



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**SİNYALİZE KAVŞAKLARDA ETKİLEŞİMLİ
VE ADAPTİF TRAFİK YÖNETİM MODELİ**

Fuat YALÇINLI

DOKTORA TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Fuat YALÇINLI tarafından hazırlanan “Sinyalize Kavşaklarda Etkileşimli ve Adaptif Trafik Yönetim Modeli” adlı tez çalışması 13/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Muciz ÖZCAN
(Necmettin Erbakan Üniversitesi)

.....

Danışman

Prof. Dr. Bayram AKDEMİR
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Doç. Dr. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Dilek UZER
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Seyit Alperen ÇELTEK
(Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
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.

Fuat YALÇINLI

Tarih: 13.01.2025

ÖZET

DOKTORA TEZİ

SİNYALİZE KAVŞAKLARDA ETKİLEŞİMLİ VE ADAPTİF TRAFİK YÖNETİM MODELİ

Fuat YALÇINLI

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

Danışman: Prof. Dr. Bayram AKDEMİR
2. Danışman: Doç. Dr. Akif DURDU

2025, 120 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Bayram AKDEMİR
Prof. Dr. Muciz ÖZCAN
Doç. Dr. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN
Dr. Öğr. Üyesi Dilek UZER
Dr. Öğr. Üyesi Seyit Alperen ÇELTEK

Nüfus ile birlikte artan şehirleşme oranı ister istemez insanların ulaşımında kullandıkları araçların neden olduğu trafik yoğunluğunu da her geç gün artırmaktadır. Bu nedenle trafiğin yönetimi artık şehir yaşamında en kritik unsurlardan biri olmuştur. İnsanların ulaşımında kullandıkları taşıt yollarının üzerindeki en büyük sorun yolların birbiriyle kesiştiği ve kesintisiz trafik akışını engelleyen sinyalize kavşaklardır. Trafikte meydana gelen gecikmeleri önlemede, sinyalizasyon kontrollerinin çok büyük bir role sahip olduğu görülmektedir. Bu kavşaklarda trafiğin en verimli şekilde akışının sağlanması, hem daha az yakıt tüketimine sebep olması nedeniyle ülke ekonomisine hem de içten yanmalı taşıtların sebep olduğu karbondioksit emisyonunun azaltılması nedeniyle daha sürdürülebilir bir çevre oluşturulmasına sağlayacağı katkılar çok önemlidir. Bu doktora tez çalışması kapsamında trafik akışına olumlu katkılar sağlayacak çalışmalar yapılarak sinyalize kavşaklar üzerinde işletilebilecek bir adaptif trafik yönetim modeli geliştirilmiştir. Kavşaklarda trafik akışını verimli bir şekilde sağlamak ve kontrol etmek üzere geliştirilen adaptif model, trafik yoğunluğuna göre minimum ve maksimum süre aralığında faz işletimi ve faz atlama özelliklerine sahiptir. Geliştirilen bu modelin diğer sinyalize kavşak kontrollerinden en belirgin farklılığı ise sıralı değil, esnek faz yapısına sahip olarak kavşaklarda trafik akışını kontrol etmesidir. Geliştirilen adaptif trafik yönetim modelinin sonuçlarını irdelemek ve karşılaştırılması muhtemel sorunların çözümü için çalışma sonucunda elde edilen adaptif model, Antalya ili sınırları içerisinde bulunan Kemer ilçesi yolu üzerindeki Heybe Kavşağı'na ait gerçek kavşak verileri kullanılarak SUMO simülasyon programında birebir simüle edilmiştir. Bu simülasyon çalışması sonucunda elde edilen adaptif trafik yönetim modeli, bu kavşakta uygulanmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanarak değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada, SUMO programından elde edilen iyileştirme sonuçları farklı yöntemlerle doğrulanmıştır. Webster teoremi ile Heybe Kavşağı sabit zamanlı sinyalizasyon sistemi verileri üzerinden gecikme hesaplaması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, kamera üzerinden görsel tespit metodu ile araçların gecikme değerleri saptanmış ve araç başına gecikme parametresi tespit edilmiştir. Son olarak AIMSUN simülasyon programında Heybe Kavşağı modellenmiş ve SUMO simülasyon işletimi ile aynı trafik verilerinde işletilmiştir. Böylelikle, Webster teoremi, görsel tespit metodu ve AIMSUN simülasyon programı olmak üzere üç farklı doğrulama yöntemi uygulanmıştır. Bütün doğrulama yöntemlerinden

SUMO simülasyon çıktısı ile benzer sonuçlar elde edilmiştir. Böylelikle geliştirilen adaptif trafik yönetim modelinin kavşağa olan etki sonuçları doğrulanmıştır.

Bu tez çalışmasında, son olarak performans ölçüm sensörü tasarlanmış ve Heybe Kavşağı'na yerleştirilmiştir. Bluetooth sinyalleri ile sinyalizasyon kavşaklarda gerçek zamanlı performans ölçümü yapabilecek bir sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kavşak kollarındaki araçların bluetooth sinyalleri üzerinden seyahat sürelerini ölçerek sinyalizasyon sisteminden kaynaklı gecikme değerlerini tespit edebilen performans ölçüm sistemi, geliştirilen adaptif trafik yönetim modelinin tüm gün kavşaktaki etkisini tespit etmede kullanılmıştır. Çalışmada geliştirilen adaptif trafik yönetim modelinin sonuçları bu çalışmada tasarlanan performans ölçüm sistemi ile tespit edilmiştir. Tespit edilen sonuçlara göre geliştirilen adaptif trafik yönetim modelinin her bir alt bileşenin performansa etkisi sabit zamanlı sinyalizasyon sistemine göre olumlu yöndedir. Minimum maksimum süre aralığı faz işletimi, faz atlama, matris yapı ve dinamik faz özellikleri sinyalizasyon kavşak performansını daha verimli hale getirmiştir.

Çalışma sonucunda, günlük ortalama 50.000 adet aracın kullandığı Heybe Kavşağı'nda geliştirilen adaptif trafik yönetim modelinin sabah bir saatlik yoğun trafikte uygulanması ile sabit zamanlı sinyalizasyon yönetimine göre araç başına ortalama gecikme 28,1 saniye/taşıt, bekleme süresi 28,5 saniye/taşıt azaltılmış ve ortalama hız 0,91 kilometre/saat artırılmıştır. Ayrıca, tasarlanan performans ölçüm sistemi ile tüm gün yapılan ölçümlerde, geliştirilen adaptif trafik yönetim modelinin Heybe Kavşağı'na uygulanması ile sabit zamanlı sinyalizasyon yönetimine göre araç başına ortalama gecikmede %38,42 oranında iyileşme sağladığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Adaptif sinyalizasyon, Akıllı trafik, Akıllı ulaşım, Bluetooth trafik sensörü, Gecikme parametresi, Performans ölçüm sistemi, Sinyalizasyon kavşak, Sinyalizasyon kavşak simülasyonu ve modelleme.

ABSTRACT

PhD THESIS

INTERACTIVE AND ADAPTIVE TRAFFIC MANAGEMENT MODEL AT SIGNALIZED INTERSECTIONS

Fuat YALÇINLI

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

**Advisor: Prof. Dr. Bayram AKDEMİR
2nd Advisor: Assoc. Prof. Dr. Akif DURDU**

2025, 120 Pages

Jury

**Prof. Dr. Bayram AKDEMİR
Prof. Dr. Muciz ÖZCAN
Assoc. Prof. Dr. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN
Asst. Prof. Dr. Dilek UZER
Asst. Prof. Dr. Seyit Alperen ÇELTEK**

The increasing urbanization rate along with the population inevitably increases the traffic density caused by the vehicles people use for transportation day by day. For this reason, traffic management has become one of the most critical elements in city life. The biggest problem on the roads people use for transportation is the signalized intersections where the roads intersect and prevent uninterrupted traffic flow. It is seen that signalization controls play a very big role in preventing delays in traffic. Ensuring the most efficient flow of traffic at these intersections is very important both for the country's economy by causing less fuel consumption and for the creation of a more sustainable environment by reducing carbon dioxide emissions caused by internal combustion vehicles. Within the scope of this thesis, studies that will make positive contributions to traffic flow were carried out and an adaptive traffic management model that can be operated on signalized intersections was developed. The adaptive model developed to efficiently provide and control traffic flow at intersections has phase operation in the minimum and maximum time range and phase skipping features according to traffic density. The most significant difference of this developed model from other signalized intersection controls is that it controls traffic flow at intersections not sequentially but with a flexible phase structure. In order to examine the results of the developed adaptive traffic management model and to solve possible problems, the adaptive model obtained as a result of the study was simulated one-to-one in the SUMO simulation program using real intersection data belonging to Heybe Intersection on the Kemer district road within the borders of Antalya province. The adaptive traffic management model obtained as a result of this simulation study was applied to this intersection and the obtained results were interpreted and evaluated.

In this study, the improvement results obtained from the SUMO program were verified with different methods. Delay calculation was performed on the Heybe Intersection fixed-time signaling system data with Webster's theorem. In addition, the delay values of the vehicles were determined with the visual detection method via the camera and the delay parameter per vehicle was calculated. Finally, the Heybe Intersection was modeled in the AIMSUN simulation program and operated on the same traffic data with the SUMO simulation operation. Thus, three different verification methods were applied, namely Webster's theorem, the visual detection method and the AIMSUN simulation program. Similar

results were obtained with the SUMO simulation output from all verification methods. Thus, the effect results of the designed adaptive intersection control model on the intersection were verified.

Finally, a performance measurement sensor was designed in the study and placed at the Heybe Intersection. A system design that can perform real-time performance measurement at signalized intersections with Bluetooth signals was implemented. The performance measurement system, which can detect the delay values originating from the signaling system by measuring the travel times of the vehicles at the intersection arms via Bluetooth signals, was used to determine the effect of the developed adaptive intersection control model on the intersection all day long. The outcomes of the adaptive intersection control model developed in this study were assessed using a performance measurement system specifically designed for this purpose. According to the results, each subcomponent of the adaptive intersection control model positively impacts performance compared to the fixed-time signaling system. Key features, including minimum and maximum time interval phase time, phase skipping, the variable matrix structure, and adaptive phase configuration, were enhanced the efficiency of the signalized intersection.

As a result of the study, the application of the developed adaptive traffic management model in the morning one-hour peak traffic at Heybe Intersection, where serves an average of 50,000 vehicles daily, reduced the average delay per vehicle by 28.1 seconds/vehicle, reduced the waiting time by 28.5 seconds/vehicle and increased the average speed by 0.91 kilometers/hour compared to the fixed-time signaling management. In addition, in the measurements made throughout the day with the designed performance measurement system, it was determined that the application of the developed adaptive traffic management model to Heybe Intersection provided an improvement of 38.42% in the average delay per vehicle compared to the fixed-time signaling management.

Keywords: Adaptive signaling, Smart traffic, Smart transportation, Bluetooth traffic sensor, Delay parameter, Performance measurement system, Signalized intersection, Signalized intersection simulation and modeling.

ÖNSÖZ

Bu doktora tezini hazırlama sürecinde bana destek olan, bilgi ve tecrübeleriyle yol gösteren, akademik danışmanlarım Prof. Dr. Bayram AKDEMİR ve Doç. Dr. Akif DURDU'ya en derin teşekkürlerimi sunarım. Kendi alanlarında derin bilgi ve deneyim sahibi olan hocalarım, bilimsel araştırma sürecimin her adımında bana rehberlik ederek tezimin oluşmasına büyük katkı sağlamışlardır.

Doktora sürecimde değerli katkıları için tez izleme komitesi ve tez savunma komitesi jüri üyeleri arasında bulunan değerli öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Ayrıca, bu zorlu süreçte yanımda olan ve manevi desteklerini her zaman hissettiğim değerli eşim Senem YALÇINLI ve sevgili kızım Eylül YALÇINLI'ya teşekkürü bir borç bilirim. Onların sabrı, anlayışı ve sevgisi, bu çalışmanın en önemli motivasyon kaynaklarından biri olmuştur.

İlkokuldan doktora sürecine kadar tüm eğitim hayatım boyunca desteklerini her zaman gösteren annem Gülümser YALÇINLI, babam Hüseyin YALÇINLI ve tüm aile üyelerime şükranlarımı sunarım.

Bu tezde yer alan araştırmaların gerçekleştirilmesi için olanak sağlayan Karayolları Genel Müdürlüğü, Antalya Büyükşehir Belediyesi ve Mosaş Akıllı Ulaşım Teknolojileri A.Ş. kurumlarına ve yöneticilerine de minnettarım. Bu kurumların desteği olmadan bu çalışmanın gerçekleştirilmesi mümkün olmazdı.

Son olarak, doktora sürecimde bana katkı sağlayan tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim. Onların değerli destekleri, bu çalışmanın her aşamasında bana güç vermiştir.

Fuat YALÇINLI
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	7
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	18
3.1. Sinyalizasyon Temel Kavramları ve İzole Kavşak Sinyalizasyon Yönetim Biçimleri	18
3.1.1. Temel kavramlar	18
3.1.2. Sabit zamanlı sinyalizasyon yönetimi.....	20
3.1.3. Yarı trafik uyarmalı sinyalizasyon yönetimi	21
3.1.4. Tam trafik uyarmalı sinyalizasyon yönetimi	23
3.1.5. Talep uyarmalı sinyalizasyon yönetimi	25
3.1.6. Adaptif sinyalizasyon yönetimi	27
3.2. Adaptif Sinyalizasyon Yönetiminde Kullanılan Sensör Teknolojileri	30
3.2.1. Görüntü işleme teknolojisi tabanlı sensörler	30
3.2.2. Loop (endüktif) sensör.....	33
3.2.3. LIDAR sensör	35
3.2.4. Radar sensör.....	37
3.3. Sinyalize Kavşak Performans Parametreleri.....	39
3.3.1. Gecikme	40
3.3.2. Bekleme süresi	42
3.3.3. Ortalama hız.....	43
3.4. Sinyalize Kavşaklar için Gecikme Tahmin Modelleri.....	45
3.4.1. Webster yöntemi	45
3.4.2. Akçelik yöntemi.....	46
3.4.3. HCM yöntemi	48
3.5. Sinyalize Kavşak Modellemede Kullanılan Simülasyon Programları.....	50
3.5.1. AIMSUN simülasyon programı	51
3.5.2. SUMO simülasyon programı	54
3.6. Uygulama Kavşağı Yapısı ve Özellikleri	57
3.7. Uygulama Kavşağı Modelleme	60
3.8. Adaptif Trafik Yönetim Modeli.....	62
3.8.1. Minimum maksimum süre aralığı faz işletimi	63
3.8.2. Faz atlama	66
3.8.3. Matris yapı ve dinamik faz	68
3.9. Performans Ölçüm Sistemi Tasarımı	70

3.9.1. Bluetooth tabanlı trafik analiz dedektörü.....	72
3.9.2. Bluetooth sinyali tabanlı gerçek zamanlı performans ölçüm sistemi uygulaması genel esasları	76
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	79
4.1. Genel Sonuçlar.....	79
4.2. Webster Yöntemi ile Doğrulama	80
4.3. Görsel Tespit Yöntemi ile Doğrulama	83
4.4. AIMSUN Simülasyon Programı ile Doğrulama.....	88
4.5. Performans Ölçüm Sistemi Uygulaması ve Tespit Edilen Sonuçlar	91
4.5.1. Bluetooth tabanlı trafik analiz dedektörü uygulama yerleşim yapıları	91
4.5.2. Bluetooth üzerinden tespit edilen veriler	94
4.5.3. Performans ölçüm sistemi sonuçları	94
4.6. Tartışma	101
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	107
5.1. Sonuçlar	107
5.2. Öneriler	109
KAYNAKLAR	111

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

c	: Devre süresi (saniye)
d	: Taşıt başına ortalama gecikme (saniye/taşıt)
d_1	: Değişmeyen varışlar varsayıldığında rutin kontrol gecikmesi (saniye/taşıt)
d_2	: Rastgele varışların etkisini hesaba katmak için artımlı gecikme (saniye/taşıt)
d_3	: Analiz dönemindeki tüm araçlar için gecikmeyi hesaba katan ilk kuyruk gecikmesi (saniye/taşıt)
D	: Toplam gecikme (saniye)
G	: Eğim (%)
N_0	: Ortalama kuyruk uzunluğu (taşıt)
PF	: Değişmeyen gecikme düzeltme faktörü
q	: Akım (taşıt/saniye)
qc	: Her devre süresinde gelen ortalama taşıt sayısı (taşıt)
Q	: Kapasite (taşıt/saat)
s	: Doygun akım (taşıt/saat)
SL	: Hız limiti (kilometre/saat)
TL	: Şerit sayısı (adet)
u	: Yeşil faz süresi oranı
x	: Doygunluk oranı
y	: Akım oranı
λ	: Yeşil sürenin devre süresine oranı

Kısaltmalar

AFH	: Adaptif Frekans Atlamalı Yayılma Spektrumu
AUS	: Akıllı Ulaşım Sistemleri
BS	: Bluetooth Sensör
CAV	: Bağlantılı ve Otonom Araçlar
CVIC	: Cooperative Vehicle Intersection Control
GABNOR	: Genetic Algorithm Based Network Optimization in Real-time
HCM	: Highway Capacity Manual
ISM	: Endüstriyel, Bilimsel ve Tıbbi
LIDAR	: Light Detection and Ranging
MAC	: Media Access Control
OBU	: On-Board Unit
PODE	: Piecewise Optimum Delay Estimation
RF	: Radyo Frekansı
sa	: Saat
SCATS	: Sydney Coordinated Adaptive Traffic System

sn	: Saniye
SUMO	: Simulation of Urban Mobility
TA	: Taşıt Trafik Akımı
ToF	: Time of Flight
TRACI	: Traffic Control Interface
TSPN	: Zamanlanmış Senkronize Petri Ağı
VANET	: Araçlar Arası Tasarsız Ağlar
V2I	: Vehicle to Infrastructure
V2X	: Vehicle to Everything



1. GİRİŞ

Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS), günümüz şehirlerinde artan nüfus ve araç sayısı ile birlikte yaşanan trafik sıkışıklığı, güvenlik sorunları ve çevresel kirlilik gibi problemlerin çözümü için geliştirilmiş, teknoloji tabanlı yenilikçi sistemlerdir. AUS, bilgi ve iletişim teknolojilerinin ulaşım altyapılarına entegre edilmesiyle, ulaşım süreçlerini daha güvenli, verimli ve sürdürülebilir hale getirmektedir. Bu sistemlerin temel amacı, ulaşım ağlarını dijitalleştirerek trafik akışını optimize etmek, seyahat güvenliğini artırmak ve yolculuk deneyimini iyileştirmektir. AUS, trafik verilerini gerçek zamanlı olarak toplamakta, analiz etmekte ve bu veriler üzerinden trafiği yönlendiren akıllı kararlar almaktadır. Bu yönüyle AUS, sürücü, yaya ve toplu taşıma araçları gibi tüm yol kullanıcıları için daha güvenli ve rahat bir ulaşım ortamı sunmaktadır (Karlı ve Çelikyay, 2022).

AUS'un şehirler için önemi giderek artmaktadır çünkü trafik sıkışıklığı, özellikle büyük şehirlerde yaşam kalitesini düşüren ve ekonomik kayıplara yol açan ciddi bir sorundur. Artan araç trafiği, yol ağlarında kapasitenin üstünde yüklenmelere, uzun bekleme sürelerine ve büyük miktarda yakıt israfına neden olurken, aynı zamanda hava kirliliği ve karbondioksit emisyonlarını da artırmaktadır. AUS sayesinde trafik akışının düzenlenmesi, yakıt tüketiminin azaltılması ve çevresel etkilerin minimuma indirilmesi mümkündür (Kenanoğlu ve Aydın, 2018). Bunun yanında, AUS ile acil durum araçları ve ambulanslar gibi kritik taşıtlar için öncelikli yol açma, kaza tespiti ve hızlı müdahale sağlanarak can kayıplarının azaltılması da mümkündür. Bu sistemlerin sağladığı en büyük avantajlardan biri, insan hatasından kaynaklanan trafik kazalarını azaltarak yol güvenliğini önemli ölçüde artırmasıdır.

Trafik yönetiminin en kritik bileşenlerinden biri sinyalizasyon sistemleridir. AUS alanında yapılan çalışmaların en önemli bileşenlerinden biri sinyalizasyon sistemleri üzerine yapılan çalışmalardır. Sinyalizasyon sistemlerinin yönetimi, şehir içi trafik düzeninin sağlanmasında ve yol güvenliğinin artırılmasında kilit bir rol oynamaktadır. Trafik sinyalizasyonu, kavşaklardaki araç ve yaya trafiğini düzenleyerek kazaların önlenmesine yardımcı olmaktadır. Bu sistemlerin etkin bir şekilde yönetilmesi, şehir trafiğinin akıcı ve güvenli bir şekilde devam etmesi açısından son derece kritiktir. Sinyalizasyon sistemleri, kavşaklarda araçların güvenli bir şekilde yönlendirilmesini sağlarken, doğru yönetilmediğinde trafik sıkışıklıklarına ve karmaşaya neden olabilmektedir. Bu nedenle, trafik ışıklarının doğru zamanlamalarla

ayarlanması, trafik akışını optimize etmek ve bekleme sürelerini en aza indirmek için hayati önemdedir.

Sinyalizasyon sistemlerinin yönetimi, sadece trafik akışını düzenlemekle kalmaz, aynı zamanda yol güvenliğini artırmaktadır. Özellikle yayaların karşıdan karşıya geçişlerinde, ışık sürelerinin iyi ayarlanması ve yaya önceliği gibi unsurların göz önünde bulundurulması, kazaların önlenmesine katkı sağlamaktadır. Yanlış ayarlanmış sinyaller, sürücülerde ani durma ve kalkma gibi tehlikeli durumlar yaratabilmektedir, bu da trafik kazalarına yol açabilmektedir. Bu nedenle, trafik mühendisliği ve sinyalizasyon yönetimi, şehirlerdeki trafik kazalarının azaltılmasında önemli bir yere sahiptir. Ayrıca sinyalizasyon sistemlerinin yönetimi, çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemlidir. Trafik ışıklarında sık sık dur-kalk yapmak, araçların daha fazla yakıt tüketmesine ve çevreye daha fazla zararlı emisyon salmasına neden olmaktadır. Doğru bir sinyalizasyon yönetimi, trafik ışıklarının sürelerinin optimize edilmesini sağlayarak araçların durma ve kalkma sayısını azaltmaktadır. Böylece yakıt tüketimi düşerken, aynı zamanda şehirdeki karbon emisyonları da azalmaktadır. Bu durum hem ekonomik tasarruf sağlamakta hem de çevresel kirliliğin önlenmesine katkıda bulunmaktadır.

Toplu taşıma araçları da sinyalizasyon sistemlerinin doğru yönetilmesinden doğrudan fayda sağlamaktadır. İyi yönetilen bir sinyalizasyon sistemi, otobüsler ve tramvaylar gibi toplu taşıma araçlarına öncelik tanıyarak ya da toplu taşıma araçlarının daha kısa sürede kavşaktan geçişini sağlayarak bu araçların trafikte daha hızlı hareket etmelerini sağlamaktadır (Hounsell ve diğ., 2004). Bu, toplu taşımanın daha cazip hale gelmesine ve bireysel araç kullanımının azalmasına katkıda bulunmaktadır, dolayısıyla genel trafik sıkışıklığı da hafiflemektedir.

Sinyalizasyon sistemlerinin yönetimi, modern şehirlerde esneklik ve verimlilik sağlamaktadır. AUS'a entegre edilmiş sinyalizasyonlar, gerçek zamanlı veriler toplayarak trafik yoğunluğuna göre anlık ayarlamalar yapabilmektedir. Bu, özellikle yoğun kavşaklarda ve farklı saat dilimlerindeki trafik akışında daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Bu tür dinamik yönetim, sadece trafik sıkışıklıklarını azaltmakla kalmamakta, aynı zamanda trafik yönetimini daha proaktif ve sürdürülebilir bir hale getirmektedir.

AUS içerisinde yer alan adaptif sinyalizasyon sistemleri, trafik sinyalizasyonunda geleneksel bir yapının devrimi niteliğinde bir gelişmedir. Geleneksel sinyalizasyon sistemleri, belirli bir zaman planına göre çalışırken, adaptif sinyalizasyon

sistemleri, gerçek zamanlı trafik verilerine dayanarak sinyalleri sürekli olarak uyarlayan ve optimize eden bir yapıdadır. Bu sistemler, trafik ışıklarını sabit zaman dilimleriyle değil, o anki trafik yoğunluğuna ve yol koşullarına göre anlık olarak ayarlamaktadır. Böylece, trafik ışıklarının belirlenmiş sürelerle çalışması yerine, araç yoğunluğuna göre dinamik olarak değişen bir düzenleme yapılmaktadır (Wang ve diğ., 2018). Örneğin, trafiğin yoğun olduğu bir yöndeki sinyal süresi uzatılırken, diğer yöndeki sinyal süreleri kısaltılarak trafiğin dengeli bir şekilde akması sağlanmaktadır. Bu sayede, araçların dur-kalk yapma sıklığı azalmakta, yolculuk süreleri kısaltılmakta, karbondioksit emisyonu azalmakta ve yakıt tüketimi optimize edilmektedir.

Adaptif sinyalizasyon sistemlerinin en önemli avantajlarından biri, trafik sıkışıklığını azaltarak yol ağının verimliliğini artırmasıdır (Lee ve diğ., 2005). Geleneksel sabit zamanlı sinyalizasyon sistemlerinde, trafik koşullarındaki değişiklikler göz ardı edilmekte ve bu da çoğu zaman gereksiz bekleme sürelerine yol açmaktadır. Ancak, adaptif sistemlerde trafik akışı sürekli izlenmekte ve sinyal süreleri anlık olarak optimize edilmektedir. Bu sistemler, özellikle büyük şehirlerde ve yoğun kavşaklarda trafik yönetiminde büyük kolaylık sağlamaktadır. Bu sistemlerin uygulanmasıyla, trafik yoğunluğu daha dengeli bir şekilde dağıtılabilmekte, araçların durma sıklığı azaltılmakta ve böylece trafikte akıcılık sağlanmaktadır. Ayrıca, şehir içindeki yolculuk süreleri de önemli ölçüde kısaltılmaktadır, bu da hem bireysel sürücüler hem de toplu taşıma araçları için büyük bir avantaj sağlamaktadır. Adaptif sinyalizasyon sistemlerinin bir diğer önemli etkisi, yakıt tüketimi ve çevresel etkiyi azaltmasıdır. Trafik ışıklarında dur-kalk yapan araçlar, düzenli bir hızla hareket eden araçlara göre daha fazla yakıt tüketmektedirler ve bu da karbon emisyonlarının artmasına yol açmaktadır. Adaptif sinyalizasyon sistemleri, araçların daha az durmasını sağlayarak yakıt tasarrufuna yardımcı olmakta ve emisyon miktarlarını düşürmektedir. Bu durum, sadece ekonomik kazanç sağlamaz, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da büyük bir öneme sahiptir. Ayrıca, trafik ışıklarının daha verimli kullanılması, trafik güvenliğini artırarak kazaların önlenmesine de katkıda bulunmaktadır.

Tez çalışmasında, adaptif trafik yönetim modeli geliştirilmiştir. Antalya ili sınırlarında bulunan Heybe Kavşağı gerçek trafik verileri ve gerçek geometri ile birebir modellenmiş ve işletilmiştir. Geliştirilen adaptif trafik yönetim modeli kodları SUMO (Simulation of Urban Mobility) simülasyon ortamında işletilerek sonuçlar paylaşılmıştır. Geliştirilen adaptif trafik yönetim modelinin özgün yönü fazların matris yapısı ile çalışmasıdır. Matris yapı sayesinde faz düzenlerine esneklik kazandırılmış ve

trafik verilerine göre faz alternatifleri oluşturulmuştur. Bu da sinyalize kavşak yönetiminin verimini daha da öne taşımaktadır. Geliştirilen adaptif trafik yönetim modeli, trafik akım bazlı çalışan özgün bir modeldir. Özgün yönü, trafik akımlarının sürelerini artırıp ya da azaltabilen, ilgili fazlarda araç yoksa fazı direkt atlayabilen ve faz konfigürasyonlarını trafik durumuna göre seçebilen bir yapıya sahip olmasıdır. Geliştirilen adaptif trafik yönetim modeli, Heybe Kavşağı'na uygulanmış ve kavşağa etkileri ortaya çıkarılmıştır. Tez çalışmasında, elde edilen sonuçların doğrulama çalışmaları da yürütülmüştür. Doğrulama yöntemlerinde, Webster teoremi, görsel tespit yöntemi ve AIMSUN simülasyon programı kullanılmıştır.

Adaptif sinyalizasyon sistemlerinin performansını doğru bir şekilde ölçmek, sistemin etkinliğini değerlendirmek için kritik bir gerekliliktir. Performans ölçümü, bu sistemlerin trafik akışına sağladığı katkının ne derece başarılı olduğunu anlamamızı sağlamaktadır. Örneğin, bir kavşakta adaptif sinyalizasyonun uygulanması sonrasında trafik sıkışıklığının ne kadar azaldığı, araçların gecikme sürelerinin ne kadar kısaldığı veya yakıt tüketiminin ne ölçüde düştüğü gibi verilerin titizlikle analiz edilmesi gerekmektedir. Bu analizler sayesinde, sistemin avantajları ve eksiklikleri net bir şekilde ortaya çıkarılabilmektedir. Ayrıca, gelecekte yapılacak iyileştirmeler için temel veriler sunmaktadır.

Performansın doğru bir şekilde ölçülmesi, sistemlerin yaygınlaştırılması ve yeni yatırımların planlanması açısından da önemlidir. Büyük şehirlerdeki karmaşık trafik yapılarında bu tür sistemlerin geniş çaplı uygulanması ciddi maliyetler gerektirmektedir. Ancak, doğru ölçüm ve analizlerle elde edilen veriler, bu yatırımların maliyet-fayda analizini sağlam bir zemine oturtmaktadır. Eğer sistemin verimli olduğu net bir şekilde gösterilemezse, yatırım kararları sorgulanabilir ve kaynakların doğru bir şekilde kullanılıp kullanılmadığı tartışma konusu olabilmektedir. Bu nedenle, performans ölçümü, sadece mevcut sistemlerin değerlendirilmesi açısından değil, gelecekte yapılacak stratejik kararlar için de hayati bir rol oynamaktadır.

Bu çalışmada, farklı yenilik olarak bluetooth verileri üzerinden bir performans ölçüm sistemi tasarlanmıştır. Bluetooth üzerinden alınan veriler üzerine bir yöntem geliştirilmiş ve sinyalize kavşağa ait gecikme parametreleri tespit edilmiştir. Geliştirilen yöntem, adaptif trafik yönetim modeli uygulanan Heybe Kavşağı'na uygulanmıştır. Sinyalize kavşak sabit zamanlı ve geliştirilen adaptif trafik yönetim modeli ile işletilmiş ve iki farklı işletimdeki gecikme parametreleri hesaplanmıştır. Böylelikle, sinyalize kavşağın farklı işletme tiplerinde performansları ortaya konmuştur. Çalışma, sinyalize

kavşaklar üzerindeki çalışmaların performansa etkisinin tespit edileceği evrensel uygulanabilir bir yöntem sunmaktadır. Bu çalışmada geliştirilen yöntem, kavşaklardaki farklı işletim tiplerinin, kavşak geometrisi değişikliklerinin ve kavşaklara kurulan diğer güvenlik sistemlerinin kavşağın performansını nasıl etkilediğini tespit etmek için kullanılabilir.

Çalışmada bluetooth tabanlı trafik sensörü tasarlanarak sinyalize kavşaklar için gerçek zamanlı sistematik bir performans ölçümü sağlanmıştır. Ülkelerdeki sinyalize kavşaklardan sorumlu devlet yetkilileri veya yerel yönetimler için kurulan sistemlerin performanslarının izlenmesi en önemli konulardan biridir. Çalışma bu yönüyle bilime katkı sağlamıştır. Ayrıca, çalışmadaki diğer en önemli bilime katkı geliştirilen performans ölçüm tasarımının adaptif sinyalizasyon sistemleri için bir geri besleme sistemi niteliği olmasıdır. Bluetooth trafik analiz sensörleri verilerinin kontrol merkezine gönderildikten sonra buradaki çeşitli sonuçlar gerçek zamanlı olarak kavşakta çalışan adaptif sinyalizasyon sisteminde kullanılabilir niteliktedir. Yani bluetooth verilerinden çıkan sonuçlar, adaptif sinyalizasyon sistemine geri besleme verisi olarak kullanılırsa kavşak verimi artacaktır.

Tezin sonraki bölümlerinde, sinyalizasyonda kullanılan temel kavramlar ve sinyalizasyon işletim tipleri hakkında bilgiler verilmiştir. Daha sonra, adaptif sinyalizasyon sistemlerinde ve bu tez çalışmasında kullanılan sensörlerle ilgili genel bilgiler yer almaktadır. Tez çalışmasında kullanılan performans parametreleri açıklanmış ve gecikme parametresi üzerine kabul gören teoremler hakkında bilgiler verilmiştir. Materyal konusunda son olarak kullanılan simülasyon programları ile ilgili gerekli açıklamalar yapılmıştır.

Tez çalışmasının sonraki akışında geliştirilen adaptif trafik yönetim modelinin uygulandığı Heybe Kavşağı'na ait detaylar verilmiştir. Geliştirilen adaptif trafik yönetim modelinin detayları alt başlıklar halinde sunulmuş ve performansa etkileri ayrı ayrı ortaya konulmuştur. Daha sonra tez çalışmasında geliştirilen performans ölçüm sistemi tasarımı detayları sunulmuştur. Araştırma sonuçları ve tartışma bölümünde ise geliştirilen adaptif trafik yönetim modelinin tespit edilen sonuçları paylaşılmış ve bu değerler üzerine gerçekleştirilen doğrulama çalışmaları açıklanmıştır. Webster teoremi, görsel tespit yöntemi ve AIMSUN simülasyon programı üzerinde yürütülen doğrulama çalışmalarının detayları ve sonuçları paylaşılmıştır. Son olarak tez çalışmasında tasarlanan performans ölçüm sisteminin Heybe Kavşağı'na uygulanması ile geliştirilen adaptif trafik yönetim modelinin tüm gün kavşak performansına etkisinin nasıl

ölçüldüğünün detayları anlatılmış ve sonuçları paylaşılmıştır. Tartışma bölümünde benzer çalışmalara yer verilmiş ve sonuçlar-öneriler bölümünde ise tez çalışmasından elde edilen sonuçlar özetlenmiş ve geleceğe dair öneriler sunulmuştur.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Günümüzde, sinyalize kavşaklardaki trafik yoğunlukları özellikle zirve saatlerde oldukça büyük bir problem haline gelmiştir. Şehirlerde her geçen gün trafiğe katılan yeni araçlar da düşünüldüğünde trafik yönetiminde sürdürülebilir yeniliklere ihtiyaç duyulduğu çok açıktır. Tez çalışmasında, bu ihtiyaca yönelik uygun materyaller üzerine kurulu bir düzende adaptif trafik yönetim modeli ve gerçek zamanlı performans ölçüm sistemi geliştirilmiş ve uygulanmıştır.

Sinyalize kavşaklardaki ya da belirli arterdeki trafiğin verimli yönetimine yönelik birçok önemli çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların ortak özelliği, kavşaklardaki ya da arter üzerindeki trafiği, değişen koşullara ve trafik verilerine göre adaptif yönetimi amaçlamasıdır.

Wolshon ve Taylor (1999), dünyada yaygın olarak kullanılan adaptif sinyalizasyon kontrol stratejilerinden Sydney Coordinated Adaptive Traffic System (SCATS)'i incelemiştir. Çalışmada, hem sinyal zamanlamalarını saatte bir değiştiren bir strateji hem de SCATS sinyal kontrolü altında kavşak gecikmesini hesaplamak için makroskobik bir simülasyon prosedürü kullanılmıştır. Çalışmanın genel sonucunda SCATS'ın gecikmeyi daha eşit bir şekilde dağıttığı tespit edilmiştir. Ancak bazı durumlarda, toplam kavşak gecikmesinde artış meydana gelmiştir. SCATS, düşük hacimli trafik dönemlerinde, yüksek hacimli trafik dönemlerine kıyasla gecikmeyi azaltmada daha etkilidir.

Wen ve diğ. (2007) tarafından yapılan çalışmada trafik sinyal kontrol sistemleri için takviyeli öğrenmeye dayalı stokastik bir trafik sinyal kontrol modeli tasarlanmıştır. Model, dört kollu sinyalli kavşakta test edilmiş ve tam trafik uyarmalı sinyalizasyon sistemi ile karşılaştırılmıştır. Takviyeli öğrenmeye dayalı adaptif trafik sinyal kontrol modeli kullanarak yapılan simülasyon sonuçları, özellikle aşırı doymuş trafik talebi, kazalar ve tıkanıklıklar gibi özel olaylar durumunda tam trafik uyarmalı sinyalizasyon sistemine göre önemli bir iyileştirme göstermektedir. Çalışmada geliştirilen takviyeli öğrenmeye dayalı adaptif trafik sinyal kontrol modeli ile taşıt başına düşen ortalama gecikme, tam trafik uyarmalı sinyalizasyon sistemine kıyasla %22,7 oranında azaltılmıştır.

Shao (2009), izole kavşak ve trafik ağı yönetimi için adaptif trafik yönetim modelleri ortaya koymuştur. İzole kavşak için ve trafik ağı için Piecewise Optimum Delay Estimation (PODE) ve Genetic Algorithm Based Network Optimization in Real-

time (GABNOR) adlı verilen iki farklı adaptif trafik yönetim modeli geliştirilmiştir. PODE, gerçek zamanlı trafiği girdi olarak kullanarak, parça parça sistem gecikmesini en aza indiren faz ve zamanlama kararları için kombinasyonları dinamik olarak aramaktadır. GABNOR, genetik algoritmanın gerçek zamanlı olarak uygulanmasını ele almıştır. PODE modeli izole kavşakta, GABNOR modeli ise trafik ağında kullanılmıştır. PODE için elde edilen sonuçlarda, izole kavşaklardaki trafik sıkışıklığı sorununu çözmeye pozitif bir potansiyel görülmektedir. GABNOR için elde edilen sonuçlarda ise, sadece arter trafik yönetiminde değil, aynı zamanda matris trafik ağını da optimize etme konusunda verimli olduğu tespit edilmiştir. Paralel hesaplama özelliği, GABNOR'un tüm trafik ağını gerçek zamanlı olarak optimize etmesine yardımcı olduğu görülmüştür.

Soh ve diğ. (2011) tarafından sinyalize kavşak yönetimi için Adaptif Sinirsel-Bulanık Çıkarım Sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem, kavşak sürelerini otomatik olarak ayarlayabilmek ve gelecekteki trafik davranışını tahmin etmek için geçmiş verilerden öğrenen modelleri sentezlemek için geliştirilmiştir. Tasarlanan trafik sinyal kontrolörünün performansı test edilmiş ve geleneksel kontrolörle ve bulanık kontrolörle karşılaştırılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, geliştirilen trafik sinyal kontrolörünün uygulandığı dört kollu izole kavşak için ortalama bekleme süresi, kuyruk uzunluğu ve gecikme süresi değerleri kullanılan diğer kontrolörlere kıyasla en düşüktür.

Chen ve Sun (2016) tarafından yapılan çalışmada araç varış tahmin modeli ve sinyal optimizasyon algoritmasından oluşan bir adaptif kontrol yöntemi önerilmiştir. Gerçek zamanlı sinyal kontrol algoritması, faz yapılandırmasını destekleyen bir dinamik programlama yapısına dayanarak formüle edilmiştir. Geliştirilen adaptif kontrol yöntemi ile gecikmenin ve kuyruk uzunluğunun en aza indirilmesi, verimin ise en üst düzeye çıkarılması hedeflenmiştir. Önerilen adaptif kontrol yöntemi, gerçek bir sinyalli kavşağın VISSIM simülasyon programı üzerinde modellenmesi ile uygulanmıştır. Geliştirilen adaptif kontrol yönteminin geleneksel yöntemlere göre daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Yu ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmada izole kavşaklardaki sinyalizasyon yönetimi için bulanık programlama yaklaşımına dayalı yeni bir yöntem önerilmiştir. Yöntemde, trafik kapasitesi, araç gecikmesi, araç durma sayısı ve egzoz emisyonu verilerinin optimizasyonu hedef olarak belirlenmiştir. Yeni yöntem, geleneksel yöntem ile VISSIM yazılımı aracılığıyla karşılaştırılmış ve analiz edilmiştir. Bu çalışmada optimize edilen sinyal zamanlamasının, araç gecikmelerini ve durma

sayılarını etkili bir şekilde azalttığı ve bunun da kavşağın trafik kapasitesini artırdığı sonucuna varılmıştır.

Yu ve diğ. (2017) tarafından yapılan çalışmada hem araç hem de yaya trafiğini baz alan bir sinyalizasyon sistemi önerilmiştir. Bu çalışma, doymamış araç trafiği koşullarını varsayarak, bir ve iki aşamalı yaya geçitlerine sahip izole bir kavşak için trafik sinyali zamanlamalarını optimize etmek üzere bir programlama yaklaşımı önermektedir. Farklı yaya geçitlerindeki yayaların ve araçların toplam ağırlıklı gecikmesinin amaç fonksiyonu olarak alınarak formüle edildiği bir model sunulmuştur. Yapılan çalışmalar neticesinde, iki aşamalı bir yaya geçidinin hem araç hem de yaya gecikmeleri açısından tek aşamalı bir yaya geçidine göre daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Wan ve Hwang (2018), adaptif sinyalizasyon kavşaklar için değer tabanlı derin takviyeli öğrenme metodu gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, yinelemeli Bellman denklemine gömülü bir dinamik hesaplama önerilmiştir. Eğitilmiş sinir ağı, ajanların politikası olarak sonlu bir küme içinde optimum bir tahmini değeri açığa çıkarmak için kullanılmıştır. Sonuçlar, eğitilmiş ajanın tüm test durumlarında sabit zamanlı sinyal planından daha iyi performans ortaya koyduğunu ve sistemin toplam gecikmesini %20 oranında azalttığını göstermektedir.

Joo ve diğ. (2020), bir kavşaktan geçen araç sayısını en üst düzeye çıkarmak ve Q-öğrenme kullanarak yollar arasındaki sinyalleri dengelemek için bir trafik sinyal kontrol sistemi önermişlerdir. Bu çalışmada, kuyruk uzunluklarının standart sapmasını ve verimi ana parametreler olarak dikkate alarak Q-öğrenme'ye dayalı bir trafik sinyal kontrol sistemi tasarlanmıştır. Q-öğrenme kullanan diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında, çalışmadaki teknik daha kısa kuyruk uzunluğu ve bekleme süresi ile iyi bir performans göstermiştir.

Li ve diğ. (2020), derin takviyeli öğrenmeyi kullanarak SUMO simülasyon programında adaptif bir trafik sinyal kontrol modeli oluşturmuştur. Çalışmada bir veya daha fazla kavşaktaki araç sayısı ve ortalama hız verileri modele girdi olarak kullanılmıştır. Geliştirilen algoritmalarda, ortalama bekleme süresini azaltmak için hem tek kavşak durumlarında hem de çok kavşak durumlarında uygulanabilir optimum bir trafik sinyali fazı ve süresi sağlanmıştır. Önerilen model, Webster sabit zamanlı kontrol yöntemi ile karşılaştırılmış ve önerilen modelin Webster sabit zamanlı kontrol yöntemine kıyasla hem ortalama bekleme süresini hem de seyahat süresini azalttığı tespit edilmiştir.

Mou (2020), kavşak kapasitesini, gecikme süresini ve durma sayısını optimize etmek için bir sinyalizasyon kontrol modeli oluşturmuştur. Model, döngü süresi, yeşil ışık süresi ve kavşağın her yönündeki maksimum araç sayısı verilerini girdi bilgisi olarak almıştır. Modelde standart yusufçuk algoritması kullanılmıştır ve çözüm kümesinin çeşitliliğini sağlayan bir hibrit mutasyon operatörü ile algoritma iyileştirilmiştir. Önerilen model, gerçek trafik verileri ile simülasyon ortamında Webster modeliyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları, geliştirilen modelin Webster modeline göre daha verimli çalıştığını ortaya koymaktadır.

Alharbi ve diğ. (2021) trafik ışıklarını dinamik olarak kontrol etmek ve yönetmek için yeni bir akıllı trafik kontrol sistemi önermişlerdir. Önerilen adaptif yöntem, kavşağa kurulan uzun menzilli dijital kameralar tarafından çekilen görüntülerin işlenmesiyle değerlendirilen trafik sıklığının seviyesine göre önceliği belirlemeye dayanmaktadır. Simülasyon sonuçları, önerilen yöntemin geleneksel yöntemlere kıyasla kavşaklardaki trafiği yönetmek için verimli bir çözüm ve geliştirme sağladığını göstermektedir.

