçilebilir. Bluetooth tabanlı tahminler kullanan araçların örnekleme oranı önemli bir sorundur; bir bölgedeki Bluetooth teknolojisinin penetrasyon hızı oranına bağlıdır. Bu çalışmada örnekleme oranı %10 civarındadır, bu oran seyahat süresi tahmini için yeterlidir, ancak OD tahmini için yeterli değildir. Daha önce de belirtildiği gibi Bluetooth cihazlarıyla daha fazla araca erişim sağlanırsa, daha güvenilir seyahat verileri oluşturulabilir. Öte yandan, potansiyel bir sorun olan, bir araçta birden fazla

Bluetooth cihazının etkin olmasıdır: bu durum, tek kişilik araçlarda etkili olmasa da toplu taşıma otobüsleri, servis araçları gibi yüksek doluluk oranlı araçlarda kritik olabilir. Her iki durum da OD matrislerinin tahminine zarar verir, ancak koridor seyahat sürelerine zarar vermez. Bluetooth cihazlarının araçlarda ve yolcular tarafından kullanımının büyük ölçüde arttığı gelecekte bu daha büyük bir sorun oluşturabilir. Daha ileri düzeyde veri işleme oluşturmak, Bluetooth tabanlı örnekleme rastgeleliğine ışık tutmak amacıyla Bluetooth etkinleştirmesini (araçta birden fazla etkin Bluetooth cihazı olup olmadığı vb.) anlamak için önemlidir.

Okuyucu konumları arasında OD matrisinin bir tahminini elde etmek mümkün olsa da başka herhangi bir destekleyici veri olmadan verilerin güvenilirliğini bilmek zordur.

5.4. Gelecekteki Öneriler

Tüm eksikliklere rağmen, Bluetooth teknolojisi kesinlikle alternatif ve nispeten kolay ve ucuz bir seyahat etüdü yöntemi sunmuş, hatta kentsel bir bölge için bile etkin bir yöntem kabul edilmiştir. Bir şehirdeki tüm ana arterlerde seyahat süresi izleme gibi geniş alan uygulamaları ve karmaşık trafik ağlarını idare etmek için Bluetooth veri işlemenin yolculuk algılama adımı otomatikleştirilmelidir. Ağ üzerindeki Bluetooth okuyucularının yerleşimi, büyük trafik akışları güvenilirliği taşıyan koridorları yakalayacak şekilde dikkatle tasarlanmalıdır. Buna istinaden, ana kentsel koridorlar boyunca kritik kavşakların okuyucular aracılığıyla donatılmasını gerektirir. Ek olarak, Bluetooth verilerinin güvenilirliğini test etmek için, Bluetooth verileriyle trafik izleme, Floating Car Data (FCD) gibi başka bir trafik veri kaynağıyla da doğrulanmalıdır. İdealist olarak, farklı kaynaklardan gelen tüm bu verilerin, yalnızca trafiği izlemekle kalmayıp aynı zamanda sürücülere gerçek zamanlı trafik durumunu yayınlamaya başlayacak olan kentsel trafik yönetimi yetkilisi gibi merkezi bir kontrol birimi tarafından birleştirilmesi gerekmektedir.

Teknoloji açısından bakıldığında, Bluetooth teknolojisinin trafik çalışmalarında verimliliğini ve kullanılabilirliğini anlamak için, yeniden tarama süresi ve kalış süresi analizi gibi daha detaylı analizlerin yapılması gerekmektedir. Farklı çalışma hızlarında ve yol genişliklerinde aktif Bluetooth cihazlarına sahip araçların tespiti, elektrik ve elektronik mühendisleri ve trafik mühendislerinden oluşan disiplinler arası bir ekip ile dikkatlice analiz edilmelidir.



KAYNAKLAR

- Haghani A, Hamed M, Sadabadi KF, Young S, Tarnoff P (2010) Data collection of freeway travel time ground truth with Bluetooth sensors, no. 2160, transportation research record, transportation research board of the national academies, Washington, D.C, pp 60–68
- Young S (2008) Bluetooth traffic monitoring technology: concept of operation and deployment guidelines. University of Maryland— Centre for Advanced Transportation Technology, Maryland
- Coifman B, Kim S (2009) Speed estimation and length based vehicle classification from freeway single-loop detectors. *Transp Res Part C Emerg Technol* 17:349–364
- Coifman B, Krishnamurthy S (2007) Vehicle reidentification and travel time measurement across freeway junctions using the existing detector infrastructure. *Transp Res Part C Emerg Technol* 15(3):135–153
- Bhaskar A, Qu M, Nantes A, Miska M, Chung E (2015) Is bus overrepresented in Bluetooth MAC scanner data? Is MAC-ID really unique? *Int J Intell Transp Syst Res* 13(2):119–130