An ve diğ. (2022) tarafından yapılan çalışmada trafik sinyalizasyon optimizasyonu için kuyruklanmadaki araç sayısını dikkate alarak Garra Rufa'dan esinlenen bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmanın çıktısı SIDRA ile karşılaştırılmış, kalibre edilmiş ve doğrulanmıştır. Ayrıca, daha kapsamlı sonuçlar elde etmek için geliştirilen algoritma genetik algoritma ve parçacık sürü optimizasyonu ile karşılaştırılmıştır. İki farklı kavşakta yapılan analiz sonuçlarına göre, kuyrukta bekleyen araç sayısında geliştirilen model ile A kavşağında %10,1, B kavşağında ise %16,5 azalma meydana gelmiştir.

Madrigal Arteaga ve diğ. (2022) tarafından yapılan çalışmada adaptif sinyalizasyon kavşak yönetiminde bulanık mantık denetleyicisi tasarlanmıştır. Denetleyici, devre süresini trafik akış hızlarına göre dinamik olarak hesaplamaktadır ve trafik akışı ne kadar yüksekse, devre süresi uzunluğu o kadar uzun olmaktadır. Hesaplanan devre süresi, Webster'ın sinyalizasyon yöntemine göre trafik akış hızlarına orantılı olarak farklı fazlara bölünmüştür. Tasarlanan bulanık mantık denetleyicisi, altı aylık bir trafik çalışmasından toplanan verilerle kalibre edilen gerçek izole bir kavşağın mikro simülasyon modeli aracılığıyla test edilmiştir. Sonuçlar, tasarlanan denetleyicinin en çok kullanılan metotlara kıyasla rekabetçi bir performansa sahip olduğunu ve birçok şehir için uygulanabilir bir çözüm olduğunu ortaya koymuştur.

Wei ve He (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada bağlantılı ve otonom araçların (CAV'ler) kavşakları senkron bir şekilde geçmesini sağlayarak kavşaklardaki trafik verimini ve güvenliği artıracak bir kontrol yöntemi oluşturulmuştur. Bu çalışma, izole bir kavşaktaki talep değişimlerini hesaba katarak sanal bir konvoyun oluşumunu ve CAV'lerin işbirlikçi ve senkron geçişini kolaylaştırmak için adaptif bir araç kontrol yöntemi önermektedir. Çalışmadaki simülasyon sonuçları, adaptif olmayan kontrole kıyasla önerilen yöntemin kavşak verimliliğini %18,2 oranında artırabileceğini göstermektedir. Ayrıca, çarpışma süresi sonuçlarına göre önerilen adaptif kontrolün trafik güvenliğini sağlamadaki avantajları vurgulanmaktadır.

Annaswamy (2023), adaptif kontrol ve takviyeli öğrenme yapılarını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. İki yöntemin ayrıntılarını, avantajlarını ve eksikliklerini göstermek için iki belirli dinamik sistem örneği kullanmıştır. Adaptif kontrol, kararlılık, parametre öğrenimi, çevrimiçi kontrol ve sürekli zamanlı sistemler merceğinden sentezlenmiştir. Takviyeli öğrenme ise, en iyilik tabanlı ve veri odaklı bir bakış açısıyla sentezlenmiştir. Karşılaştırıldığında, takviyeli öğrenme yapısında adaptif kontrole göre kararlılık ve sağlamlık açısından ele alınması gereken eksiklikler tespit edilmiştir.

Qiao ve diğ. (2023), V2I (Araçtan Altyapıya) teknolojisi tabanlı bir trafik sinyalizasyon optimizasyon modeli ortaya koymuşlardır. Modelde, V2I teknolojinin zengin araç verisi sağlama yeteneği ile genetik algoritma kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları, önerilen modelin ortalama gecikmeyi ve durma sayısını azaltma anlamında trafik verimliliğini artırabileceğini göstermektedir. Önerilen model, V2I tabanlı sinyal kontrol yöntemi olduğu için özellikle trafik hacmi yüksek kavşaklarda trafik verimliliğini daha da artırabileceğini göstermektedir.

Wei ve Ju (2024) tarafından yapılan çalışmada yapay balık sürüsü algoritmasına dayalı bir adaptif kavşak sinyal kontrolü optimizasyonu yöntemi incelenmiştir. Bu yöntemde, minimum ortalama gecikme ve ortalama durma sayısını amaç fonksiyonları olarak kullanarak sinyal kontrolü için bir optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Deneysel sonuçlar, bu yöntemin ortalama gecikmesinin 7,8 ms, ortalama durma sayısının 2 ve seyahat süresinin 68,4 sn olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlara göre, bu yöntemin trafik sinyali kontrolünde iyi bir optimizasyon etkisine sahip olduğu ve kavşaklarda trafik sıkışıklığını azaltabileceği kanıtlanmıştır.

Adaptif kavşak yönetimlerinde, kavşakta bulunan sensör teknolojilerinden gelen veriler üzerinden yönetim sağlanmaktadır. Adaptif trafik yönetiminde, loop sensörler,

görüntü işleme tabanlı sensörler, LIDAR veya radar gibi sensör teknolojileri kullanılabilir. Adaptif trafik yönetiminde trafik verisi çeşitliliği ve doğruluk oranı çok önemlidir. Trafik verisi çeşitliliği ve doğruluk oranı arttıkça adaptif trafik yönetimi modelleri de daha çok verim sağlamaktadır. Farklı sensör teknolojilerinin kullanıldığı adaptif yönetim sistemleri çalışmaları mevcuttur. Ayrıca, trafik sensörleri üzerine de geliştirme çalışmaları devam etmektedir.

Rachmadi ve diğ. (2011) tarafından yapılan çalışmada görüntü işleme tabanlı kamera sensörleri kullanılarak adaptif trafik sinyal kontrol sistemi tasarlanmıştır. Çalışmada, Temel Bileşen Analizi yapısı, araçları tespit etmek için video karesindeki nesneleri analiz etmekte ve sınıflandırmaktadır. Dağıtılmış Koşul Tatmin Problemi yöntemi ise, her şeritteki sayılan araç sayısına göre her trafik sinyalinin süresini belirlemek için kullanılmıştır. Bu yöntemleri içeren kamera sensöründen araç algılama ve sayma işlemleri gerçekleştirilmiş ve trafik sinyalleri çıkarılan verilere göre adaptif yönetilmiştir. Çalışmada geliştirilen görüntü işleme tabanlı trafik sensörü, normal trafik koşullarında %96,55 doğruluk oranı ile veri tespiti yapmıştır.

Medina ve diğ. (2013), Wavetronix ve MS Sedco şirketleri tarafından üretilen araç tespiti yapabilen iki mikrodalga radar sistemini olumsuz hava koşulları altında sinyalli bir kavşakta değerlendirmişlerdir. Yüksek hızlı rüzgar, yağmur ve tamamen veya kısmen karla kaplı yol koşullarındaki tespitler, normal hava koşulları altındaki veriler ile karşılaştırmalı analiz edilmiştir. Sonuçlar, iki radarın performansının olumsuz hava koşullarında kötüleştiğini ve tespit hatalarının türünün ve sıklığının sisteme bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Genel olarak, rüzgar, ileri tespit bölgesindeki araç algılamalarının hatalarını %50'den fazla artırmıştır. Karla kaplı yolda durma ve ilerleme bölgelerindeki yanlış araç tespitleri artmıştır ve yağmurda, durma ve ilerleme bölgelerinde yanlış ve takılı kalan tespitler meydana gelmiştir. Ayrıca, çalışma yağış yoğunluğu ve rüzgar hızları arttıkça yanlış tespitlerin artma olasılığının yüksek olduğunu göstermiştir. Bu değerlendirmelerden elde edilen sonuçlar, olumsuz hava koşullarının mikrodalga radar algılama sistemleri üzerinde önemli etkileri olduğunu göstererek, araştırmacılara ve uygulayıcılara bu koşullar altında benzer kurulumların potansiyel performansı hakkında bilgi sağlamıştır.

Vidhya ve Banu (2014), trafik yoğunluğu tabanlı bir dinamik trafik sinyal sistemi tasarlamışlardır. Çalışmada, trafik yoğunluğunu saptamak için görüntü işleme teknikleri kullanılmıştır. Araştırmada, kavşakta yakalanan görüntü işlenmekte ve gri tonlamalı görüntüye dönüştürülmektedir. Ardından görüntüde bulunan araç sayısını

hesaplamak için konturun çizildiği eşik değeri hesaplanmaktadır. Araç sayısı hesaplandıktan sonra, hangi kavşak koluna hangi sinyallerin tahsis edileceğine bağlı olarak sinyal sürelerine karar verilmiştir. MATLAB ortamında yapılan çalışmada, sinyalli kavşaklara uygulanabilecek yüksek verimli sonuçlar elde edilmiştir.

Patel ve Rohilla (2020), kızılötesi sensör tabanlı adaptif trafik sinyal kontrol sisteminin bir prototipini geliştirmiştir. Geliştirilen prototip, trafik sinyal parametrelerini ilgili şeritlerdeki araç yoğunluğuna göre ayarlamakta ve trafik operasyonunun verimliliğini artırmaktadır. Kızılötesi sensör tabanlı adaptif trafik sinyal kontrol sisteminde kavşaktaki dört kolun her birinde kızılötesi sensörler kullanılarak araç yoğunluğu ölçülmüştür. Sistemde, her kavşak kolundaki araç yoğunluğu ölçülmüş ve en yüksek araç yoğunluğuna sahip kola yeşil, diğer her kola kırmızı sinyal verilmiştir. Sonuçlar, kızılötesi sensör tabanlı adaptif yönetimin kavşağın verimini arttırdığı yönündedir.

Gheorghiu ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışmada, araç algılamada kullanılan loop sensörler ile kablosuz manyetik sensörler arasında karşılaştırma yapılmıştır. Çalışmada iki sensör karşılaştırılarak, olağan trafik koşullarında manyetik sensörlerin loop sensörler için uygun bir alternatif olup olmadığını belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan ölçümler kesin sonuçlar vermiş ve iki teknoloji arasında iyi bir karşılaştırma sağlanmıştır. Manyetik sensörün loop sensöre göre bazı sapmaları olduğu görülmüştür, ancak geniş varyasyonların olduğu trafik koşullarında loop sensörleri uygulamanın maliyetleri düşünüldüğünde, manyetik sensörler alternatif bir çözüm olduğu tespit edilmiştir.

Sinyalize kavşak performansındaki en önemli parametrelerden biri gecikmedir. Geliştirilen adaptif trafik yönetim modellerinin genel hedefi, sinyalize kavşaktaki araç başına düşen gecikmeyi düşürmektir. Gecikme parametresinin düşüşüne paralel olarak kavşağın verimi, yakıt tasarrufu ve karbondioksit salınım azaltımı artmaktadır. Gecikmeyi minimuma indirmeyi hedefleyen bazı tahmin modelleri çalışmalarda oldukça sık kullanılmıştır.

Korkmaz ve Akgüngör (2017) tarafından yapılan çalışmada sinyalize kavşaklarda gecikme tahmini için yeni bir model önerilmiştir. Bu araştırmada, diferansiyel gelişim yaklaşımı kullanılarak doğrusal, üstel ve ikinci dereceden olmak üzere üç tür diferansiyel gelişim gecikme tahmin modeli geliştirilmiştir. CORSIM simülasyonundan alınan verilerin bir kısmı modellerin geliştirilmesi için kullanılırken, geri kalanı önerilen modellerin tutarlılığını doğrulamak için kullanılmıştır. Model çıktıları, analitik olarak HCM (Highway Capacity Manual) ve Akçelik gecikme

modelleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonuçları, geliştirilen gecikme tahmin modelinin değerlerinin mevcut gecikme modellerinden daha iyi olduğunu göstermiştir.

Saha ve diğ. (2017) tarafından yapılan araştırmada Hindistan gibi daha karmaşık trafik yapılarında daha iyi performans gösterecek gecikme modeli önerilmiştir. Önerilen model, ülke genelindeki yedi adet dört kollu sinyalli kavşaktan toplanan trafik verilerine dayanarak mevcut HCM modelinin revize edilmesi ile geliştirilmiştir. Ölçülen kuyruk uzunluğu zamana göre çizilmiş ve bir döngüdeki toplam gecikmeyi ve araç başına ortalama gecikmeyi tahmin etmek için Simpson'ın üçte bir kuralı kullanılmıştır. Önerilen model, sekiz adet başka kavşağın verileri kullanılarak doğrulanmış ve gözlemlenen gecikme ile tahmini gecikme arasındaki maksimum farkın %5 olduğu tespit edilmiştir.

Balta ve Özcelik (2018), izole bir sinyalli kavşak üzerinde karınca kolonisi algoritması kullanarak trafik sinyalizasyon optimizasyonu uygulamışlardır. Araç hareketleri VANET (Araçlar Arası Tasarsız Ağlar) mimarisine göre ayarlanarak oluşan trafik verileri yoldan merkeze VANET üzerinden iletilmektedir. Çalışmada, sinyalizasyon kavşaktaki araçların ortalama bekleme sürelerinin azalmasına bağlı olarak karbondioksit emisyonlarının, yakıt tüketiminin ve gürültü oranlarının azaldığını göstermek hedeflenmiştir. Bu amaçla farklı araç yoğunluklarına sahip trafik senaryoları kullanılarak simülasyonlar çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar güncel trafik sinyalizasyon tahmin modellerinden Webster denklemleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlarda, trafik sinyalizasyon sistemlerinde karınca kolonisi optimizasyonu kullanımının yoğun ve değişken trafik koşullarında daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Li ve diğ. (2021) tarafından yapılan çalışmada bir sinyalli kavşağın optimizasyonu için Webster modeli kullanılmıştır. Zhonghuan Doğu Yolu ile Guang Mei Batı Yolu'nun kesişimindeki sinyalli kavşakta çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Kavşak verileri elde edilmiş ve verilere göre Webster yöntemi ile kavşak sinyalleri optimize edilmiştir. VISSIM simülasyon yazılımıyla optimizasyondan önce ve sonra karşılaştırmalar yapılmıştır ve optimize edilmiş kavşağın kuyruk uzunluğu, park etme süreleri, seyahat süresi, gecikme süresi ve kirletici emisyonunun belirgin şekilde azaldığı tespit edilmiştir. Kavşağın gecikmesinin 21,9 saniyeden 17,3 saniyeye düştüğü, kavşağın hizmet seviyesinin C seviyesinden B seviyesine yükseldiği ve araçların trafik verimliliğinin önemli ölçüde iyileştirildiği görülmüştür.

Sıkar ve Aslan (2022) tarafından yapılan çalışmada kavşaklardaki gecikmeleri en aza indirmek için otonom araç sistemlerinin etkinliği değerlendirilmektedir. Teknolojinin gelişmesiyle ulaşımda otonom araçlar kullanılmaya başlanmıştır. Bu durum, kavşaklardaki araç gecikmelerinin hesaplanmasında otonom araçların hesaba katılması sorununu ortaya çıkarmıştır. Bu çalışmada, normal araçlar ve otonom araçlar için yapılan hesaplamaların Webster yöntemi ile nasıl yönetileceği gösterilerek, örnek bir kavşak sistemi üzerinde örnek hesaplamalar yapılmıştır. Her iki araç tipi için de makine öğrenimi algoritmaları kullanılarak regresyon analizi yapılmıştır.

Cakici ve Aksoy (2024), sinyalize kavşaklarda ortalama durma sayısının azalması ve ortalama araç gecikmesinin azalması olaylarının arasındaki ilişkiyi irdelemişlerdir. Çalışmanın ilk aşamasında, Akçelik ortalama araç gecikmesi ve ortalama durma sayısı modellerine dayalı iki ayrı sinyal zamanlaması optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Daha sonra, her iki yaklaşım için de optimum sinyal zamanlamalarını belirlemek üzere diferansiyel gelişim algoritmasını içeren komut dosyaları geliştirilmiştir. Üçüncü aşamada, her biri kavşaktaki genel trafik hacimlerinde farklılık gösteren otuz farklı trafik senaryosu oluşturulmuştur. Daha sonra, Ortalama Araç Gecikmesinin Minimizasyonu ve Ortalama Durma Sayısının Minimizasyonu yaklaşımlarından türetilen sinyal zamanlamaları bu senaryolara bağımsız olarak uygulanmış ve performans göstergeleri (ortalama araç gecikmesi ve ortalama durma sayısı) karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, Ortalama Araç Gecikmesinin Minimizasyonu yerine Ortalama Durma Sayısının Minimizasyonu tabanlı sinyal zamanlamalarının kullanılmasının ortalama araç gecikmelerinde %113,55'e kadar artışa yol açabileceğini ortaya koymuştur.

Sinyalize kavşaklarda uygulanan yeni teknolojiler ve algoritmalar her geçen gün artmaya devam etmektedir. Uygulanan teknolojilerin ve algoritmaların sinyalize kavşak performansını nasıl etkilediği sorusu çok önemlidir. Günümüzde genellikle yöntem uygulandıktan sonra trafik verileri alınarak simülasyon yazılımlarında performans belirleme ya da trafik sensörleri ile performans ölçümü yapılmaktadır. Sinyalize kavşaklardaki performans ölçümü ile ilgili çalışmalar geliştirilmeye ve uygulanmaya devam etmektedir.

Chen ve diğ. (2017) tarafından yapılan bir çalışmada arteriyel trafik performans değerlendirmesi, ortalama seyahat süresi tahminine odaklanılarak incelenmiştir. Kesintiye uğramış akış göz önüne alındığında, seyahat süresi değişkenliğinin özelliklerini yakalamak ve arteriyel hizmet seviyesini belirlemek kritik bir adımdır. Bu

çalışma, arter trafiğindeki seyahat süresi değişkenliğinin baskın bir parçası olan sinyalli kavşaklardaki gecikme değişkenliğini araştırmak için klasik kümülatif eğrileri ve olasılık teorilerini entegre eden stokastik bir yaklaşım sunmaktadır. Önerilen yöntem, Çin, Şanghay'daki bir arter boyunca seyahat süresinin tahmininde uygulanmıştır. Otuz dakikalık aralıklarla yapılan kapsamlı veri analizlerinde, tespit edilen seyahat süresi değişkenliği ve saha ölçümleri karşılaştırıldığında benzer sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Zheng ve diğ. (2013), sinyalli kavşakların performansını ölçmek için görüntü işleme tabanlı bir sistem tasarlamışlardır. Çalışmada, kavşak performans değerlendirmeleri için kontrol gecikmesi ve kuyruk uzunluğu parametreleri baz alınmıştır. Araştırmada, sanal looplar oluşturularak toplanan trafik sayım verilerine dayalı olarak sinyalli kavşaklarda kuyruk uzunluğu ve araç kontrol gecikmesini ölçmek için bir yaklaşım önerilmektedir. Tasarlanan yöntem hem saha testleri hem de simülasyon deneyleriyle değerlendirilmiştir. Sistemdeki araç sayım hataları sonuçların doğruluğunu etkilese de, hem saha testlerinde hem de simülasyon deneylerinde kuyruk uzunlukları ve kontrol gecikmesi ölçümleri konusunda tatmin edici doğruluk oranları elde edilmiştir.

Ulusoy ve Köfteci (2022) tarafından yapılan çalışmada sinyalize kavşak performansının tespit edilmesi için VISSIM simülasyon programı kullanılmıştır. Antalya iline bağlı Konyaaltı ilçesinde bulunan sinyalli bir kavşağa kamera yerleştirilerek görüntü kaydı alınmıştır. Daha sonra sabah ve akşam kamera görüntüleri analiz edilerek trafik verileri saptanmıştır. Saptanan veriler ve geometri ile sinyalize kavşak, VISSIM simülasyon programında birebir modellenmiştir. Modellenen kavşak üzerinde yapılan sinyal planı revizeleri ile kavşakta gecikme değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir.

Ansariyar (2023) tarafından yapılan çalışmada LIDAR sensörler kullanılarak sinyalizasyon sistemlerinin performansını ölçmeyi hedefleyen bir yöntem tasarlanmıştır. Bu çalışma, sinyalli kavşaklarda gecikme süresi verilerini toplamak için LIDAR sensör teknolojisinin uygulanmasını araştırmaktadır. Araştırmada, Haziran 2023 tarihinde sinyalli kavşağa iki adet LIDAR sensörleri yerleştirilmiştir. Yerleştirilen sensörlerle tespit edilen araç yönü, hızı ve davranışı verilerinden gecikme süreleri saptanmıştır. Bu araştırmanın temel odağı, sinyalli bir kavşaktaki sinyal fazları için gecikme sürelerini belirlemenin avantajlarıdır. Çalışma, trafik mühendisleri, şehir plancıları ve sinyalli kavşakların güvenliğini ve verimliliğini iyileştirmeyi amaçlayan yöneticiler için değerli

trafik verileri sağlamanın yanı sıra, LIDAR teknolojisinin yol güvenliğini ve trafik yönetimini iyileştirmek için nasıl kullanılabileceğine dair bilgi edinmeye katkıda bulunmaktadır.

Almutairi ve diğ. (2024), trafik sayımından ağ düzeyinde gerçek zamanlı gecikmeyi tahmin etmek için yeni bir yaklaşım sunmaktadır. Toplam Seyahat Gecikmesi Tahmin Tekniği adı verilen teknik ile bir kavşağın akışındaki varış ve ayrılış dedektörlerinden gelen gerçek zamanlı verileri inceleyerek sinyalli kavşak gecikmelerini hesaplayabilen bir yöntem sunulmuştur. Önerilen tahmin yöntemi, araç varış ve ayrılış verilerini ilişkilendiren denklemleri matematiksel olarak işlemiştir. Elde edilen sonuçlar VISSIM simülasyon programı çıktısıyla karşılaştırılmış ve değişen trafik koşulları altında istatistiksel bir test gerçekleştirilmiştir. Bulgular, önerilen metodolojinin çeşitli trafik hacimlerinde istikrarlı ve güvenilir sonuçlar ürettiğini göstermiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

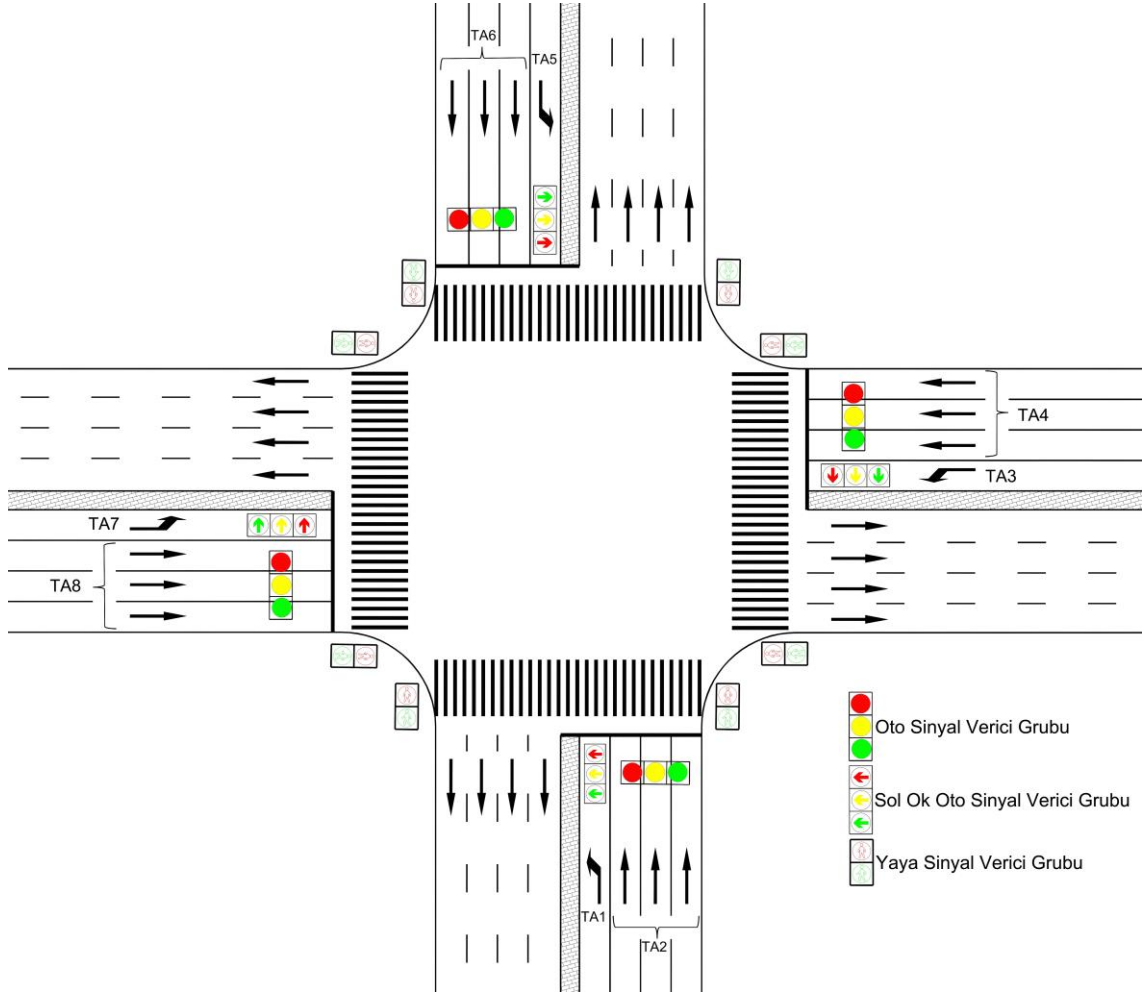
3.1. Sinyalizasyon Temel Kavramları ve İzole Kavşak Sinyalizasyon Yönetim Biçimleri

3.1.1. Temel kavramlar

Sinyalizasyon, araç ve yaya trafiğini düzenlemek amacıyla kullanılan ışıklı sinyal sistemlerinin yönetimiyle ilgili kavram ve tekniklerin genel adıdır. Bu kavramlar, trafik akışını optimize etmek ve güvenliği artırmak için çok önemlidir. Sinyalizasyon sistemlerinin temel bileşenleri ve kavramlarını anlamak, trafik akışını daha etkili bir şekilde yönetmeye yardımcı olmaktadır.

Trafik akımı, kavşaktaki araçların veya yayaaların belirli bir güzergah üzerinde hareketini ifade etmektedir. Trafik akımı, taşıtların veya yayaaların hızı, yönü ve zamanlaması gibi unsurları içermektedir. Trafik akımlarının modellenmesi, analiz edilmesi ve optimize edilmesi ile daha verimli ve güvenli yol sistemlerinin kurulması sağlanmaktadır. Şekil 3.1’de örnek bir sinyalizasyon kavşak üzerinde taşıt trafik akımları gösterilmiştir. Şekil 3.1’de bulunan TA1, TA2, TA3, TA4, TA5, TA6, TA7 ve TA8 yönlerinin her biri kavşaktaki taşıtlara ait trafik akımlarıdır.

Faz, sinyalizasyon bir kavşakta belirli bir yöndeki araç ve yaya trafiğine izin veren zaman dilimini ifade etmektedir. Her faz, kavşaktaki farklı yönlerden gelen trafik hareketlerine (dönüşler, düz gitmeler gibi) veya yayaaların geçişine ayrılmış olabilir. Örneğin, bir kavşakta araçların doğrudan gidişi için bir faz, sağa veya sola dönüşler için ayrı fazlar bulunabilmektedir. Fazlar, kavşakta trafiğin akıcı ve güvenli bir şekilde ilerlemesi için kritik öneme sahiptir. Birden fazla faz, birbirini izleyerek çalışmaktadır ve bu fazlar arasında koordinasyon sağlanarak, tüm yönlerden gelen trafiğin kontrollü bir şekilde akması amaçlanmaktadır. Fazlar, trafik akımlarından meydana gelmektedir. Örneğin, Şekil 3.1’deki örnek sinyalizasyon sisteminde TA4 ve TA8 trafik akımlarına aynı anda verilen yeşil süresi bir fazdır. Şekil 3.1’deki örnek kavşakta kullanılabilecek olası fazlar, TA1 ve TA2, TA3 ve TA7, TA1 ve TA5, TA2 ve TA6, TA5 ve TA6, TA4 ve TA8, TA7 ve TA8, TA3 ve TA4 olarak sıralanabilir. Trafik verileri ve kavşak karakteristikleri gibi parametrelere göre fazların hangi trafik akımlarından oluşacağı ve hangi süre ile işletileceği sinyalizasyon kavşak verimi için büyük önem taşımaktadır.



Şekil 3.1. Örnek sinyalizasyon kavşak ve trafik akımları

Periyot (Devre Süresi), bir sinyalizasyon kavşağın tüm fazlarının bir kez tamamlanması için geçen toplam zamandır. Diğer bir deyişle, tüm trafik yönleri ve hareketleri için gerekli olan fazlar sırasıyla tamamlanıp başa döndüğünde bir periyot tamamlanmış olmaktadır. Örneğin, bir kavşakta dört ayrı faz varsa (kuzey-güney araç trafiği, kuzey-güney yayaları, doğu-batı araç trafiği, doğu-batı yayaları gibi), bu dört faz tamamlandığında bir periyot sona ermektedir. Periyot süresi, trafik yoğunluğuna, kavşağın geometrik yapısına ve sinyalizasyon stratejilerine göre değişmektedir. Kısa periyotlar daha dinamik bir trafik yönetimi sağlamaktadır, ancak yoğun trafiğin olduğu yerlerde uzun periyotlar tercih edilebilmektedir.

Koruma süresi, sinyalizasyon sistemlerinde araçların ve yayaların güvenli geçişini sağlamak amacıyla kullanılan bir zaman aralığıdır. Bu süre, araçların ve yayaların bir kavşaktan geçerken çakışmasını önlemek için tasarlanmıştır ve genellikle

sarı ışık ve kırmızı ışık koruma sürelerini içermektedir. Sarı ışık koruma süresi, yeşil ışıktan kırmızıya geçiş sırasında sürücülerini uyarmak amacıyla yanmaktadır. Bu süre, araçların güvenli bir şekilde durabilmesi ya da duramayacak kadar yaklaştıklarında kavşağı geçebilmeleri için verilmektedir. Sarı ışık süresi, hız sınırı, yol durumu ve kavşağın yapısına göre değişebilmektedir. Genellikle 3-5 saniye arasında olmaktadır. Kırmızı ışık koruma süresi, kavşakta tüm yönlerdeki ışıkların kırmızı olduğu kısa bir zaman dilimidir. Bu süre, yeşil ışık yanan bir araç veya yaya geçişini tamamladıktan sonra, diğer yöndeki araçların harekete başlamadan önce kavşağı güvenli bir şekilde boşaltmasına olanak tanımaktadır. Kırmızı koruma süresi sinyalizasyon kavşaklarda genellikle 1-2 saniye olup, çarpışma riskini azaltmak için uygulanmaktadır.

3.1.2. Sabit zamanlı sinyalizasyon yönetimi

Sabit zamanlı sinyalizasyon sistemi, trafiğin belirli bir düzen içerisinde akmasını sağlamak amacıyla kullanılan ve trafik ışıklarının belirli bir zaman döngüsü ile çalıştığı bir sinyalizasyon yöntemidir. Bu sistem, özellikle araç ve yaya trafiğini kontrol etmek için yaygın olarak kullanılan temel trafik yönetimi yöntemlerinden biridir. Trafik sinyalleri, önceden belirlenmiş sürelerle sürekli olarak tekrarlanan bir döngü halinde çalışmaktadır. Bu döngü, belirli bir zaman periyodunda kırmızı, sarı ve yeşil ışıkların belirli sürelerle yanıp sönmelerini içermektedir. Sinyal fazlarının süreleri (kırmızı, sarı, yeşil ışıkların yanma süreleri), trafik mühendisleri tarafından belirlenmekte ve bu süreler, genellikle yolun kapasitesi, trafik yoğunluğu ve yaya trafiği gibi çeşitli faktörlere dayanarak optimize edilmektedir. Örneğin, dört yönlü bir kavşakta her yön için yeşil ışık sabit bir süre boyunca yanmaktadır. Bu süreler sabit bir döngüde tekrar etmekte ve herhangi bir trafik yoğunluğu veya olay bu sistemde anlık bir değişikliğe yol açmamaktadır. Sistem tamamen önceden belirlenmiş zaman dilimlerine dayanmaktadır (Thunig ve diğ., 2019).

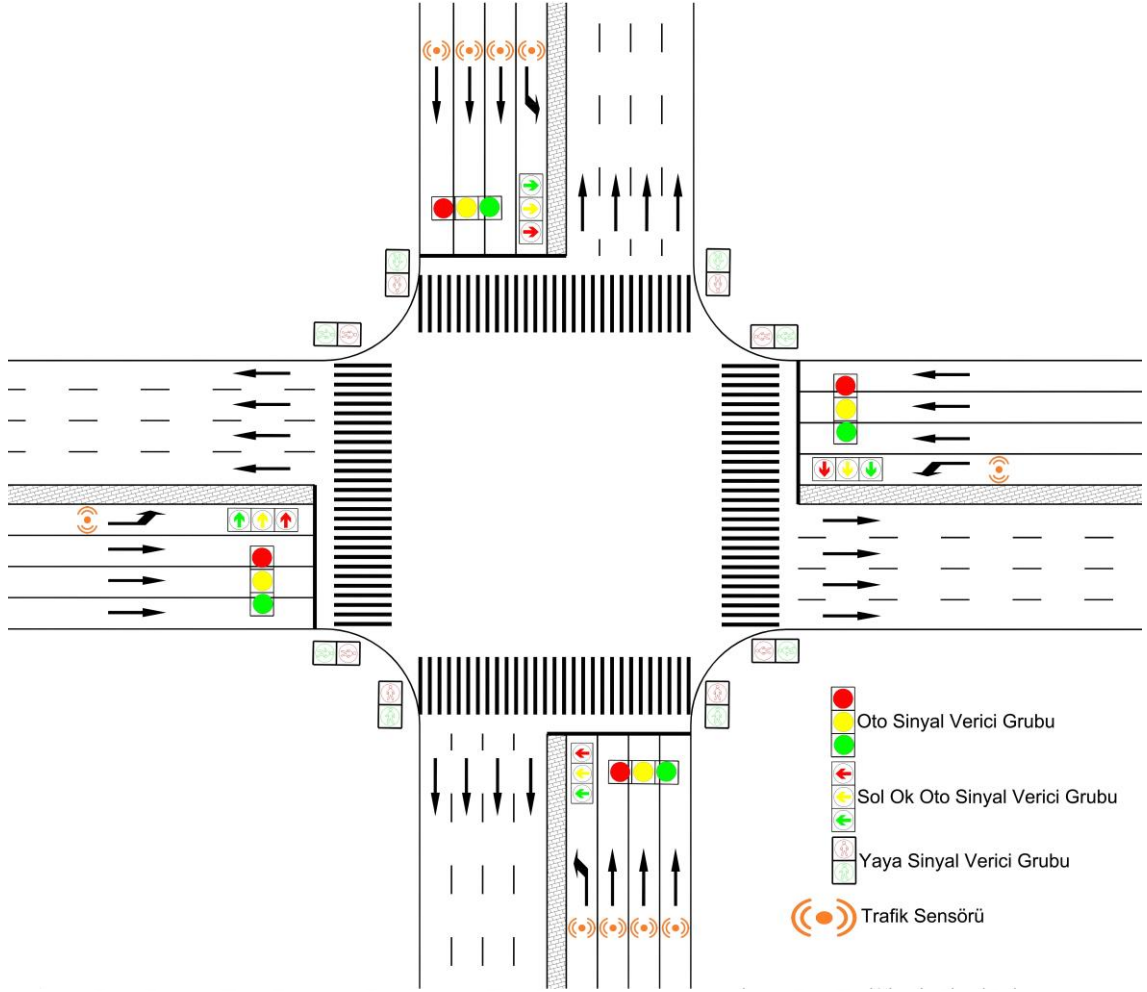
Sabit zamanlı sinyalizasyon sistemi, teknolojik açıdan oldukça basit oldukları için kurulumu ve yönetimi diğer karmaşık sinyalizasyon sistemlerine kıyasla daha kolaydır. Ayrıca düşük maliyetli bir sistemdir ve özellikle küçük ve orta ölçekli yerleşim yerlerinde veya trafik yoğunluğunun sabit olduğu bölgelerde ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Ancak bu sistemin bazı dezavantajları da vardır. Sabit zamanlı sinyalizasyon sistemleri, trafik yoğunluğunun sürekli değiştiği şehir merkezleri gibi bölgelerde etkili olmayabilir. Sistem, trafik akışını gerçek zamanlı olarak

düzenleyemediği için yoğun saatlerde trafik sıkışıklığına neden olabilmekte veya yoğun olmayan saatlerde gereksiz beklemelemlere yol açabilmektedir. Trafik yoğunluğuna göre uyarılama yapılmadığı için bazı anlarda yollar gereksiz yere boş kalırken, diğer yollar aşırı yoğun olabilmektedir. Özellikle trafik akışının anlık olarak değiştiği bölgelerde bu sistem verimsiz kalmaktadır. Ayrıca sabit olduğu için acil durum araçlarının geçişine öncelik tanıyamamakta veya beklenmedik bir trafik artışına bir yanıt verememektedir. Bu da trafik yönetiminde esnekliğin kaybolmasına yol açmaktadır.

Sabit zamanlı sinyalizasyon sistemleri genellikle düşük yoğunluklu trafik bölgelerinde, küçük kasabalarda veya trafik akışının belirli saatlerde nispeten sabit olduğu kavşaklarda kullanılabilir. Ayrıca, trafik akışının nispeten öngörülebilir olduğu sanayi bölgeleri, belirli kampüs alanları ve küçük yerleşim bölgelerinde de çalışabilir. Ancak trafik koşullarına gerçek zamanlı uyum sağlayan akıllı sinyalizasyon sistemleriyle karşılaştırıldığında, sabit zamanlı sinyalizasyon sistemleri sınırlı yeteneklere sahiptir.

3.1.3. Yarı trafik uyarmalı sinyalizasyon yönetimi

Yarı trafik uyarmalı sinyalizasyon sistemi, belirli yönlerdeki trafik yoğunluğunun değişken olduğu kavşaklarda, belirli bir yönün diğerlerinden daha az yoğun olduğu yerlerde ya da bir yönün trafik akışını düzenlemenin kritik olmadığı durumlarda kullanılan bir sistemdir. Bu sistemde, belirli yönlerdeki trafik sinyalleri sabit zaman döngüsüne göre çalışırken, diğer yönlerdeki sinyaller trafik talebine bağlı olarak devreye girmektedir. Özellikle ana yollarla tali yolların kesiştiği kavşaklarda tercih edilmektedir. Ana yol üzerinde sinyaller genellikle sabit yeşil sürelerinde çalışırken, tali yol üzerindeki sinyaller ve anayol sola dönüş sinyalleri araç algılama sensörleri aracılığıyla etkinleştirilmektedir. Böylece tali yolda araç trafiği olmadığında sinyaller gereksiz yere devreye girmez ve ana yol trafiği kesintisiz bir şekilde akabilmektedir (Lee ve diğ., 2013). Şekil 3.2’de örnek bir yarı trafik uyarmalı sinyalizasyon sistemi gösterilmiştir. Şekil 3.2’de de görüldüğü gibi araç algılayıcı sensörler tali yollara ve anayol sola dönüşlerine yerleştirilmiştir. Sensör yerleştirilen yönler araç algılayıcı sensörler ile devreye girmekte ve sensörden gelen algılamaya göre belirlenen maksimum yeşil süresine kadar işletilmektedir. Anayol trafik akımlarının yeşil süreleri ise sabittir.



Şekil 3.2. Örnek bir kavşakta yarı trafik uyarmalı sinyalizasyon sistemi uygulaması

Yarı trafik uyarmalı sinyalizasyon sisteminde, tali yoldaki trafik akışını düzenlemek için yerleştirilen sensörler tali yol üzerinde bir araç algılandığında devreye girmektedir. Eğer tali yolda bekleyen bir araç algılanmazsa, ana yol sinyalleri sürekli yeşil yanmaktadır ve trafik akışı kesintisiz bir şekilde devam etmektedir. Ancak tali yolda bekleyen bir araç olduğunda sensörler bunu algılamakta ve anayol için belirlenen sabit yeşil süresinden sonra ana yol trafiğini durdurmaktadır. Daha sonra tali yol trafiğine geçiş hakkı vermektedir.

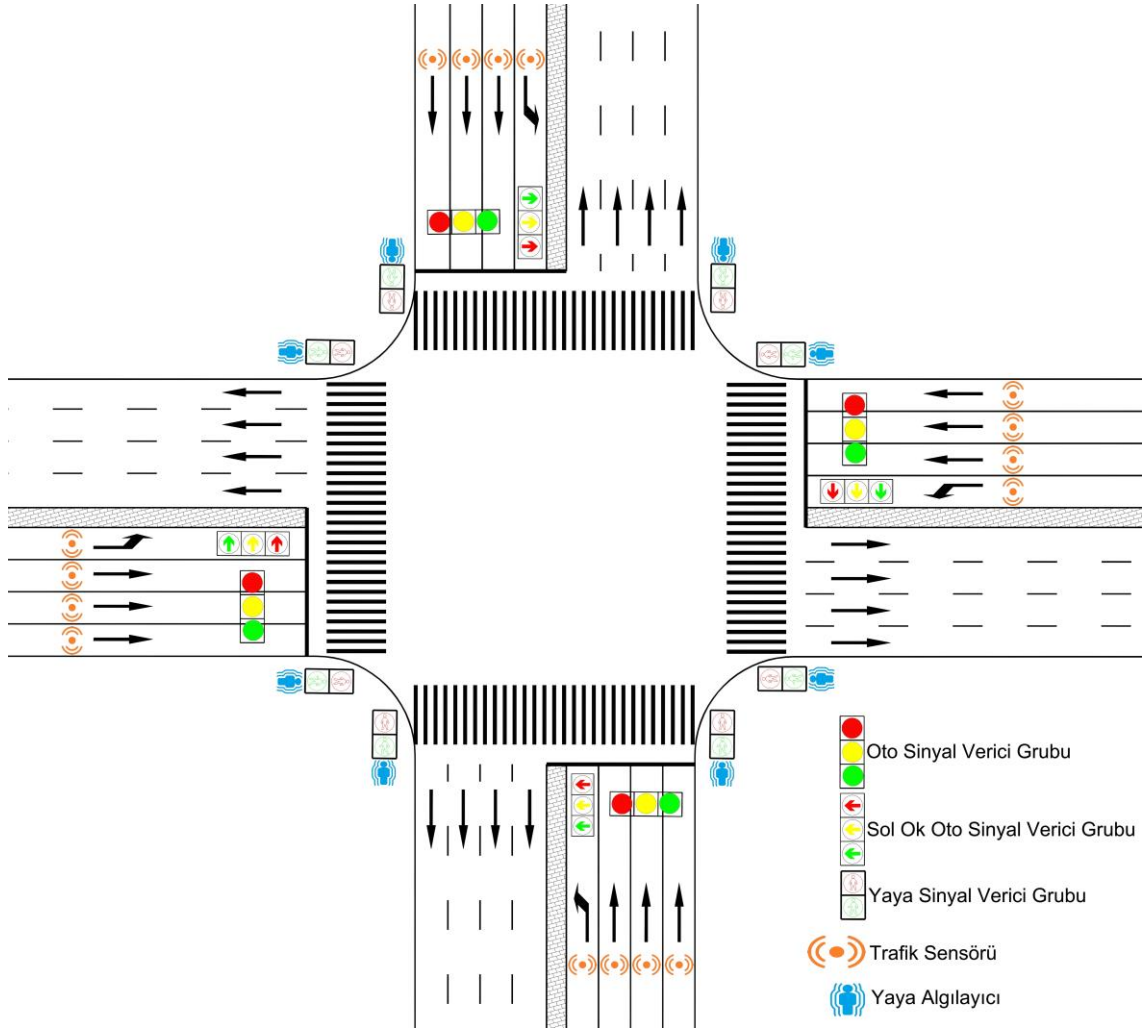
Yarı trafik uyarmalı sinyalizasyon sisteminin en büyük avantajlarından biri, trafik yoğunluğunun daha az olduğu tali yollarda beklemleri minimize etmesidir. Sistem, gerektiği zaman devreye girerek daha verimli bir trafik yönetimi sağlamaktadır. Özellikle yoğun ana yollar üzerinde, tali yol trafiğinin düşük olduğu kavşaklarda, ana yol trafiğinin kesintiye uğramaması ve tali yol kullanıcılarının gereksiz beklemesinin önlenmesi, trafiğin genel akışını hızlandırmaktadır. Böylece yakıt ve zaman tasarrufu

sağlanırken, gereksiz dur-kalk hareketleri de minimuma indirilmektedir. Ancak bu sistemin bazı dezavantajları vardır. Örneğin, yoğun saatlerde tali yoldaki trafiğin aniden artması durumunda yarı trafik uyarmalı sistem, yoğun taleple başa çıkmakta zorlanabilmekte ve ana yol trafiğinde sıkışıklıklara yol açabilmektedir. Ayrıca, sensörlerin etkin çalışmaması durumunda sistemin aksamaması olasıdır. Bunun yanı sıra, sistemi kurmak ve sensörlerin doğru çalışmasını sağlamak için gereken altyapı maliyeti, sabit zamanlı sinyalizasyon sistemlerine göre daha yüksektir. Bu nedenle, yarı trafik uyarmalı sinyalizasyon sistemi genellikle trafik yoğunluğunun orta seviyede olduğu kavşaklarda tercih edilmektedir (Lin, 1991).

3.1.4. Tam trafik uyarmalı sinyalizasyon yönetimi

Tam trafik uyarmalı sinyalizasyon sistemi, bir kavşakta veya yaya geçidinde tüm trafik sinyallerinin tamamen trafik talebine bağlı olarak çalıştığı bir sistemdir. Bu sistemde, trafik sinyalleri sabit bir zaman döngüsüne bağlı olmaksızın, kavşağa yaklaşan araçların veya yayaaların varlığına göre etkinleştirilmektedir. Genellikle yoğun olmayan kavşaklarda, şehir içi veya kırsal bölgelerde tercih edilen bu sistem, yalnızca talep olduğunda sinyal sürelerini düzenleyerek trafiğin akıcı olmasını sağlamaktadır. Tüm yönlerde sensörler veya dedektörler kullanılmaktadır ve bu sensörler, araçların kavşak koluna geldiğini veya yayanın geçme talebini algıladığında ilgili sinyal fazın devreye alınmasını sağlamaktadır (Ribeiro ve Simões, 2015).

Tam trafik uyarmalı sinyalizasyon sisteminin temel işleyişi, araç veya yaya trafiğini algılayan sensörlere dayanmaktadır. Her yön için yerleştirilen bu sensörler, trafik sinyallerini sadece bir araç veya yaya algılandığında bile değiştirecek şekilde programlanmıştır. Kavşağa gelen bir araç veya yaya yoksa, sinyal sistemi duruma göre ana yol üzerindeki yeşil ışığı sürekli yakabilmektedir. Ancak sensörler, bir tali yoldan gelen bir aracı veya yaya geçidini kullanmak isteyen bir yayayı algıladığında, sistem ana yol trafiğini ilgili faz bittikten sonra durdurarak tali yola veya ilgili yaya geçidi yönüne yeşil ışık vermektedir. Bu durum, yalnızca tali yoldan gelen bir trafik ya da yaya geçidinde bekleyen yaya olduğunda gerçekleşmektedir, bu sayede gereksiz duraklamalar ve beklemler önlenmektedir. Sensörlerden gelen taleplere göre fazlara verilen yeşil süreleri, maksimum belirlenen sürelere kadar arttırılabilmektedir. Şekil 3.3'te örnek bir tam trafik uyarmalı sinyalizasyon yönetimi gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Örnek bir kavşakta tam trafik uyarmalı sinyalizasyon sistemi uygulaması

Bu sistemin en büyük avantajı, trafik yoğunluğuna her yön için uyum sağlayabilmesidir. Özellikle trafik akışının düzensiz olduğu kavşaklarda veya bazı yönlerde daha düşük yoğunlukta trafik gözlemlendiği yerlerde ideal bir çözüm sunmaktadır. Ana yollarda ve tali yollarda gereksiz yere araçların durmasını önlerken, kavşaklarda trafik sıkışıklığını en aza indirmektedir. Ayrıca yakıt ve zaman tasarrufu sağlaması açısından da önemli bir avantaj sunmaktadır. Tam trafik uyarmalı sistemin bir diğer avantajı, özellikle yaya geçitlerinde etkili olmasıdır. Yaya trafiği yoğun olmayan bölgelerde bu sistem, yalnızca yaya geçiş talebi olduğunda devreye girerek yayalara öncelik tanımaktadır. Böylece yayalar gereksiz yere beklemezken, araç trafiği de akıcı bir şekilde devam etmektedir. Yaya talep butonları bu tür sistemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır ve yayalar butonlara bastığında sinyal sistemi hemen, faz sonu veya periyot sonunda devreye girerek yayaların güvenli bir şekilde karşıya geçmelerine olanak tanımaktadır. Ancak tam trafik uyarmalı sinyalizasyon sisteminin bazı

dezavantajları da mevcuttur. Öncelikle, yoğun trafik akışının olduğu bölgelerde bu sistem etkili olmayabilir. Sürekli bir trafik akışı olan kavşaklarda, her bir araç algılandığında sinyal sürelerinin yalnızca talebe göre dinamik olarak değişmesi, trafiğin akışını yavaşlatmaktadır ve talebe bağlı fazların sık sık devreye girmesi verimi düşürmektedir. Bu durum özellikle büyük şehirlerde, yoğun kavşaklarda ciddi trafik sıkışıklıklarına neden olabilmektedir. Tam trafik uyarmalı sinyalizasyon sistemlerinde faz konfigürasyonları ve sıraları sabittir. Ayrıca sensörlerin doğru ve kesintisiz çalışması da sistemin verimliliği açısından kritik öneme sahiptir. Sensörlerde meydana gelebilecek herhangi bir arıza, sinyalizasyonun doğru çalışmasını engelleyebilmekte ve kavşaklarda karışıklıklara yol açabilmektedir. Bu sistemin kurulumu, sabit zamanlı ve yarı trafik uyarmalı sinyalizasyon sistemlerine kıyasla daha karmaşık ve maliyetlidir. Sisteme sürekli olarak bakımının gerekmesi ve sensörlerin hassas bir şekilde çalışması için gereken teknolojik altyapı gibi etkenler maliyetleri artırabilmektedir. Ayrıca, trafik akışının çok sık değiştiği bölgelerde bu sistemin verimli çalışabilmesi için daha gelişmiş sensörlerin ve algoritmaların kullanılması gereklidir.

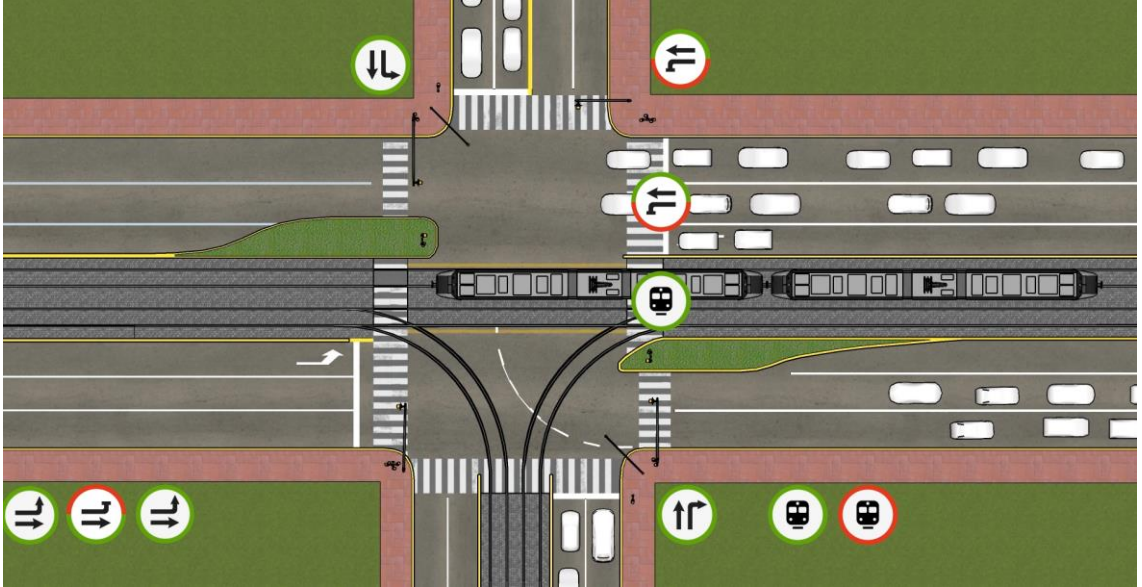
3.1.5. Talep uyarmalı sinyalizasyon yönetimi

El ile kumanda, yaya butonu, toplu taşıma veya tramvay gibi harici taleplerle devreye giren sinyalizasyon sistemleridir. Bu sinyalizasyon yönetimi, talep odaklı trafik yönetimi sağlamaktadır ve bu sistemler yalnızca ihtiyaç duyulduğunda aktif hale gelmektedir. Yaya butonları, yayaların güvenli bir şekilde yolun karşısına geçmelerini sağlamak için kullanılan bir bileşendir. Bu sistemde, yayalar kavşaktaki ya da geçitteki bir butona bastığında, yaya sinyali devreye girmektedir ve yayalara geçiş önceliği tanınmaktadır. Yaya butonu kullanılmadığı sürece sinyalizasyon sistemi genellikle ana yol veya tali yol trafiğine öncelik vermektedir ve araçların akışını kesintiye uğratmamaktadır. Bu sistem, özellikle yaya trafiğinin düzensiz ve düşük olduğu bölgelerde yayaların güvenli geçişlerini sağlarken araç trafiğini de gereksiz yere durdurmamak için idealdir.

El ile kumanda edilen sinyalizasyon sistemleri, genellikle trafik polisleri veya yetkililer tarafından kullanılmaktadır. Bu sistemde, trafik sinyalleri manuel olarak kontrol edilmektedir ve özel durumlarda, örneğin büyük etkinliklerde veya trafik kazaları gibi acil durumlarda trafiği düzenlemek amacıyla devreye girebilmektedir. El ile kumanda edilen sistemler, trafik yoğunluğunun belirli zamanlarda çok artması veya

beklenmedik durumlar yaşandığında sinyal sürelerini manuel olarak değiştirerek trafik akışını hızlandırabilmektedir. Bu yöntem, diğer otomatik sinyalizasyon sistemlerine göre daha esnek bir çözüm sunmaktadır, ancak sürekli insan müdahalesi gerektirdiği için genellikle geçici ve acil durumlarda tercih edilmektedir.

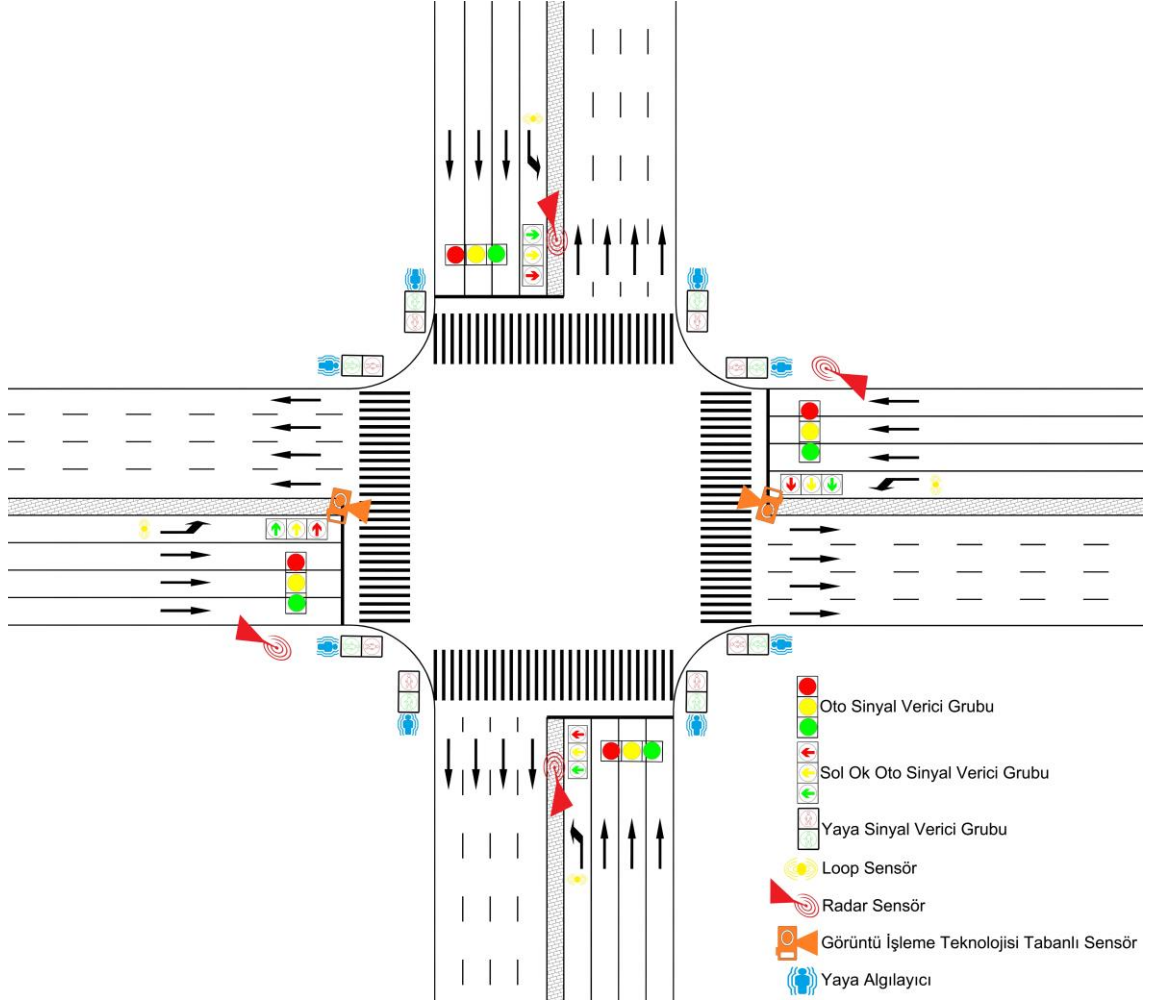
Tramvay ve toplu taşıma araçlarının talepleriyle devreye giren sinyalizasyon sistemleri ise toplu taşıma öncelikli trafik yönetimi sağlayan bir sistemlerdir. Bu sistemde, tramvaylar veya otobüsler gibi toplu taşıma araçları kavşağa yaklaştığında, araçlar tarafından gönderilen bir sinyal ya da sensörler aracılığıyla trafik ışıkları değişmekte ve toplu taşıma araçlarına geçiş önceliği tanınmaktadır. Bu yönetim, özellikle yoğun şehir içi trafikte toplu taşıma araçlarının hızlı ve kesintisiz bir şekilde hareket etmelerini sağlayarak yolculuk sürelerini kısaltmaktadır ve toplu taşımayı daha cazip hale getirmektedir. Böyle bir sistemde, toplu taşıma araçları sinyalleri algıladığında, diğer araç trafiği durdurularak toplu taşımaya geçiş hakkı verilmektedir. Bu özellik hem toplu taşımının etkinliğini artırmakta hem de toplu taşıma araçlarının zamanında ulaşım noktalarına varmalarını sağlamaktadır. Şekil 3.4'te örnek bir tramvay keşişmeli kavşak gösterilmiştir. Bu örnek kavşakta tramvay aracı kavşağa geldiği sırada sensörler aracılığı ile algılanmakta ve tramvay aracına anında, faz sonu veya periyot sonu geçiş hakkı verilmektedir.



Şekil 3.4. Örnek bir tramvay keşişmeli kavşakta talep uyarmalı sinyalizasyon sistemi uygulaması

3.1.6. Adaptif sinyalizasyon yönetimi

Adaptif sinyalizasyon sistemi, trafik koşullarına anlık olarak uyum sağlayan ve trafik ışıklarının sürelerini gerçek zamanlı olarak optimize eden gelişmiş bir trafik yönetim sistemidir. Bu sistem, trafiğin yoğunluğunu, araçların hızını ve akışını sürekli olarak izleyip analiz etmekte ve bu veriler doğrultusunda trafik sinyallerini dinamik bir şekilde ayarlamaktadır. Adaptif sinyalizasyon, geleneksel sabit zamanlı sistemlerden farklı olarak, değişen trafik koşullarına anında yanıt verebilme yeteneği ile öne çıkmaktadır. Kullanılan sensörlerdeki trafik verisi çeşitliliğinin fazla olması nedeni ile de yarı uyarmalı, tam uyarmalı ve talep uyarmalı sinyalizasyon sistemlerine göre daha verimli çalışmaktadır. Adaptif sinyalizasyon sistemlerinde, sensörlerden alınan trafik verisi çeşitliliği fazla olduğu için daha güçlü algoritmalar ve daha verimli kontrol yazılımları kullanılmaktadır. Özellikle büyük şehirlerde ve trafik yoğunluğunun dalgalandığı bölgelerde bu sistem, trafik sıkışıklığını azaltmak ve yol kullanıcılarının verimli bir şekilde hareket etmelerini sağlamak amacıyla tercih edilmektedir (Chia ve diğ., 2017). Şekil 3.5'te farklı trafik sensörlerin kullanıldığı örnek bir adaptif sinyalizasyon sistemi uygulaması verilmiştir.



Şekil 3.5. Örnek bir kavşakta adaptif sinyalizasyon sistemi uygulaması

Sistemin temel işleyişi, kavşaklarda veya yolların belirli noktalarına yerleştirilen sensörler aracılığıyla sürekli veri toplanması temeline dayanmaktadır. Bu sensörler, kavşağa yaklaşan araç sayısını, araçların hızlarını, araçlar arasındaki mesafeleri ve yaya geçiş taleplerini algılamaktadır. Toplanan bu veriler, sistemin kontrol birimlerine iletilmektedir ve bu veriler analiz edilerek trafik ışıklarının süreleri yeniden ayarlanmaktadır. Örneğin, bir kavşağa yaklaşan araç sayısının çok fazla olduğu bir durumda, adaptif sinyalizasyon sistemi o yöndeki yeşil ışık süresini uzatarak araçların daha hızlı bir şekilde geçiş yapmalarını sağlamaktadır. Eğer bir yolda trafik yoğunluğu azalmışsa, sistem bu duruma hemen tepki vermekte ve diğer yönlere daha fazla geçiş süresi tanımaktadır.

Adaptif sinyalizasyon sisteminin en büyük avantajlarından biri, trafik akışını optimize ederek sıkışıklığı azaltmasıdır. Geleneksel sabit zamanlı sistemlerde trafik ışıkları belirli bir döngüye göre çalıştığı için, trafiğin yoğun olduğu zamanlarda bile bu

döngü sabit kalmakta ve araçlar gereksiz yere beklemek zorunda kalabilmektedir. Ancak adaptif sistemler, trafik yoğunluğuna anında yanıt verdiği için bekleme sürelerini minimuma indirmekte ve sürücülerin gereksiz dur-kalk yapmalarını önlemektedir. Bu durumda yakıt tasarrufu sağlamak ve genel olarak trafik akışını daha akıcı hale getirmektedir. Özellikle yoğun kavşaklarda ve ana arterlerde bu sistem, trafik sıkışıklığını azaltarak araçların hızlı ve güvenli bir şekilde hareket etmesine olanak tanımaktadır.

Adaptif sinyalizasyon, aynı zamanda çevre dostu bir sistemdir. Araçların gereksiz yere dur-kalk yapmaması ve trafikte daha az beklemeleri, yakıt tüketimini azaltarak karbon emisyonlarını da düşürmektedir. Bu durum, şehir içi ulaşımın çevresel etkilerini minimuma indirmektedir (Koch ve diğ., 2023). Ayrıca adaptif sistemler, toplu taşıma araçlarına da öncelik tanıyabilmektedir. Toplu taşıma araçlarının kavşaklara yaklaştığı algılandığında, sistem bu araçlara geçiş önceliği vererek toplu taşıma hizmetlerinin hızını ve güvenilirliğini artırabilmektedir. Böylece toplu taşımayı tercih eden yolcular için seyahat süresi kısalırken, şehirde genel olarak toplu taşımaya yönelimi teşvik eden bir yapı ortaya çıkmaktadır.

Bu sistemlerin uygulanmasında önemli olan bir diğer unsur ise akıllı şehir teknolojilerinin bir parçası olarak entegre çalışabilmeleridir. Adaptif sinyalizasyon, diğer akıllı ulaşım sistemleri ile entegre edildiğinde, şehir genelinde daha kapsamlı bir trafik yönetimi sağlanabilmektedir. Örneğin, trafik akışına göre belirlenen sinyal süreleri, şehir genelindeki diğer sinyalizasyon sistemleriyle senkronize edilerek daha geniş bir alanda trafiğin optimize edilmesi mümkün hale gelmektedir. Bu sayede, sadece belirli bir kavşakta değil, tüm şehirde daha dengeli ve akıcı bir trafik sağlanmaktadır.

Adaptif sinyalizasyon sistemlerinin kurulumu ve bakımı oldukça karmaşıktır ve yüksek maliyet gerektirebilmektedir. Sensörlerin yerleştirilmesi, veri toplama ve analiz altyapısının oluşturulması, sistemin doğru çalışabilmesi için sürekli bakım ve güncelleme gerektirmektedir. Ayrıca sistemin verimli çalışabilmesi için trafik koşullarının doğru bir şekilde analiz edilmesi ve sistemin sürekli olarak güncel verilerle beslenmesi gerekmektedir. Sistem, sensörlerin arızalanması veya yanlış veri toplaması durumunda hatalı kararlar verebilir ve bu da trafik akışını olumsuz etkileyebilir. Bu durum için yazılımsal ve donanımsal önlemler alınabilir.

3.2. Adaptif Sinyalizasyon Yönetiminde Kullanılan Sensör Teknolojileri

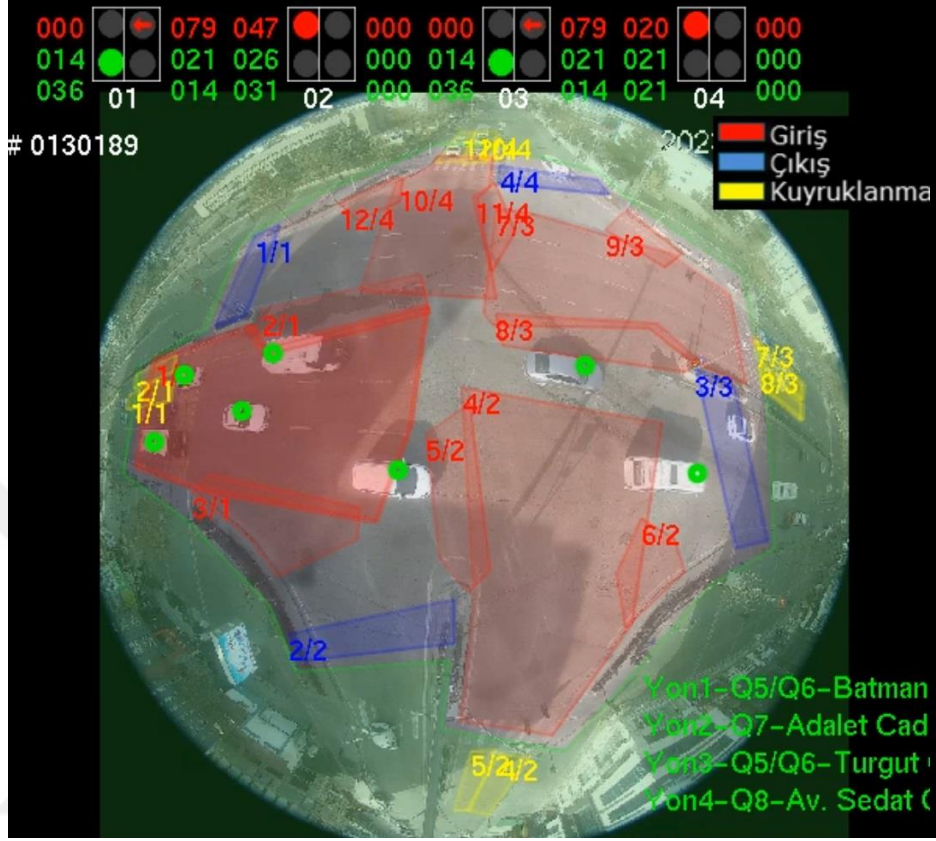
Adaptif sinyalizasyon yönetiminde kullanılan sensör teknolojileri, trafik akışını izlemek, trafik verilerini tespit etmek ve sinyal sürelerini dinamik olarak ayarlamak için kritik öneme sahiptir. Bu sensörler, yollarda ve kavşaklarda araç ve yaya hareketlerini algılayarak, trafik ışıklarının sürelerini optimize etmek için gerekli verileri sağlamaktadır. Adaptif sinyalizasyon sistemleri, farklı türde sensör teknolojileri kullanılarak gerçek zamanlı verilerle beslenecek şekilde çalışmaktadır. Bu sensörlerin türleri, kullanım amaçlarına ve sistemin ihtiyaçlarına göre değişiklik gösterebilmektedir. Adaptif sinyalizasyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılan sensör teknolojileri, görüntü işleme teknolojisi tabanlı sensörler, loop sensörler, LIDAR (Light Detection and Ranging) sensörler ve radar sensörlerdir.

3.2.1. Görüntü işleme teknolojisi tabanlı sensörler

Adaptif sinyalizasyon sisteminde kullanılan görüntü işleme teknolojisi tabanlı sensörler, trafik akışını dinamik bir şekilde yönetmek için son yıllarda önemli bir bileşen haline gelmiştir. Bu sensörler, kavşaklarda veya ana yollarda kurulu kameralar aracılığıyla elde edilen görüntüleri analiz etmekte ve gerçek zamanlı trafik verilerini toplamaktadır. Sistem, bu verileri işleyerek araçların sayısını, hızlarını, yaya hareketlerini ve trafik akışındaki değişiklikleri belirlemektedir (Uddin ve diğ., 2015). Böylece trafik ışıklarının süreleri, trafik yoğunluğuna ve akışına uygun olarak otomatik bir şekilde ayarlanmaktadır. Bu teknoloji, şehir içi trafiği optimize etmek, trafik sıkışıklığını azaltmak ve yol güvenliğini artırmak amacıyla kullanılmaktadır.

Görüntü işleme tabanlı sensörler, kamera görüntülerini analiz ederek yolda kaç araç bulunduğunu, bu araçların ne hızla hareket ettiklerini ve hangi yöne gittiklerini tespit edebilmektedir. Aynı zamanda yayaların varlığını ve hareketlerini de algılayabilmektedir. Bu sensörler, kavşaklardaki araç kuyruklarını ve trafik yoğunluğunu tespit edebildiği gibi, hız ihlallerini de belirleyebilmektedir. Bu sistemin en büyük avantajlarından biri, bir kavşakta veya yolda aynı anda birden fazla şeridi izleyebilmesi ve çok çeşitli trafik hareketlerini takip edebilmesidir. Böylece adaptif sinyalizasyon sistemine çok daha kapsamlı ve detaylı veriler sağlamaktadır. Diğer bazı sensör türleri yalnızca belirli bir noktada veya belirli bir şerit üzerinde çalışırken,

görüntü işleme teknolojisi geniş bir alanı izleme kapasitesine sahiptir. Şekil 3.6’da örnek bir görüntü işleme teknolojisi tabanlı sensör görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.6. Görüntü işleme teknolojisi tabanlı trafik sensörü

Görüntü işleme teknolojisi tabanlı sensörler, trafikteki değişikliklere anında tepki verebilme yeteneği ile öne çıkmaktadır. Sistem, sürekli olarak kamera görüntülerini analiz etmekte ve bu görüntüler üzerinden trafik ışıklarının sürelerini dinamik olarak ayarlamaktadır (Umair ve diğ., 2024). Örneğin, bir kavşağa yaklaşan araç sayısının arttığını tespit ettiğinde, bu yöndeki trafik sinyalinin yeşil ışık süresini uzatmaktadır. Aynı şekilde, yoğunluğu düşük olan bir yöne daha az süre tanımaktadır ve böylece trafik akışı optimize edilmektedir. Bu, özellikle büyük şehirlerde yoğun trafiği yönetmede büyük bir avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, sistem yayaları da algılayabildiği için, yayaların güvenli geçişini sağlamak amacıyla yaya sinyallerini de gerektiğinde devreye sokabilmektedir. Bu özellik, sadece araçların değil, yayaların da güvenli bir şekilde hareket etmelerine olanak tanımaktadır.

Görüntü işleme tabanlı sensörlerin en önemli avantajlarından biri, diğer sensörlerle kıyaslandığında daha kapsamlı veri toplayabilmesidir. Örneğin, loop

sensörler sadece araçları tespit ederken, görüntü işleme teknolojisi tabanlı sensörler hem araçları hem de yayaları algılayabilmektedir. Ayrıca, bu sensörler araçların hızı, hareket yönlerini ve boyutlarını da analiz edebilmektedir, bu da gerektiğinde özel trafik yönetimi stratejilerinin uygulanmasına olanak tanımaktadır. Örneğin, ağır yük taşıyan kamyonların veya toplu taşıma araçlarının öncelikli geçiş hakkı tanınması gibi durumlar, görüntü işleme tabanlı sensörlerin sağladığı veriler sayesinde daha kolay hale gelebilmektedir. Bu sayede trafik yönetimi daha esnek ve verimli bir hale gelmektedir. Bu teknolojinin bir diğer önemli avantajı, trafik kazalarını ve yol üzerindeki acil durumları tespit edebilme yeteneğidir. Görüntü işleme algoritmaları, anormal trafik hareketlerini, kazaları veya yolda duran araçları algılayabilmektedir. Böyle durumlarda sistem, otomatik olarak trafik ışıklarını yeniden ayarlayarak, acil durum araçlarına yol açmak veya diğer araçları güvenli bir şekilde yönlendirmek için sinyalleri düzenleyebilmektedir. Bu özellik, trafik kazalarının olumsuz etkilerini en aza indirmek ve acil durumlara hızlı bir şekilde müdahale edebilmek açısından büyük bir avantaj sunmaktadır. Ayrıca, bu veriler trafik izleme merkezlerine de iletilerek, trafik yönetim birimlerinin olaylara hızlıca müdahale etmesine yardımcı olmaktadır.

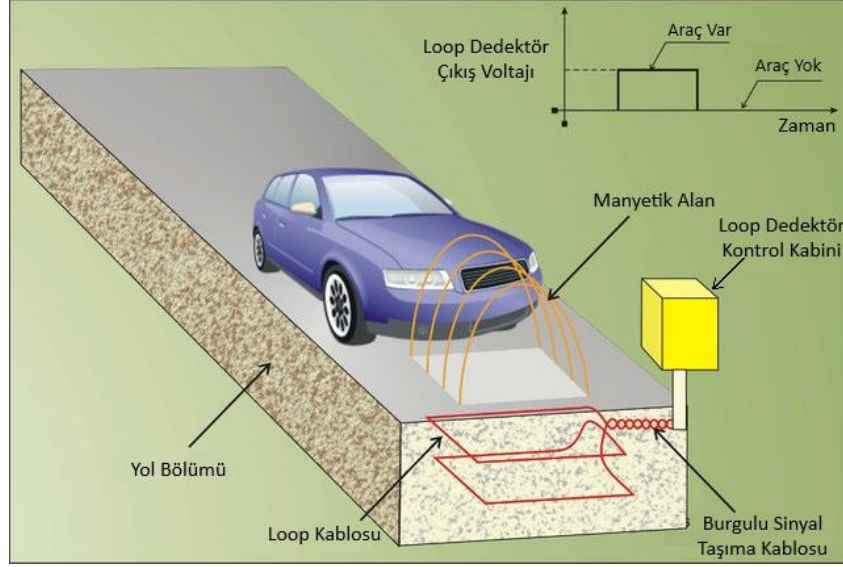
Görüntü işleme teknolojisi tabanlı sensörlerin uygulanmasında bazı zorluklar da vardır. En büyük zorluklardan biri, bu sistemlerin yüksek maliyetli olmasıdır. Bu sistemlerin etkin bir şekilde çalışabilmesi için güçlü bir veri işleme altyapısı gerekmektedir. Kamera görüntülerinin anlık olarak analiz edilmesi ve trafik sinyallerinin buna göre düzenlenmesi, hızlı ve güvenilir bir veri işleme sistemine ihtiyaç duymaktadır. Bunun yanı sıra, görüntü işleme tabanlı sistemlerin bakım ve güncellemeleri de oldukça kritiktir. Kameralar, dış etkenlere karşı hassas olabilir ve düzenli olarak temizlenmesi veya onarılması gerekebilir. Ayrıca, yazılımın sürekli olarak güncellenmesi ve yeni trafik verilerine adapte edilmesi önemlidir. Bir diğer zorluk ise görüntü kalitesidir. Görüntü işleme tabanlı sensörler, genellikle iyi aydınlatılmış ortamlarda en verimli şekilde çalışmaktadır. Gece veya düşük ışık koşullarında bu sensörlerin performansı düşebilmektedir. Kötü hava koşulları da sistemin doğruluğunu etkileyebilmektedir. Yoğun yağmur, kar veya sis gibi durumlarda kameralar, net görüntüler sağlayamayabilir ve bu da trafik ışıklarının yanlış ayarlanmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle, bu tür sensörlerin etkin bir şekilde çalışabilmesi için hava koşullarına dayanıklı ekipmanların kullanılması ve düşük ışık koşullarında bile net görüntü sağlayabilen kameraların tercih edilmesi gereklidir.

Ayrıca, görüntü işleme algoritmalarının bu tür zorluklara karşı optimize edilmesi de büyük önem taşımaktadır.

3.2.2. Loop (endüktif) sensör

Loop sensör, özellikle yol trafiği yönetiminde sıklıkla kullanılan elektromanyetik indüksiyon tabanlı araç algılama sistemleridir. Çalışma prensibi, yer altına gömülen bir iletken döngüsü ile manyetik alan yaratılmasına dayanmaktadır. Sensör, üzerine bir araç geldiğinde bu manyetik alanın bozulmasını algılamaktadır. Araç, metal ağırlıklı olduğu için üzerinden geçtiği iletken döngü çevresindeki manyetik alanı bozarak elektriksel bir tepki yaratmaktadır. Bu tepki, sinyal kontrol cihazlarına gönderilmektedir ve araç varlığı bilgisi olarak işlenmektedir. Tipik olarak bu sensörler, yol yüzeyine açılan oluklara yerleştirilen yalıtımlı iletken tel yapılarından oluşmaktadır. Bu iletken teller, sürekli bir döngü (loop) halinde yerleştirilmektedir ve bir araç manyetik alanı etkilediğinde döngüdeki elektrik akımı değişmektedir. Bu değişiklik, aracın algılandığı anlamına gelmektedir.

Loop sensörlerin çalışma prensibi Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasasına dayanmaktadır. Bir iletken döngüsünde bir manyetik alan oluşturulursa, bu manyetik alan değiştiğinde bir elektrik akımı indüklenmektedir. Bir araç metal gövdesiyle bu manyetik alanın içine girdiğinde, manyetik akıyı değiştirmekte ve bu değişim indüklenen akımda bir dalgalanma yaratmaktadır. Bu dalgalanma, sensör tarafından ölçülmektedir ve araç algılandığında sinyal kontrol ünitesine bir elektriksel sinyal gönderilmektedir. Analiz devreleri, bu sinyali işleyerek trafik ışıklarına ve diğer kontrol sistemlerine veri sağlamaktadır. Şekil 3.7'de loop sensör çalışma yapısı gösterilmiştir.

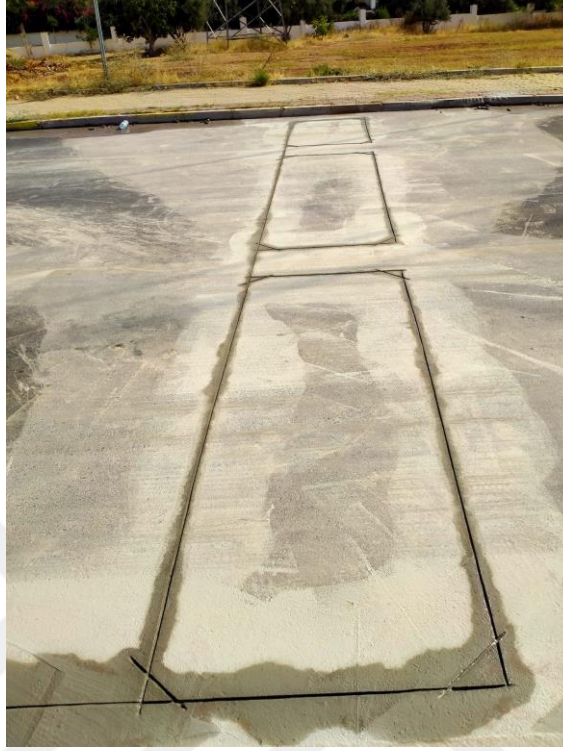


Şekil 3.7. Loop sensör çalışma yapısı (Mircea ve Nicolae, 2014)

Loop sensörlerin en önemli avantajı, yüksek doğruluk oranına sahip olması ve dayanıklılık yönünden sağlam olmasıdır. Yüksek hassasiyete sahip bu sensörler, araçların geçiş anını kesin bir doğrulukla tespit edebilmektedir. Yerin altına yerleştirdikleri için çevresel koşullardan (hava durumu, sıcaklık değişiklikleri, yağmur, kar vb.) etkilenmezler. Bu da onları uzun süreli ve güvenilir bir çözüm haline getirmektedir. Ayrıca, loop sensörler nispeten düşük maliyetlidir. Sensörler, yerleştirildikten sonra uzun süre bakım gerektirmeden çalışabilmektedirler. Ayrıca, diğer birçok sensör tipine kıyasla daha geniş bir sıcaklık aralığında stabil performans göstermektedir. Bununla birlikte, farklı konfigürasyonlarla kullanımında araç hızı, sayımı ve sınıflandırması gibi ek bilgiler de sağlayabilmektedir.

Loop sensörlerin en önemli sorunlardan biri kurulum maliyeti ve zorluklarıdır. Loop sensörler, yolun altına gömülmesi gerektiği için yolun kazılması ve sensörlerin dikkatli bir şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu süreç hem zaman alıcıdır hem de maliyetlidir. Yoldaki çatlaklar, deformasyonlar veya kazı sonrası asfaltın bozulması, sensörlerin performansını düşürebilmektedir. Özellikle ağır trafiğe veya aşırı iklim koşullarına maruz kalan bölgelerde, sensörün fiziksel olarak zarar görme riski vardır. Ayrıca, bu sensörler sadece metal tabanlı araçları algılayabilmektedir, bu da bisikletler veya plastik gövdeli elektrikli scooter gibi araçların algılanmasında zorluk yaratmaktadır. Sensörlerin yeraltına monte edilmesi, bakımın zor ve masraflı olmasına neden olabilmektedir. Bozulma durumunda tekrar kazı yapılarak tamir edilmeleri

gerekmektedir. Loop sensörün sahaya uygulanmış görüntüsü Şekil 3.8’de bulunmaktadır.



Şekil 3.8. Loop sensör saha uygulaması

3.2.3. LIDAR sensör

LIDAR trafik sensörlerinin çalışma prensibi, lazer tabanlı mesafe ölçümüne dayanmaktadır. LIDAR sensörü, belirli bir dalga boyunda lazer ışınları göndermektedir. Bu ışınlar yansıtıcı bir yüzeye çarptığında geri dönmekte ve geri dönme süresi (ToF) hesaplanmaktadır. Bu süre, nesnenin sensöre olan uzaklığıyla doğru orantılıdır. ToF prensibiyle, çok sayıda lazer darbesi gönderilerek çevredeki nesnelerin konum bilgileri (mesafe, hız, hareket yönü) milimetre seviyesinde bir hassasiyetle hesaplanabilmektedir. LIDAR sistemleri genellikle milyonlarca veri noktası oluşturmaktadır ve bu sayede çevrenin üç boyutlu haritası çıkarılabilmektedir.

LIDAR sensörleri dört ana bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler, lazer kaynağı, dedektör, optik sistem ve sinyal işleme ünitesidir. Lazer kaynağı genellikle kızılötesi spektrumunda çalışmaktadır. Bu dalga boyu özellikle gece veya düşük ışık koşullarında daha güvenilir sonuçlar sağlamaktadır. Lazer kaynağı, çok hızlı bir şekilde 360 dereceye kadar geniş bir açıda çevreyi tarayabilmektedir. Yüksek tarama frekansı,

saniyede milyonlarca lazer darbesi göndererek çok sayıda veri noktası elde edilmesini sağlamaktadır. Tipik LIDAR sistemleri saniyede 10 ila 100 tur arasında dönmektedir, bu da sensörün her açıdan sürekli ve hızlı veri toplamasını mümkün kılmaktadır (Anand ve diğ., 2020). LIDAR sensörlerinin tarama menzili ise lazer gücüne, dalga boyuna ve algılanacak nesnelerin yansıtıcılığına bağlıdır. Trafik LIDAR sensörlerinde verimli menzil genellikle 300 metreye kadar çıkabilmektedir. Bu menzil hem şehir içi kavşaklarda hem de otoyol gibi geniş alanlarda veri toplamaya elverişlidir. Hassasiyet açısından LIDAR sensörleri, genellikle milimetre seviyesinde bir doğruluk sağlamaktadır, bu da küçük ve hızlı hareket eden nesneleri bile güvenilir bir şekilde algılanabileceği anlamına gelmektedir. Şekil 3.9’da kavşakta kullanılan bir LIDAR sensör çıktısı gösterilmektedir.



Şekil 3.9. LIDAR sensör algılama çıktısı (Ouster, 2024)

Adaptif kavşak sinyalizasyon sistemlerinde LIDAR sensörlerinin kullanımı, gerçek zamanlı veri toplama ve işleme üzerine odaklanmaktadır. LIDAR, bir kavşağın etrafındaki tüm araçları, yayaları ve bisikletleri tespit ederek gerçek zamanlı trafik verisi oluşturabilmektedir. Bir adaptif kavşakta, LIDAR sensörleri her yönde gelen araçların sayısını, hızını ve araç türlerini (otomobil, otobüs, bisiklet, yaya gibi) algılayabilmektedir. Bu veriler, merkezi bir kontrol ünitesine veya yerel kontrol cihazına aktarılmaktadır. Kontrol ünitesi, gelen araçların sayısına ve yoğunluğuna bağlı olarak sinyal sürelerini ayarlamaktadır. LIDAR sensörler, hız ve yön algılama

yetenekleri sayesinde araçların kavşaklara olan yaklaşma hızlarını hesaplayabilmektedir, bu veri de potansiyel çarpışma durumlarını önlemek için sinyalizasyonu uyarlayabilmektedir. Şekil 3.10'da LIDAR sensörünün kavşak uygulamasında montajlı görseli verilmiştir.



Şekil 3.10. LIDAR sensör kavşak uygulaması (Ouster, 2024)

Trafik kontrolünde kullanılan LIDAR sistemlerinde genellikle 905 nm veya 1550 nm dalga boyunda lazerler tercih edilmektedir. 905 nm lazerler, daha kompakt ve uygun maliyetlidir, ancak göz güvenliği sınırlamaları vardır. 1550 nm lazerler ise göz güvenliği açısından daha avantajlı olup, daha yüksek güçlerde çalışabilmektedir. LIDAR sensörleri, yatayda ve dikeyde derece başına birkaç nokta tarama yapabilmektedir. Yüksek çözünürlüklü LIDAR sensörler, yatayda 0,1 derece veya daha küçük bir açıyla tarama yaparak nesneleri çok daha hassas bir şekilde algılayabilmektedir.

3.2.4. Radar sensör

Radar sensörü, elektromanyetik dalgalar kullanarak bir nesnenin konumunu, hızını ve hareket yönünü belirleyen bir algılama teknolojisidir. Trafik sensörleri olarak kullanılan radarlar, aktif sensörlerdir ve çevreye sürekli olarak radyo dalgaları göndermektedir. Bu radyo dalgaları, bir nesneye çarptığında geri yansır ve sensör bu yansıyan dalgaları analiz ederek nesnenin hızını ve uzaklığını belirlemektedir. Radar sensörlerinin temel prensibi Doppler etkisine dayanmaktadır. Bu etki, nesnenin sensöre doğru veya sensörden uzaklaşmasına bağlı olarak frekansın değişmesidir. Bu değişim, nesnenin hızını belirlemek için kullanılmaktadır.

Trafikte kullanılan radar sensörleri genellikle hareket halindeki araçları tespit etmek, hızlarını ölçmek ve trafikteki yoğunluğu analiz etmek için tercih edilmektedir (Li ve Yoon, 2023). RF teknolojisine dayanan bu sensörler, geniş bir kapsama alanına sahiptir ve zorlu hava koşullarında bile etkili çalışabilmektedir. Bu özellik, radar sensörlerini özellikle değişken çevresel koşullarda (örneğin, yağmur, kar, sis gibi) diğer algılama teknolojilerine kıyasla üstün kılmaktadır. Hatta düşük görüş koşullarında bile radarlar, trafik akışını sürekli olarak izleyebilme kapasitesine sahiptir.

Radar sensörlerinin çalışma prensibi, Doppler kaymasına dayanmaktadır. Sensör, elektromanyetik dalgalar yayarak hedefe ulaşmakta ve hedeften yansıyan sinyali geri almaktadır. Bu yansıyan sinyal, hedefin hareketine göre Doppler kaymasına uğramaktadır. Radar sistemi, bu kaymayı analiz ederek hedefin hızını tespit etmektedir. Ayrıca, yansıyan sinyalin süresine bağlı olarak hedefin mesafesi hesaplanabilmektedir. Radarlar, genellikle 24 GHz veya 77 GHz gibi milimetre dalga boylarında çalışmaktadır. Bu özellik, radarlara yüksek çözünürlük ve hassasiyet sağlamaktadır.

Adaptif sinyalizasyon kavşak sistemlerinde radar sensörleri, trafiğin gerçek zamanlı izlenmesi ve analiz edilmesi için kullanılmaktadır. Özellikle yüksek hızla gelen araçları tespit etmek ve kavşağa yaklaşan araçların hızlarını analiz etmek için son derece uygundur. Radar sensörlerinden alınan veriler, adaptif trafik kontrol sistemine iletilerek sinyal sürelerinin optimize edilmesine katkı sağlamaktadır. Radarlar sadece araçları değil, aynı zamanda yayaları ve bisikletlileri de tespit edebilmektedir. Bu sayede kavşaklardaki tüm hareketli unsurların koordinasyonu daha etkili bir şekilde sağlanabilmektedir. Şekil 3.11’de sinyalizasyon bir kavşakta kullanılan radar sensörün görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 3.11. Radar sensör kavşak uygulaması (Wavetronix, 2024)

Radar sensörlerinin en önemli özellikleri arasında yüksek algılama menzili, çoklu hedef takibi ve geniş bir tarama açısı verilebilir. Trafik radarları, verimli menzil olarak genellikle 350 metreye kadar ulaşmaktadır ve çok sayıda hedefi aynı anda takip edebilmektedir. Bu özellikleriyle, yoğun kavşaklarda bile etkin bir performans sergileyebilmektedirler. Ayrıca, radar sistemleri, araçların hızını milisaniyeler içinde ölçebilmekte ve bu verileri anlık olarak trafik yönetim sistemine aktarabilmektedir. Diğer taraftan, radarın elektromanyetik dalgaları çeşitli yüzeylerden etkilenmez, yani cam ve plastik gibi yapılarından dahi geçebilmektedir.