- Cortes C, Lavanya R, Oh JS, Jayakrishnan R (2002) Generalpurpose methodology for estimating link travel time with multiple- point detection of traffic. *Transp Res Rec J Transp Res Board* 1802:181–189
- Dailey DJ (1999) A statistical algorithm for estimating speed from single loop volume and occupancy measurements. *Transp Res Part B Methodol* 33(5):313–322
- Wang Y, Nihan NL (2003) Can single-loop detectors do the work of dual-loop detectors? *J Transp Eng* 129(2):169–176
- Qian QQ, Lin S, He ZY, Li XP (2012) Travelling wave timefrequency characteristic-based fault location method for transmission lines. *Gener Transm Distrib IET* 6(8):764–772
- Sharma A, Bullock D, Bonneson J (2007) Input-output and hybrid techniques for real-time prediction of delay and maximum queue length at signalized intersections. *Transp Res Rec J Transp Res Board* 2035:69–80
- Vigos G, Papageorgiou M, Wang Y (2008) Real-time estimation of vehicle-count within signalized links. *Transp Res Part C Emerg Technol* 16(1):18–35
- Stevanovic AZ, Martin PT (2008) Assessment of the suitability of microsimulation as a tool for the evaluation of macroscopically optimized traffic signal timings. *J Transp Eng* 134(2):59–67
- Wang Y, Malinovskiy Y, Lee UK, Wu YJ (2011) Investigation of bluetooth-based travel time estimation error on a short corridor. In: *Transportation research board 90th annual meeting* (No. 11–3056)
- Welsh E, Murphy P, Frantz JP (2002) Improving connection times for Bluetooth devices in mobile environment. In: *Proceedings of the 2002 international conference, on fundamentals of electronics communications and computer science of IEICE (ICFS 2002)*, 27–28 Mar 2002, Tokyo, Japan, pp 1–5
- Ahmed H, El-Dariby L, Abdulhai B, Morgan Y (2008) Bluetooth- and Wi-Fi-based mesh network platform for traffic monitoring. In: *TRB 87th annual meeting compendium of papers DVD*, 13–17 Jan 2008, Washington, DC, pp 1–11
- Sharifi E, Hamed M, Haghani A, Sadrsadat H (2011) Analysis of vehicle detection rate for Bluetooth traffic sensors: a case study in Maryland and Delaware. In: *Proceedings of the 18th world congress on intelligent transport systems*, 16–20 Oct 2011, Orlando, FL, pp 1–12
- Quayle SM, Koonce P, DePencier D, Bullock DM (2010) Arterial performance measures with media access control readers: Portland, Oregon, pilot study. *Transp Res Rec J Transp Res Board* 2192:185–193. doi:10.3141/2192-18
- Quayle SM, Koonce P, DePencier D, Bullock D (2010) Arterial performance measures using MAC readers: Portland pilot study. In: *Transportation research board annual meeting proceedings CD-ROM*

- Wasson JS, Sturdevant JR, Bullock DM (2008) Real-time travel time estimates using media access control address matching. *ITE J* 78(6):20–23
- Sadabadi KG, Hamed M, Haghani A (2010) Evaluating moving average techniques in short-term travel time prediction using an AVI dataset. In: Transportation research board, annual meeting proceedings CD-ROM
- Houston TranStar and Bluetooth Traffic Monitoring (2012). http://traffic.houstontranstar.org/bluetooth/transtar_bluetooth.html. Accessed 22 July 2013
- Jaume B, Lúcia M, Laura M, Carlos C (2010) A Kalman-filter approach for dynamic OD estimation in corridors based on Bluetooth and WiFi data collection. 12th WCTR, Lisbon, Portugal
- Sawant H, Tan J, Yang Q, Wang Q (2004) Using Bluetooth and sensor networks for intelligent transportation systems. In: IEE intelligent transportation systems conference, Washington, D.C., USA
- Bullock D, Haseman R, Wasson J, Spitler R (2010) Automated measurement of wait times at airport security: deployment at Indianapolis international airport, Indiana. *Transp Res Rec J Transp Res Board* 2177:60–68
- Van Boxel D, Schneider W IV, Bakula C (2011) Innovative realtime methodology for detecting travel time outliers on interstate highways and urban arterials. *Transp Res Rec J Transp Res Board* 2256:60–67
- Malinovskiy Y, Lee UK, Wu YJ, Wang Y (2011) Investigation of Bluetooth-based travel time estimation error on a short corridor. In: Transportation research board 90th annual meeting (No. 11-3056)
- Puckett DD, Vickich MJ (2010) Bluetooth-based travel time/ speed measuring systems development (No. UTCM 09-00-17)
- Horn C, Klampfl S, Cik M, Reiter T (2014) Detecting outliers in cell phone data: correcting trajectories to improve traffic modeling. *Transp Res Rec J Transp Res Board* 2405:49–56
- Khoei AM, Bhaskar A, Chung E (2013) Travel time prediction on signalised urban arterials by applying SARIMA modelling on Bluetooth data. In: 36th Australasian Transport Research Forum (ATRF) 2013
- Qiao W, Haghani A, Hamed M (2013) A nonparametric model for short-term travel time prediction using bluetooth data. *J Intell Transp Syst* 17(2):165–175
- Nantes A, Ngoduy D, Miska M, Chung E (2015) Probabilistic travel time progression and its application to automatic vehicle identification data. *Transp Res Part B Methodol* 81:131–145

- Liu X, Chien S, Kim K (2012) Evaluation of floating car technologies for travel time estimation. *J Mod Transp* 20(1):49–56
- Blogg, M., Semler, C., Hingorani, M. & Troutbeck, R. (2010) Travel Time And Origin-Destination Data Collection Using Bluetooth MAC Address Readers, Australasian Transport Research Forum 2010 Proceedings, pp. 1-15.
- Elliot, A., Yen, D.C. & Shih, D.S. (2004) Bluetooth Technology: An Exploratory Study Of The Analysis And Implementation Frameworks, *Computer Standards & Interfaces*, Vol. 26, pp. 263–277.
- Elliot, M. & Broughton, J. (2004) How Methods And Levels Of Policing Affect Road Casualty Rates, PROJECT REPORT PR SE/924/04.
- Yucel, S., Tuydes-Yaman, H., Altintasi, O. & Ozen, M. (2013) Determination of Vehicular Travel Patterns in an Urban Location Using Bluetooth Technology, ITS America Annual Meeting and Expo, Nashville.