Radar sensörlerinin adaptif trafik sistemlerinde kullanılması hem trafik akışını iyileştirmek hem de güvenliğini artırmak açısından büyük avantajlar sağlamaktadır. Radarlar, düşük bakım maliyetleri ve uzun ömürlü çalışma süreleri ile bilinmektedir. Diğer algılama teknolojilerine kıyasla daha az kalibrasyon gerektirirler ve çevresel faktörlerden (ışık, hava koşulları gibi) daha az etkilenmektedirler. Bu özellik, radar sensörlerini özellikle dış mekanlarda uzun vadeli kullanıma uygun hale getirmektedir.

Radar sensörlerinin bazı dezavantajları da vardır. Özellikle, radarların hassasiyetleri çok yüksek hızlarda azalma gösterebilmekte ve bu durumda düşük çözünürlük problemi ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca, elektromanyetik dalgalar bazı yüzeylerden yansımada ya da nesnelerin arkasına geçtiğinde performans kayıpları yaşanabilmektedir. Radar sinyalleri, özellikle radar yoğunluklu ortamlarda (örneğin, çok sayıda radar sensörünün kullanıldığı büyük şehirlerde) parazitlere maruz kalabilmekte, bu da yanlış veya tutarsız verilerin üretilmesine neden olabilmektedir. Bir diğer zorluk ise radarların sabit nesneleri hareketli nesnelerden ayırt etme kabiliyetinin bazen yetersiz kalmasıdır. Örneğin, yolda duran bir araç ile yol kenarındaki bir tabela arasında ayırım yapmak radar için zorluk yaratabilmektedir.

3.3. Sinyalize Kavşak Performans Parametreleri

Sinyalize kavşaklarda performans, trafik akışının etkin ve güvenli bir şekilde yönetilmesi açısından büyük bir öneme sahiptir. Trafik yoğunluğunu yönetmek, gecikmeleri minimize etmek ve kaza riskini azaltmak gibi amaçlar doğrultusunda performans değerlendirilmektedir. Yüksek performanslı bir sinyalizasyon sistemi, trafiği düzenli ve akıcı bir şekilde yönlendirerek, sürücülerin ve yayaların bekleme sürelerini azaltmaktadır. Bu özellik, araçların dur-kalk yapma sıklığını azaltarak yakıt

tasarrufu sağlarken, sürücü konforunu da artırmaktadır. Trafik güvenliği açısından da performansın önemi büyüktür. Düzgün tasarlanmış ve iyi performans gösteren bir sinyalize kavşak, çarpışma riskini en aza indirmektedir. Sinyal zamanlaması doğru ayarlandığında, yaya geçişleri güvenli bir şekilde yapılabilmekte ve araçlar kavşakta daha kontrollü bir şekilde hareket etmektedir. Özellikle yoğun trafik dönemlerinde, sinyalize kavşakların performansı, trafiğin hızını belirlemede kritik bir rol oynamaktadır. İyi çalışan bir sistem, tıkanıklıkları önleyerek trafiğin daha akıcı bir şekilde ilerlemesini sağlamaktadır. Performans değerlendirmeleri, genellikle gecikme, bekleme süresi ve ortalama hız gibi kriterler üzerinden yapılmaktadır ve bu kriterler, sinyalizasyon sistemlerinin optimize edilmesinde büyük rol oynamaktadır.

3.3.1. Gecikme

Sinyalize kavşaklarda performans parametrelerinden biri olan gecikme, bir aracın kavşakta serbest akış hızında hareket edemediği süreyi ifade etmektedir. Gecikme, trafik mühendisliğinde kavşak performansını ölçmek ve trafik akışını optimize etmek için kullanılan temel göstergelerden biridir. Bir aracın kırmızı ışıktaki beklemesi, yavaşlaması veya durduktan sonra tekrar hızlanması sırasında kaybedilen sürelerin toplamı gecikme olarak değerlendirilmektedir. Bu parametre, yalnızca sürücü konforunu değil, aynı zamanda kavşak kapasitesini, trafik güvenliğini, çevre kirliliğini ve yakıt tüketimini de etkilemektedir. Bu nedenle gecikme, sinyalize kavşakların tasarımında ve yönetiminde detaylı analiz gerektiren bir unsur olarak ortaya çıkmaktadır (Fu ve Hellinga, 2000).

Gecikmenin temel sebepleri arasında, sinyal süreleri, trafik yoğunluğu ve araçların birbirini izleme ve hareket etme süreleri bulunmaktadır. Özellikle yoğun trafikli kavşaklarda, yeşil ışık süresi her yön için yetersiz kaldığında araçlar durmak zorunda kalmakta ve bu da toplam gecikme süresini artırmaktadır. Gecikme yalnızca kırmızı ışık süresiyle değil, aynı zamanda araçların yeniden hızlanması için harcadıkları süreyle de doğrudan ilişkilidir. Araçlar yeşil ışık yandığında anında tam hızlarına ulaşamadıkları için, hareketlenme gecikmesi de göz önünde bulundurulması gereken önemli bir etkidir.

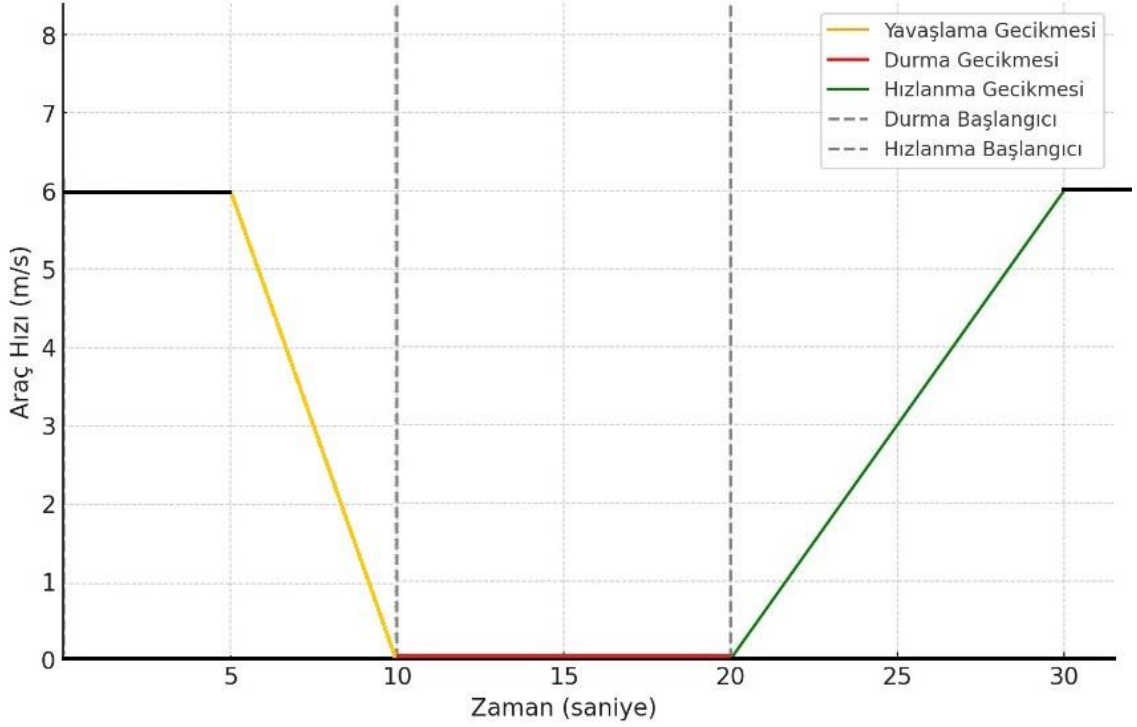
Gecikmenin analizi, sinyalize kavşakların etkinliğini artırmak adına büyük önem taşımaktadır. Sinyal sürelerinin ayarlanması, trafik hacminin düzenlenmesi ve kavşak tasarımının optimize edilmesi gibi faktörler, gecikme süresinin minimize edilmesi için

kullanılabilecek temel araçlardır. Bir kavşakta gecikmenin yüksek olması, trafik sıkışıklığını ve yakıt tüketimini artırmaktadır. Araçların durup kalkma sıklığı arttıkça yakıt tüketimi artar ve bu da hem ekonomik hem de çevresel açıdan olumsuz sonuçlar doğurmaktadır. Bunun yanı sıra, yüksek gecikme süreleri sürücülerde stres yaratabilmekte ve dikkatsiz sürüş davranışlarına yol açabilmektedir. Bu durum, kazaların ve trafik güvenliği sorunlarının artmasına neden olabilmektedir.

Gecikme, sinyalize kavşakların farklı yönleri ve fazları için hesaplanarak değerlendirilmektedir. Kavşaktaki her bir hareket yönü için ayrı ayrı gecikme süreleri hesaplanmakta ve bu veriler, kavşağın genel performansını ortaya koymaktadır (Chen ve diğ., 2013). Örneğin, dört kollu bir kavşakta kuzey-güney ve doğu-batı yönlerinde farklı trafik yoğunlukları olabilir ve bu yönlerin her biri için farklı gecikme değerleri elde edilir. Eğer bir yön için gecikme çok yüksekse, bu durumda o yönün sinyal süresinin yeniden düzenlenmesi gerekebilmektedir. Böylece, tüm yönler için eşit ya da kabul edilebilir düzeyde gecikme süreleri sağlanarak, kavşaktaki trafik akışı daha verimli hale getirilebilmektedir.

Gecikme, kavşaktaki araçların durmadan geçme olasılıkları ile de ilişkilidir. Eğer bir araç kavşağa yaklaştığında yeşil ışık yanıyorsa ve aracın durmasına gerek kalmıyorsa, bu durumda gecikme yaşanmamış demektir. Ancak kırmızı ışığa denk gelen araçlar durmak zorunda kaldığında, bu araçlar için belirli bir gecikme süresi ortaya çıkmaktadır. Sinyalize kavşakların performansını optimize etmek için yapılan çalışmalarda, bu duruma çözüm bulmak amacıyla çeşitli algoritmalar ve optimizasyon yöntemleri geliştirilmiştir. Amaç, trafiğin en az duraklama ile akmasını sağlayarak gecikme sürelerini minimuma indirmektir.

Sinyalize kavşaklarda gecikme, sadece bireysel araçlar için değil, genel trafik akışı açısından da önemli sonuçlar doğurmaktadır. Örneğin, bir kavşaktaki gecikme süresi, aynı güzergâhtaki diğer kavşaklara da yansiyabilmektedir. Bir kavşakta gecikme yaşanıyorsa, bu durum zincirleme bir etki yaratarak, arka arkaya gelen diğer kavşaklarda da tıkanıklıklara neden olabilmektedir. Bu tür durumlar, trafiğin genel akışını olumsuz etkileyebilmekte ve şehir genelinde yaygın trafik sıkışıklıklarına yol açabilmektedir.



Şekil 3.12. Örnek gecikme grafiği

Gecikmenin grafiksel olarak örnek bir gösterimi Şekil 3.12’de yer almaktadır. Örneğin, bir sinyal döngüsünde geçen süre boyunca her bir aracın hareketine bakıldığında, durma ve hızlanma sürecinin belirgin olduğu bir grafik çizilebilmektedir. Bu grafik, bir aracın kavşağa yaklaşırken hızının düşmeye başladığı, kırmızı ışıktaki tamamen durduğu, yeşil ışıkla birlikte yeniden hızlanmaya başladığı ve sonunda serbest akış hızına ulaştığı noktaları göstermektedir. Grafikte, yatay eksende zaman, dikey eksende ise aracın hızı yer almaktadır. Bu grafik, gecikmenin araç hızına nasıl etki ettiğini görsel olarak ortaya koymakta ve araçların trafik akışındaki hız değişimlerinin gecikme üzerindeki etkisini daha net anlaşılmasını sağlamaktadır. Bu grafikte yavaşlama, durma ve hızlanma süreleri ve eğimleri kavşak durumu ya da araca göre değişebilmektedir.

3.3.2. Bekleme süresi

Kavşak sinyalizasyon sistemlerinde bekleme süresi, sürücünün bir sinyalizasyon kavşakta kırmızı ışık nedeniyle durduğu ve hareket edemediği süreyi ifade etmektedir. Bu süre, aracın kavşağa yaklaşmasından itibaren kırmızı ışıktaki geçirdiği zamanı içermekte ve yalnızca durduğu süreyi kapsamaktadır. Diğer bir deyişle, araç durduktan

sonra yeşil ışığın yanmasını beklerken harcadığı süre bekleme süresi olarak tanımlanmaktadır. Bu süre, trafiğin akışını ve sürücülerin psikolojisini etkileyen önemli bir unsurdur (Wu ve diğ., 2009).

Bekleme süresi, sinyalizasyon sistemlerindeki sürelerle ilgili olarak değişkendir. Örneğin, kırmızı ışık süresi uzun olan bir kavşakta bekleme süresi de buna paralel olarak artacaktır. Trafik hacmi ise bekleme süresi üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Yoğun trafik koşullarında araçlar daha uzun süre kırmızı ışıkta kalabilmekte, bu da kuyrukların oluşmasına ve bekleme süresinin uzamasına yol açmaktadır. Özellikle kavşağın kapasitesi, yani birim zamanda geçebilecek araç sayısı sınıra yaklaştığında veya sınırı aştığında bekleme süreleri önemli ölçüde artmaktadır.

Bekleme süresi yalnızca kırmızı ışıkta durulan süreyi kapsadığından gecikme parametresinden farklıdır. Gecikme, aracın tüm hareket boyunca yaşadığı toplam kayıp zamanı ifade etmektedir ve hem bekleme süresini hem de kavşakta durma-yavaşlama gibi diğer etkenleri içermektedir. Bu nedenle, bekleme süresi yalnızca kırmızı ışıkta geçen süreyi ölçerken, gecikme araç hareketinin genel performansına odaklanmaktadır.

Bekleme süresi, kavşağın sinyalizasyon yapısına göre değişiklik gösterebilmektedir. Örneğin, tam trafik uyarmalı sinyal sistemlerinde araçların varlığına bağlı olarak yeşil ışık süresi otomatik olarak ayarlanabilmektedir. Bu sistemler, düşük yoğunlukta bekleme süresini en aza indirmeyi hedeflerken, yüksek yoğunlukta da trafiğin etkin bir şekilde akmasını sağlamaya çalışmaktadır. Bununla birlikte, sabit zamanlı sinyalizasyon sistemlerinde bekleme süresi daha öngörülebilir olabilmektedir, ancak trafiğin gerçek zamanlı yoğunluğu dikkate alınmadığı için bu sistemler yoğun saatlerde sürücüler için daha fazla bekleme süresi yaratabilmektedir.

Özetle, sinyalizasyon kavşaklarda bekleme süresi, trafiğin etkin bir şekilde yönetilmesi açısından önemli bir parametredir. Bekleme süresinin minimuma inmesi hem sürücülerin konforunu artırmakta hem de kavşaklardaki genel trafik akışını iyileştirmektedir. Bu süre, doğru sinyalizasyon stratejileri ve gelişmiş trafik yönetim sistemleri ile optimize edilebilmektedir.

3.3.3. Ortalama hız

Kavşak sinyalizasyon sistemlerinde performans göstergelerinden biri olan ortalama hız, kavşaktan geçen araçların birim zamanda belirli bir mesafeyi kat ederken elde ettikleri hızların ortalamasını temsil etmektedir. Bu parametre, kavşak

performansının değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamakta ve trafik akışının etkinliğini ölçmek için kullanılmaktadır. Ortalama hız, kavşağın kapasitesi ve trafik yoğunluğu gibi faktörlerle doğrudan ilişkilidir. Aynı zamanda sürüş konforu ve trafik güvenliği ile de bağlantılıdır. Kavşağın tasarımı ve sinyalizasyon stratejilerinin etkinliği, ortalama hız üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir.

Ortalama hızın belirlenmesinde birkaç temel faktör öne çıkmaktadır. İlk olarak, sinyal periyot süreleri ve bu sürelerin trafik akışına etkisi kritik bir unsurdur. Kavşaktaki araçlar, sinyalizasyon nedeniyle yavaşlamak ya da durmak zorunda kaldıklarında, yeniden hızlanma süreçleriyle ortalama hız düşüş göstermektedir. Özellikle dur-kalk hareketlerinin sık yaşandığı kavşaklarda, bu etki daha belirgin hale gelmektedir. Araçların sinyal fazı boyunca ne kadar süre durdukları, ardından ne kadar hızlandıkları ve ne zaman tam hızlarına ulaştıkları, ortalama hızın belirlenmesinde doğrudan rol oynamaktadır. Sinyal periyot süresinin uzun olduğu durumlarda, araçlar daha uzun süre beklediğinden ortalama hızda düşüş yaşanmaktadır.

Trafik hacmi ve kavşaktaki araç yoğunluğu, ortalama hızı etkileyen bir diğer önemli parametredir. Yüksek trafik yoğunluğuna sahip kavşaklarda, araçlar sık sık durmak zorunda kalabilmekte ve bu da ortalama hızın önemli ölçüde azalmasına yol açmaktadır. Özellikle kavşaktaki kapasitenin trafik talebini karşılayamadığı durumlarda, araçlar sinyal periyotları arasında birikerek kuyruk oluşturmakta ve ortalama hızları düşmektedir. Bu tür durumlarda, sinyalizasyon sisteminin adaptif olarak düzenlenmesi, yani trafik yoğunluğuna göre sinyal sürelerinin dinamik olarak ayarlanması, ortalama hızın korunmasında önemli bir rol oynayabilmektedir. Adaptif sinyalizasyon sistemleri, trafik akışını gerçek zamanlı izleyerek, kavşaktaki yeşil ışık sürelerini trafik hacmine göre optimize etmektedir ve böylece ortalama hızı yükseltmeye çalışmaktadır.

Ortalama hız aynı zamanda kavşaklardaki geometrik düzenlemeler ve şerit yapılandırmaları ile de yakından ilişkilidir. Örneğin, kavşak içerisinde sola dönüş gibi manevralar için ayrı fazların varlığı, araçların bekleme sürelerini artırarak ortalama hız üzerinde olumsuz bir etkiye neden olabilmektedir. Ayrıca, şerit sayısının yetersiz olduğu ya da şeritlerin dar olduğu kavşaklarda, araçlar yavaşlamak zorunda kalmakta ve bu durum ortalama hızın azalmasına katkıda bulunmaktadır. Bu bağlamda, kavşak geometrisinin optimize edilmesi ve şerit düzenlemelerinin trafik hacmine uygun şekilde yapılandırılması, ortalama hızın iyileştirilmesinde önemli bir strateji olarak öne çıkmaktadır.

Teknik olarak ortalama hız, belirli bir zaman diliminde kavşaktan geçen araçların kat ettiği toplam mesafenin bu zaman dilimine bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Bu hesaplama yapılırken, araçların kavşağa yaklaşma hızları, sinyalizasyon nedeniyle durma ve hızlanma süreleri dikkate alınmaktadır. Araçların sinyalizasyon kavşakta geçirdiği süreler arttıkça, ortalama hız düşme eğilimi göstermektedir. Bu nedenle, kavşak performansını iyileştirmek ve trafik akışını hızlandırmak amacıyla sinyal periyot sürelerinin ve faz sürelerinin optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır.

3.4. Sinyalize Kavşaklar için Gecikme Tahmin Modelleri

Sinyalize kavşaklar için gecikme tahmin modelleri, bir kavşakta araçların sinyalizasyon nedeniyle maruz kaldıkları zaman kayıplarını hesaplamak amacıyla kullanılan analitik temelli yöntemleri içermektedir. Gecikme, bir aracın serbest akış hızında kesintisiz geçiş yapabileceği süreden, sinyalizasyon ve diğer trafik akış faktörleri nedeniyle sapması olarak tanımlanmaktadır. Bu gecikmeler, kavşak performansını değerlendirmek ve trafik yönetim stratejilerini optimize etmek açısından kritik bir öneme sahiptir.

3.4.1. Webster yöntemi

Webster gecikme modeli, sinyalize kavşaklarda araçların ortalama bekleme süresini tahmin etmek için geliştirilmiş analitik bir yöntemdir. 1958 yılında F.V. Webster tarafından yayınlanan bu model, sinyalize kavşakların performansını ölçmek ve optimizasyon yapmak amacıyla kullanılmaktadır. Model, bir kavşakta araçların maruz kaldığı ortalama gecikmeyi hesaplamak için trafik hacmi, kapasite ve sinyal periyot süreleri gibi temel parametreleri dikkate almaktadır. Webster modeli, araç başına düşen ortalama gecikmeyi Denklem 3.1’de verilen formülü kullanarak hesaplamaktadır (Webster, 1966).

$$d = \frac{C(1 - \lambda)^2}{2(1 - \lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1 - x)} - 0,65 \left(\frac{C}{q^2} \right)^{\frac{1}{3}} x^{2+5\lambda} \quad (3.1)$$

d: Taşıt başına ortalama gecikme (saniye/taşıt),

C: Devre süresi (saniye),

- q: İlgili fazdaki akım (taşıt/saat),
 λ : Yeşil sürenin (G) devre süresine oranı (G/C),
x: Doygunluk oranı ($x=q/\lambda s$)(s=doygun akım).

Webster modeli, kavşaktaki trafik akışını düzenlemek için sinyal devre sürelerini optimize etme imkânı sunmaktadır. Sinyal devre süresini ayarlayarak araçların yeşil faz süresince daha verimli geçiş yapmaları sağlanabilmektedir. Böylece gecikme en aza indirgenmekte ve kavşağın kapasitesi daha verimli kullanılabilmektedir. Ancak modelin belirli sınırlamaları vardır. Webster modeli, genellikle sabit zamanlı sinyalizasyon sistemlerinde etkili olup, adaptif veya tam trafik uyarmalı sistemler gibi dinamik sinyalizasyon koşullarında daha karmaşık faktörleri göz önüne almamaktadır. Ayrıca model, trafik akışının düzenli olduğu varsayımına dayanmaktadır. Gerçek dünyada trafik akışı düzensiz olabilmekte ve bu durumda gecikme tahminleri sapmalar gösterebilmektedir.

Webster gecikme modelinin avantajı, hesaplamalarının basitliği ve hızlı uygulanabilirliğidir. Özellikle ilk değerlendirmeler ve tasarım aşamalarında kullanışlıdır. Bununla birlikte, daha karmaşık kavşaklar veya yüksek trafik yoğunluklarına sahip bölgeler için simülasyon tabanlı daha gelişmiş yöntemlerle desteklenmesi gerekebilmektedir. Bu durum, modelin doğruluğunu ve uygulanabilirliğini artırmaktadır.

Webster modeli, kavşak performansını değerlendirme ve gecikmeyi optimize etmek için kullanılmaktadır. Kavşaktaki trafik yoğunluğu arttığında, sinyal devre süreleri ve yeşil faz süreleri düzenlenerek gecikmenin azaltılması hedeflenmektedir. Trafik mühendisleri, bu modeli kullanarak sinyal optimizasyonu yapabilmekte ve kavşak performansını artırmaya yönelik stratejiler geliştirebilmektedir. Modelin basitliği, hızlı bir analiz aracı olarak kullanılmasını sağlamaktadır ve birçok trafik yönetim senaryosunda referans alınmaktadır.

3.4.2. Akçelik yöntemi

Akçelik gecikme modeli, trafik mühendisliğinde özellikle yüksek trafik yoğunluğuna sahip sinyalizasyon kavşaklarında araç başına düşen ortalama gecikme süresini tahmin etmek için geliştirilmiş bir modeldir. Bu model, kapasitenin zorlandığı

senaryolarda trafik yoğunluğunun etkilerini doğru bir şekilde yansıtarak daha gerçekçi bir gecikme tahmini sunmaktadır. Akçelik'in bu modeli, trafik akışının dinamik yapısını dikkate almakta ve trafik yoğunluğunun belirli bir kritik değeri aşması durumunda, gecikmenin daha belirgin hale geldiğini vurgulamaktadır. Bu sayede, kavşak performansını daha doğru bir biçimde analiz edebilmekte ve kavşaklarda yaşanan gecikmeyi ayrıntılı olarak modellemektedir. Denklem 3.2'de, Akçelik modelinde toplam gecikmenin hesaplama formülü verilmiştir (Akçelik, 1981).

$$D = \frac{qc(1 - u)^2}{2(1 - y)} + N_0x \quad (3.2)$$

D: Toplam gecikme (saniye),

qc: Her devre süresinde gelen ortalama taşıt sayısı (taşıt),

q: Akım (taşıt/saniye),

c: Devre süresi (saniye),

u: Yeşil faz süresi oranı,

y: Akım oranı,

x: q/Q doygunluk derecesi ,

Q: Kapasite (taşıt/saat),

N₀: Ortalama kuyruk uzunluğu (taşıt).

Akçelik modeli, kavşaktaki gecikmeyi sinyal periyot süresi, trafik hacmi ve kapasite gibi kavşağın temel özelliklerine bağlı olarak tahmin etmektedir. Modelde kullanılan matematiksel yapılar, trafik akışının kapasiteye yaklaştıkça gecikmenin artış hızının farklılaştığını göstermektedir. Sinyal döngüsündeki kırmızı ışık süresi boyunca bekleyen araçlar, sinyal döngüsünün yeşil ışık süresiyle dengeli bir biçimde hareket ettiklerinde bekleme süresi sınırlıdır. Ancak trafik hacmi kapasiteye yaklaştıkça, bu denge bozulmakta ve kavşak üzerindeki araç sayısı her bir periyotta artmaya başlamaktadır. Bu durum, araç başına düşen ortalama bekleme süresini artırmakta ve kavşaktaki gecikmenin daha yüksek oranlarda gözlenmesine yol açmaktadır.

Akçelik modelinde gecikme tahmini, sinyal periyot süresinin kırmızı ve yeşil ışıktaki geçen kısmının ve bu sürelerin trafik akışı üzerindeki etkilerinin ayrıntılı bir analizine dayanmaktadır. Sinyal süresinin trafik hacmi üzerindeki etkisini vurgulayan model, özellikle yoğun kavşaklarda sinyal sürelerini düzenleyerek trafik akışını optimize etmeye yönelik bir analiz imkanı sunmaktadır. Örneğin, yüksek hacimli

senaryolarda trafik akışının daha verimli olması için kırmızı ve yeşil faz süreleri dikkatle ayarlanmalı, kapasitenin maksimum verimlilikle kullanılması sağlanmalıdır. Akçelik modelinin bu yaklaşımı, sinyal devre süresinin ve yeşil ışık süresinin belirli bir dengesini bulmaya çalışmaktadır. Böylece kavşak verimliliğini maksimize ederek araçların gecikme sürelerini minimize etmektedir.

Akçelik gecikme modeli ayrıca trafik akışındaki dalgalanmaların gecikme üzerindeki etkilerini de ele almaktadır. Trafik akışı düzensiz olduğunda, belirli bir sürede geçen araç sayısı beklenenden fazla olabilmektedir ve bu durum, sinyal döngüsünde bekleyen araç sayısının artmasına neden olmaktadır. Trafik akışındaki bu tür değişimler, yoğunluk arttıkça daha belirgin hale gelmekte ve kavşağın verimli çalışmasını engelleyerek araçların bekleme süresini artırmaktadır. Akçelik modeli, trafik yoğunluğunun ani artışlarını göz önünde bulundurarak kavşaklardaki trafik yönetimini daha sağlıklı bir hale getirmeyi hedeflemektedir. Bu yaklaşımla Akçelik modeli, kapasitenin zorlandığı durumlarda daha yüksek doğrulukta gecikme tahminleri sunmakta ve trafik akışının dalgalanması nedeniyle artan gecikmeleri daha doğru şekilde yansıtmaktadır.

Model, yoğun trafik koşullarında kavşak verimliliğini artırmak ve gecikme sürelerini minimize etmek için önemli bir araç olarak kullanılmaktadır. Kavşakta geçiş yapan araç sayısının kapasiteye oranı yükseldikçe, sinyal döngüsünün trafik üzerindeki etkileri daha fazla önem kazanmakta ve Akçelik modeli bu duruma uygun tahminlerle trafik yönetimini optimize etmeye katkı sağlamaktadır. Örneğin, bir sinyal döngüsünde kapasiteyi aşan trafik hacmi durumunda kavşakta biriken araçlar sonraki döngülere taşınmaktadır, bu da toplam gecikme süresini artırmaktadır. Akçelik modeli, sinyal sürelerinin trafik yoğunluğuna göre ayarlanması gerektiği varsayımıyla hareket etmekte ve yoğun trafiğin yol açtığı gecikme artışlarını tahmin ederek kavşak yönetim stratejilerini iyileştirmektedir.

3.4.3. HCM yöntemi

HCM gecikme tahmin modeli, sinyalizasyon kavşaklarda yaşanan trafik akışını ve buna bağlı gecikme süresini detaylandırmak amacıyla geliştirilmiş bir modeldir. Bu model, trafik yoğunluğunun ve sinyal süresinin kavşak verimliliği üzerindeki etkilerini göz önünde bulundurarak araç başına düşen ortalama bekleme süresini tahmin etmeye yönelik çeşitli değişkenler kullanmaktadır. Model, sinyal devre süresi, yeşil ışık süresi

oranı, trafik yoğunluğu ve kavşak kapasitesi gibi parametreleri bir araya getirerek gecikmenin daha kapsamlı bir analizini sunmaktadır. HCM, kavşakların farklı trafik yoğunluğu seviyelerindeki performansını ölçmek ve hizmet düzeylerini belirlemek için kullanılmakta olup, özellikle Amerika Birleşik Devletleri ve diğer birçok ülkede yaygın olarak trafik mühendisliği çalışmalarında uygulanmaktadır. HCM yöntemine göre araç başına düşen gecikme Denklem 3.3'teki formül ile tespit edilmektedir (Murat, 2006).

$$d = d_1(PF) + d_2 + d_3 \quad (3.3)$$

d: Araç başına düşen kontrol gecikmesi (saniye/taşıt),

d_1 : Değişmeyen varışlar varsayıldığında rutin kontrol gecikmesi (saniye/taşıt),

PF: Değişmeyen gecikme düzeltme faktörü,

d_2 : Rastgele varışların etkisini hesaba katmak için artımlı gecikme,

d_3 : Analiz dönemindeki tüm araçlar için gecikmeyi hesaba katan ilk kuyruk gecikmesi.

HCM modeline göre, gecikme tahminlerinde sinyal devre süresinin ve trafik hacminin kavşaktaki araç akışına etkisi oldukça belirleyicidir. Trafik akışı arttıkça, sinyal devre süresinin yeterliliği azalmakta ve bu durum, sinyal sürelerinin araç geçişine uyumlu bir şekilde düzenlenmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır. Modelin temel varsayımlarından biri, trafik yoğunluğunun artmasıyla birlikte kavşakta bekleyen araçların sayısının ve buna bağlı olarak bekleme sürelerinin yükselmesidir. Bu durum, trafik akışının kapasite sınırlarına yaklaştığı durumlarda belirginleşir ve her sinyal döngüsü sonunda geçen araç sayısı ile döngüde bekleyen araç sayısı arasındaki ilişkiyi etkilemektedir. Kavşaktaki trafik hacminin kapasiteye yakın olduğu durumlarda, araçların bekleme süresi sinyal döngüsünün kırmızı ışık süresi boyunca artarken, yeşil ışık süresine geçildiğinde bu sürenin azalması beklenmektedir. Ancak, kapasitenin zorlandığı durumlarda bekleme süresi bu geçişe rağmen artış göstermektedir.

HCM modeli, sinyal süresinin düzenlenmesi ve trafik hacmiyle uyumlu hale getirilmesi gerektiğini savunmaktadır. Yüksek trafik hacimli kavşaklarda, devre süresinin uygun şekilde düzenlenmesi ve kırmızı-yeşil faz sürelerinin dengelenmesi, araç başına düşen ortalama bekleme süresinin minimuma indirilmesini sağlamaktadır. HCM modelinde, sinyal döngüsünün her fazında geçen araç sayısının, devre süresi boyunca dengeli bir dağılım gösterdiği varsayımı yapılmaktadır. Bu varsayım da kapasite sınırlarına yaklaşan trafik akışlarında bekleme süresinin azaltılabilmesi için

ideal faz sürelerinin belirlenmesine olanak tanımaktadır. Böylece model, kavşakta yaşanan toplam gecikmeyi, trafik akışının yoğun olduğu senaryolarda dahi optimize etmeyi amaçlamaktadır. Özellikle kapasite kullanımının %90 ve üzeri olduğu senaryolarda, gecikme tahminleri daha hassas bir analiz gerektirmektedir ve HCM modelinin bu gibi yüksek hacimli kavşaklarda sağladığı tahminler oldukça önemlidir.

Kavşaktaki trafik yoğunluğunun dalgalandığı durumlarda HCM modeli, sinyal döngüsünde bekleyen araç sayısındaki değişimlerin gecikme süresini nasıl etkilediğini incelemektedir. Sinyal döngüsünde yaşanan bu değişimler, belirli bir faz boyunca akış gösteren araçların bir sonraki döngüde yeniden beklemeye başlamasıyla sonuçlanmaktadır. HCM modeli, trafik akışındaki bu düzensizliğin gecikme üzerinde yarattığı etkiyi değerlendirmekte ve sinyal sürelerini bu akışa uyumlu hale getirmeyi amaçlamaktadır. Özellikle yüksek hacimli kavşaklarda, sinyal döngülerinin her bir fazında yaşanan dalgalanmalar trafik akışını yavaşlatmakta ve gecikme süresini artırmaktadır. HCM modelinin gecikme tahminlerindeki temel amacı, bu düzensizliklerin olumsuz etkisini azaltarak trafik akışını optimize etmektir.

Bu modelin en güçlü yönlerinden biri, çeşitli trafik yoğunlukları ve sinyal süreleri için gecikme tahminini ayrı ayrı yapabilmesidir. HCM modeli, kavşakların hizmet seviyelerini belirlemek ve trafik yoğunluğuna bağlı olarak gecikme sürelerini hesaplamak için kullanılan standart bir çerçeve sunmaktadır. Model, kavşaktaki trafik akışının kapasite sınırlarını aşması durumunda gecikme süresinin hızla arttığını öne sürmekte ve bu nedenle sinyal sürelerinin, kavşağın kapasite kullanımı ile dengeli bir biçimde düzenlenmesini önermektedir.

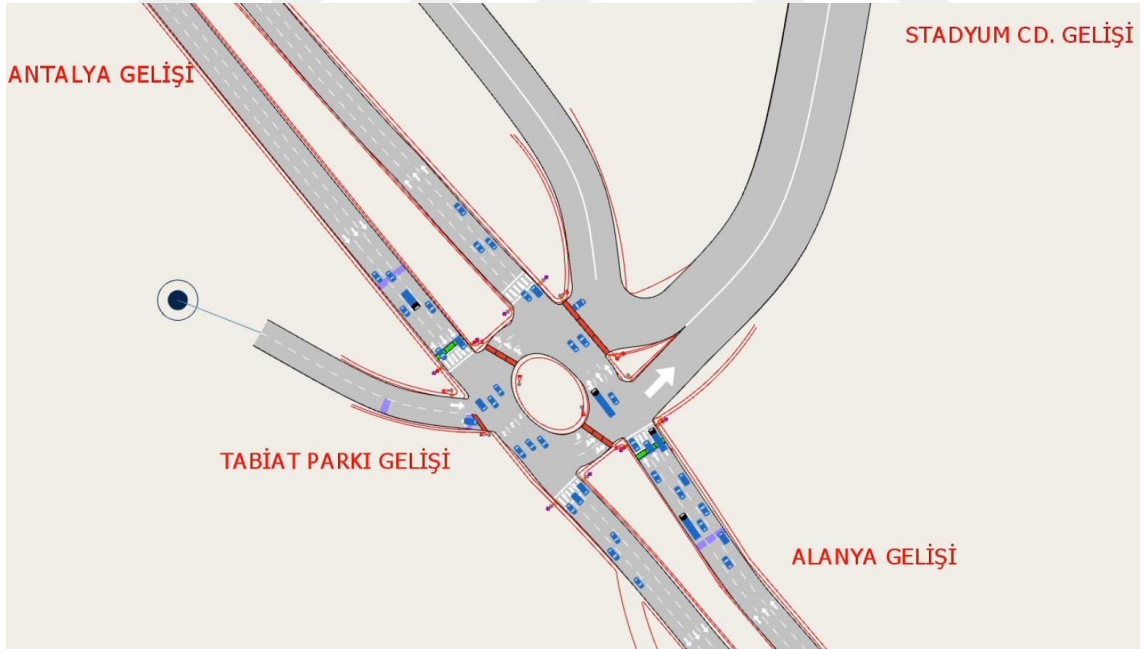
3.5. Sinyalize Kavşak Modellemede Kullanılan Simülasyon Programları

Sinyalize kavşak modellemede kullanılan simülasyon programları, trafik akışını analiz etmek, kavşak performansını değerlendirmek ve farklı senaryolar altında sinyal planlarının etkinliğini test etmek için kullanılmaktadır. Bu programlar, araçların hareketlerini, yaya hareketlerini ve trafik yoğunluğunu simüle ederek kavşaklarda yaşanan gecikme, kuyruk uzunluğu ve ortalama hız gibi performans göstergelerini ölçmektedir. Ayrıca, sinyal süreleri, faz planları ve kavşak düzenlemelerinin optimize edilmesi amacıyla farklı düzenlemelerin etkilerini görselleştirmekte ve karşılaştırma olanağı sağlamaktadır. Bu tür simülasyon araçları, kavşaklarda trafik akışının daha verimli hale getirilmesine ve olası trafik sıkışıklıklarının önlenmesine yardımcı

olmaktadır. Tez çalışması kapsamında AIMSUN ve SUMO simülasyon programları detaylı bir şekilde kullanılmıştır.

3.5.1. AIMSUN simülasyon programı

AIMSUN, sinyalize kavşaklar ve şehir içi ulaşım ağları gibi trafik altyapılarının performansını analiz etmek, simüle etmek ve iyileştirmek için kullanılan ileri düzey bir simülasyon programıdır. Mikro, mezo ve makro simülasyon yetenekleriyle farklı ölçeklerde trafik akışını modelleme imkânı sunan AIMSUN, çok yönlü bir analiz ve karar destek aracıdır. Program, trafik mühendisliği ve ulaşım planlaması alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Şehir içi yollar, otoyollar, kavşaklar, koridorlar gibi birçok trafik ortamında kapsamlı simülasyon yapılmasına olanak tanımaktadır (Shaker ve Bigdeli Rad, 2018). AIMSUN, özellikle trafik akışının detaylı olarak analiz edilmesi ve optimizasyon çalışmaları için kullanıcılara geniş bir araç yelpazesi sunmaktadır. Şekil 3.13'te AIMSUN simülasyon programında modellenmiş örnek bir sinyalize kavşak simülasyonu bulunmaktadır.



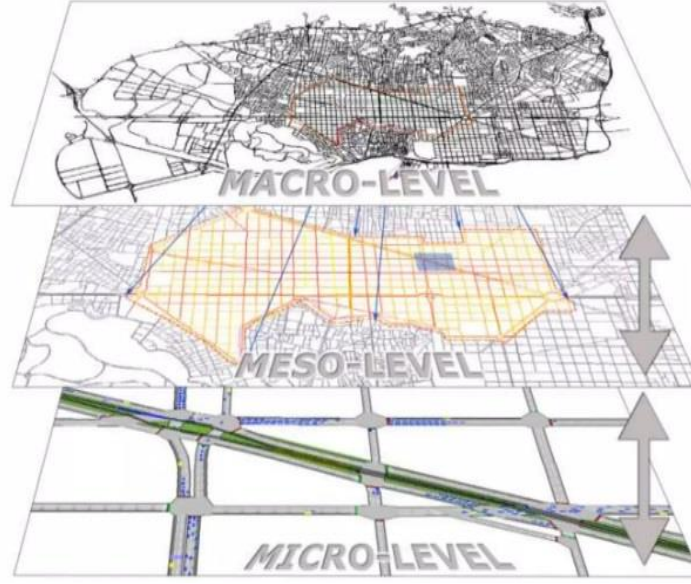
Şekil 3.13. AIMSUN simülasyon programında modellenmiş örnek bir sinyalize kavşak simülasyonu

AIMSUN'un mikro simülasyon özelliği, trafik akışını araç düzeyinde modellemeye olanak tanımaktadır. Mikro simülasyonda her bir aracın hızlanma, yavaşlama ve şerit değiştirme gibi davranışları gerçek zamanlı olarak simüle

edilmektedir. Bu kapsamda, araçların bireysel davranışlarının tüm trafik akışı üzerindeki etkilerini incelemek mümkün hale gelmektedir. Özellikle sinyalize kavşaklarda araçların sinyal sürelerine verdiği tepki, kavşaktaki kuyruk oluşumları ve geçiş süresi gibi kritik performans göstergeleri mikro düzeyde ayrıntılı olarak analiz edilmektedir. Bu düzeydeki analizler, kavşaklardaki trafik sinyal sürelerinin optimizasyonu, kavşak kapasitesinin artırılması ve araç akışının daha verimli bir şekilde düzenlenmesi için önemli veriler sağlamaktadır.

Mezo simülasyon özelliği, daha geniş alanlarda trafik analizleri yapmak için tercih edilmektedir. Bu düzeyde, AIMSUN simülasyon modeli, trafik akışını bir grup araç ya da yol segmentleri üzerinden değerlendiren ve daha genelleştirilmiş bir analiz sunan bir modeldir. Bu yaklaşım, şehir içi veya şehirler arası ağlardaki trafik yoğunluğunu simüle etmek isteyen mühendisler için kullanışlı bir araçtır. Mezo düzeyde yapılan simülasyonlar, özellikle ulaşım planlamasında yoğun trafik akışını, yol kapasitesini ve ana arterlerde oluşan tıkanıklıkları anlamak ve çözüm önerileri geliştirmek için uygundur. AIMSUN'un mezo simülasyonu, yol ağının genel performansını değerlendirmek ve geniş çapta stratejik trafik yönetim planları geliştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

AIMSUN, aynı zamanda makro simülasyon yapabilme özelliğine de sahiptir. Makro simülasyon, özellikle geniş bir ulaşım ağında genel trafik yoğunluğunu, ortalama hızları ve gecikme sürelerini analiz etmek için kullanılmaktadır. Bu simülasyon seviyesi, daha geniş bir perspektiften trafik yönetim stratejileri geliştirmek ve şehir genelinde ulaşım politikalarını değerlendirmek isteyen trafik mühendisleri ve şehir planlamacıları için yararlıdır. Makro düzeyde analiz, bölgesel ulaşım sistemlerinin uzun vadeli etkilerini değerlendirme ve trafiği genel olarak yönetme konusunda veri sağladığından, şehir içi ulaşım planlaması açısından değerli bilgiler sunmaktadır. Şekil 3.14'te mikro, mezo ve makro simülasyon yapılarını gösteren örnek bir görsel verilmiştir.



Şekil 3.14. AIMSUN mikro, mezo ve makro simülasyon yapıları (Aimsun, 2024)

AIMSUN'un simülasyon süreçlerinde gelişmiş algoritmalar kullanılmaktadır ve modelleme süreci oldukça esnektir. Program, kullanıcıların gerçek trafik verilerini entegre ederek simülasyonları kalibre etmesine ve gerçeğe yakın sonuçlar elde etmesine olanak tanımaktadır. Bu süreçte, hız, trafik yoğunluğu, trafik hacmi gibi çeşitli parametreler sisteme girilerek daha doğrusal ve güvenilir sonuçlar elde edilmektedir. AIMSUN ayrıca, adaptif sinyal kontrol sistemleri gibi ileri düzey trafik yönetim çözümlerinin simülasyonunu yapabilme kabiliyetiyle öne çıkmaktadır. Özellikle büyük şehirlerde trafik yoğunluğunun sürekli değiştiği dinamik koşullarda, adaptif sinyalizasyon stratejilerinin etkinliğini test etmek için AIMSUN geniş bir uygulama alanı sağlamaktadır (Fang ve Elefteriadou, 2006).

Programın en dikkat çekici özelliklerinden biri de görsel ağırlıklı arayüzüdür. AIMSUN, simülasyon sonuçlarını grafikler, animasyonlar ve veri tabloları aracılığıyla anlaşılır bir şekilde sunmaktadır. Bu sayede, kullanıcılar simülasyon çıktılarından elde edilen verileri daha kolay analiz edebilmekte ve karar destek sistemleri oluşturabilmektedirler. Ayrıca, simülasyon sonuçları üzerinden senaryoların kıyaslanması, analiz edilmesi ve karar alma sürecine yönelik görselleştirme araçları ile kavşak performansının detaylı olarak değerlendirilmesine imkân tanımaktadır. Bu özellik, karmaşık trafik ağlarında yapılan simülasyonları sadeleştirmekte ve trafik mühendislerinin karar süreçlerini hızlandırmaktadır.

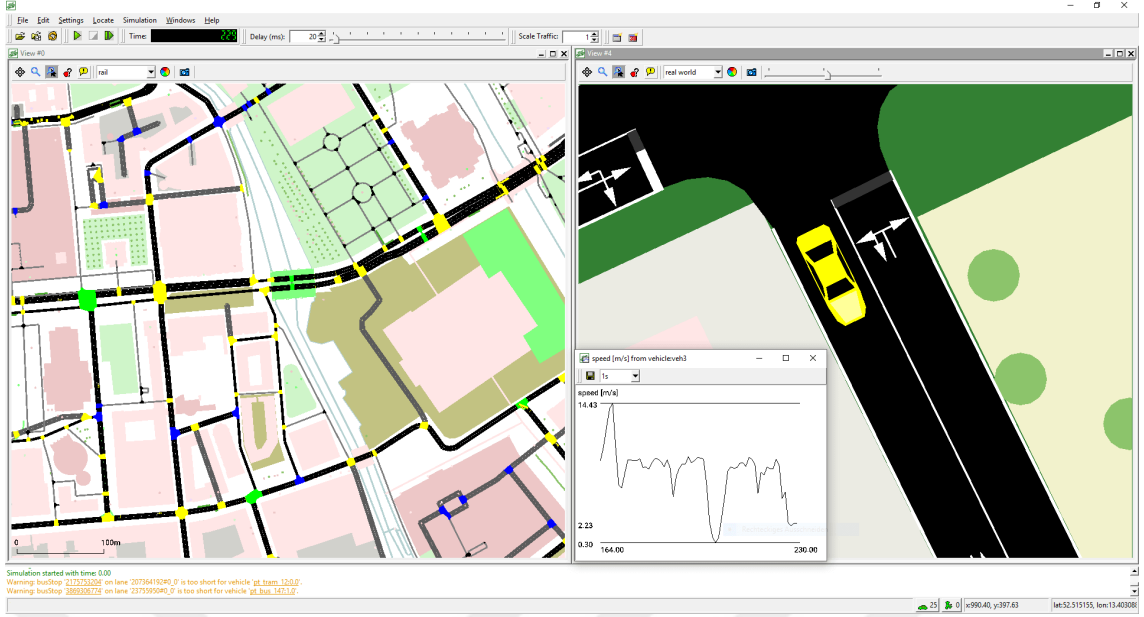
AIMSUN, modellemenin yanı sıra optimize edilmiş trafik yönetimi ve ulaşım politikaları geliştirmek için stratejik bir araç olarak kullanılmaktadır. Özellikle

sürdürülebilir ulaşım sistemleri, yol güvenliği ve çevresel etkilerin azaltılması gibi hedefler doğrultusunda, kavşaklarda trafik akışını kontrol eden stratejiler üzerinde çalışmak isteyen mühendisler ve araştırmacılar için ideal bir platformdur (Abedian ve diğ., 2021). Bu özellikler, trafik sıkışıklığının önlenmesi, kavşak kapasitesinin artırılması ve çevresel etkilerin azaltılması konularında daha etkin çözümler geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

Özetle, AIMSUN simülasyon programı, trafik mühendisliği ve şehir planlaması alanlarında geniş bir uygulama yelpazesine sahip olan, ayrıntılı trafik analizi yapabilen bir yazılımdır. Gerek mikro gerekse makro düzeyde sunmuş olduğu araçlarla, trafik yoğunluğunun etkin bir şekilde yönetilmesi ve ulaşım sistemlerinin daha verimli hale getirilmesi için kritik bir rol oynamaktadır. AIMSUN, kapsamlı simülasyon kapasitesi ve güçlü modelleme yetenekleriyle, özellikle sinyalizasyon kavşaklardaki performansın değerlendirilmesi, iyileştirilmesi ve uzun vadeli trafik yönetim stratejilerinin oluşturulması açısından önemli bir araçtır.

3.5.2. SUMO simülasyon programı

SUMO, açık kaynaklı ve çok yönlü bir mikroskobik trafik simülasyon platformudur. Karmaşık kentsel trafik sistemlerini ve ulaşım ağlarını detaylı bir biçimde modelleme imkânı sunan SUMO, kullanıcıların trafikteki bireysel araç hareketlerini simüle ederek, yoğunluk, hız, kuyruk uzunluğu gibi temel trafik parametrelerini analiz etmesine olanak tanımaktadır. SUMO'nun geliştirilme amacı, esnek ve kapsamlı bir trafik simülasyon platformu sunarak araştırmacılara ve mühendislik uygulamalarına detaylı bir trafik modeli sunmaktır (Monga ve Mehta, 2022). Açık kaynak yapısı sayesinde geniş bir kullanıcı kitlesi tarafından desteklenen ve geliştirilen SUMO, farklı düzeylerde trafik analizlerine olanak tanımaktadır. Ulaşım altyapısının yönetimi, planlaması ve değerlendirilmesi için uygun bir araçtır. SUMO simülasyon programı görüntüsü Şekil 3.15'te bulunmaktadır.



Şekil 3.15. SUMO simülasyon programı görüntüsü (Sumo, 2024)

SUMO'nun en güçlü özelliklerinden biri, mikroskobik simülasyon tekniği kullanarak her bir aracın hareketini bireysel olarak modelleyebilmesidir. Bu özellik, araçların hızlanma, yavaşlama, şerit değiştirme ve dönüş gibi temel davranışlarını ayrıntılı bir biçimde analiz etmeye imkân vermektedir. Özellikle karmaşık şehir içi trafik akışlarında, SUMO'nun mikroskobik analiz yeteneği, bireysel araç davranışlarının trafik sistemine nasıl etki ettiğini ayrıntılı bir biçimde ortaya koymaktadır. Bu sayede, trafik sıkışıklığı gibi problemlerin kaynağı tespit edilebilmekte ve bu durumlara yönelik çözüm stratejileri geliştirilmektedir (Smith ve diğ., 2014). Ayrıca SUMO, büyük ölçekli simülasyonlarda da yüksek doğruluk sağlayarak trafik yoğunluğunun dinamik bir analizini yapmaktadır.

SUMO, kullanıcılara senaryo bazlı simülasyonlar oluşturma ve farklı trafik düzenleme stratejilerini test etme imkânı tanımaktadır. Programın esnek yapısı sayesinde, simülasyon sürecine dair pek çok parametre kolaylıkla özelleştirilebilmektedir. Örneğin, sinyalizasyon kavşakları için farklı yeşil ışık süreleri veya kavşak fazları ayarlanarak trafik akışının nasıl etkilendiği gözlemlenebilmektedir. Bu özellik, kavşak performansının iyileştirilmesi ve sinyal sürelerinin optimize edilmesi gibi konularda çok önemli bir avantaj sağlamaktadır. SUMO, trafik akışını sadece belirli bir bölgede değil, aynı zamanda tüm bir şehir ağında analiz etme kabiliyeti ile öne çıkmakta ve bu sayede kapsamlı ulaşım yönetimi çözümleri geliştirmek isteyen kullanıcılara geniş bir bakış açısı sunmaktadır.

SUMO, diğer trafik simülasyon programlarının aksine, açık kaynaklı bir yapıya sahiptir ve bu sayede araştırmacılar tarafından sürekli olarak geliştirilmekte ve genişletilmektedir. Bu esneklik, kullanıcıların kendi ihtiyaçlarına göre özel fonksiyonlar veya algoritmalar ekleyerek simülasyon süreçlerini özelleştirmelerine olanak tanımaktadır. Örneğin, bir araştırmacı, belirli bir şehirdeki trafik koşullarını simüle etmek istiyorsa, SUMO'nun sunduğu API'ler ve eklentiler aracılığıyla mevcut yol verilerini ve trafik hacimlerini programa entegre edebilmektedir. Bu açık kaynak yapısı, programın kullanıcı topluluğundan gelen katkılarla sürekli güncellenmesini ve trafik simülasyonu alanında daha ileri bir noktaya taşınmasını sağlamaktadır.

SUMO, kullanıcıların simülasyon süreçlerini özelleştirmesi ve detaylı analizler yapabilmesi için TRACI (Traffic Control Interface) gibi güçlü kod geliştirme eklentileri sunmaktadır. TRACI, SUMO ile Python, C++ gibi farklı programlama dilleri arasında veri alışverişini sağlamakta ve bu sayede simülasyon sırasında gerçek zamanlı kontrol ve dinamik karar alma imkânı sunmaktadır. TRACI ile kullanıcılar, trafik sinyalizasyonları, araç hızları ve şerit değişimleri gibi unsurları simülasyon esnasında yönetebilmekte, adaptif kontrol stratejilerini entegre edebilmekte ve simülasyon süresince bu parametrelerde değişiklik yapabilmektedirler. Örneğin, belirli bir trafik hacmi ya da yoğunluk altında sinyal sürelerinin dinamik olarak uyarlanması veya araç davranışlarının belirli koşullara göre değişmesini sağlayan komutlar geliştirilebilmektedir. SUMO'nun bu esnek yapısı, kullanıcıların kendi algoritmalarını ve trafik yönetim stratejilerini doğrudan simülasyon ortamına entegre etmesine olanak tanıyarak, trafik kontrol sistemleri üzerine yapılan araştırmalarda ve uygulamalarda oldukça güçlü bir altyapı sunmaktadır.

SUMO, sadece simülasyon değil, aynı zamanda trafik optimizasyonu ve analiz süreçleri için de kullanılabilir (Ali ve diğ., 2021). Program, bir ulaşım ağındaki belirli senaryolara ilişkin sonuçları veritabanı formatında kaydedebilmektedir. Böylece simülasyon sonuçları daha sonra detaylı olarak analiz edilebilmektedir. Bu özellik, trafik akışını iyileştirmek için farklı stratejilerin uygulanmasını ve bu stratejilerin etkilerinin incelenmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca, SUMO ile elde edilen veriler, birden fazla trafik yönetim senaryosunun performansını karşılaştırmak ve belirli senaryoların trafiği nasıl etkilediğini anlamak için kullanıcılara önemli bilgiler sunmaktadır. Program, trafik yoğunluğunun yönetimi ve trafik sıkışıklığının önlenmesi için stratejik kararlar alınmasına katkıda bulunmaktadır.

SUMO'nun grafiksel arayüzü ve görselleştirme yetenekleri, kullanıcıların simülasyon sürecini daha sezgisel bir şekilde gözlemlemesini sağlamaktadır. Simülasyon sırasında elde edilen veriler, araçların kavşaklarda ve koridorlarda nasıl hareket ettiğini ve bekleme sürelerini analiz etmeye yönelik grafiklerle sunmaktadır. Bu görselleştirme, kullanıcıların trafik akışını görsel olarak değerlendirmesine olanak tanıyarak analizlerin daha kolay anlaşılmasını sağlamaktadır. SUMO aynı zamanda geniş veri girişi seçenekleri sunmaktadır. Gerçek trafik verilerini kullanarak simülasyonun daha gerçekçi olmasını sağlamaktadır. Böylece mevcut trafik koşullarına dayalı olarak güvenilir simülasyon sonuçları elde edilmektedir. Bu özellik, SUMO'yu yalnızca araştırmacılar için değil, aynı zamanda mühendislik uygulamaları ve ulaşım politikaları geliştiren kurumlar için de ideal bir çözüm haline getirmektedir.

SUMO, çok çeşitli ulaşım ve simülasyon senaryolarını da desteklemektedir. Araçların yalnızca özel yollar üzerindeki hareketlerini değil, aynı zamanda toplu taşıma sistemlerinin, bisiklet yollarının ve yaya trafiğinin etkilerini de dikkate almaktadır. Bu özelliği sayesinde, SUMO yalnızca motorlu taşıtların simülasyonunu değil, aynı zamanda sürdürülebilir ulaşım planlaması ve çevresel etkiler üzerinde de analiz yapılmasını mümkün kılmaktadır. Şehir içi ulaşımında farklı türdeki araçların birbirleriyle etkileşimi, SUMO'da detaylı olarak analiz edilebilmekte, böylece sürdürülebilir ulaşım çözümlerinin etkileri ve çevresel faydaları değerlendirilebilmektedir.

3.6. Uygulama Kavşağı Yapısı ve Özellikleri

Antalya, nüfus büyüklüğü bakımından Türkiye'nin beşinci büyük kentidir. Türkiye'de turizm şehri olarak bilinmektedir. Antalya'da motorlu kara taşıtları sayısı Eylül 2024 itibarıyla 1 milyon 540 bin 456'e ulaşmıştır. Bu tez çalışmasında adaptif trafik yönetim modeli geliştirilmiş ve Antalya ili içerisinde bulunan Heybe Kavşağı'na uygulanmıştır. Heybe Kavşağı, SUMO simülasyon programında modellenmiş ve model üzerinde adaptif trafik yönetim stratejileri geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin içerisine eklenen özelliklerin iyileşmeye etkileri ayrı ayrı ortaya konmuştur. Geliştirilen adaptif trafik yönetim modelinin sabit zamanlı sinyalizasyon yönetimine göre performans farkları çıkarılmıştır.

Antalya Heybe Kavşağı'nın yapısı Şekil 3.16'da verilmiştir. Kavşak ana yollarında sola dönüş sığınmaları olan bir yapıya sahiptir.



Şekil 3.16. Antalya Heybe Kavşağı yapısı

Şekil 3.17’de de görüldüğü üzere Heybe Kavşağı, dört adet yön ve TA5, TA6, TA7, TA8, TA9 ve TA10 olarak adlandırılan altı adet taşıt trafik akımından oluşmaktadır. Şekilde de görüldüğü üzere yön isimleri;

Yön-1: Kemer Gelişi

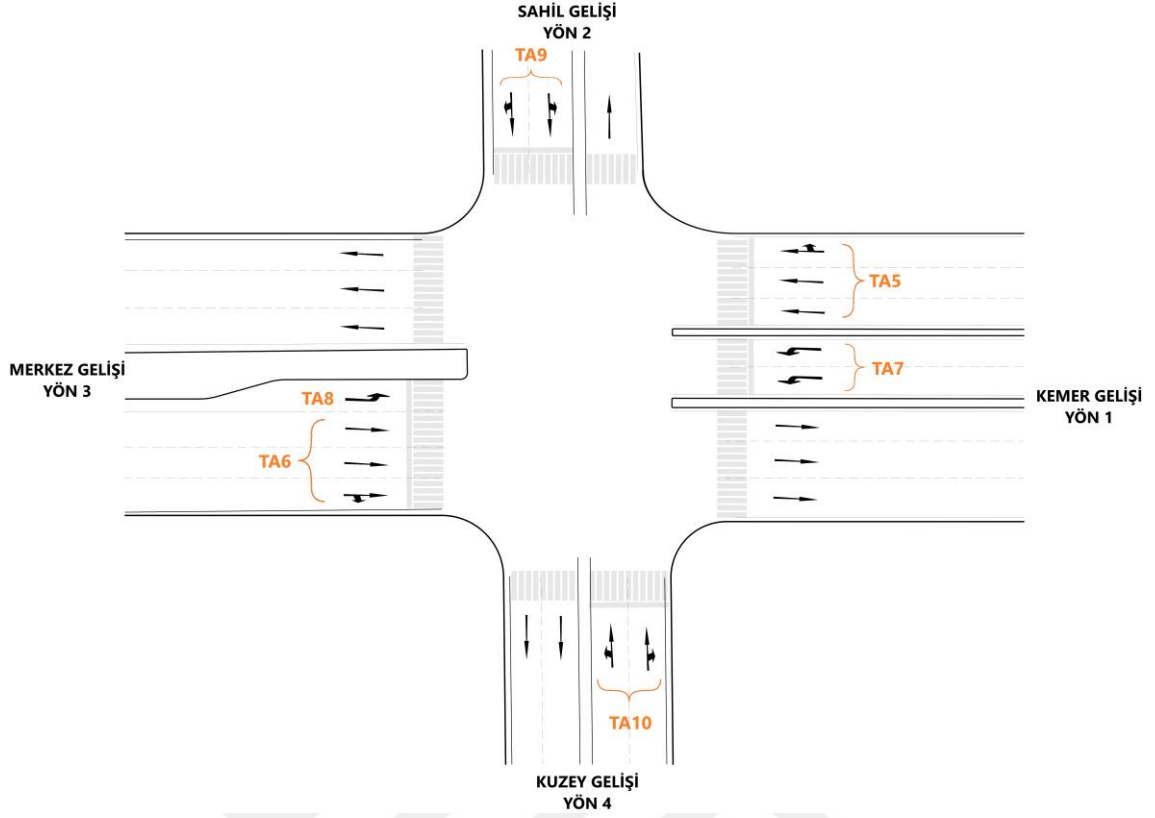
Yön-2: Sahil Gelişi

Yön-3: Merkez Gelişi

Yön-4: Kuzey Gelişi

olarak adlandırılmıştır.

Heybe Kavşağı geometrik yapısı itibari ile anayolların tali yollara göre şerit sayısı bakımından daha fazla olarak inşa edilmiş olan bir kavşaktır. Kemer Gelişi yönü üç şeritli, Kemer Gelişi sola dönüş sığınma cebi iki şeritli, Sahil Gelişi yönü iki şeritli, Merkez Gelişi yönü üç şeritli, Merkez Gelişi sola dönüş sığınma cebi tek şeritli ve Kuzey Gelişi yönü iki şeritli olarak sinyalize kavşak geometri yapısı oluşturulmuştur.



Şekil 3.17. Antalya Heybe Kavşağı yönleri ve taşıt trafik akımları

Tez çalışmasında, 23 Mayıs 2023 tarihindeki saat 08.30 – 09.30 arasındaki zirve saat sayım verileri kullanılmıştır. Simülasyon modellemesi, adaptif yönetim modeli alt özellik işletimleri ve doğrulama yöntemleri aynı tarih ve saat diliminde gerçekleştirilmiştir. Trafik olarak en kalabalık saat dilimi seçilmiştir ve böylece modelin alt yapılarının iyileşmeye etkisinin en kalabalık trafikte gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Çizelge 3.1’de, 23 Mayıs 2023 tarihindeki saat 08.30 – 09.30 arasındaki Heybe Kavşağı’na ait nereden nereye bazlı sayımlar bulunmaktadır.

Çizelge 3.1. Heybe Kavşağı nereden nereye bazlı araç sayımları

Yön-yön ismi	Kemer	Sahil	Merkez	Kuzey
Kemer	81 adet	54 adet	1.333 adet	434 adet
Sahil	45 adet	0 adet	22 adet	104 adet
Merkez	1.245 adet	70 adet	51 adet	59 adet
Kuzey	113 adet	201 adet	275 adet	0 adet
Toplam	1.484 adet	325 adet	1.681 adet	597 adet

Çizelge 3.2’de Heybe Kavşağı’na ait 23 Mayıs 2023 tarihindeki saat 08.30 – 09.30 arasındaki sınıflandırma bazlı araç sayımları bulunmaktadır.

Çizelge 3.2. Heybe Kavşağı sınıflandırma bazlı araç sayımları

Araç sınıfı	Araç miktarı (adet)
Motosiklet/bisiklet	289
Otomobil	3.199
Kamyonet	361
Kamyon/otobüs	238
Toplam araç	4.087

Çizelge 3.3'te ise Heybe Kavşağı'nda 23 Mayıs 2023 tarihindeki saat 08.30 – 09.30 arasındaki geliş yönlerine ayrılmış sınıflandırma sayımları bulunmaktadır.

Çizelge 3.3. Heybe Kavşağı sınıflandırma-yön bazlı araç sayımları

Sınıflandırma-yön ismi	Kemer	Sahil	Merkez	Kuzey
Motosiklet/bisiklet (adet)	99	27	105	58
Otomobil (adet)	1.139	248	1.329	483
Kamyonet (adet)	134	36	144	47
Kamyon/otobüs (adet)	112	14	103	9
Toplam (adet)	1.484	325	1.681	597

3.7. Uygulama Kavşağı Modelleme

Heybe Kavşağı'nda elde edilen gerçek trafik verileri ile kavşağın SUMO modellemesi gerçekleştirilmiştir. 23 Mayıs 2023 tarihindeki saat 08.30 – 09.30 arasındaki trafik araç sayımları ve sınıflandırma verileri SUMO simülasyon programında kullanılacak şekilde rota verilerine dönüştürülmüştür. Heybe Kavşağı'nın geometrisi SUMO simülasyon programında çizilerek bu rota dosyasındaki trafik verileri ile işletme sağlanmıştır.

SUMO simülasyonunda yararlanılan trafik verileri, sabah saat 08.30 ile 09.30 saatleri arasında kaydedilen beş dakikalık toplu araç sayımı sonuçlarına dayandırılmıştır. Bu araçlar, gerçek trafik akışı tahmin edilerek, yine beş dakikalık zaman dilimlerine uygun şekilde simülasyona dâhil edilmiştir. Simülasyonda kullanılan trafik modeli; araçların giriş yönleri, kavşaktan çıkış yönleri, toplam araç miktarları ve araç türlerini kapsamaktadır. Hazırlanan simülasyonun temelinde, trafik yoğunluğunu etkileyen yol genişliği, kavşaktaki yolların uzunluğu, şerit adedi, dönüş şeritleri, yol ve kavşak kapasitesi, hız sınırları ve sinyalizasyon düzeni gibi değişkenler yer almıştır.

Araçların hareket modelini belirlemek amacıyla, sürücülere özgü hata payı, tepki süreleri ve benzeri parametrelerin optimizasyonu, kavşakta gerçekleştirilen gözlemler ışığında kalibrasyon işlemiyle gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.18’de Heybe Kavşağı’nın SUMO modeli yer almaktadır.



Şekil 3.18. Heybe Kavşağı Sumo modellemesi

Heybe Kavşağı’nın SUMO modellemesi tamamlandıktan sonra Çizelge 3.4’te görüldüğü üzere kavşak, Antalya Büyükşehir Belediyesi tarafından saat 08.30 – 09.30 arasındaki zirve saatte işletilen sabit sinyalizasyon süreleri ile modelde çalıştırılmıştır. Söz konusu kavşaktaki koruma süresi yedi saniye olarak verilmiştir.

Çizelge 3.4. Heybe Kavşağı sabit zamanlı sinyalizasyon sistemi süreleri

Yön ismi	Faz	Sabit zamanlı sinyalizasyon sistemi süreleri (sn)
Kemer	TA5 - TA7	65 - 36
Sahil	TA9	20
Merkez	TA6 - TA8	43 - 14
Kuzey	TA10	22

Heybe Kavşağı sabit zamanlı sinyalizasyon yönetimi ile işletildikten sonra sonuçlar, SUMO simülasyon programından çıktı olarak alınmıştır. Adaptif trafik yönetim modeli alt özellikler ile ayrı ayrı karşılaştırması yapılacak sabit zamanlı

sinyalizasyon yönetiminin araç başı ortalama gecikme, araç başı ortalama bekleme süresi ve kavşak içi araç başı ortalama hız sonuçları Çizelge 3.5’te gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. Heybe Kavşağı sabit zamanlı sinyalizasyon yönetimi sonuçları

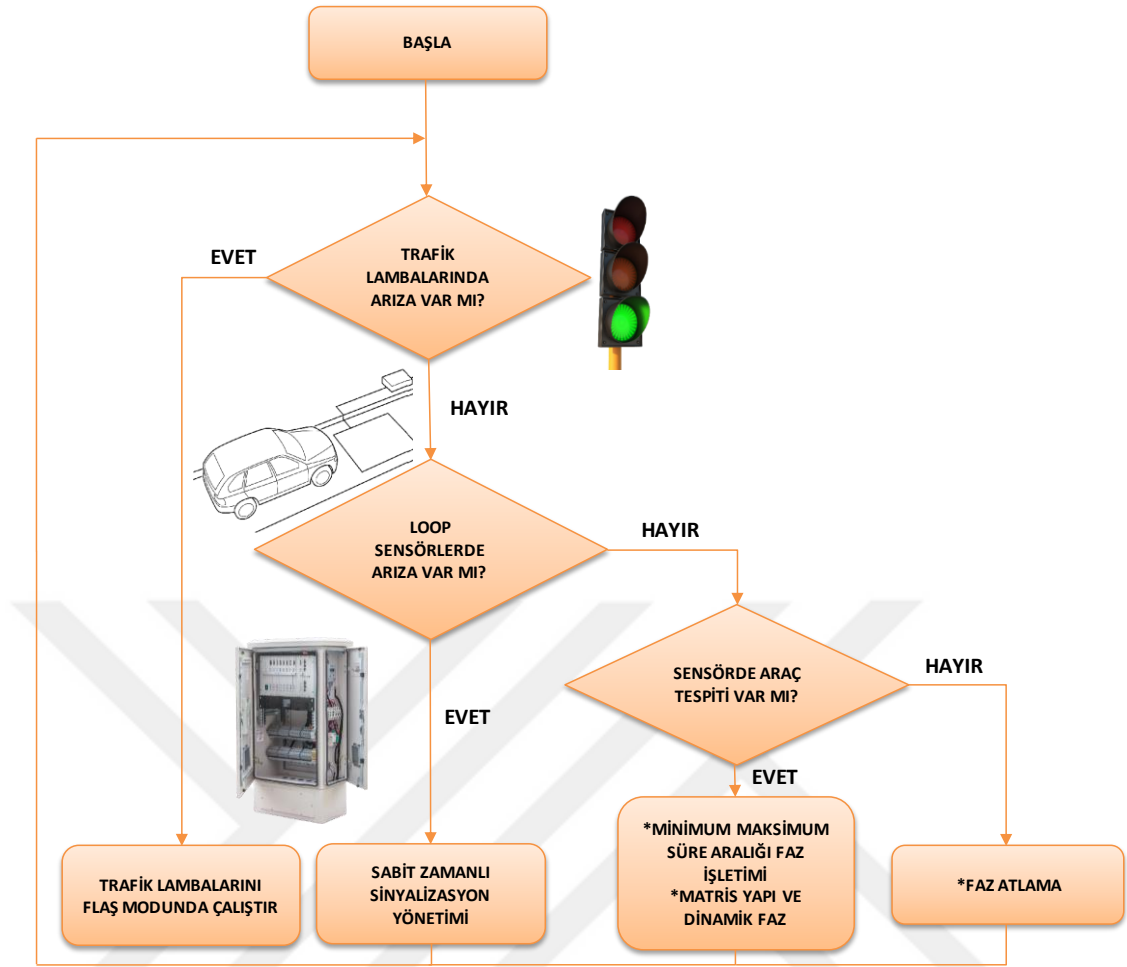
Sinyalizasyon yönetim biçimi	Gecikme (sn/taşıt)	Bekleme süresi (sn/taşıt)	Ortalama hız (km/sa)
Sabit zamanlı sinyalizasyon yönetimi	103,2	87,9	5,44

3.8. Adaptif Trafik Yönetim Modeli

Tez çalışmasında, uygun materyaller üzerinden değişen trafik koşullarına uyum sağlayan adaptif trafik yönetim algoritmaları geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmaların en yenilikçi yönü, değişen trafik koşullarına uyumun fazlar üzerinden değil, trafik akımları üzerinden sağlanmasıdır. Trafik akımları üzerine kurulan algoritmalar sayesinde daha büyük yapısal birimler olan faz ve periyot süresi üzerinde esneklik sağlanmaktadır. Bu da verimlilik açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır. Geliştirilen algoritmalar sahada uygulanmıştır. Başka bir deyişle, geliştirilen modelin performansı gerçek bir kavşakta ve gerçek trafik verileriyle gösterilmiştir. Çalışma, teoriden pratiğe dönüştürülmüştür. Geliştirilen model, gün içinde en yoğun trafikte kullanılmıştır ve en yoğun trafik performans sonuçları paylaşılmıştır.

Geliştirilen model, tüm trafik sensörleri ile uyumludur. Tez çalışmasında loop sensörleri kullanılmıştır ancak model LIDAR, radar veya görüntü işleme gibi sensörlerle de çalıştırılabilir.

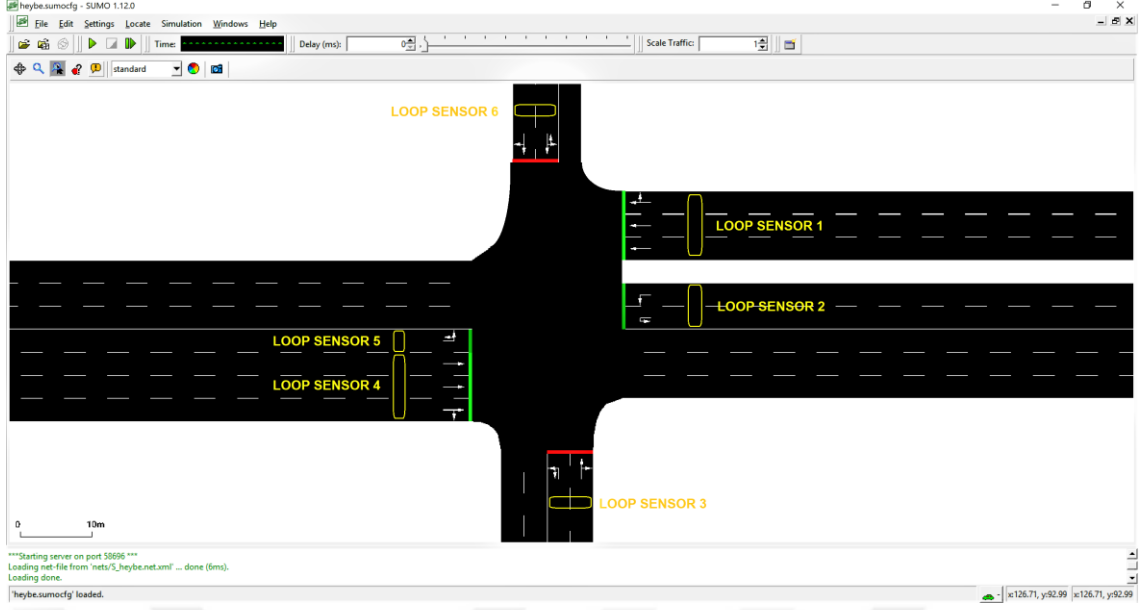
Bu çalışmada, adaptif trafik yönetim modeli altında minimum maksimum süre aralığı faz işletimi, faz atlama ve matris yapı ile dinamik faz algoritmaları ve kodları geliştirilmiştir. Geliştirilen bu algoritmalar ve kodlar gerçek trafik verileri ile Antalya Heybe Kavşağı’na uygulanmıştır. Genel sistem diyagramı Şekil 3.19’da verilmiştir.



Şekil 3.19. Genel sistem diyagramı

3.8.1. Minimum maksimum süre aralığı faz işletimi

Bu işletme özelliğinde trafik akımları için minimum ve maksimum süreler belirlenmiştir. Şekil 3.20’de görüldüğü üzere kavşak kollarına araç sayım ve araç varlık bilgisi alınacak loop sensörleri yerleştirilmiştir.



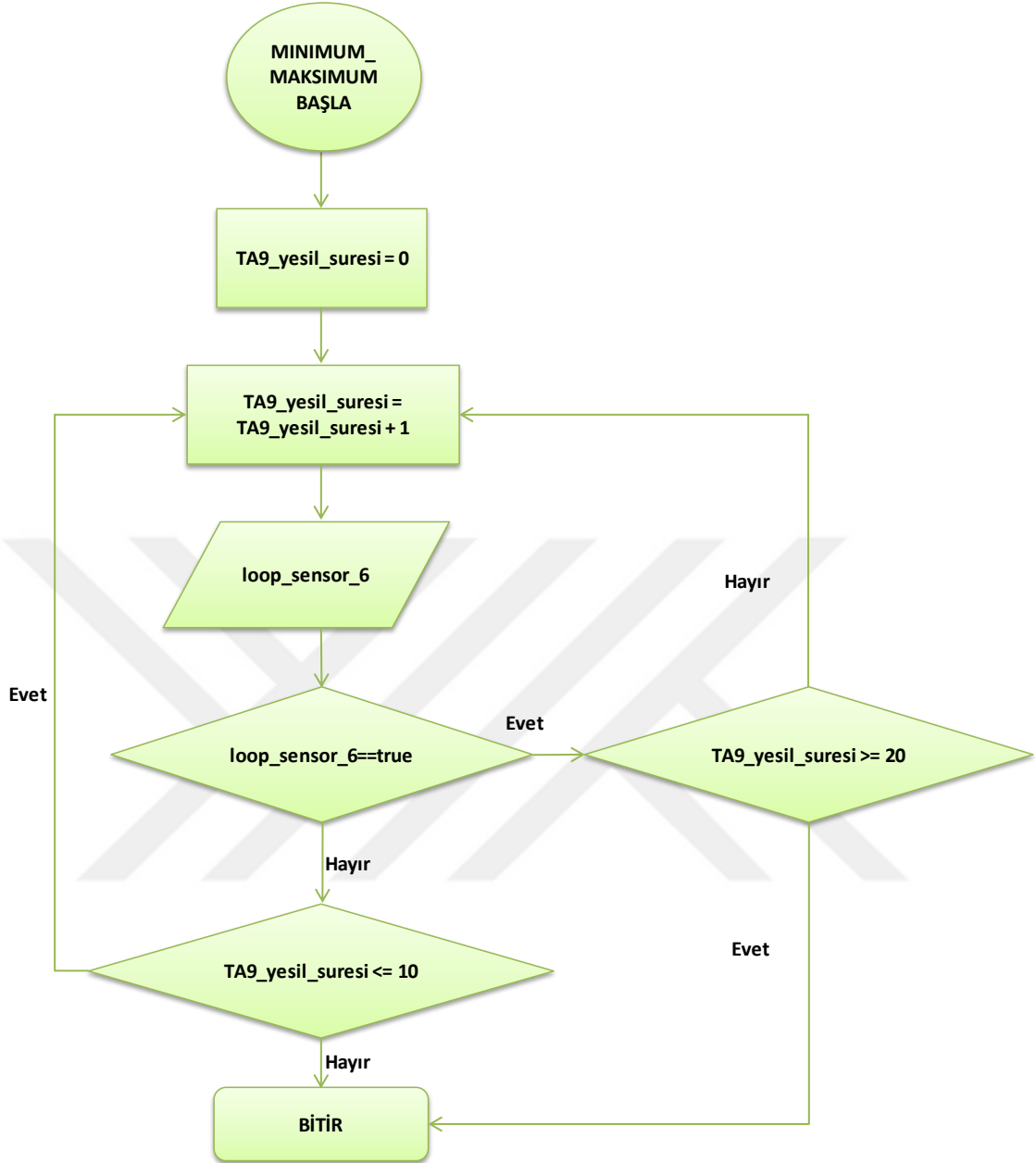
Şekil 3.20. Heybe Kavşağı sensör yerleşimi

Kavşak kollarında bulunan sensörler yardımı ile araç varlık bilgileri alınmaktadır. Bu araç varlık bilgilerine göre trafik akımlarının süreleri minimum ve maksimum arasında işletilmektedir. Böylece, trafik kollarındaki yoğunluğa göre minimum ve maksimum süreler arasındaki yeşil süreleri kullanılmaktadır. Kullanılan minimum ve maksimum trafik akım yeşil süreleri Çizelge 3.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Trafik akımları minimum ve maksimum yeşil süreleri

Trafik akımı	Minimum yeşil süresi (sn)	Maksimum yeşil süresi (sn)
TA5	15	50
TA6	15	70
TA7	10	50
TA8	10	20
TA9	10	20
TA10	15	30

Şekil 3.21’de TA9 fazı için örnek genel algoritma şeması verilen işletim ile yoğun olan kavşak kollarındaki yeşil sinyal süreleri maksimum süreye kadar uzun işletilmekte, yoğun olmayan kavşak kollarındaki yeşil sinyal süreleri ise minimum süreye kadar kısa işletilmektedir.



Şekil 3.21. TA9 fazı minimum maksimum işletimi genel algoritması

Heybe Kavşağı'nın minimum ve maksimum süre aralığı faz işletimi ile çalıştırıldıktan sonraki sonuçlar, SUMO simülasyon programından çıktı olarak alınmıştır. Minimum ve maksimum süre aralığı faz işletimi ile araç başı ortalama gecikme, araç başı ortalama bekleme süresi ve kavşak içi araç başı ortalama hız sonuçları Çizelge 3.7'de gösterilmiştir.

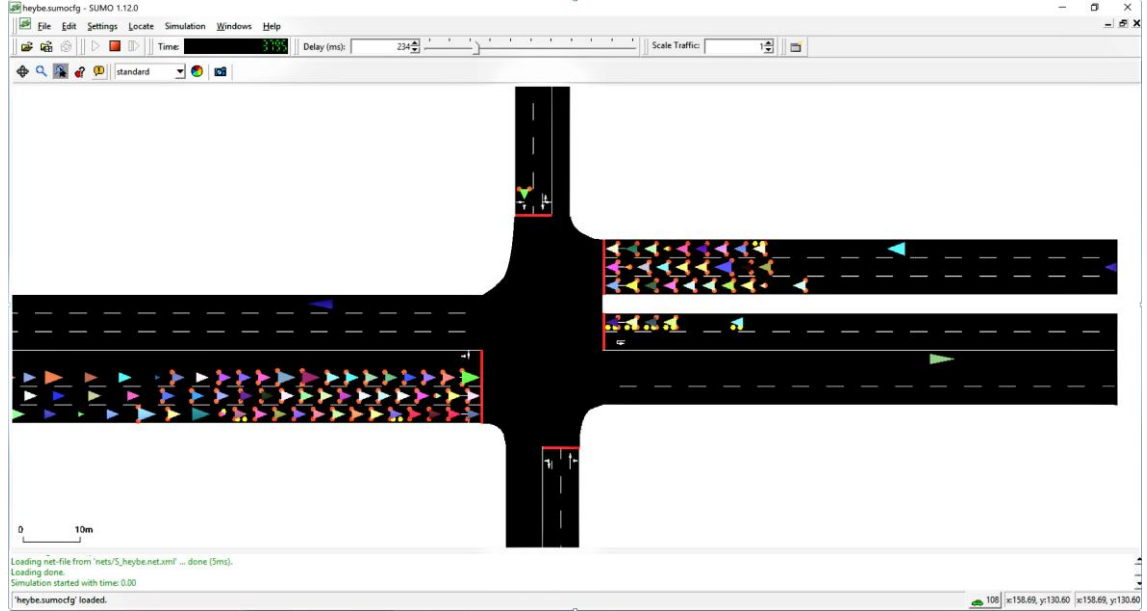
Çizelge 3.7. Minimum maksimum süre aralığı faz işletimi sonuçları

Sinyalizasyon yönetim biçimi	Gecikme (sn/taşıt)	Bekleme süresi (sn/taşıt)	Ortalama hız (km/sa)
Sabit zamanlı sinyalizasyon yönetimi	103,2	87,9	5,44
Minimum maksimum süre aralığı faz işletimi	80,3	67,6	6,21

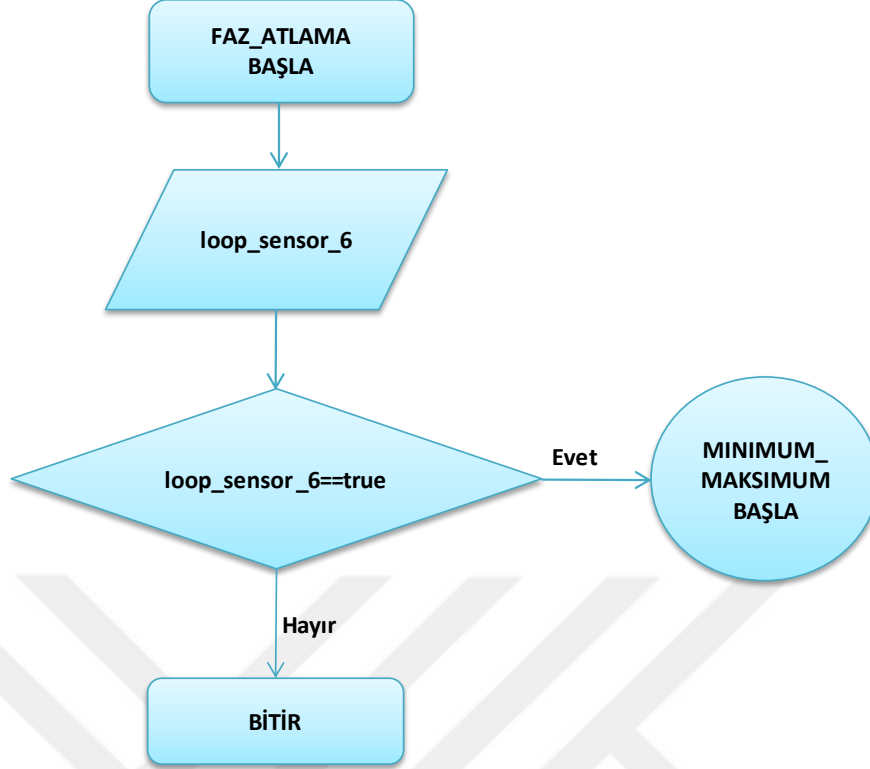
3.8.2. Faz atlama

Bu özellik kapsamında geliştirilen algoritma, araç gelmeyen yöne yeşil sinyal süresi vermeden direkt olarak diğer faza atlamayı sağlamaktadır. Böylece kavşak kollarındaki sensörler yardımı ile alınan araç yokluk bilgisi ile ilgili kavşak koluna ait faz işletilmeden direkt olarak sıradaki faza geçiş yapılmaktadır.

Şekil 3.22'deki örnekte görüldüğü üzere TA10 fazına geçiş anında kavşak kolunda hiçbir araç yoktur. Bu durumda TA10 fazı minimum süre ile işletilmeden direkt olarak sıradaki faza geçiş yapılmaktadır.

**Şekil 3.22.** TA10 trafik akımı için faz atlama durumu

Şekil 3.23'te TA9 fazı için örnek genel algoritma şeması verilen özellik ile araç gelmeyen yönlere yeşil sinyal süresi verilmeden işletim sağlanmaktadır.



Şekil 3.23. TA9 trafik akımı için faz atlama işletimi genel algoritması

Heybe Kavşağı, faz atlama özelliği ile çalıştırıldıktan sonraki sonuçlar, SUMO simülasyon programından çıktı olarak alınmıştır. Faz atlama kodları, minimum maksimum süre aralığı faz işletimi ile birlikte çalışacak şekilde geliştirilmiştir. Faz atlama özelliğinin eklenmesi ile araç başı ortalama gecikme, araç başı ortalama bekleme süresi ve kavşak içi araç başı ortalama hız sonuçları Çizelge 3.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.8. Minimum maksimum süre aralığı faz işletimi + faz atlama sonuçları

Sinyalizasyon yönetim biçimi	Gecikme (sn/taşıt)	Bekleme süresi (sn/taşıt)	Ortalama hız (km/sa)
Sabit zamanlı sinyalizasyon yönetimi	103,2	87,9	5,44
Minimum maksimum süre aralığı faz işletimi + faz atlama	79,3	64,6	6,25

3.8.3. Matris yapı ve dinamik faz

Sinyalizasyon sistemlerinin en küçük işletme yapısı fazdır. Faz, trafik akımlarının birleşiminden meydana gelmektedir. Fazların birleşiminden de periyot süresi oluşmaktadır. Sinyalizasyon sistemlerinde fazlar, genellikle önceden belirlenen bir sırada işletilmektedir. Ancak, sinyalizasyon sistemlerinde fazların belirli bir kalıp içerisinde işletilmesi adaptif yönetim sistemlerini olumsuz etkilemektedir. Adaptif trafik yönetim sistemlerinde fazların dinamik olarak değişen koşullara göre işletilmesi verimi artırmaktadır. Bu çalışmada, dinamik faz yapısı için trafik akımı çakışma matrisi oluşturulmuştur. Böylelikle birbiri ile çalışabilecek ve çalışmayacak trafik akımları belirlenerek trafik koşullarına göre esnek faz yapısı geliştirilmiştir.

Şekil 3.1’de verilen örnek sinyalizasyon kavşak için oluşturulan çakışma matrisi Çizelge 3.9’da yer almaktadır.

Çizelge 3.9. Örnek sinyalizasyon kavşak çakışma matrisi

Çakışma Matrisi	TA1	TA2	TA3	TA4	TA5	TA6	TA7	TA8
TA1	*	+	-	-	+	-	-	-
TA2	+	*	-	-	-	+	-	-
TA3	-	-	*	+	-	-	+	-
TA4	-	-	+	*	-	-	-	+
TA5	+	-	-	-	*	+	-	-
TA6	-	+	-	-	+	*	-	-
TA7	-	-	+	-	-	-	*	+
TA8	-	-	-	+	-	-	+	*

Çakışma matrisinde artı sembolü birbiri ile çalışabilecek trafik akımlarını, eksi sembolleri ise beraber çalışamayacak trafik akımlarını ifade etmektedir. Adaptif trafik yönetim modeli algoritmalarına bu çakışma matrisi girdi olarak verilmektedir. Kullanıcı tarafından belirlenen çakışma matrisi baz alınarak trafik akımlarındaki araç yoğunluğu, araç varlığı veya araç yokluğuna göre alternatifli fazlar otomatik devreye alınmaktadır. Böylece kalıplaşmış faz sırası ve faz düzenleri devre dışı bırakılarak dinamik faz yapısı oluşturulmuştur. Bu özellik, sinyalizasyon kavşaklara esneklik ve verimlilik sağlamaktadır. Örneğin, TA5 trafik akımına yeşil sinyal verileceğinde TA1 veya TA6 trafik akımına da yeşil sinyal verilebilir. Yani, TA5 ve TA1 ya da TA5 ve TA6 olmak üzere iki farklı faz

alternatifleri oluşmaktadır. Bu iki farklı faz alternatifinden hangisinin devreye alınacağına ilgili trafik akımlarındaki trafik yoğunluğu, araç varlık ve araç yokluk bilgilerine göre otomatik karar verilmektedir.

Tez çalışmasının yürütüldüğü ve Şekil 3.17’de trafik akımları belirtilen Antalya Heybe Kavşağı için Çizelge 3.10’da bulunan çakışma matrisi oluşturulmuştur.

Çizelge 3.10. Heybe Kavşağı trafik akımları çakışma matrisi

Çakışma Matrisi	TA5	TA6	TA7	TA8	TA9	TA10
TA5	*	+	+	-	-	-
TA6	+	*	-	+	-	-
TA7	+	-	*	+	-	-
TA8	-	+	+	*	-	-
TA9	-	-	-	-	*	-
TA10	-	-	-	-	-	*

Çizelge 3.10’da da görüldüğü üzere farklı trafik akımları aktif olduğu zaman farklı trafik akımlarını aktif hale getirme imkanı ortaya çıkmaktadır. Yani trafik koşullarına göre dinamik faz yapısı ortaya çıkmaktadır.

Örneğin, TA6 aktif olduğunda;

Alternatif Faz-1: TA6 + TA8,

Alternatif Faz-2: TA6 + TA5,

TA7 aktif olduğunda;

Alternatif Faz-1: TA7 + TA5,

Alternatif Faz-2: TA7 + TA8,

olmak üzere faz esneklikleri ortaya çıkmaktadır.

TA6 trafik akımı aktif olması gerektiğinde iki farklı alternatif faz açığa çıkmaktadır. Ya da TA7 trafik akımı aktif olması gerektiğinde TA7 + TA5 veya TA7 + TA8 olmak üzere iki farklı faz alternatifi sunulmaktadır. Örneğin, TA6 aktif olduğunda eğer TA8’de araç az ise TA6 + TA5 fazı işletilebilir. Ya da TA6 aktif olduğunda TA8’deki kuyruklanma fazla ise TA6 + TA8 fazı işletilebilir. Değişen trafik koşullarına göre dinamik faz yapısı ile adaptif trafik yönetim modeli, daha esnek ve daha çok trafik koşullarına uyum sağlayabilen bir yapı haline gelmiştir.

Heybe Kavşağı, matris yapı ve dinamik faz özelliği ile çalıştırıldıktan sonraki sonuçlar, SUMO simülasyon programından çıktı olarak alınmıştır. Matris yapı ve

dinamik faz kodları, minimum maksimum süre aralığı faz işletimi ve faz atlama ile birlikte çalışacak şekilde geliştirilmiştir. Matris yapı ve dinamik faz özelliğinin eklenmesi ile araç başı ortalama gecikme, araç başı ortalama bekleme süresi ve kavşak içi araç başı ortalama hız sonuçları Çizelge 3.11’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.11. Minimum maksimum süre aralığı faz işletimi + faz atlama + matris yapı ve dinamik faz sonuçları

Sinyalizasyon yönetim biçimi	Gecikme (sn/taşıt)	Bekleme süresi (sn/taşıt)	Ortalama hız (km/sa)
Sabit zamanlı sinyalizasyon yönetimi	103,2	87,9	5,44
Minimum maksimum süre aralığı faz işletimi + faz atlama + matris yapı ve dinamik faz	75,1	59,4	6,35

3.9. Performans Ölçüm Sistemi Tasarımı

Trafik yönetiminde temel amaç, güvenliğin ön planda olduğu bir yolculukta mümkün olan en iyi sürede insanların hedef noktaya varmasını sağlamaktır. Mümkün olan en iyi sürede hedef noktaya varmak için gecikme, bekleme süresi ve ortalama hız gibi parametrelerin iyileştirilmesi gerekmektedir. Günümüzde geliştirilen akıllı trafik sistemleri buna benzer parametreleri iyileştirmek için sahaya kurulumları yapılmaktadır (Elsagheer Mohamed ve AlShalfan, 2021; Frank ve diğ., 2019; Miyim ve Muhammed, 2019). Kurulan sistemlerin performansının ölçümü ve bu ölçüm sonuçlarının sistemlere geri besleme olarak verilmesi sistemlerin iyileştirilmesi ve sistem hakkında kararlar verilmesinde önemli rol oynamaktadır.

Trafikte gecikmeye neden olan en önemli bileşenlerden biri sinyalizasyon kavşaklarıdır. Sinyalizasyon kavşaklarında araçların beklemesinden oluşan gecikmeleri en aza indirme amacı ile farklı sinyalizasyon işletim sistemleri geliştirilmiştir (Shankaran ve Rajendran, 2021; Yalçın ve diğ., 2023; Genser ve diğ., 2024; Ribeiro ve Simões, 2015). Bu geliştirilen sinyalizasyon işletimlerinin performanslarının ölçümü, geliştirilen sistemleri daha iyiye götürmek, sistemlerin verimini artırması için geri besleme yapmak ve performans üzerinde harici etkileri incelemek için önemlidir.

Gecikme, genellikle trafik mühendisliği çalışmaları ve trafik sinyalizasyon projelerinde değerlendirilmektedir (Saha ve diğ., 2017; Andronov ve Leverents, 2018;

Preethi ve diğ., 2016; Shahpar ve diğ., 2011). En yaygın kullanılan ölçüm yöntemleri şunlardır:

Veriler Üzerinden İncelemeler: Trafik algılayıcıları, kameralar ve manuel gözlem ile elde edilen veriler kullanılarak gecikme süreleri hesaplanabilmektedir.

Simülasyon Modelleri: Trafik simülasyon yazılımları, farklı senaryolar altında gecikme sürelerini tahmin etmek için kullanılmaktadır.

Saha Testleri: Gerçek trafik koşullarında yapılan araç içinden süre analizi gibi testler, gecikme sürelerini ve sistem performansını değerlendirebilmektedir.

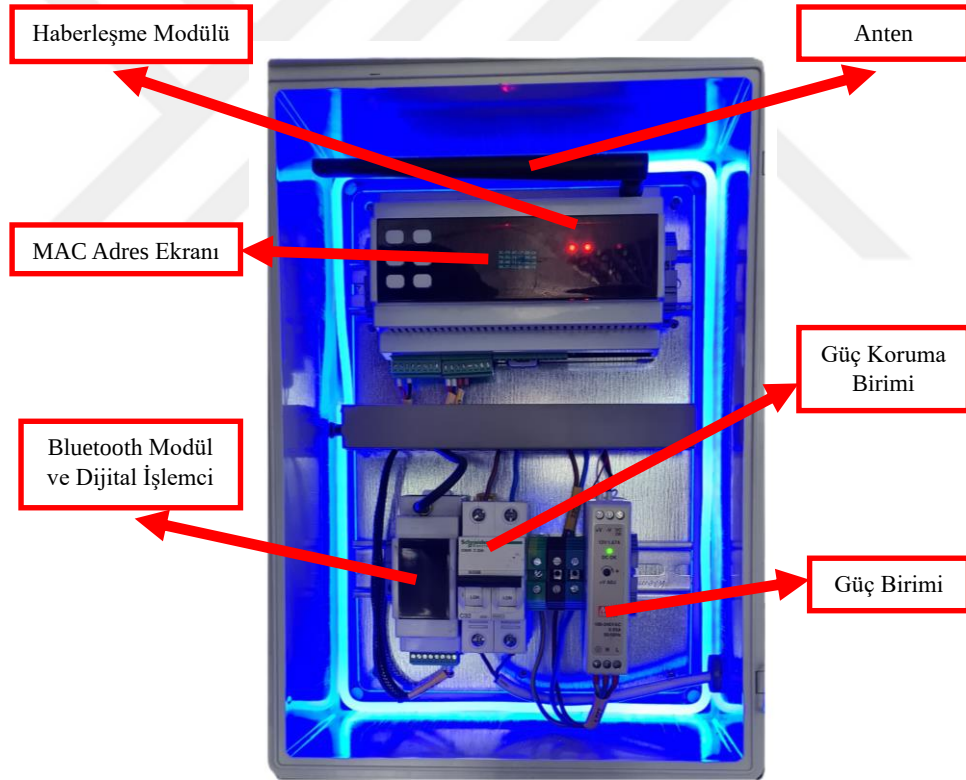
Bluetooth teknolojisi, kısa mesafeli kablosuz iletişim sağlayan bir radyo frekansı teknolojisidir. Bluetooth, genellikle 10 metre içinde etkin çalışmaktadır. Ancak, bazı gelişmiş sürümler ve cihazlar, 100 metreye kadar iletişim sağlayabilmektedir. 2.4 GHz ISM bandında çalışmaktadır ve bu band, endüstriyel, bilimsel ve tıbbi uygulamalar için dünya genelinde lisanssız olarak kullanılabilir (Bluetooth, 2024). Kulaklıklar, hoparlörler, akıllı saatler, araç içi eğlence sistemleri, telefonlar gibi birçok tüketici elektroniği cihazında bluetooth kullanılmaktadır. Bu durum, bluetooth sinyalleri üzerinden trafikte hareket halindeki bir yolcu veya sürücünden veri toplayabilmek anlamına gelmektedir. Bluetooth sensörleri, belirli iki nokta arasındaki seyahat sürelerini hesaplamak için kullanılmaktadır. Bu sensörler, cihazların MAC (Media Access Control) adreslerini anonim olarak yakalamakta ve bu cihazların iki nokta arasındaki hareketlerini izlemektedir. Seyahat sürelerinin belirlenmesi, trafik yoğunluğunun ve tıkanıklıkların anlaşılmasını sağlamaktadır (Moghaddam ve Hellinga, 2014; Friesen ve McLeod, 2015; Erkan ve Hastemoglu, 2016).

Bu tez çalışmasında, farklı yenilik olarak bluetooth verileri üzerinden bir performans analizi gerçekleştirilmiştir. Bluetooth üzerinden alınan veriler üzerine bir yöntem geliştirilmiş ve sinyalize kavşağa ait gecikme parametreleri tespit edilmiştir. Geliştirilen yöntem, Heybe Kavşağı'na uygulanmıştır. Sinyalize kavşak, sabit zamanlı sinyalizasyon sistemi ve geliştirilen adaptif trafik yönetim modeli ile işletilmiş ve iki farklı işletimdeki gecikme parametreleri hesaplanmıştır. Böylelikle, sinyalize kavşağın farklı işletme tiplerinde performansları ortaya konmuştur. Çalışma, sinyalize kavşaklar üzerindeki çalışmaların performansa etkisinin tespit edileceği bir yöntem sunmaktadır. Bu çalışmada geliştirilen yöntem, kavşaklardaki farklı işletim tiplerinin, kavşak geometrisi değişikliklerinin ve kavşaklara kurulan diğer güvenlik sistemlerinin kavşağın performansını nasıl etkilediğini tespit etmek için kullanılabilir. Ülkelerdeki sinyalize kavşaklardan sorumlu devlet yetkilileri veya yerel yönetimler için kurulan sistemlerin

performanslarının izlenmesi en önemli konulardan biridir. Çalışmada, bluetooth tabanlı trafik sensörü tasarlanarak sinyalizasyon kavşakları için gerçek zamanlı sistematik bir performans ölçümü sağlanmıştır.

3.9.1. Bluetooth tabanlı trafik analiz dedektörü

Bluetooth tabanlı trafik analiz dedektörü; bluetooth modülü, dijital işlemci, çevresel donanımlar, haberleşme modülü ve yazılım içeren bir sensördür. Bu sensör, veriyi alıp kodlayarak haberleşme modülü üzerinden veri toplama merkezine iletecek şekilde tasarlanmıştır. Sensör, bulunduğu yerdeki bluetooth cihazların MAC adreslerini tespit ederek veri toplama merkezine iletmektedir. Bluetooth tabanlı trafik analiz dedektörü yapısı Şekil 3.24'te görülmektedir.



Şekil 3.24. Bluetooth tabanlı trafik analiz dedektörü yapısı

Bluetooth trafik analiz sensörü, trafik akışını izlemek ve analiz etmek amacıyla tasarlanmış bir cihazdır. Bu sensörler, bluetooth teknolojisini kullanarak araçların ve yol kullanıcılarının hareketlerini takip etmektedir. Bluetooth sinyalleri yayan cihazları

(örneğin; cep telefonları, kablosuz kulaklıklar, araç içi bluetooth cihazları) algılayarak, belirli bir bölgedeki trafik hacmi, hız, yön ve seyahat süresi gibi bilgileri toplamaktadır.

Bluetooth trafik analiz sensörlerinde etkili bluetooth aralığı ve mevcut olası girişimler, sensörlerin verimli çalışmasını doğrudan etkileyen kritik faktörlerdir. Bluetooth sensörleri genellikle 100 metreye kadar etkili bir şekilde çalışmaktadır. Bu menzil, kullanılan bluetooth versiyonuna, sensörün güç ayarlarına ve çevresel faktörlere bağlı olarak değişebilmektedir. Bluetooth 5.0 ve üzeri sürümler, daha geniş bir menzil sunabilmekte ve düşük enerji tüketimi ile daha uzun mesafelerde veri iletimi yapabilmektedir. Eğer sensör açık bir alana kurulmuşsa ve sinyalin önünde engel yoksa, menzil maksimum seviyeye ulaşabilmektedir. Binalar, araçlar, ağaçlar gibi fiziksel engeller bluetooth sinyalini zayıflatabilmektedir, bu da menzilin düşmesine neden olmaktadır. Özellikle şehir içi gibi yoğun yapılaşmanın olduğu yerlerde bu zayıflama daha belirgin olabilmektedir. Sensörlerin kurulumları bu faktörler göz önüne alınarak yapılmalıdır.

Bluetooth trafik analiz sensörleri, çevresel ve teknolojik faktörlerden kaynaklanan çeşitli girişimlere maruz kalabilmektedir. Bluetooth, 2.4 GHz ISM bandında çalışmaktadır ve bu band Wi-Fi ve Zigbee gibi diğer birçok cihaz tarafından da kullanılmaktadır. Bu durum, radyo frekansı girişimlerine neden olabilmektedir ve sinyal kaybı, menzil daralması ve veri iletiminde gecikmelere yol açabilmektedir. Özellikle yoğun Wi-Fi trafiği olan alanlarda bluetooth sinyalleri baskılanabilmektedir. Şehir içi gibi çok sayıda yansıtıcı yüzeyin olduğu alanlarda, bluetooth sinyalleri bina, araç gibi yüzeylerden yansıyarak sensöre birden fazla yoldan ulaşabilmektedir. Bu, çoklu yol yayılımı olarak bilinmektedir. Sinyallerin sensöre farklı zamanlarda ulaşması, sinyalin kalitesini düşürebilmekte ve mesafe ölçümlerinde hatalara neden olabilmektedir. Ayrıca, yoğun bir bölgede çok sayıda bluetooth cihazının bulunması sinyal kalabalığına yol açabilmektedir. Çevresel faktörler de bluetooth sinyallerini etkilemektedir. Aşırı yağmur, kar veya yoğun nem gibi hava koşulları, bluetooth sinyal gücünü etkileyebilmektedir.

Bluetooth trafik analiz sensörleri, uygun koşullarda etkili bir şekilde veri toplayabilse de, sinyalin yayılmasını etkileyen çeşitli girişimlerle karşılaşabilmektedir. Bu girişimlerin etkisini en aza indirmek için, tasarlanan bluetooth trafik analiz sensörleri uygun lokasyonlara yerleştirilmiştir. Ayrıca, tasarlanan sensörde uygun frekans yönetimi teknikleri kullanılmakta ve ek yazılım ve donanım çözümleri uygulanmaktadır.

Tasarlanan bluetooth trafik analiz sensörlerinde girişimlerin etkisini en aza indirmek için çeşitli stratejiler ve çözümler uygulanmıştır. Tasarlanan sensörde AFH (Adaptif Frekans Atlamalı Yayılma Spektrumu) kullanılmaktadır. AFH, bluetooth sinyalinin 2.4 GHz bandında sürekli olarak frekans değiştirmesini sağlamaktadır. Bu sayede, girişim yaratan frekanslar tespit edilip atlanmakta, daha az yoğun olan frekanslar üzerinden iletişim kurulmaktadır. Böylece, girişimler azaltılmakta, sinyal kararlılığı artırılmaktadır ve veri iletimi daha güvenilir hale getirilmektedir. Bluetooth teknolojisi, saniyede 1.600 defa frekans atlayabilmektedir. Bu hızlı atlama hızı, cihazların aynı frekans bandını kullanan diğer cihazlarla çakışma olasılığını azaltmaktadır. Girişimleri azaltmak için sensörde diğer kullanılan bileşen, yüksek güçlü antendir. Tasarlanan sensörde kullanılan anten, sinyal gücünü artıracak şekilde optimize edilmiştir ve yerleştirilmiştir. Yüksek kazançlı anten ile engellerin etkisi azaltılmaktadır. Tasarlanan metot da çoklu sensör kullanımı ile sinyal birleştirme gerçekleştirilmiştir. Yani herhangi bir kavşak kolundan geçen bir bluetooth cihazının MAC adresi alındıktan sonra diğer kollarda bulunan bluetooth cihazlarından herhangi birinde bu MAC adresi tespit edilerek eşleştirilmiştir. Böylece, girişimlerden kaynaklanan yanlış veriler engellenmiştir. Tasarlanan bluetooth sensörü yüksek koruma derecesine sahip bir kılıf içerisine tasarlanmıştır. Böylece, sensör kötü hava koşulları ve fiziksel darbe gibi çevresel koşullardan korunmaktadır.

Bluetooth sinyallerinin kullanımından başka, sinyalli kavşaklarda gerçek zamanlı performans ölçümü için çeşitli teknikler mevcuttur. Bunlardan biri endüktif döngü dedektörleridir. Endüktif döngü dedektörleri yaygın olarak kullanılmaktadır ve araç varlığı ve geçişi hakkında güvenilir veriler sağlamaktadır. Uzun vadeli kullanım için uygun maliyetlidir. Fakat maliyetli bir bakım sürecine sahiptir. Endüktif döngü dedektörleri, uygulama sırasında trafiğin kapatılarak bir kurulum gerektirmektedir. Ayrıca araç hızı veya sınıfı gibi ayrıntılı verileri yakalama yetenekleri sınırlıdır. Bir diğer performans ölçüm tekniklerinden biri video görüntü işlemedir. Video görüntü işleme sistemleri, araç sayıları, hızları ve sınıflandırmaları dahil olmak üzere kapsamlı veriler sunmaktadır. Birden fazla şeridi kapsayabilir ve yüksek doğrulukta gerçek zamanlı veriler sağlayabilmektedir. Ancak bu sistemlerin kurulumu ve bakımı pahalıdır. Ayrıca, sis, yağmur veya zayıf aydınlatma gibi çevre koşullarından olumsuz etkilenebilirler. Performans ölçümünde kullanılan tekniklerden biri de kızılötesi sensörlerdir. Kızılötesi sensörler kuyruk uzunluklarını ve araç hızlarını ölçmede etkilidirler. Ancak, bu sensörler aşırı sıcaklıklar veya yoğun yağmur gibi çevresel

faktörlere karşı hassastır ve bu da doğruluklarını olumsuz etkilemektedir. Ayrıca, diğer yöntemlere kıyasla sınırlı bir tespit aralığına sahiptirler. Performans ölçümünde kullanılan tekniklerden bir diğeri radar tabanlı sistemlerdir. Radar sistemleri araç hızı, mesafesi ve yönü hakkında doğru veriler sağlamaktadır. Farklı hava koşullarında etkilidirler ve aynı anda birden fazla şeridi kapsayabilmektedirler. Radar sistemlerinin maliyeti yüksektir ve doğrulukları çevredeki büyük metal nesnelerden veya diğer parazitlerden etkilenebilmektedir. Performans ölçümünde kullanılan tekniklerden biri olan bluetooth sinyal tabanlı sistemler, seyahat süresi ve gecikme verilerini toplamak için ergonomik bir yöntem sunmaktadır. Montajları kolaydır ve önemli altyapı değişiklikleri olmadan gerçek zamanlı veri sağlayabilmektedirler. Ancak, bluetooth sistemlerinin doğruluğu, araçlardaki bluetooth özellikli cihazların nüfus oranına bağlıdır. Bu teknolojileri karşılaştırdığımızda, bluetooth sinyal tabanlı sistemlerin gerçek zamanlı performans ölçümü için uygun maliyetli ve müdahalesiz bir seçenek sunarken, diğer yöntemlerin veri zenginliği açısından avantajlar sunabileceği ortaya çıkmaktadır. Trafik yönetimi ihtiyacı veya uygulama alanına göre en uygun tekniğin seçimi gereklidir.

Bluetooth sensörleri, trafikte belli alanlarda ve belli amaçlarla kullanılabilir:

Trafik Verisi Toplama: Bluetooth sensörleri, belirli bir bölgede bulunan bluetooth cihazlarının MAC adreslerini anonim olarak yakalamaktadır. Bu sayede araçların ve yayaların belirli noktalardan geçiş zamanları kaydedilmektedir (Díaz ve diğ., 2015).

Trafik Akışı Analizi: Toplanan veriler, trafik yoğunluğunu, hızları, seyahat sürelerini ve güzergah tercihlerini analiz etmek için kullanılmaktadır. Bu bilgiler, trafik yönetim merkezlerine anlık trafik durumu hakkında bilgi sağlamaktadır (Bachmann ve diğ., 2013).

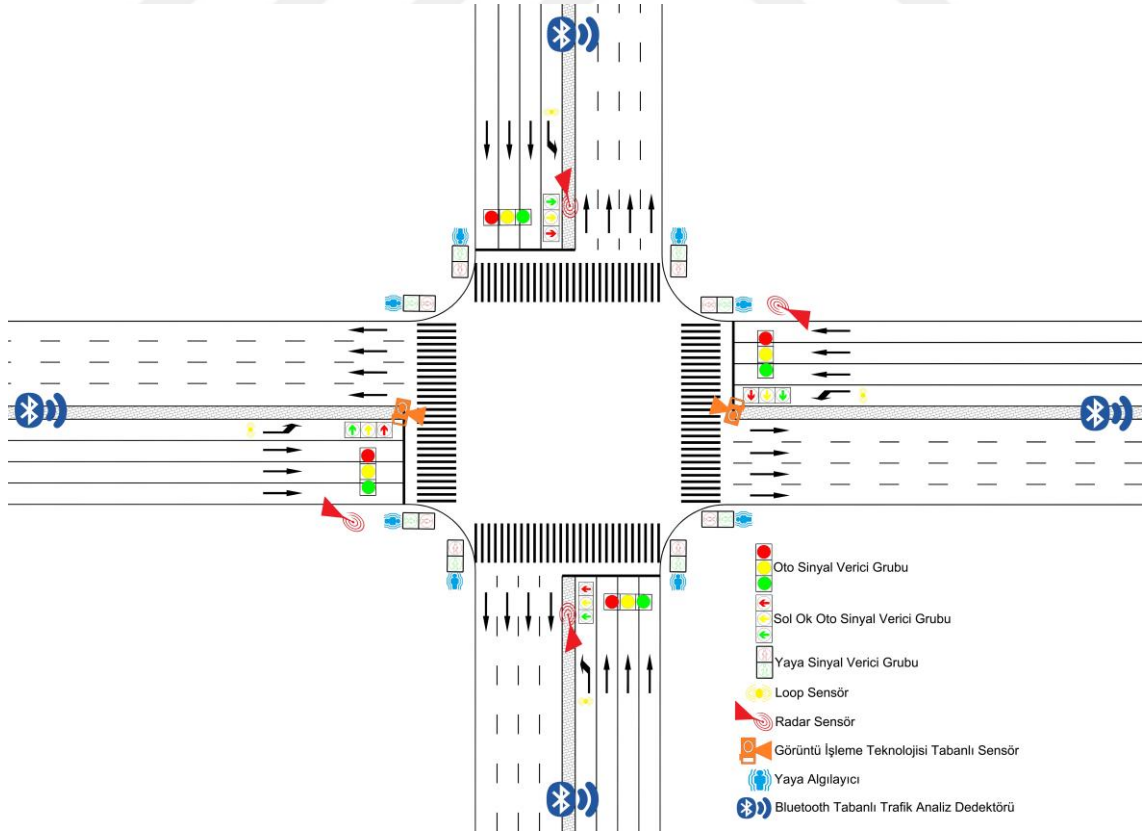
Seyahat Süresi Hesaplama: Belirli iki nokta arasındaki seyahat süresi, bu iki noktada bulunan sensörler arasında geçen zaman farkı hesaplanarak belirlenmektedir (Araghi ve diğ., 2015; Day ve diğ., 2010).

Trafik Yoğunluğu ve Kapasite Analizi: Bu sensörler, belirli bir yol kesimindeki araç sayısını ve yoğunluğu belirlemek için kullanılmaktadır. Böylece, yolların kapasitesi ve mevcut trafik yoğunluğu hakkında bilgi elde edilmektedir (Barcelö ve diğ., 2010).

Trafik Yönetimi ve Planlama: Toplanan veriler, şehir planlamacıları ve trafik mühendisleri tarafından trafik yönetimi stratejileri geliştirmek, trafik sıkışıklığını azaltmak ve yol güvenliğini artırmak amacıyla kullanılmaktadır.

3.9.2. Bluetooth sinyali tabanlı gerçek zamanlı performans ölçüm sistemi uygulaması genel esasları

Bu tez çalışmasında tasarlanan metot tüm sinyalize kavşaklarda uygulanabilir niteliktedir. Sinyalize kavşaklar, üç yönlü kavşak, dört yönlü kavşak, rotary kavşak gibi tiplere ayrılmaktadır. Her kavşak kendi içerisinde kollara ait şerit sayıları farklılık gösterebilmektedir. Bu çalışmadaki tasarım bütün sinyalize kavşak tiplerinde uygulanabilecek şekilde tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemde, kavşak kollarına uygun uzaklıkta yerleştirilen bluetooth sensörleri ile araç başı seyahat süreleri tespit edilmekte ve kavşakta kullanılacak ikinci sensör ile füzyon gerçekleştirilerek gerçek araç sayısı ile ilişkilendirilmektedir. Tasarlanan metotta ikincil sensör olarak loop sensörler, görüntü işleme tabanlı sensörler, radar sensörler gibi araç sayımı yapabilen sensörler kullanılabilir. Şekil 3.25'te dört yönlü bir kavşak üzerine yapılabilecek örnek bir uygulama bulunmaktadır. İkinci sensör olarak loop sensör, görüntü işleme tabanlı sensörler ya da radar sensörlerden birinin kullanılması yeterlidir.



Şekil 3.25. Örnek kavşak üzerine gerçek zamanlı performans ölçüm sistemi uygulaması

Örnek uygulamada görüldüğü gibi bluetooth sensörler kavşak yönlerinden geriye yerleştirilmiştir. Böylece araçların kavşak kolları arasındaki seyahat süreleri tespit edilmektedir. Tespit edilen seyahat süreleri üzerinden araç başı gecikmeler hesaplanabilmekte ve ikinci sensörden gelen gerçek araç sayıları ile çarpılarak kollar arası toplam gecikme tespit edilebilmektedir. Böylece gerçek zamanlı olarak kavşak performansı ölçülmektedir.

Bluetooth sensörleri için daha güvenli veri, menzil optimizasyonu ve girişimleri azaltmak için konumlandırmada bazı hususlara dikkat edilmelidir. Bluetooth sensörler, kavşak kollarındaki stop çizgisinden itibaren maksimum kuyruklanmanın olduğu noktanın ucuna yerleştirilmesi daha uygundur. Bu nedenle sensörlerin, kavşak kolu dur çizgisinin yaklaşık 100 metre gerisine konulması önerilmektedir.

Bluetooth sensörleri yol kenarlarına yakın yerlere kurulmalıdır. Bluetooth sensörünün konumu yol kenarlarında ya da araç geçiş güzergâhlarının yakınında olmalıdır. Sensör, hâlihazırda var olan direklerin üzerine monte edilebilir veya ihtiyaç halinde yeni direk dikilebilir. Bluetooth sensörler, 360 derece kapsama alanı içinde, uygun yarıçap mesafesindeki cihazlarla güvenilir bir şekilde iletişim kurabilir. Bu nedenle, sensörlerin konumlandırılması sırasında kapsama alanı yarıçapı önemli bir kriter olarak göz önünde bulundurulmalıdır. Bluetooth sinyalleri radyo dalgaları kullanmaktadır ve engellerden etkilenebilmektedir. Binalar, duvarlar, ağaçlar ve büyük metal yapılar sinyalin yayılmasını engelleyebilmekte veya yansıtabilmektedir. Sensörler, bu tür engellerin olmadığı, açık görüş hattına sahip yerlere yerleştirilmelidir. Sensörlerin yerden yüksekliği, sinyalin kapsama alanını ve alım kalitesini etkilemektedir. Bluetooth sensörlerin montajlanacağı yüksekliğin üç ile altı metre arasında olması önerilmektedir. Çok alçakta yerleştirilen sensörler, sinyal kaybına veya yansımalar nedeniyle yanlış veriye neden olabilmektedir. Sensörlerin birbirlerine olan mesafesi, kapsama alanlarını optimize edecek şekilde ayarlanmalıdır. Sensörlerin birbirine çok yakın yerleştirilmesi veri fazlalığına ve yanlış hesaplamaya yol açabilmektedir. Wi-Fi yönlendiricileri ve diğer bluetooth cihazları gibi elektromanyetik girişim kaynaklarından uzak durulmalıdır. Bu tür cihazlar, bluetooth sinyallerini etkileyebilmektedir. Sensörlerin sürekli çalışabilmesi için yakınlarında güvenilir bir enerji kaynağı bulunmalıdır. Sensörlerin bakımının kolay yapılabilmesi için, erişimin rahat olduğu yerlere yerleştirilmelidir. Bu, periyodik bakımlar ve arızaların giderilmesi için önemlidir.

Tasarlanan metotta veri güvenliğini sağlamak için bluetooth sensöründe AFH adı verilen teknoloji kullanılmıştır. Bu teknoloji, bluetooth cihazlarının aynı frekans bandını kullanan diğer cihazlardan gelen girişimlerden etkilenmeden iletişim kurmasını sağlamaktadır. Sürekli olarak değişen frekanslar, sinyalin izlenmesini ve yetkisiz kişilerin sinyali yakalamasını zorlaştırmaktadır, bu da iletişimin güvenliğini artırmaktadır. Ayrıca, tasarlanan metotta kullanılan tüm sensörler ve bileşenler kapalı devre haberleşme sistemine bağlıdır. Sensörlerden tespit edilen tüm veriler kapalı devre haberleşme kanalı üzerinden sistem sahibi otoriteye ait olan sunucuya aktarılabilir. Tüm hesaplamalar, tespitler ve izlemeler sunucu üzerinden yapılmaktadır. Tespit edilen tüm veriler sunucu üzerinde yedeklenebilmektedir.

Bluetooth sinyallerinin fazlalığı veri güvenliği ve girişimleri için olumsuz etki oluşturabilir. Yoğun trafikte bu durumun oluşmaması için tasarlanan metotta bu etkileri en aza indirmek için bazı önlemler alınmıştır. Birden fazla sensör birleşimi ile veriler eşleştirilmektedir. Herhangi bir kavşak kolunda tespit edilen bluetooth sinyali diğer kollardaki bluetooth sensörleri güzergahından herhangi birinden kavşağı terk etmesi beklenmektedir. Eşleşmeyen bluetooth sinyalleri elenmektedir. Heybe Kavşağı'nda yapılan uygulamada yoğun trafikteki bluetooth verilerinin daha fazla olduğu, bu nedenle araç başı ortalama gecikme hesabının daha sağlıklı olduğu görülmüştür. Çünkü bluetooth verileri arttıkça gecikme değerlerinin doğruluk oranları da artmaktadır. Heybe Kavşağı, günlük yüklü araç trafiğine sahip yoğun bir kavşaktır. Tasarlanan metodun yoğun trafikteki durumlarını gözlemek için yoğun bir kavşak seçilmiştir.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Genel Sonuçlar

Geliştirilen adaptif trafik yönetim modelinin kavşaktaki araç başı ortalama gecikme, araç başı ortalama bekleme süresi ve kavşak içi araç başı ortalama hız parametrelerine önemli bir ölçüde olumlu katkı yaptığı saptanmıştır. Geliştirilen algoritmalar; kavşaktaki trafik yüklerine göre adapte olabilen, kavşak trafik akımlarındaki yoğunluğa göre sürelerin değiştiği ve trafik koşullarına göre alternatif fazlar işletebilen yapıdadır. Bu geliştirmeler de Çizelge 4.1’de görüldüğü üzere performans parametrelerine olumlu yansımaktadır.

Çizelge 4.1. Adaptif trafik yönetim modeli alt bileşenlerinin performansa etkileri

Sinyalizasyon yönetim biçimi	Gecikme (sn/taşıt)	Bekleme süresi (sn/taşıt)	Ortalama hız (km/sa)
Sabit zamanlı sinyalizasyon yönetimi	103,2	87,9	5,44
Minimum maksimum süre aralığı faz işletimi	80,3	67,6	6,21
Minimum maksimum süre aralığı faz işletimi + faz atlama	79,3	64,6	6,25
Minimum maksimum süre aralığı faz işletimi + faz atlama + matris yapı ve dinamik faz	75,1	59,4	6,35

Geliştirilen adaptif trafik yönetim modelinin kavşaktaki araç başı ortalama gecikme, araç başı ortalama bekleme süresi ve kavşak içi araç başı ortalama hız parametrelerine katkısı yüzde olarak incelendiğinde Çizelge 4.2’deki sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Performans yüzdeleri incelendiğinde geliştirilen adaptif trafik yönetim modelinin her bir alt bileşeninin devreye alınması ile sabit zamanlı sinyalizasyon sistemine göre iyileştirme yüzdelerinin daha da olumlu etkilendiği görülmektedir.

Çizelge 4.2. Adaptif trafik yönetim modeli alt bileşenlerinin performans yüzdeleri

Sinyalizasyon yönetim biçimi	Gecikme	Bekleme süresi	Ortalama hız
------------------------------	---------	----------------	--------------

Minimum maksimum süre aralığı faz işletimi	%22,2	%23	%14,1
Minimum maksimum süre aralığı faz işletimi + faz atlama	%23,2	%26,5	%14,8
Minimum maksimum süre aralığı faz işletimi + faz atlama + matris yapı ve dinamik faz	%27,2	%32,4	%16,7

Yapılan çalışmalar trafik hacmi bakımından zirve saatte yapılmıştır. Geliştirilen model, zirve saat trafik verileri ile işletilmiştir. Kavşaktaki trafik hacminin daha normal olduğu diğer saat dilimleri baz alındığında adaptif trafik yönetim modelinin performansa katkısının daha yüksek olacağı beklenmektedir. Özellikle kavşak kollarındaki trafik yüklerinin az olduğu saat dilimlerinde, minimum maksimum süre aralığı faz işletimi, faz atlama ve dinamik faz yapıları daha da verimli ve sık çalışacağı için gecikme, bekleme süresi ve ortalama hız verilerinin iyileşme farkının daha yüksek olacağı düşünülmektedir.

Matris yapı ve dinamik faz yapısı özellikle geniş geometriye sahip ve sola dönüşlerin ayrı olduğu kavşak geometrilerinde daha da verimli çalışacağı beklenmektedir. Trafik akımı ne kadar fazla ise matris yapıda beraber çalışabilecek trafik akımları da artacaktır. Dolayısı ile faz alternatifleri çoğalacaktır. Bu da trafik verilerine göre esnek faz yapılarını doğuracaktır ve verimi artıracaktır.

4.2. Webster Yöntemi ile Doğrulama

Tez çalışmasında, SUMO simülasyon ortamında geliştirilen algoritmaların tespit edilen sonuçları için farklı yöntemlerle doğrulama çalışmaları yürütülmüştür. SUMO simülasyon çalışmalarında işletilen sabit zamanlı sinyalizasyon yönetiminde Çizelge 3.1, Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te verilen trafik verileri kullanılmıştır. Bu trafik verileri Çizelge 3.4'te verilen sabit zamanlarla işletilerek Çizelge 3.5'te belirtilen gecikme, bekleme süresi ve ortalama hız sonuçları elde edilmiştir.

Sabit zamanlı sinyalizasyon yönetiminde elde edilen gecikme verisi üzerinden doğrulama işlemi yürütülmüştür. Doğrulama çalışmasında Webster yöntemi kullanılmıştır. Sabit zamanlı sinyalizasyon yönetiminin gecikme süreleri hesaplamaları için 23 Mayıs 2023 tarih ve zirve saat 08.30 – 09.30 aralığına ait Antalya Heybe

Kavşağı'nın verileri kavşak kontrol cihazından elde edilmiştir. Gecikmeyi minimuma indirmeyi hedefleyen hesaplamalarda Webster modeli kullanılmıştır. Taşıt başına düşen ortalama gecikmeler, elde edilen verilerin Webster gecikme formülünde yerine konulması ile hesaplanmıştır (Webster, 1966). Doğruluk oranını artırmak amacıyla, trafik akımları için ayrı ayrı hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. İlgili formül, Denklem 4.1'de sunulmuştur.

$$d = \frac{C(1 - \lambda)^2}{2(1 - \lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1 - x)} - 0,65\left(\frac{C}{q^2}\right)^{\frac{1}{3}}x^{2+5\lambda} \quad (4.1)$$

d: Taşıt başına ortalama gecikme (saniye/taşıt),

C: Devre süresi (saniye),

q: İlgili fazdaki akım (taşıt/saat),

λ : Yeşil sürenin (G) devre süresine oranı (G/C),

x: Doygunluk oranı ($x=q/\lambda s$)(s=doygun akım).

TA7 için hesaplama örneği verilmiştir. Formülde çarpan olarak kullanılan s (doygun akım) değeri, sürücü davranışıyla ilgili parametreler dahil edilmeden, Denklem 4.2'deki şerit sayısı, hız limiti ve eğim gibi değerlerin yerine konulmasıyla hesaplanmıştır (Çetin ve Murat, 2013).

$$s = 990 + 288TL + 8.5SL - 26G \quad (4.2)$$

s: Doygun akım (taşıt/saat),

TL: Şerit sayısı (TA7 trafik akımı için 2 adet),

SL: Hız limiti (TA7 trafik akımı için 40 kilometre/saat),

G: Eğim (TA7 trafik akımı için %0).

TA7 trafik akımı için tespit edilen değerler;

q = 455 taşıt/sa,

C = 200 sn,

G = 36 sn,

s = 1906 taşıt/sa.

Değerler, Denklem 4.1’de yerine konulduğunda Denklem 4.3 elde edilmektedir.

$$d = \frac{200(1 - (\frac{36}{200})^2)}{2(1 - (\frac{36}{200})(\frac{455}{(\frac{36}{200})^{1906}}))} + \frac{(\frac{455}{(\frac{36}{200})^{1906}})^2}{2 * 455(1 - (\frac{455}{(\frac{36}{200})^{1906}}))} - 0.65(\frac{200}{455^2})^{\frac{1}{3}}(\frac{455}{(\frac{36}{200})^{1906}})^{2+5(\frac{36}{200})} \quad (4.3)$$

$$d = 88,17 \text{ sn/taşıt}$$

Zirve saat verileri, her bir kavşak koluna özgü olarak Webster gecikme formülünde yerine konularak gecikme süreleri hesaplanmıştır. Ortalama gecikme sürelerinin her bir trafik akımı için ayrı ayrı olarak elde edilen sonuçları Çizelge 4.3’te sunulmuştur.

Çizelge 4.3. Sabit zamanlı sinyalizasyon yönetimi için Webster yöntemi gecikme sonuçları

Trafik akımı	Gecikme (sn/taşıt)
TA7	88,17
TA5	134,88
TA9	89,33
TA8	90,51
TA6	162,86
TA10	116,39
Ortalama gecikme	110,98

Çizelge 4.4’te görüldüğü gibi SUMO simülasyon ortamında geliştirilen algoritmalarla işletilen Heybe Kavşağı’nda sabit zamanlı sinyalizasyon yönetiminde elde edilen sonuç ile Webster yöntemi ile hesaplanan sonuç birbirine çok yakındır. Aradaki fark, SUMO simülasyon programında sürücü davranışlarının da simüle edilmesi olarak açıklanabilmektedir. Webster yöntemi formülünde sürücü davranışı ile ilgili parametreler ihmal edilerek hesap yapılmıştır. Oysa, SUMO simülasyon programı sinyalizasyon kavşağı işletirken genel sürücü davranışlarını da baz almaktadır.

Çizelge 4.4. Webster yöntemi ile doğrulama sonuçları

Sinyalizasyon yönetim biçimi	SUMO simülasyon programı gecikme sonucu (sn/taşıt)	Webster yöntemi gecikme sonucu (sn/taşıt)
Sabit zamanlı sinyalizasyon yönetimi	103,2	110,98

4.3. Görsel Tespit Yöntemi ile Doğrulama

Tez çalışmasında, SUMO simülasyon ortamında geliştirilen adaptif trafik yönetim modeli algoritmalarının tespit edilen sonucu için görsel tespit yöntemi ile doğrulama çalışmaları yürütülmüştür. SUMO simülasyon çalışmalarında işletilen adaptif trafik yönetim modelinde, Heybe Kavşağı'na ait 23 Mayıs 2023 tarihindeki saat 08.30 – 09.30 arasındaki Çizelge 3.1, Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te verilen trafik verileri kullanılmıştır. Bu trafik verileri adaptif trafik yönetim modeli ile işletilerek Çizelge 4.1'de belirtilen gecikme, bekleme süresi ve ortalama hız sonuçları elde edilmiştir.

Adaptif trafik yönetim modeli, görsel tespit yöntemi ile gecikme hesapları için 23 Mayıs 2023 tarihindeki 08.30 – 09.30 zirve saat aralığındaki kamera görüntüleri kullanılmıştır. Kavşakta bulunan kamera görüntüsü Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Heybe Kavşağı görsel tespit yönteminde kullanılan kamera görüntüsü

Kamera görüntüleri üzerinden gözlemlenerek elde edilen sonuçlar her bir trafik akımı için tespit edilerek Çizelge 4.5, Çizelge 4.6, Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8'de sunulmuştur.

Çizelge 4.5. TA7 ve TA5 trafik akımları için gecikme sayımları

Trafik akımı	Sayım	T _{giriş} (sn)	T _{çıkış} (sn)	T _{çıkış} -T _{giriş} (sn)	Gecikme (sn/taşıt)
TA7	1.Taşıt	9	72	63	84,95
	2.Taşıt	4	38	34	
	3.Taşıt	10	72	62	
	4.Taşıt	12	109	97	
	5.Taşıt	13	116	103	
	6.Taşıt	9	107	98	
	7.Taşıt	6	57	51	
	8.Taşıt	11	116	105	
	9.Taşıt	9	107	98	
	10.Taşıt	5	41	36	
	11.Taşıt	6	106	100	
	12.Taşıt	9	138	129	
	13.Taşıt	11	122	111	
	14.Taşıt	9	102	93	
	15.Taşıt	7	78	71	
	16.Taşıt	11	113	102	
	17.Taşıt	8	111	103	
	18.Taşıt	6	75	69	
	19.Taşıt	11	116	105	
	20.Taşıt	6	75	69	
TA5	1.Taşıt	12	18	6	30,25
	2.Taşıt	9	12	3	
	3.Taşıt	13	14	1	
	4.Taşıt	8	66	58	
	5.Taşıt	10	30	20	
	6.Taşıt	10	64	54	
	7.Taşıt	7	28	21	
	8.Taşıt	8	57	49	
	9.Taşıt	10	23	13	
	10.Taşıt	9	63	54	
	11.Taşıt	1	27	26	
	12.Taşıt	9	32	23	
	13.Taşıt	7	62	55	
	14.Taşıt	8	29	21	
	15.Taşıt	10	58	48	
	16.Taşıt	9	62	53	
	17.Taşıt	10	22	12	
	18.Taşıt	11	39	28	
	19.Taşıt	7	23	16	
	20.Taşıt	9	53	44	

Çizelge 4.6. TA9 trafik akımı için gecikme sayımları

Trafik akımı	Sayım	T _{giriş} (sn)	T _{çıkış} (sn)	T _{çıkış} -T _{giriş} (sn)	Gecikme (sn/taşıt)
TA9	1.Taşıt	8	49	41	76,05
	2.Taşıt	9	105	96	
	3.Taşıt	13	121	108	
	4.Taşıt	7	35	28	
	5.Taşıt	9	85	76	
	6.Taşıt	8	140	132	
	7.Taşıt	6	97	91	
	8.Taşıt	12	49	37	
	9.Taşıt	7	130	123	
	10.Taşıt	11	121	110	
	11.Taşıt	7	75	68	
	12.Taşıt	11	53	42	
	13.Taşıt	7	49	42	
	14.Taşıt	6	38	32	
	15.Taşıt	8	25	17	
	16.Taşıt	8	149	141	
	17.Taşıt	5	147	142	
	18.Taşıt	7	82	75	
	19.Taşıt	9	86	77	
	20.Taşıt	6	49	43	

Çizelge 4.7. TA8 ve TA6 trafik akımları için gecikme sayımları

Trafik akımı	Sayım	T _{giriş} (sn)	T _{çıkış} (sn)	T _{çıkış} -T _{giriş} (sn)	Gecikme (sn/taşıt)
TA8	1.Taşıt	11	108	97	89,75
	2.Taşıt	9	75	66	
	3.Taşıt	10	56	46	
	4.Taşıt	7	73	66	
	5.Taşıt	12	116	104	
	6.Taşıt	13	131	118	
	7.Taşıt	11	129	118	
	8.Taşıt	10	130	120	
	9.Taşıt	6	106	100	
	10.Taşıt	9	95	86	
	11.Taşıt	11	116	105	
	12.Taşıt	9	110	101	
	13.Taşıt	8	73	65	
	14.Taşıt	9	69	60	
	15.Taşıt	7	113	106	
	16.Taşıt	13	116	103	
	17.Taşıt	12	112	100	
	18.Taşıt	9	81	72	

	19.Taşıt	12	79	67	
	20.Taşıt	10	105	95	
TA6	1.Taşıt	8	100	92	
	2.Taşıt	7	65	58	
	3.Taşıt	9	61	52	
	4.Taşıt	9	93	84	
	5.Taşıt	9	88	79	
	6.Taşıt	9	104	95	
	7.Taşıt	9	86	77	
	8.Taşıt	10	112	102	
	9.Taşıt	8	113	105	
	10.Taşıt	8	106	98	
	11.Taşıt	9	102	93	75,6
	12.Taşıt	11	80	69	
	13.Taşıt	13	94	81	
	14.Taşıt	7	107	100	
	15.Taşıt	11	112	101	
	16.Taşıt	9	95	86	
	17.Taşıt	6	48	42	
	18.Taşıt	15	52	37	
	19.Taşıt	10	28	18	
	20.Taşıt	10	53	43	

Çizelge 4.8. TA10 trafik akımı için gecikme sayımları

Trafik akımı	Sayım	T _{giriş} (sn)	T _{çıkış} (sn)	T _{çıkış} -T _{giriş} (sn)	Gecikme (sn/taşıt)
TA10	1.Taşıt	9	103	94	
	2.Taşıt	8	100	92	
	3.Taşıt	13	74	61	
	4.Taşıt	9	73	64	
	5.Taşıt	4	62	58	
	6.Taşıt	7	120	113	
	7.Taşıt	14	102	88	
	8.Taşıt	10	116	106	
	9.Taşıt	8	120	112	
	10.Taşıt	11	111	100	105,2
	11.Taşıt	8	151	143	
	12.Taşıt	4	148	144	
	13.Taşıt	8	141	133	
	14.Taşıt	7	143	136	
	15.Taşıt	10	127	117	
	16.Taşıt	6	161	155	
	17.Taşıt	10	92	82	
	18.Taşıt	9	105	96	
	19.Taşıt	6	147	141	

Çizelge 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8’de detayları verilen trafik akımlarına göre taşıt başına düşen gecikme süreleri Çizelge 4.9’da verilmiş ve adaptif trafik yönetim modelinin görsel tespit yöntemi ile ortalama taşıt başına düşen gecikme süresi hesaplanmıştır.

Çizelge 4.9. Adaptif trafik yönetim modeli görsel tespit yöntemi gecikme sonuçları

Trafik akımı	Gecikme (sn/taşıt)
TA7	84,95
TA5	30,25
TA9	76,05
TA8	89,75
TA6	75,6
TA10	105,2
Ortalama gecikme	80,38

Yapılan doğrulama çalışmaları sonucunda, SUMO simülasyon programının gecikme parametresi sonuçları ile görsel tespit yöntemi gecikme parametresi sonuçları Çizelge 4.10’da yer almaktadır.

Çizelge 4.10. Görsel tespit yöntemi ile doğrulama sonuçları

Sinyalizasyon yönetim biçimi	SUMO simülasyon programı gecikme sonucu (sn/taşıt)	Görsel tespit yöntemi gecikme sonucu (sn/taşıt)
Adaptif trafik yönetim modeli	75,1	80,38

Çizelge 4.10’da da görüldüğü üzere SUMO simülasyon programında yapılan çalışmalar ile görsel tespit yöntemi doğrulama çalışmaları sonuçları yaklaşık olarak aynıdır. Küçük farklılık, simülasyon ortamı ile gerçek kavşak fiziki koşullar arasındaki fark veya harici etkenler olarak açıklanabilmektedir. Yani simülasyon programları ideal koşullarda çalışmayı simüle etmektedir. Oysa kavşakta herhangi bir koldaki yolun asfalt bozukluğu ya da yaya davranışları gibi harici etkenler gecikme parametresinde farklılığa neden olabilmektedir. SUMO simülasyon programında gecikme parametrelerinin göz ardı edilebilir biraz daha az olması bu şekilde açıklanabilmektedir.

4.4. AIMSUN Simülasyon Programı ile Doğrulama

Tez çalışmasında, SUMO simülasyon ortamında geliştirilen algoritmaların tespit edilen sonuçları için AIMSUN simülasyon programı kullanılarak doğrulama çalışmaları yürütülmüştür. SUMO simülasyon çalışmalarında işletilen sabit zamanlı sinyalizasyon yönetiminde ve adaptif trafik yönetim modelinde, Çizelge 3.1, Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te verilen trafik verileri kullanılmıştır. Bu trafik verileri Çizelge 3.4'te verilen sabit zamanlarla işletilerek Çizelge 3.5'te belirtilen gecikme, bekleme süresi ve ortalama hız sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca, aynı trafik verileri geliştirilen adaptif trafik yönetim modeli ile işletilerek Çizelge 4.1'de belirtilen gecikme, bekleme süresi ve ortalama hız sonuçları elde edilmiştir.

Bu doğrulama çalışmasında, sayısal analizlerin yapılabilmesi için AIMSUN trafik modelleme ve simülasyon yazılımı tercih edilmiştir. AIMSUN kullanılarak, anlık trafik ve sinyalizasyon verileri uyumlu hale getirilmiş ve modellenen kavşağın geometrik çizimi üzerinde bu verilere dayalı sonuçlar elde edilmiştir.

AIMSUN modeli geliştirilirken çeşitli parametreler girilmiş ve kapsamlı bir modelleme çalışması yapılmıştır. Bu modelde, trafik yoğunluğunu etkileyen yol genişliği, şerit sayısı, dönüş şeritleri, şerit kapasiteleri, yol kapasiteleri, hız sınırları ve sinyalizasyon düzeni gibi faktörler temel alınmıştır. Araç hareketlerini simüle edebilmek için sürücülere ait agresiflik katsayısı, tepki süreleri, şerit değiştirme davranışları ve benzeri parametreler kavşakta gerçekleştirilen saha gözlemleriyle kalibre edilmiştir. Bu süreçte, kavşak akış yönleri ve trafik yoğunlukları gözle izlenmiş, elde edilen verilerle parametrelerin doğruluğu artırılmıştır. Yapılan trafik sayımları AIMSUN ortamına aktarılmış ve simülasyon modelleri, gözlenen yoğunluk değerleri ile tam uyum sağlanana kadar düzenlenmiştir. Heybe Kavşağı'nın AIMSUN geometrik modeli Şekil 4.2'de sunulmaktadır.



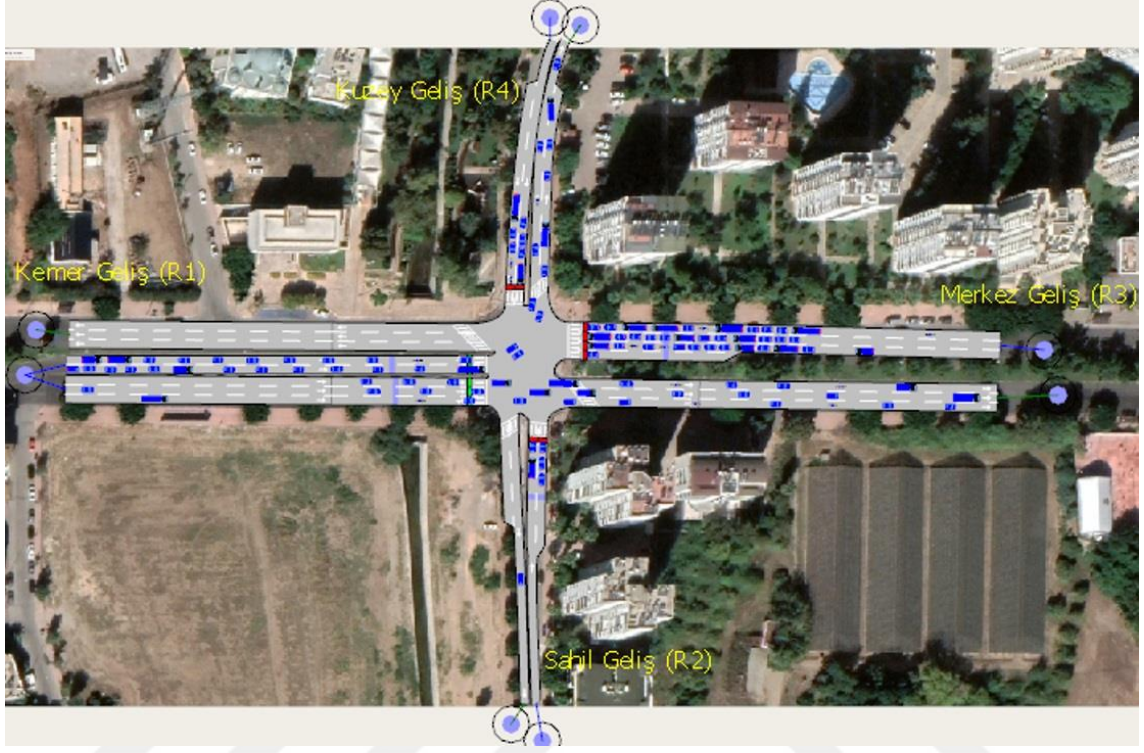
Şekil 4.2. Heybe Kavşağı AIMSUN geometrik modeli

AIMSUN simülasyonunda kullanılan trafik verileri, Heybe Kavşağı'na ait 23 Mayıs 2023 tarihindeki saat 08.30 – 09.30 arasındaki Çizelge 3.1, Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3'te gösterilen verilerdir. Araçların kavşak bölgesine girişlerinin gerçekçi bir şekilde simüle edilebilmesi için, araçlar arasındaki mesafe ve süreler, belirli bir minimum ve maksimum aralığında üstel bir fonksiyonla ilişkilendirilmiştir. AIMSUN simülasyonunda kullanılan trafik modeline ait veriler; araçların geliş yönleri, kavşaktan çıkış yönleri, toplam araç sayıları ve araç türlerinden oluşmaktadır.

AIMSUN simülasyon programında motosiklet araç sınıfı bulunmakta, ancak bu araçların davranışsal modelleri Türkiye'de motosiklet kullanan sürücülerin davranışsal modelleri ile eşleşmemektedir. Bu sebepten dolayı motosiklet sınıfı AIMSUN simülasyonunda otomobil sınıfına dahil edilmiştir. Otomobillerin boyut, hızlanma, tepki vb. parametreleri motosikleti de içine alacak şekilde uyarlanmıştır.

Heybe Kavşağı, AIMSUN simülasyon programında modellendikten sonra 23 Mayıs 2023 tarihindeki saat 08.30 – 09.30 arasındaki trafik verileri ile Çizelge 3.4'te yer alan sabit süreler ile işletilmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. Daha sonra adaptif trafik yönetim modelinde yer alan minimum maksimum süre aralığı faz işletimi ve faz atlama özellikleri AIMSUN simülasyon programında işletilmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. AIMSUN simülasyon programında işletilen adaptif trafik yönetim modeli alt

bileşenlerinde yine aynı koşul olan 23 Mayıs 2023 tarihindeki saat 08.30 – 09.30 arasındaki trafik verileri kullanılmıştır. Şekil 4.3'te Heybe Kavşağı'na ait AIMSUN simülasyon model işletimi görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 4.3. Heybe Kavşağı AIMSUN mikro simülasyon çalışması görüntüsü

Şekil 4.3'te de görüldüğü gibi Heybe Kavşağı, AIMSUN simülasyon programında işletilmiş ve sonuçlar elde edilmiştir. Heybe Kavşağı için AIMSUN simülasyon programından elde edilen sonuçlar Çizelge 4.11, Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.13'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.11. AIMSUN simülasyon programı ile gecikme parametresi doğrulama sonuçları

Sinyalizasyon yönetim biçimi	SUMO simülasyon programı gecikme sonucu (sn/taşıt)	AIMSUN simülasyon programı gecikme sonucu (sn/taşıt)
Sabit zamanlı sinyalizasyon yönetimi	103,2	105,4
Adaptif trafik yönetim modeli	75,1	81,6

Çizelge 4.12. AIMSUN simülasyon programı ile bekleme süresi parametresi doğrulama sonuçları

Sinyalizasyon yönetim biçimi	SUMO simülasyon programı bekleme süresi sonucu	AIMSUN simülasyon programı bekleme süresi sonucu
------------------------------	--	--

	(sn/taşıt)	(sn/taşıt)
Sabit zamanlı sinyalizasyon yönetimi	87,9	89,4
Adaptif trafik yönetim modeli	59,4	64,2

Çizelge 4.13. AIMSUN simülasyon programı ile ortalama hız parametresi doğrulama sonuçları

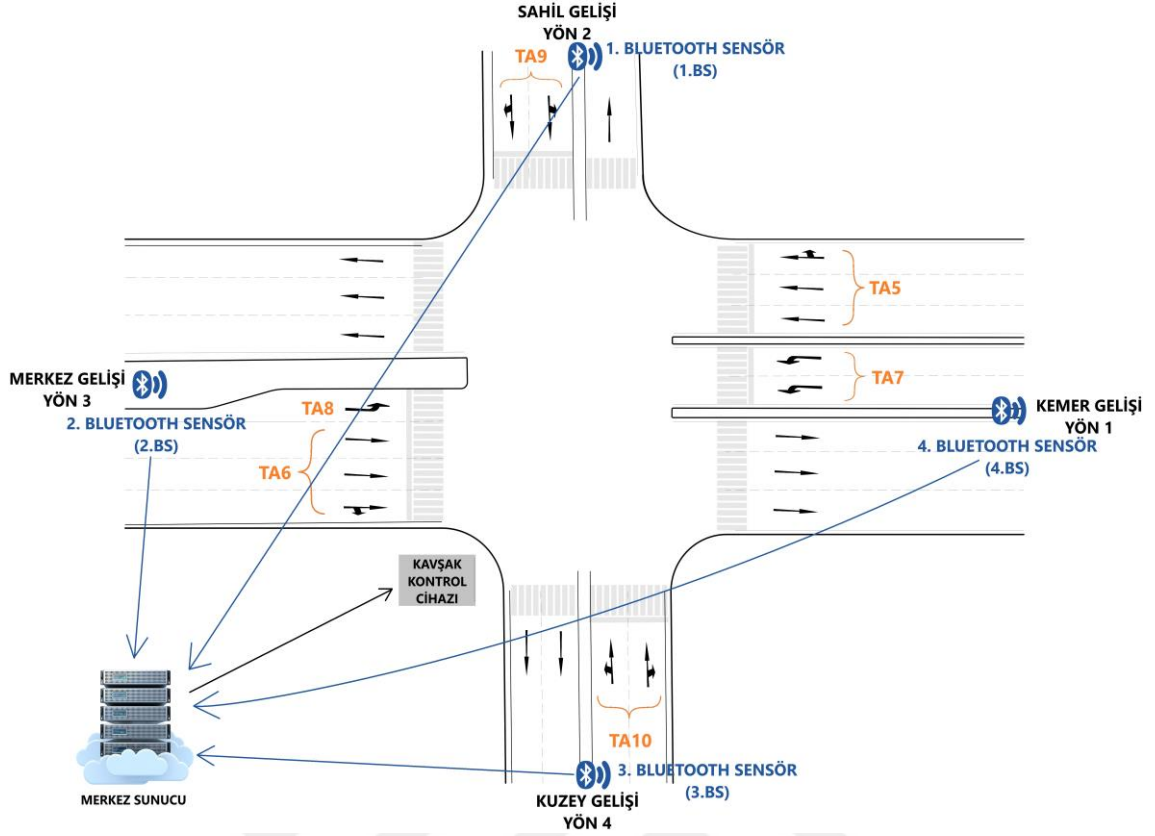
Sinyalizasyon yönetim biçimi	SUMO simülasyon programı ortalama hız sonucu (km/sa)	AIMSUN simülasyon programı ortalama hız sonucu (km/sa)
Sabit zamanlı sinyalizasyon yönetimi	5,44	5,42
Adaptif trafik yönetim modeli	6,35	6,17

Çizelge 4.11, Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.13'te görüldüğü gibi SUMO simülasyon programı ve AIMSUN simülasyon programı çıktıları birbirine çok yakındır. Sonuçların birebir aynı çıkmamasının nedeni iki simülasyon programının arka planda işlettiği teorilerin ve yöntemlerin çeşitliliği ve farklılıkları olarak düşünülebilir.

4.5. Performans Ölçüm Sistemi Uygulaması ve Tespit Edilen Sonuçlar

4.5.1. Bluetooth tabanlı trafik analiz dedektörü uygulama yerleşim yapıları

Tez çalışmasında, sinyalizasyon sistemlerinin verimliliklerini ölçmek amacı ile performans ölçüm sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan performans ölçüm sistemi, bluetooth sensör tabanlı gerçek zamanlı tespite dayalı bir sistemdir. Analiz amaçlı geliştirilen yöntemde kullanılan bluetooth trafik analiz sensörleri, Şekil 4.4'te görüldüğü gibi Heybe Kavşağı'na yerleştirilmiştir.



Şekil 4.4. Heybe Kavşağı bluetooth trafik analiz sensörleri yerleşim planları

Sensörler kavşak kollarının gidiş ve geliş yönlerinin ortalarına yerleştirilmiştir. Böylece tüm trafik akımlarını kullanabilecek araçların trafik verileri alınmıştır. Bluetooth sensörlerinin (BS) saha montajı Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

Bluetooth trafik analiz sensörlerinin yerleşim planına göre tüm trafik akımları için veriler tespit edilebilmektedir. MAC adresleri, bluetooth sensörleri ile tespit edilmekte ve veriler merkeze gönderilmektedir. Merkeze gönderilen MAC adresleri tespit eden sensörlere göre eşleştirilmektedir. Böylece araçların güzergahları, bluetooth tespit zamanları, seyahat süreleri ve gecikme gibi parametreler belirlenebilmektedir. Bu yapı ile gerçek zamanlı performans ölçüm sistemi oluşturulmuştur. Bu yapının bilimsel olarak en büyük yeniliği, tespit edilen parametreleri adaptif sinyalizasyon sisteminde geri besleme verisi olarak kullanarak performansı artırıcı algoritmalara altyapı oluşturmasıdır. Bu çalışmadaki performans ölçümü gerçek trafik verileri ile gerçek zamanlı yapıldığı için adaptif sinyalizasyon sistemleri yönetimini daha verimli hale getirecektir. Şekil 4.4'te görüldüğü gibi bluetooth verileri kontrol merkezinde toplanıp otomatik sonuçlar çıkarıldıktan sonra kavşakta bulunan adaptif sinyalizasyon sistemini yöneten kavşak kontrol cihazına gerçek zamanlı geri besleme olarak gönderilebilir.



Şekil 4.5. Bluetooth trafik analiz sensörü saha montajı

Trafik akımlarına karşılık gelen bluetooth trafik analiz sensörleri konfigürasyonları Çizelge 4.14’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.14. Trafik akımlarına göre bluetooth eşleşmeleri

Trafik akımı	Bluetooth konfigürasyonu (Nereden nereye)
TA5	4.BS’den 2.BS veya 1.BS
TA6	2.BS’den 4.BS veya 3.BS
TA7	4.BS’den 3.BS
TA8	2.BS’den 1.BS
TA9	1.BS’den 2.BS veya 3.BS veya 4.BS
TA10	3.BS’den 1.BS veya 2. BS veya 4.BS

4.5.2. Bluetooth üzerinden tespit edilen veriler

Bluetooth trafik analiz sensörleri bulunduğu yerden geçen açık bluetooth tabanlı cihazların (kulaklıklar, hoparlörler, akıllı saatler, araç içi eğlence sistemleri, telefonlar vb.) MAC adreslerini tespit etmektedir. MAC adresi ile birlikte tespit zamanı da kaydedilmektedir. Böylelikle tüm bluetooth sensörlerden gelen bu veriler ışığında trafik verileri çıkarılabilmektedir.

Tespit edilen MAC adresleri içerisinde otomatik veri ayıklama işlemleri yapılmaktadır. Örneğin, belli bir yol üzerinde bulunan iki adet bluetooth sensör arasında markete uğrayan MAC adresleri olabilir. Bu gibi veriler otomatik olarak yazılım filtreleri ile elenmektedir. Çizelge 4.15'te bluetooth sensörlerin tespit ettiği örnek veriler yer almaktadır.

Çizelge 4.15. Bluetooth trafik sensörlerinin tespit ettiği örnek veriler

Tespit edilen adres	İlk tespit cihaz no	İlk tespit zamanı (saat:dakika:saniye)	Son tespit cihaz no	Son tespit zamanı (saat:dakika:saniye)	Trafik akımı	Seyahat süresi (sn)
1.MAC NO	3.BS	15:31:05	1.BS	15:31:59	TA10	54
2.MAC NO	2.BS	11:52:32	1.BS	11:54:35	TA8	123
3.MAC NO	4.BS	01:24:15	3.BS	01:24:32	TA7	17
4.MAC NO	1.BS	18:05:01	2.BS	18:07:01	TA9	120
5.MAC NO	4.BS	08:26:56	2.BS	08:27:41	TA5	45
6.MAC NO	2.BS	20:00:45	4.BS	20:01:55	TA6	70
7.MAC NO	2.BS	10:00:23	4.BS	10:01:46	TA6	83

4.5.3. Performans ölçüm sistemi sonuçları

Çalışmada geliştirilen gerçek zamanlı performans ölçüm sistemi ile gecikme değerleri saptanmıştır. Performans ölçümü için trafikte verimlilik belirlemedeki en önemli parametrelerden biri olan gecikme parametresi kullanılmıştır. Heybe Kavşağı'na, tasarlanan bluetooth trafik sensörleri yerleştirilmiştir. Bluetooth sensörlerinden alınan veriler haberleşme hattı üzerinden tek bir merkezde toplanmıştır. Merkezdeki veriler üzerinden gecikme değerleri hesaplanmıştır.

Hesaplama öncelikle normal koşullar göz önünde bulundurulmuştur. Bluetooth trafik sensörleri arasındaki yol bazlı mesafeler ölçülmüştür ve araçların 50 km/sa sabit hız ile hiçbir sinyalizasyon, araç bekleme gibi engele takılmadan sahip olacakları seyahat süreleri hesaplanmıştır. 50 km/sa yerel yönetimin kural olarak

uyguladığı hız sınırındır. Çizelge 4.16’da bluetooth trafik sensörleri arasındaki mesafe ve 50 km/sa sabit hızla normal koşullardaki seyahat süreleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.16. Bluetooth sensörler arasındaki mesafe ve normal koşullarda seyahat süresi

Trafik akımı	Bluetooth konfigürasyonu (Nereden nereye)	Sensörler arasındaki yol mesafesi (m)	Normal koşullarda seyahat süresi (sn)
TA5	4.BS’den 2.BS	656	47
TA5	4.BS’den 1.BS	554	40
TA6	2.BS’den 4.BS	656	47
TA6	2.BS’den 3.BS	428	31
TA7	4.BS’den 3.BS	460	33
TA8	2.BS’den 1.BS	545	39
TA9	1.BS’den 2.BS	545	39
TA9	1.BS’den 3.BS	367	26
TA9	1.BS’den 4.BS	554	40
TA10	3.BS’den 1.BS	367	26
TA10	3.BS’den 2.BS	428	31
TA10	3.BS’den 4.BS	460	33

Heybe Kavşağı iki farklı işletim tipi ile çalıştırılmıştır. Kavşak, 3 Ocak 2024 tarihinde tüm gün sabit zamanlı sinyalizasyon sistemi olarak çalıştırılmıştır. Kavşak, ertesi gün 4 Ocak 2024 tarihinde tüm gün adaptif trafik yönetim modeli ile çalıştırılmıştır. Her iki günde bluetooth trafik sensörlerinden trafik verileri alınmış ve normal koşullardaki seyahat süresinden çıkarılarak gecikme süreleri hesaplanmıştır. Böylelikle tüm gün için sabit zamanlı sinyalizasyon sistemi ve adaptif trafik yönetim modelinin gerçek zamanlı performans ölçümü gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.17’de TA5 trafik akımı için tespit edilen ve hesaplanan değerler örnek olarak verilmiştir. Gecikme hesabında, normal koşullardaki bluetooth sensörleri arasındaki seyahat süreleri referans alınmıştır. Heybe Kavşağı’nda araç sayımlarını tespit edebilen loop sensörler bulunmaktadır. Bu sensörlerden elde edilen araç sayıları ve bluetooth sensörlerinden elde edilen araç başı gecikme değerleri ile toplam gecikme elde edilmektedir.

Çizelge 4.17’de bulunan tespit edilen değerler ve hesaplamalar tüm trafik akımları için yapılmıştır. Örneğin, TA5 trafik akımı saatlik araç başı gecikme değeri hesabı için 4. Bluetooth sensörden 2. Bluetooth sensöre ve 4. Bluetooth sensörden 1. Bluetooth sensöre aynı saatteki toplam gecikmeler toplanmıştır ve o saatteki toplam araç sayısına bölünmüştür. Denklem 4.4’te TA5 trafik akımı için sabit zamanlı sinyalizasyon sisteminde saat 15:00-16:00 aralığına ait örnek hesaplama verilmiştir.

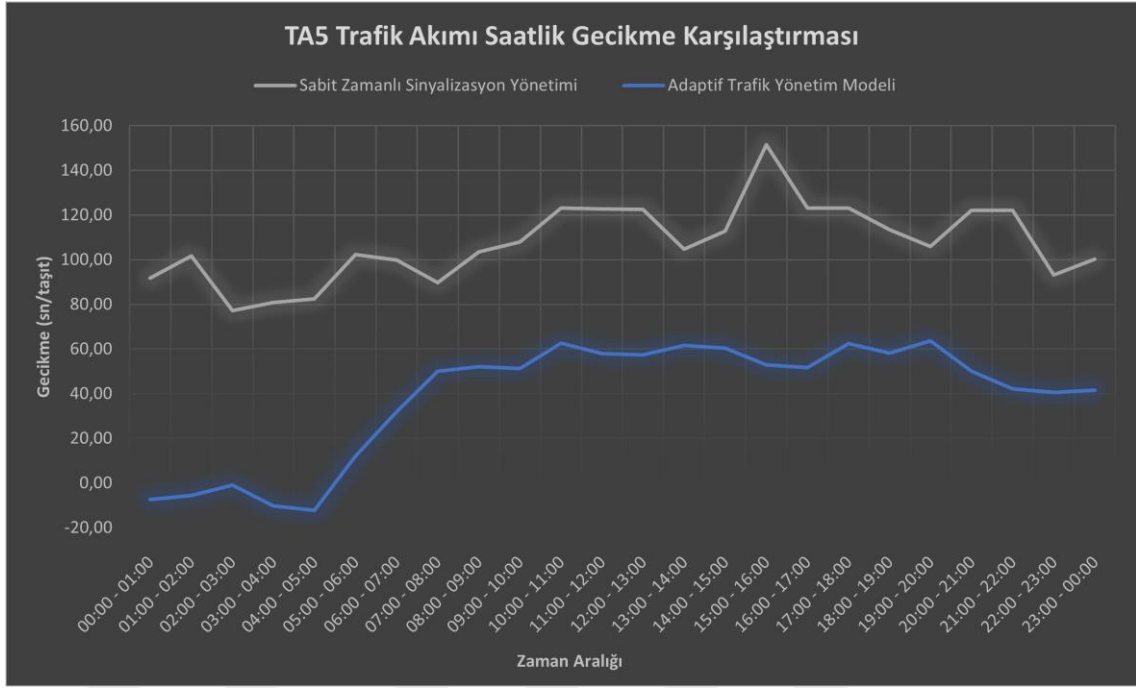
$$\text{saatlik araç başı gecikme} = \frac{177.364 + 6.756}{1.161 + 54} = 151,54 \text{ sn/taşıt} \quad (4.4)$$

Çizelge 4.17. TA5 trafik akımı için sabit zamanlı sinyalizasyon sistemi ve adaptif trafik yönetim modeli işletimlerdeki bluetooth trafik sensörlerinde tespit edilen veriler ve gecikme hesaplamaları

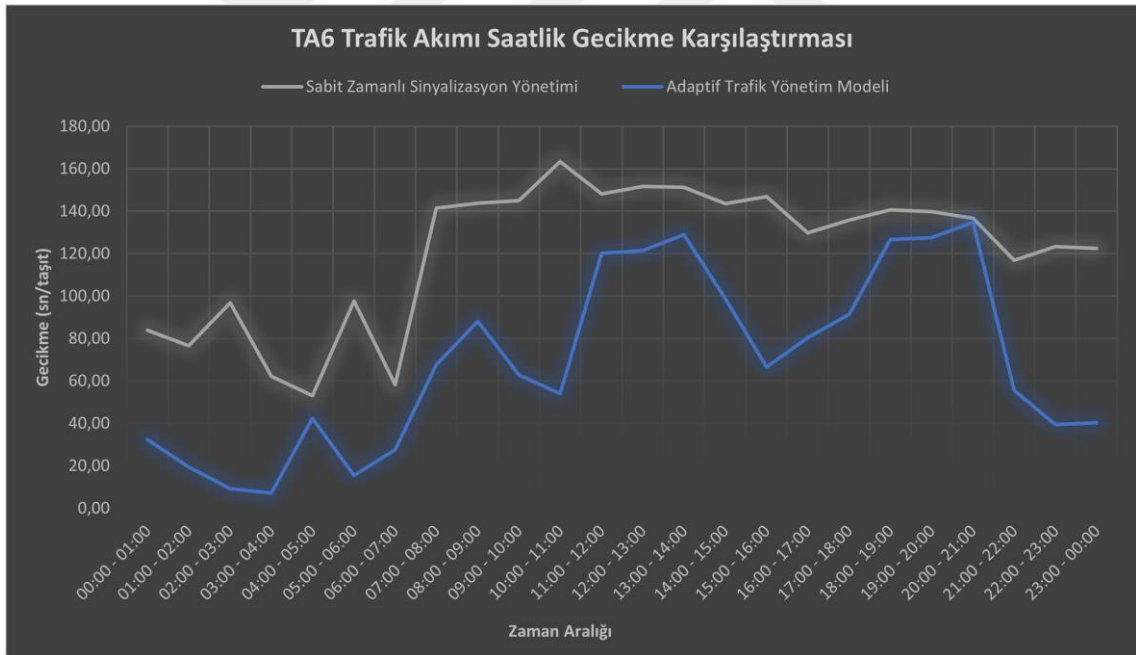
Bluetooth konfigürasyonu	Saat aralığı	Sabit zamanlı-Bluetooth ile tespit edilen araç sayısı (adet)	Sabit zamanlı-Ortalama seyahat süresi (sn)	Adaptif-Bluetooth ile tespit edilen araç sayısı (adet)	Adaptif-Ortalama seyahat süresi (sn)	Sabit zamanlı-Araç başına düşen gecikme (sn/taşıt)	Adaptif-Araç başına düşen gecikme (sn/taşıt)	Sabit zamanlı-Gerçek araç sayısı (adet)	Sabit zamanlı-Toplam gecikme (sn)	Adaptif-Gerçek araç sayısı (adet)	Adaptif-Toplam gecikme (sn)
4.BS 'den 2.BS	00:00-01:00	98	138	89	39	91	-8	416	37.759	615	-5.063
	01:00-02:00	77	148	99	41	101	-6	306	30.835	445	-2.773
	02:00-03:00	23	123	14	45	76	-2	142	10.759	123	-275
	03:00-04:00	15	125	21	35	78	-12	120	9.332	156	-1.908
	04:00-05:00	11	128	19	33	81	-14	101	8.158	124	-1.765
	05:00-06:00	14	149	9	59	102	12	97	9.871	55	647
	06:00-07:00	31	145	35	81	98	34	218	21.313	201	6.787
	07:00-08:00	133	135	176	97	88	50	656	57.576	807	40.163
	08:00-09:00	220	146	188	99	99	52	986	97.385	826	42.760
	09:00-10:00	134	154	189	99	107	52	862	92.034	865	44.779
	10:00-11:00	114	169	144	110	122	63	894	108.861	939	58.939
	11:00-12:00	156	168	201	105	121	58	958	115.696	896	51.760
	12:00-13:00	187	169	166	104	122	57	967	117.750	987	56.030
	13:00-14:00	271	150	260	109	103	62	1.091	112.120	1.000	61.768
	14:00-15:00	200	159	218	108	112	61	1.084	121.157	1.089	66.176
	15:00-16:00	189	200	343	100	153	53	1.161	177.364	1.189	62.741
	16:00-17:00	245	169	177	98	122	51	1.100	133.945	989	50.210
	17:00-18:00	264	170	132	110	123	63	1.099	134.922	850	53.353
	18:00-19:00	199	160	208	105	113	58	1.323	149.192	1.100	63.545
	19:00-20:00	145	152	214	110	105	63	992	103.930	748	46.950
	20:00-21:00	253	172	175	96	125	49	751	93.701	720	35.113
	21:00-22:00	88	169	142	89	122	42	553	67.338	671	28.026
	22:00-23:00	65	139	155	88	92	41	507	46.526	724	29.516

	23:00-00:00	96	146	112	88	99	41	526	51.952	554	22.585
	00:00-01:00	2	162	2	57	122	17	14	1.710	23	394
	01:00-02:00	3	160	3	59	120	19	16	1.922	12	229
	02:00-03:00	2	145	2	69	105	29	7	736	5	146
	03:00-04:00	1	173	1	81	133	41	7	932	6	247
	04:00-05:00	1	155	1	88	115	48	5	576	4	192
	05:00-06:00	2	152	1	56	112	16	6	673	4	64
	06:00-07:00	1	188	5	59	148	19	9	1.333	29	554
	07:00-08:00	3	188	7	96	148	56	21	3.110	46	2.581
	08:00-09:00	14	193	9	94	153	54	92	14.086	88	4.762
	09:00-10:00	9	171	7	85	131	45	47	6.162	56	2.526
	10:00-11:00	15	192	12	102	152	62	42	6.389	87	5.404
4.BS 'den 1.BS	11:00-12:00	8	199	14	101	159	61	53	8.433	67	4.095
	12:00-13:00	7	178	9	107	138	67	41	5.663	54	3.624
	13:00-14:00	8	198	5	94	158	54	40	6.324	33	1.786
	14:00-15:00	12	176	7	93	136	53	53	7.214	65	3.452
	15:00-16:00	7	165	6	98	125	58	54	6.756	45	2.615
	16:00-17:00	6	188	8	114	148	74	61	9.035	45	3.335
	17:00-18:00	9	166	9	94	126	54	95	11.981	34	1.840
	18:00-19:00	7	165	12	103	125	63	65	8.132	67	4.229
	19:00-20:00	6	167	11	116	127	76	52	6.610	54	4.110
	20:00-21:00	11	114	10	105	74	65	42	3.113	67	4.363
	21:00-22:00	3	167	6	88	127	48	36	4.576	43	2.069
	22:00-23:00	4	180	7	75	140	35	15	2.102	32	1.124
	23:00-00:00	4	163	4	105	123	65	32	3.940	21	1.367

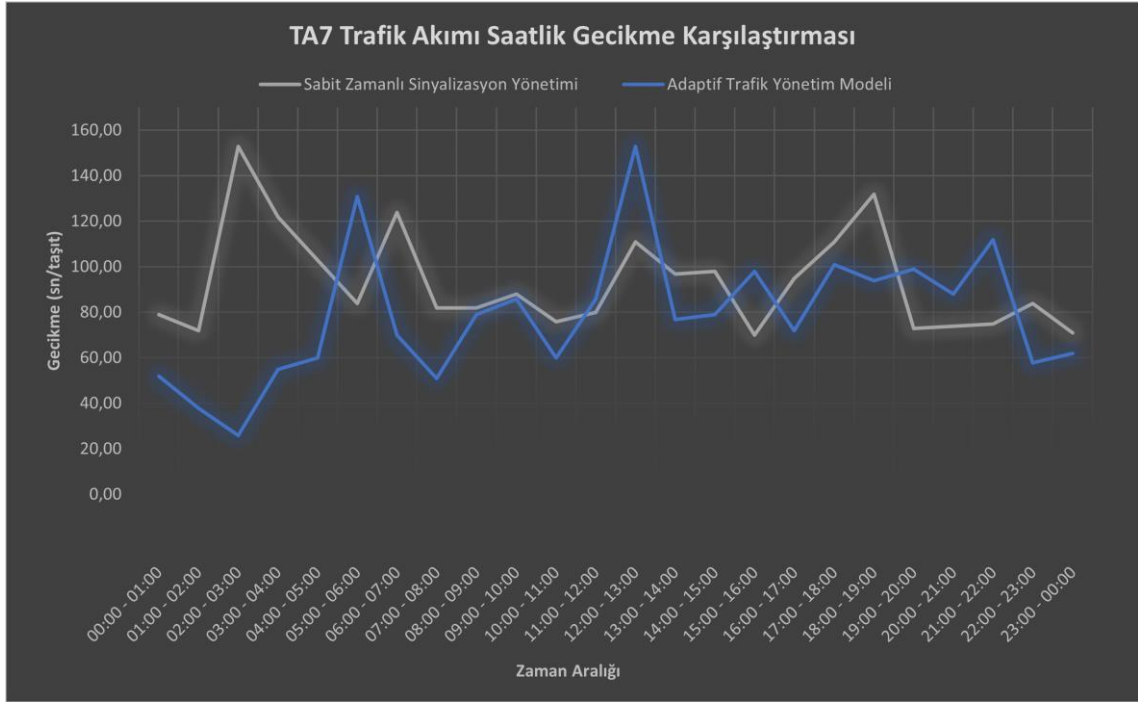
3 Ocak 2024 ve 4 Ocak 2024 tarihlerindeki sabit zamanlı sinyalizasyon sistemi ve adaptif trafik yönetim modelinin saatlik gecikme grafikleri Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de verilmiştir.



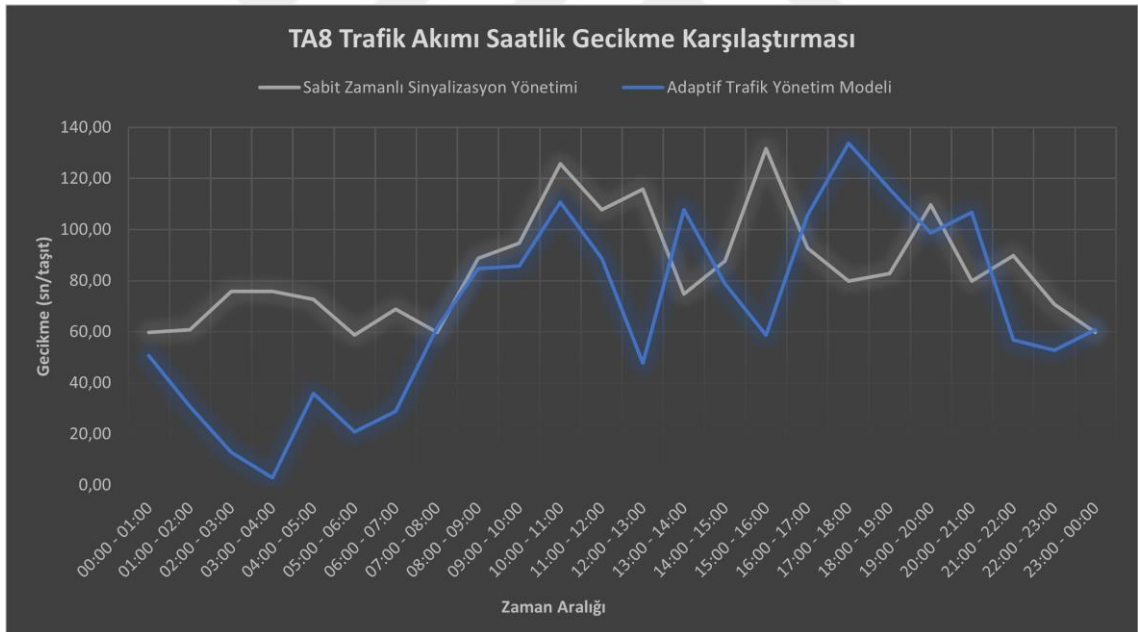
Şekil 4.6. TA5 trafik akımı için saatlik gecikme parametresi karşılaştırması



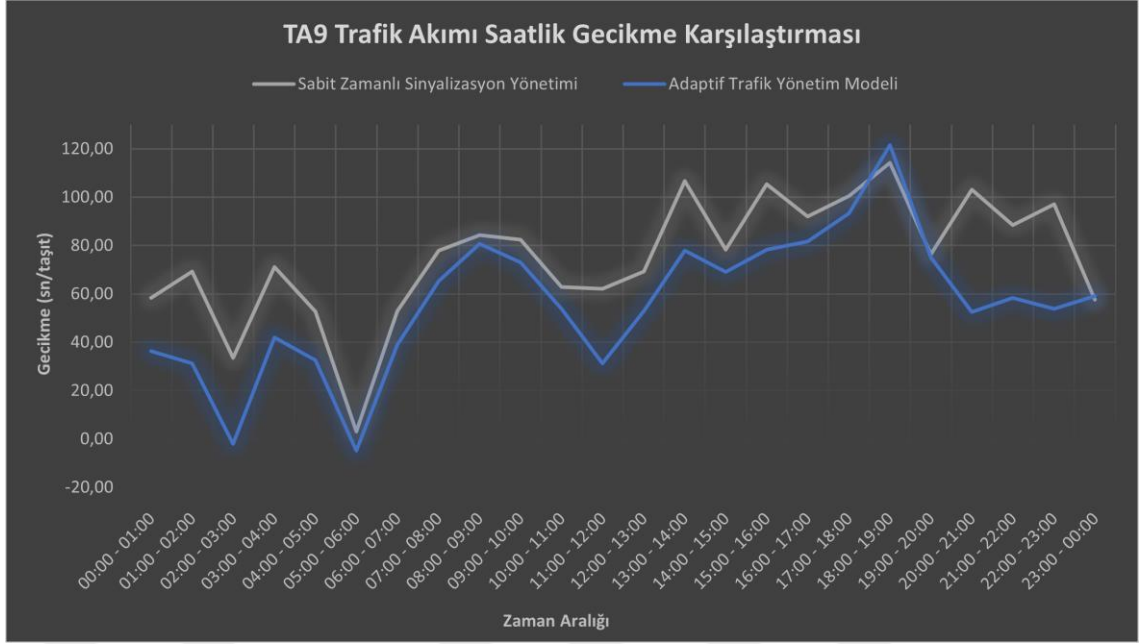
Şekil 4.7. TA6 trafik akımı için saatlik gecikme parametresi karşılaştırması



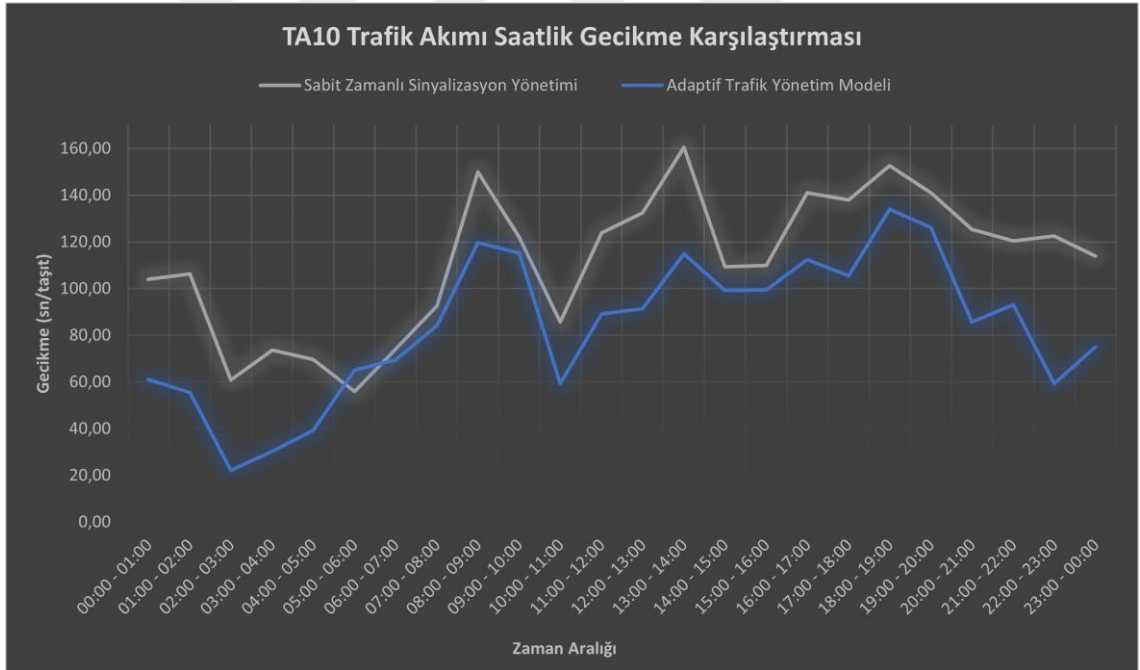
Şekil 4.8. TA7 trafik akımı için saatlik gecikme parametresi karşılaştırması



Şekil 4.9. TA8 trafik akımı için saatlik gecikme parametresi karşılaştırması



Şekil 4.10. TA9 trafik akımı için saatlik gecikme parametresi karşılaştırması



Şekil 4.11. TA10 trafik akımı için saatlik gecikme parametresi karşılaştırması

Çizelge 4.17’de bulunan toplam gecikme ve toplam gerçek araç sayısı üzerinden trafik akım bazlı günlük ortalama araç başına düşen gecikme hesaplanmıştır. Trafik akım bazlı günlük ortalama araç başına düşen gecikme, toplam gecikmenin toplam gerçek araç sayısına bölünmesi ile bulunmuştur. Kavşağa ait günlük ortalama araç başına düşen gecikme ise tüm trafik akımlarının toplam gecikmelerinin toplanıp

kavşağın günlük toplam gerçek araç sayısına bölünmesi ile hesaplanmıştır. Kavşağa ait günlük araç başına düşen gecikme performansları Çizelge 4.18’de görülmektedir.

Çizelge 4.18. Günlük araç başına düşen gecikme performansları

Trafik akımı	Sabit zamanlı-Trafik akım bazlı günlük ortalama araç başına düşen gecikme (sn/taşıt)	Adaptif-Trafik akım bazlı günlük ortalama araç başına düşen gecikme (sn/taşıt)	Sabit zamanlı-Günlük ortalama araç başına düşen gecikme (sn/taşıt)	Adaptif-Günlük ortalama araç başına düşen gecikme (sn/taşıt)
TA5	114,00	48,99		
TA6	134,61	85,02		
TA7	92,34	85,05		
TA8	90,46	81,82	119,12	73,36
TA9	85,78	70,05		
TA10	126,06	98,20		

Tez çalışmasında tasarlanan gerçek zamanlı performans ölçüm sistemi ile sabit zamanlı sinyalizasyon sistemi ve adaptif trafik yönetim modelinin performans ölçümü gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre, sabit zamanlı sinyalizasyon sistemi günlük ortalama araç başına düşen gecikme 119,12 sn/taşıt ve adaptif trafik yönetim modeli günlük ortalama araç başına düşen gecikme 73,36 sn/taşıt olarak tespit edilmiştir. Bluetooth tabanlı performans ölçüm sonuçlarına göre Heybe Kavşağı’na adaptif trafik yönetim modeli uygulanması ile gecikmede günlük yaklaşık %38,42’lik bir iyileşme meydana gelmiştir.

4.6. Tartışma

Bu tez çalışmasında, adaptif trafik yönetim modeli ve gerçek zamanlı performans ölçüm sistemi tasarlanmıştır. Tasarlanan model ve sistem gerçek dünyada uygulanmış ve sonuçları elde edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar teoriden pratiğe dönüştürülmüştür.

Çalışmada geliştirilen adaptif trafik yönetim modeli ile yoğun saatlerde etkin bir iyileştirme sağlanmıştır. Model, minimum maksimum süre aralığı faz işletimi, faz atlama, matris yapı ve dinamik faz olmak üzere üç farklı özellik ile çalışmaktadır. Bu özelliklerin birleşimi ve bu üç farklı özelliğin senkron çalışması adaptif yönetime önemli bir avantaj sağlamaktadır. CRONOS diye adlandırılan kontrol stratejisinin kullanıldığı bir adaptif yönetim çalışmasında, yoğun saat gecikme parametresinde %19,3'lük bir iyileştirme sağlanmıştır (Midenet ve diğ., 2004). Başka bir çalışmada,

bulanık mantık ve revize edilmiş Webster optimum çevrim formülü kullanılarak adaptif trafik yönetimi incelenmiş ve ortalama bekleme süreleri 52,64 saniyeden 41,44 saniyeye düşürülmüştür (Ali ve diğ., 2020). Başka bir çalışmada ise, motosiklet sayısı, otomobil sayısı ve kuyruk uzunluğu gibi değişkenleri içeren bulanık mantık kontrol yöntemi kullanılarak yeşil ışık süresi hesaplanmıştır. Sonuçlar, bulanık mantık denetleyicilerini kullanan trafik ışığı düzenleme sisteminin geleneksel sistemden daha iyi performans gösterdiğini göstermiştir (Mualifah ve Abadi, 2019). Sinyalli kavşaklarda gerçek zamanlı adaptif bir kontrol stratejisi uygulamak için modüler bir Zamanlanmış Senkronize Petri Ağı (TSPN) modeli geliştirilmiştir. Çalışmalar, SUMO ve MATLAB programında gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda, önerilen kontrol stratejisi gecikmeyi azaltmış ve kavşakta güvenli bir trafik akışı sağlamıştır (Lamghari Elidrissi ve diğ., 2024). Başka bir çalışmada, Q-öğrenmesi kullanılarak sinyalizasyon kontrolü yapılmıştır. Q-öğrenmesinin kullanıldığı kavşakta kuyruk uzunluğu ve bekleme süresi açısından pozitif bir performans sergilenmiştir (Joo ve diğ., 2020). Diğer çalışmada ise, yaklaşan araçlar ile sinyal kontrolörü arasında gelişmiş iletişim teknolojilerinden yararlanarak araç yolu optimizasyonunu sinyal kontrolüyle bütünleştiren bir sinyal kontrol algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritma çalışmasında MATLAB ortamı kullanılmıştır. Sonuçlar, önerilen optimizasyon algoritmasının araç gecikmelerini azaltarak, diğer yandan da verimliliği ve kapasiteyi artırarak kavşak performansını iyileştirebileceğini ve sıkışık trafik koşulları altında daha etkili performans gösterdiğini göstermektedir (Li ve diğ., 2014). Bu çalışmadaki minimum maksimum süre aralığı faz işletimi, faz atlama, matris yapı ve dinamik faz özellikleri sayesinde değişen trafik koşullarına göre daha efektif sonuçlar elde edilmiştir. Diğer çalışmalardaki iyileştirme oranlarına göre verimin yüksek olmasındaki en büyük etkenlerden biri bu tez çalışmasındaki adaptif yönetim alt özelliklerinin trafik koşullarına göre kademeli devreye girmesidir. Bu çalışmada, geliştirilen algoritmalar sırayla devreye alınmış ve her bir bileşenin etkisi ayrı ayrı belirlenmiştir. Bu, adaptif trafik yönetiminde hangi alt bileşenin daha etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Adaptif trafik modelinin alt bileşenlere ayrılmasının nedeni, bu model üzerinde yapılacak gelecekteki geliştirmelerin alt bileşenlere kadar müdahale edilebilmesini sağlamaktır.

Tez çalışmasındaki adaptif trafik yönetim modelinde temel olarak trafik akımları baz alınmıştır. Trafik akımları üzerine mimari kurulmuştur. Sinyalizasyon sistemlerinde trafik akımlarının konfigürasyonu fazları oluşturmaktadır. Dinamik faz yapıları üzerine yapılan bir çalışmada, asimetrik trafik akışlarına uyum sağlayabilen bir akış

gerçekleştirilmiştir. Gerçek trafik verileri ile VISSIM simülasyon programı üzerinde modelleme yapılmış ve araç gecikmesinde %28'lik bir iyileştirme tahmin edilmiştir (Jiang ve diğ., 2021). Başka bir çalışmada, faz dizisini ve zamanı optimize edebilen bir algoritma geliştirilmiş ve sonuçlar VISSIM simülasyon programı aracılığıyla elde edilmiştir. Yoğun saatlerde, farklı yönetim stilleri için ortalama araç gecikmelerinde %10,74 ve %17,22 arasında değişen azalmalar tespit edilmiştir (Zhai ve diğ., 2017). Bu tez çalışmasında sinyalizasyon sistemlerinin en küçük yapı birimi olan trafik akımlarının temel alınması, fazları temel alan diğer çalışmalara göre avantaj oluşturmıştır. Tez çalışmasında, fazların trafik akımlarından oluşması nedeniyle, değişen trafik koşullarına karşı daha etkili ve esnek bir yönetim tarzı geliştirilmiştir. Tez çalışmasının en büyük bilimsel yeniliklerinden biri, geliştirilen adaptif trafik yönetim algoritmalarının en küçük yapısal birim olan trafik akımları üzerinde geliştirilmiş olmasıdır. Ayrıca, geliştirilen modelde esnek faz yapısı trafik akımlarına dayalı olarak oluşturulduğundan, kavşaklar arasında adaptif koordinasyon için bir altyapı oluşturulmuştur. Diğer adaptif trafik yönetimlerine göre en önemli avantajı, esnek faz yapısı sayesinde daha verimli ve kolay adaptif koordinasyon sağlanabilmesidir. Bu çalışma, gelecekteki adaptif koordinasyon çalışmaları için temel oluşturmaktadır.

Tez çalışmasında tespit edilen adaptif trafik yönetim modeli performans sonuçlarının doğrulanmasında Webster modeli kullanılmıştır. Bir çalışmada, sinyalli kavşaklar için optimizasyon tabanlı bir trafik sinyali çevrim uzunluğu modeli geliştirilmiştir. Model, Çin trafik koşulları altında Webster gecikme modeline göre yeniden kalibre edilmiştir. Optimizasyon çevrim uzunluğu modelinin performansı, gecikme süresi ve kuyruk uzunluğu açısından TRRL modeli ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, optimizasyon trafik sinyali çevrim uzunluğu modelinin TRRL modelinden daha verimli olduğunu göstermektedir (Wu ve diğ., 2015). Bu tez çalışmasında Webster gecikme modelinin doğrulamada kullanılmasının uygun olduğu diğer çalışmalardan da görülmektedir.

Tez çalışmasının bir diğer yenilikçi yönü ise bluetooth ve loop sensörlerinden oluşan bir sensör füzyonunun oluşturulmasıdır. Adaptif sinyalizasyon sistemlerinde genellikle kamera, loop sensör, LIDAR ve radar gibi sensörler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, trafik verileri üretmek için tasarlanan bluetooth sensörleri ve loop sensörler birlikte kullanılmıştır. Bir çalışmada, hız parametresine dayalı olarak geliştirilen adaptif trafik yönetim sisteminde bir hız dedektörü kullanılmıştır. Hız değerlerine dayalı olarak

geliştirilen uygulama ile fazlardaki gecikme parametrelerinde iyileştirmeler sağlanmıştır (Ren ve diğ., 2016). Başka bir çalışmada, sinyalizasyon kontrolünde görüntü işleme ve görüntü eşleştirme tekniği kullanan adaptif trafik ışığı kontrol sistemi tasarlanmıştır. Çalışmada Sobel, Canny, Roberts, Log ve aktif kontur olmak üzere beş farklı kenar dedektörü uygulanmıştır. Canny kenar işleminin kenar tespiti için en iyi işlem olduğu belirlenmiştir (Meng ve diğ., 2021). Başka bir çalışmada akıllı kavşaklar için veri üretmek üzere bir sensör füzyonu oluşturulmuştur. Bu sensör füzyonu görüntü işleme tabanlı kameralar ve loop sensörlerinden oluşmaktadır. Bu sensör yapısı ile nesne hareketlerinin takibi, talep profili oluşturma, olay tespiti ve dönüş hareketi sayımlarında başarılı sonuçlar elde edilmiştir (Banerjee ve diğ., 2019). Bu çalışmalardan farklı olarak bu tez çalışmasında bluetooth ve loop sensörlerin teknolojik altyapıları kullanılarak farklı bir sensör füzyonu oluşturulmuş ve tespit edilen trafik verilerinin çeşitliliği artırılmıştır.

Tez çalışmasındaki algoritmalar, SUMO simülasyon programında geliştirilmiş ve denenmiştir. Ayrıca, AIMSUN simülasyon programında da tespit edilen performans sonuçlarının doğrulama çalışmaları yürütülmüştür. Simülasyon programları sinyalizasyon sistemlerinde geliştirilen yeni algoritmaların test edilmesi ve performans sonuçlarının elde edilmesi için çok önemli bir araçtır. Bir çalışma, kuyruk uzunluğuna dayalı talep tahmini kullanan ve değişen trafik koşullarında daha iyi performans göstermeyi amaçlayan sezgisel bir adaptif trafik kontrol algoritması önermektedir. Algoritma analizinde VISSIM simülasyon programı kullanılmıştır. Geliştirilen algoritma, ortalama kontrol gecikmesi ve ortalama kuyruk uzunluğu parametreleri üzerinde değerlendirilmiştir. Bu parametreler üzerinde sezgisel adaptif trafik kontrol algoritması ile önemli iyileştirmeler elde edilmiştir (Raveendran ve diğ., 2020). Başka bir çalışmada, sinyalli bir kavşak için dinamik kontrol stratejisi önerilmiştir. Bu strateji, her şerit için kuyruk uzunluğuna göre yeşil ışık süresinin otonom olarak ayarlanmasını sağlamaktadır. Önerilen stratejinin analizi için SUMO simülasyon programı kullanılmıştır. Sonuç olarak, önerilen dinamik kontrol stratejisinin daha verimli olduğu sonucuna varılmıştır (Elidrissi ve diğ., 2019). Başka bir çalışmada, basit sensörlerden alınan akış hızını girdi olarak kullanan bulanık mantık denetleyicisine dayalı adaptif bir trafik sinyali kontrolü önerilmiştir. Çalışmalar mikro ölçekli bir simülasyon programı üzerinde yürütülmüştür. Sonuçlar, önerilen adaptif kontrol modelinin daha verimli olduğunu göstermiştir (Madrigal Arteaga ve diğ., 2022). Çalışmalardan da görüldüğü üzere sinyalizasyon sistemi yönetimlerini, gerçek dünyadaki kavşaklara uygulamadan

önce simülasyon ortamlarında geliştirmek ve etkisini ölçmek gerçek dünyada daha verimli ve daha güvenli sonuçlar vermektedir.

Tez çalışmasındaki en önemli bilime katkılardan biri de gerçek zamanlı bir sinyalizasyon performans ölçüm sistemi tasarlanmasıdır. Daha önce, sinyalizasyon kavşakları ve belirli rotalarda farklı algoritma veya yenilikler için performans ve verimlilik ölçmeye yönelik çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bir çalışmada, LIDAR sensör verileri üzerinden sinyalizasyon kavşakları için performans ölçümü gerçekleştirilmiştir ve 1,39 sn/taşıtlık ağırlıklı ortalama kontrol gecikmesi sapması ile kontrol gecikmesi tespit edilmiştir (Saldivar-Carranza ve Bullock, 2024). Trafik uyarmalı sinyalizasyon yönetimlerinde maksimum yeşil sürenin verimli belirlenmesi üzerine yapılan bir çalışmada performans analizi AIMSUN simülasyon programı üzerinden yapılmıştır (Shirvani Shiri ve Maleki, 2017). Bir çalışmada, belirli güzergahlar üzerine yerleştirilen bluetooth sensörleri yardımı ile seyahat süreleri ölçülmüştür. Daha sonra geliştirilen optimizasyon algoritmaları ile arter boyunca hareket eden araçların gecikme değerleri daha verimli tespit edilmiştir (Abbas ve diğ., 2013). Diğer bir çalışmada ise Cooperative Vehicle Intersection Control (CVIC) algoritması geliştirilerek VISSIM simülasyon ortamında bir analiz sonucu ortaya konmuştur. Bu sonuçlara göre, CVIC algoritması geleneksel uyarmalı sinyalizasyon sistemlerine göre toplam seyahat süresinde %33 lük bir iyileşme sağlamıştır (Lee ve Park, 2012). Çok şeritli kavşaklar için gecikme üzerinden toleranslı bir akıllı kavşak yönetimi yapısı sunan bir çalışmada, SUMO simülasyon programı üzerinde analizler yapılmıştır. Analiz sonuçlarında geliştirilen yapı üzerinden yönetilen kavşakların diğer sinyalizasyonlara göre daha iyi performans ortaya koyduğu görülmüştür (Zheng ve diğ., 2019).

Sinyalizasyon kavşakları için performans analizlerinde simülasyon programları ya da elektronik sensörler gibi maliyetli çözümler kullanmak yerine kavşakta gözle sayımlar yaparak da daha ekonomik analiz yapılabilmektedir. Bir çalışmada, Hindistan'ın Chennai kentindeki Retteri kavşağında her yöndeki trafik sayımları ve sinyal süreleri araştırmacılar tarafından izlenerek not edilmiştir. Daha sonra bu veriler üzerinden Webster teoremi kullanılarak gecikme ve kavşak hizmet seviyesi değeri belirlenmiştir (Marisamynathan ve Lakshmi, 2016). Diğer bir çalışmadaki sinyalizasyon kavşakları için performans analizinde ise uçangöz görüntülerinden yararlanılmış ve kaydedilen veriler üzerinden yakıt tasarrufu ve karbondioksit salınım azaltım değerleri hesaplanmıştır (Öztürk ve Balaban, 2022).

Bu tez çalışmasında, Heybe Kavşağı'ndaki adaptif trafik yönetim modelinin sabit zamanlı sinyalizasyon sistemine göre daha verimli çalıştığı ortaya konmuştur. Adaptif sinyalizasyon sistemlerinin sabit zamanlı sinyalizasyon sistemlerine göre daha verimli çalışması beklenen normal bir sonuçtur. Ancak, belediyeler ve devlet kurumlarındaki trafik yöneticileri için performansı gerçek zamanlı olarak belirlemek ve izlemek önemlidir. Ayrıca, farklı sistemlerin veya algoritmaların performansı hangi farklarla etkilendiğini tespit etmek, karşılaştırma için de önemlidir. Bu çalışmanın bilime katkılarından biri budur. Bu çalışmada tasarlanan bluetooth tabanlı performans ölçüm sistemi ile gerçek zamanlı tespit ve izleme mümkün olabilmektedir. Bu konu ile ilgili diğer çalışmalar, performans ölçümü için genellikle geçmiş veriler üzerinden simülasyon çalışmaları ya da trafik verilerini elde ederek ileri zamanda hesaplama yöntemlerini içermektedir (Shirvani Shiri ve Maleki, 2017; Lee ve Park, 2012; Zheng ve diğ., 2019; Marisamynathan ve Lakshmi, 2016; Öztürk ve Balaban, 2022). Bu çalışmada kurulan yapı, canlı trafik verileri ile gerçek zamanlı sonuç üretme üzerine kuruludur.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Sabit zamanlı sinyalizasyon sistemleri dünyada hala yaygındır. Ancak son yıllarda, sinyalli kavşaklarda adaptif trafik yönetim sistemleri sıklıkla uygulanmaya başlanmıştır. Bu çalışmada, sinyalli kavşaklarda kullanılabilecek adaptif trafik yönetim modeli geliştirilmiş ve sahada uygulanmıştır. Bu çalışmanın en büyük yeniliği, geliştirilen adaptif trafik yönetim modelinin üç farklı alt bileşenden oluşmasıdır. Bu üç farklı bileşen, farklı koşullara göre senkron çalıştığı için daha etkili bir sistem oluşturulmuştur. Ayrıca, bir diğer küresel yenilik ise geliştirilen modelin trafik akımlarına dayalı olması ve trafik akımlarından birbirleriyle çalışabilen otomatik esnek faz yapılarının oluşturulmasıdır. Bu sayede en küçük bileşen olan trafik akımları baz alınarak, trafik karakterindeki değişikliklere daha verimli ve daha hızlı yanıt verilmesi sağlanmıştır.

Sinyalize kavşaklar için geliştirilen adaptif trafik yönetim modeli, değişen trafik koşullarına uyum sağlayabilen ve sinyalize kavşakların en önemli işletim bileşenleri olan trafik akımları ve faz yapıları üzerinde esneklik oluşturabilen bir model olarak geliştirilmiş ve işletilmiştir. SUMO simülasyon programında Heybe Kavşağı modellenmesi yapılmış ve geliştirilen adaptif trafik yönetim modeli tüm alt bileşenleri ile zirve saat verileri ile ayrı ayrı işletilmiştir. Geliştirilen modelde, sinyalize kavşakların en önemli performans parametreleri olan araç başı ortalama gecikme ve araç başı ortalama bekleme süresinin minimuma indirilmesi; araç başı ortalama hız verisinin de maksimuma çıkarılması hedeflenmiştir.

Heybe Kavşağı'nda uygulanan adaptif trafik yönetim modelinin sabit zamanlı sinyalizasyon yönetimine göre karşılaştırması sonucu Çizelge 5.1'de de görüldüğü üzere araç başı ortalama gecikme 28,1 sn/taşıtlık ve bekleme süresi 28,5 sn/taşıtlık azaltılmıştır. Ayrıca, geliştirilen model ile sabit zamanlı sinyalizasyon yönetimine göre araç başı ortalama hız 0,91 km/sa artırılmıştır.

Çizelge 5.1. Adaptif trafik yönetim modelinin performansa etkileri

Sinyalizasyon sistemi	Gecikme (sn/taşıtlık)	Bekleme süresi (sn/taşıtlık)	Ortalama hız (km/sa)
Sabit zamanlı sinyalizasyon yönetimi	103,2	87,9	5,44
Adaptif trafik yönetim modeli	75,1	59,4	6,35

Çizelge 5.2’de de görüldüğü üzere adaptif trafik yönetim modeli ile Heybe Kavşağı’ndaki araç başı ortalama gecikme parametresinde %27,2’lik, araç başı bekleme süresi parametresinde %32,4’lük, araç başı ortalama hız parametresinde ise %16,7’lik iyileşme sağlanmıştır.

Çizelge 5.2. Adaptif trafik yönetim modeli performans yüzdeleri

Sinyalizasyon sistemi	Gecikme	Bekleme süresi	Ortalama hız
Adaptif trafik yönetim modeli	%27,2	%32,4	%16,7

İyileşme değerleri ve yüzdeleri baz alındığında geliştirilen model ile birlikte sinyalizasyon kavşakta zaman tasarrufu ve yakıt tasarrufu gibi önemli çıktılar da elde edilmiştir. Ayrıca, araçların karbondioksit salınımına etkisi baz alındığında söz konusu model ile karbondioksit salınım azaltımı sağlanmıştır. Böylelikle geliştirilen model, aynı zamanda hem ekonomik hem de çevresel olarak önemli bir olumlu etki ortaya çıkarmaktadır (Zheng ve diğ., 2023; Akçelik ve diğ., 2014; Elbir ve diğ., 2010).

Bu tez çalışmasında, bilime önemli katkı olarak bluetooth tabanlı gerçek zamanlı performans ölçüm sistemi geliştirilmiş ve sinyalli bir kavşağa uygulanmıştır. Sistem, kavşak yönetimini optimize etmek için değerli veriler sağlamadaki etkinliğini göstermektedir. Sonuçlar, bluetooth tabanlı yöntemin gecikme parametrelerini doğru bir şekilde ölçtüğünü, aynı zamanda sabit zamanlı ve adaptif sinyal sistemleri arasındaki performans farklılıklarına ilişkin sonuçlar sunduğunu göstermektedir. Heybe Kavşağı’ndaki uygulamadan elde edilen temel bulgular arasında, adaptif trafik yönetim modeli kullanıldığında sabit zamanlı sinyalizasyon sistemine kıyasla araç başına ortalama gecikmede önemli bir azalma sağlanmaktadır. Bu, adaptif sistemlerin sinyalli kavşaklarda trafik akışını iyileştirme ve tıkanıklığı azaltma potansiyelini vurgulamaktadır.

Diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında bu çalışmanın bilime en büyük katkılarından biri, geri bildirimli adaptif bir yönetim altyapısı sunmasıdır. Genellikle adaptif sinyalizasyon sistemleri, trafik sensörlerinden gelen verilere göre farklı algoritmalar ve optimizasyon yöntemleri ile sinyal sürelerini belirlemektedir. Ancak bu çalışmada, belirlenen adaptif sinyal sürelerinin sonuçları ölçülerek bir sonraki karar algoritmasına girdi olarak sağlanabilir. Başka bir deyişle, belirlenen sinyal sürelerinin kavşaktaki seyahat sürelerine etkisi ölçülür ve sonuçların yeniden değerlendirilmesi için

tekrar karar verilecek sinyal süresi belirleme yapısına girdi olarak geri bildirim sağlanabilir.

Heybe Kavşağı'na adaptif trafik yönetim modeli kurulumundan sonra sabit zamanlı sinyalizasyon sistemine göre verim arttığı için yakıt tasarrufu ve karbondioksit salınım azaltımı gibi önemli çıktılar elde edilmektedir. Bluetooth tabanlı performans ölçüm sistemi ile belirlenen araç başına gecikme değerleri ile yakıt tasarrufu ve karbondioksit salınım azaltım değerlerini hesaplamak mümkün olmaktadır (Calle-Laguna ve diğ., 2019). Çalışma, tasarruf miktarlarının hesaplanması ve belirlenmesine de altyapı oluşturmaktadır.

Tez çalışmasında tasarlanan gerçek zamanlı performans ölçüm yöntemi farklı tipteki sinyalli kavşaklara uygulanabilir. Üç kollu, dört kollu veya döner adalı sinyalli kavşaklarda sensörlerin uygun şekilde yerleştirilmesiyle bu çalışmada elde edilen performansa benzer bir doğruluk oranı ile verim sonuçları elde edilebilir. Gelecekteki çalışmalar bu sistemin farklı geometri ve trafik koşullarına sahip diğer kavşaklara ölçeklenebilirliğini araştırabilir. Tasarlanan yöntem, genel trafik mühendisliği çalışmalarında performans sonuçlarını belirleme yeteneğine sahiptir. Örneğin, sinyal olmayan bir kavşağın bir yönündeki şerit sayısının artırılması gibi geometrik bir değişikliğin performans üzerindeki etkileri tasarlanan yöntemle belirlenebilir. Genel olarak bu çalışma, akıllı şehir uygulamaları ve yeni trafik yönetim sistemleri için gerçek zamanlı performans izlemede sağlam bir çerçeve sunmaktadır.

5.2. Öneriler

Tez çalışmasında, adaptif trafik yönetim modeli ve gerçek zamanlı bir performans ölçüm sistemi tasarlanmıştır. Bu çalışma farklı bileşenlerle, farklı ortamlarda ve farklı geliştirmelerle denenebilir ve daha ileri seviyelere taşınabilir.

Tasarlanan adaptif trafik yönetim modelinde sensör olarak, loop sensörler kullanılmıştır. Aynı algoritmalar ve yazılımlar farklı tipteki trafik sensörleri ile denenip performans analizi gerçekleştirilebilir. Örneğin, algoritma veri girdileri görüntü tabanlı bir trafik sensörü ile beslenebilir. Bu durumda performans karşılaştırması yapılarak tasarlanan sistem irdelenebilir. Aynı zamanda tasarlanan adaptif trafik yönetim modeli sola dönüş ceplerinin bulunduğu dört kollu Heybe Kavşağı'na uygulanmıştır. Tasarlanan model, farklı kavşak geometrilerinde denenerek, geliştirmeler ve performans karşılaştırmaları yapılabilir.

Geliştirilen modelde esnek faz yapısı, trafik akımlarına dayalı olarak oluşturulduğundan, kavşaklar arasında adaptif koordinasyon için bir altyapı oluşturulmuştur. Geliştirilen modelin diğer adaptif trafik yönetimlerine göre en önemli avantajı, esnek faz yapısı sayesinde daha verimli ve kolay adaptif koordinasyon sağlayabilmesidir. Bu çalışma, gelecekteki kavşaklar arası adaptif koordinasyon çalışmaları için temel oluşturmaktadır.

Bu tez çalışmasında tasarlanan bluetooth tabanlı performans ölçüm sisteminin en önemli bilimsel yeniliklerinden biri, adaptif sinyalizasyon sistemlerinde geri besleme olarak kullanılabilecek nitelikte olmasıdır. Sistem, gerçek zamanlı ölçüm yaptığı için adaptif kontrol birimine gerçek zamanlı geri bildirimler yaparak kavşak performansında iyileşmeler sağlayabilir. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da bazı saat dilimlerinde adaptif trafik yönetim modeli veriminin sabit zamanlı sinyalizasyon sistemine göre düştüğü görülmektedir. Bu veri, gerçek zamanlı olarak bu tezde tasarlanan performans ölçüm sisteminden adaptif kontrol birimine geri besleme olarak verilirse, adaptif kontrol birimine geliştirilecek algoritmalar ile daha iyi bir sinyalizasyon kavşak performansı elde edilebilir. Çalışmanın bu yönü gelecek bir araştırma önerisi olma niteliğindedir.

Bu çalışmada, bluetooth sensörlerinden elde edilen araç gecikme değerleri, loop sensörlerden elde edilen araç sayısı verileriyle ilişkilendirilmiştir. Bluetooth sensörleri, farklı sensör teknolojileriyle birleştirilerek daha verimli ve işlevsel sistemler üretilebilir. Radar veya LIDAR gibi araçların farklı özelliklerini algılayabilen sensörlerle bir kombinasyon oluşturulursa çıktılarının doğruluk oranı ve çeşitliliği artırılabilir. Yöntemin uygulanabilirliğindeki en önemli sınırlama bluetooth verisinin belirli bir miktarda bulunması zorunluluğudur. Çok az trafiğin olduğu kavşaklarda bluetooth verisi yetersiz kalacağından sistemin doğruluğu azalabilmektedir.

Bu çalışmada tasarlanan performans ölçüm sistemine benzer olarak farklı teknolojiler üzerinden sistemler kurulabilir. Örneğin, araç takip sistemleri ya da Vehicle to Everything (V2X) teknolojisi üzerinden benzer performans ölçüm sistemleri tasarlanabilir. Ancak, araç takip sistemi ya da On-Board Unit (OBU) sahibi araçlar trafikte az miktarda olduğu için çalışma sonucu doğruluk oranının düşük olacağı tahmin edilmektedir. Ancak, ilerideki yaygınlaşmaya göre bu teknolojiler gelecek araştırma önerisi olarak verilebilir.

KAYNAKLAR

- Abbas, M., Rajasekhar, L., Gharat, A., & Dunning, J. P., 2013, Microscopic modeling of control delay at signalized intersections based on Bluetooth data, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 17(2), 110-122, DOI: 10.1080/15472450.2013.784653.
- Abedian, S., Mirsanjari, M. M., & Salmanmahiny, A., 2021, Investigating the effect of suburban buses on traffic flow and carbon monoxide emission by Aimsun simulation software, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49, 1319-1330, DOI: 10.1007/s12524-020-01289-z.
- Aimsun, 2024, Aimsun simulation program [online], <https://www.aimsun.com> [Erişim Tarihi: 9 Ağustos 2024].
- Akçelik, R., 1981, Traffic signals capacity and timing analysis, *Australian Road Research Board*.
- Akçelik, R., Smit, R., & Besley, M., 2014, Recalibration of a vehicle power model for fuel and emission estimation and its effect on assessment of alternative intersection treatments, *Proceedings of the TRB 4th International Conference on Roundabouts*, Seattle, DC, USA, 16-18.
- Alharbi, A., Halikias, G., Sen, A. A. A., & Yamin, M., 2021, A framework for dynamic smart traffic light management system, *International Journal of Information Technology*, 13, 1769-1776, DOI: 10.1007/s41870-021-00755-2.
- Ali, M. E. M., Durdu, A., Celtek, S. A., & Gultekin, S. S., 2020, Fuzzy logic and webster's optimal cycle based decentralized coordinated adaptive traffic control method, *Elektronika ir Elektrotechnika*, 26(4), 57-64, DOI: 10.5755/j01.eie.26.4.25959.
- Ali, M. E. M., Durdu, A., Çeltek, S. A., & Yilmaz, A., 2021, An adaptive method for traffic signal control based on fuzzy logic with webster and modified webster formula using SUMO traffic simulator, *IEEE Access*, 9, 102985-102997, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3094270.
- Almutairi, A., Yi, P., & Owais, M., 2024, New approach for estimating intersection control delay from passive traffic sensors at network level, *IEEE Access*, 12, 2882-2900, DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3349499.
- An, H. K., Awais Javeed, M., Bae, G., Zubair, N., Metwally, A. S. M., Bocchetta, P., Na, F., & Javed, M. S., 2022, Optimized intersection signal timing: An intelligent approach-based study for sustainable models, *Sustainability*, 14(18), 11422, DOI: 10.3390/su141811422.
- Anand, B., Barsaiyan, V., Senapati, M., & Rajalakshmi, P., 2020, Region of interest and car detection using lidar data for advanced traffic management system, *2020 IEEE*

- 6th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), New Orleans, LA, USA, 1-5, DOI: 10.1109/WF-IoT48130.2020.9221354.
- Andronov, R., & Leverents, E., 2018, Calculation of vehicle delay at signal-controlled intersections with adaptive traffic control algorithm, *MATEC Web of Conferences*, 143, 04008, DOI: 10.1051/mateconf/201814304008.
- Annaswamy, A. M., 2023, Adaptive control and intersections with reinforcement learning, *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 6(1), 65-93, DOI: 10.1146/annurev-control-062922-090153.
- Ansariyar, A., 2023, Precision in motion: assessing the accuracy of LiDAR sensors for delay time calculation at signalized intersections, *Available at SSRN*, 4595005, DOI: 10.2139/ssrn.4595005.
- Araghi, B. N., Pedersen, K. S., Christensen, L. T., Krishnan, R., & Lahrmann, H., 2015, Accuracy of travel time estimation using Bluetooth technology: Case study Limfjord tunnel Aalborg, *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 13, 166-191, DOI: 10.1007/s13177-014-0094-z.
- Bachmann, C., Roorda, M. J., Abdulhai, B., & Moshiri, B., 2013, Fusing a bluetooth traffic monitoring system with loop detector data for improved freeway traffic speed estimation, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 17(2), 152-164, DOI: 10.1080/15472450.2012.696449.
- Balta, M., & Özcelik, I., 2018, Traffic signaling optimization for intelligent and green transportation in smart cities, *2018 3rd International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)*, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 31-35, DOI: 10.1109/UBMK.2018.8566333.
- Banerjee, T., Chen, K., Huang, X., Rangarajan, A., & Ranka, S., 2019, A multi-sensor system for traffic analysis at smart intersections, *2019 Twelfth International Conference on Contemporary Computing (IC3)*, Noida, India, 1-6, DOI: 10.1109/IC3.2019.8844934.
- Barcelö, J., Montero, L., Marqués, L., & Carmona, C., 2010, Travel time forecasting and dynamic origin-destination estimation for freeways based on bluetooth traffic monitoring, *Transportation Research Record*, 2175(1), 19-27, DOI: 10.3141/2175-03.
- Bluetooth, 2024, Bluetooth technology [online], <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth> [Erişim Tarihi: 5 Eylül 2024].
- Cakici, Z., & Aksoy, G., 2024, Does the minimization of the average vehicle delay and the minimization of the average number of stops mean the same at the signalized intersections?, *International Journal of Transportation Science and Technology*, 13, 213-228, DOI: 10.1016/j.ijtst.2024.01.003.
- Calle-Laguna, A. J., Du, J., & Rakha, H. A., 2019, Computing optimum traffic signal cycle length considering vehicle delay and fuel consumption, *Transportation*

Research Interdisciplinary Perspectives, 3, 100021, DOI: 10.1016/j.trip.2019.100021.

- Chen, P., Liu, H., Qi, H. S., & Wang, F. J., 2013, Analysis of delay variability at isolated signalized intersections, *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 14, 691-704, DOI: 10.1631/jzus.A1300208.
- Chen, P., Sun, J., & Qi, H., 2017, Estimation of delay variability at signalized intersections for urban arterial performance evaluation, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 21(2), 94-110, DOI: 10.1080/15472450.2016.1216319.
- Chen, S., & Sun, D. J., 2016, An improved adaptive signal control method for isolated signalized intersection based on dynamic programming, *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 8(4), 4-14, DOI: 10.1109/MITS.2016.2605318.
- Chia, I., Wu, X., Dhaliwal, S. S., Thai, J., & Jia, X., 2017, Evaluation of actuated, coordinated, and adaptive signal control systems: A case study, *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 143(9), 05017007, DOI: 10.1061/JTEPBS.0000068.
- Çetin, M., & Murat, Y. Ş., 2013, Doygun akımın belirlenmesinde sürücü davranışına bağlı bir matematik yaklaşım, *Teknik Dergi*, 24(117), 6399-6414.
- Day, C. M., Haseman, R., Premachandra, H., Brennan Jr, T. M., Wasson, J. S., Sturdevant, J. R., & Bullock, D. M., 2010, Visualization and assessment of arterial progression quality using high resolution signal event data and measured travel time, *Lyles School of Civil Engineering Faculty Publications*, 8.
- Díaz, J. J. V., González, A. B. R., & Wilby, M. R., 2015, Bluetooth traffic monitoring systems for travel time estimation on freeways, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(1), 123-132, DOI: 10.1109/TITS.2015.2459013.
- Elbir, T., Bayram, A., Kara, M., Altıok, H., Seyfioğlu, R. S., Ergün, P., & Şimşir, S., 2010, İzmir kent merkezinde karayolu trafiğinden kaynaklanan hava kirliliğinin incelenmesi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 12(1), 1-17.
- Elidrissi, H. L., Tajer, A., Nait-Sidi-Moh, A., & Dakkak, B., 2019, A SUMO-based simulation for adaptive control of urban signalized intersection using petri nets, *2019 4th World Conference on Complex Systems (WCCS)*, Ouarzazate, Morocco, 1-6, DOI: 10.1109/ICoCS.2019.8930774.
- Elsagheer Mohamed, S. A., & AlShalfan, K. A., 2021, Intelligent traffic management system based on the internet of vehicles (IoV), *Journal of Advanced Transportation*, 2021(1), 4037533, DOI: 10.1155/2021/4037533.

- Erkan, I., & Hastemoglu, H., 2016, Bluetooth as a traffic sensor for stream travel time estimation under Bogazici Bosphorus conditions in Turkey, *Journal of Modern Transportation*, 24, 207-214, DOI: 10.1007/s40534-016-0101-y.
- Fang, F. C., & Elefteriadou, L., 2006, Development of an optimization methodology for adaptive traffic signal control at diamond interchanges, *Journal of Transportation Engineering*, 132(8), 629-637, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:8(629).
- Frank, A., Al Aamri, Y. S. K., & Zayegh, A., 2019, IoT based smart traffic density control using image processing, *2019 4th MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC)*, Muscat, Oman, 1-4, DOI: 10.1109/ICBDSC.2019.8645568.
- Friesen, M. R., & McLeod, R. D., 2015, Bluetooth in intelligent transportation systems: a survey, *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 13, 143-153, DOI: 10.1007/s13177-014-0092-1.
- Fu, L., & Hellinga, B., 2000, Delay variability at signalized intersections, *Transportation Research Record*, 1710(1), 215-221, DOI: 10.3141/1710-25.
- Genser, A., Makridis, M. A., Yang, K., Ambühl, L., Menendez, M., & Kouvelas, A., 2024, Time-to-Green predictions for fully-actuated signal control systems with supervised learning, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 25(7), 7417-7430, DOI: 10.1109/TITS.2023.3348634.
- Gheorghiu, R. A., Iordache, V., & Stan, V. A., 2021, Urban traffic detectors—comparison between inductive loop and magnetic sensors, *2021 13th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, Pitesti, Romania, 1-4, DOI: 10.1109/ECAI52376.2021.9515014.
- Hounsell, N. B., McLeod, F. N., & Shrestha, B. P., 2004, Bus priority at traffic signals: investigating the options, *12th IEE International Conference on Road Transport Information and Control, RTIC 2004*, London, UK, 287-294, DOI: 10.1049/cp:20040043.
- Jiang, X., Jin, Y., & Ma, Y., 2021, Dynamic phase signal control method for unstable asymmetric traffic flow at intersections, *Journal of Advanced Transportation*, 2021(1), 8843921, DOI: 10.1155/2021/8843921.
- Joo, H., Ahmed, S. H., & Lim, Y., 2020, Traffic signal control for smart cities using reinforcement learning, *Computer Communications*, 154, 324-330, DOI: 10.1016/j.comcom.2020.03.005.
- Karlı, R. G. Ö., & Çelikyay, H. S., 2022, Akıllı ulaşım sistemleri (AUS) üzerine Türkiye'deki politikaların araştırılması, *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 5(2), 1-14, DOI: 10.51513/jitsa.1090659.

- Kenanoğlu, M. E., & Aydın, M., 2018, Akıllı ulaşım sistemlerinin dışsallık bağlamında değerlendirilmesi: seçilmiş ülke uygulamaları, *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Uluslararası Sosyal Bilimler Dergisi*, 3(2), 363-387, DOI: 10.31454/usb.476915.
- Koch, L., Brinkmann, T., Wegener, M., Badalian, K., & Andert, J., 2023, Adaptive traffic light control with deep reinforcement learning: An evaluation of traffic flow and energy consumption, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(12), 15066 – 15076, DOI: 10.1109/TITS.2023.3305548.
- Korkmaz, E., & Akgüngör, A. P., 2017, Delay estimation models for signalized intersections using differential evolution algorithm, *Journal of Engineering Research*, 5(3), 17-29.
- Lamghari Elidrissi, H., Nait Sidi Moh, A., & Tajer, A., 2024, Modular design and adaptive control of urban signalized intersections systems using synchronized timed Petri nets, *Personal and Ubiquitous Computing*, 1-15, DOI: 10.1007/s00779-024-01797-6.
- Lee, C. K., Yun, I., Choi, J. H., Ko, S. J., & Kim, J. Y., 2013, Evaluation of semi-actuated signals and pedestrian push buttons using a microscopic traffic simulation model, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17, 1749-1760, DOI: 10.1007/s12205-013-0040-7.
- Lee, J., Abdulhai, B., Shalaby, A., & Chung, E. H., 2005, Real-time optimization for adaptive traffic signal control using genetic algorithms, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 9(3), 111-122, DOI: 10.1080/15472450500183649.
- Lee, J., & Park, B., 2012, Development and evaluation of a cooperative vehicle intersection control algorithm under the connected vehicles environment, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(1), 81-90, DOI: 10.1109/TITS.2011.2178836.
- Li, D., Wu, J., Xu, M., Wang, Z., & Hu, K., 2020, Adaptive traffic signal control model on intersections based on deep reinforcement learning, *Journal of Advanced Transportation*, 2020(1), 6505893, DOI: 10.1155/2020/6505893.
- Li, S., & Yoon, H. S., 2023, Sensor fusion-based vehicle detection and tracking using a single camera and radar at a traffic intersection, *Sensors*, 23(10), 4888, DOI: 10.3390/s23104888.
- Li, Y., Qin, Z., & Zhu, C. M., 2021, Optimal design of transportation signal control at the intersection based on Webster signal timing method, *Journal of Physics: Conference Series*, Kunming, China, 1972, 012130, DOI: 10.1088/1742-6596/1972/1/012130.
- Li, Z., Elefteriadou, L., & Ranka, S., 2014, Signal control optimization for automated vehicles at isolated signalized intersections, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 49, 1-18, DOI: 10.1016/j.trc.2014.10.001.

- Lin, F. B., 1991, Knowledge base on semi-actuated traffic-signal control, *Journal of Transportation Engineering*, 117(4), 398-417, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(1991)117:4(398).
- Madrigal Arteaga, V. M., Pérez Cruz, J. R., Hurtado-Beltrán, A., & Trumpold, J., 2022, Efficient intersection management based on an adaptive fuzzy-logic traffic signal, *Applied Sciences*, 12(12), 6024, DOI: 10.3390/app12126024.
- Marisamynathan, S., & Lakshmi, S., 2016, Performance analysis of signalized intersection at metropolitan area, *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 2(1), 19-29.
- Medina, J. C., Ramezani, H., & Benekohal, R. R. F., 2013, Evaluation of microwave radar vehicle detectors at a signalized intersection under adverse weather conditions, *Transportation Research Record*, 2366(1), 100-108, DOI: 10.3141/2356-12.
- Meng, B. C. C., Damanhuri, N. S., & Othman, N. A., 2021, Smart traffic light control system using image processing, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Medan, Indonesia, 1088, 012021, DOI: 10.1088/1757-899X/1088/1/012021.
- Midenet, S., Boillot, F., & Pierrelée, J. C., 2004, Signalized intersection with real-time adaptive control: on-field assessment of CO₂ and pollutant emission reduction, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 9(1), 29-47, DOI: 10.1016/S1361-9209(03)00044-0.
- Mircea, M., & Nicolae, F., 2014, Increasing of the urban traffic surveillance by automatic information device, *Central European Journal of Engineering*, 4, 133-141, DOI: 10.2478/s13531-013-0152-3.
- Miyim, A. M., & Muhammed, M. A., 2019, Smart traffic management system, *2019 15th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO)*, Abuja, Nigeria, 1-6, DOI: 10.1109/ICECCO48375.2019.9043219.
- Moghaddam, S. S., & Hellinga, B., 2014, Real-time prediction of arterial roadway travel times using data collected by bluetooth detectors, *Transportation Research Record*, 2442(1), 117-128, DOI: 10.3141/2442-13.
- Monga, R., & Mehta, D., 2022, Sumo (simulation of urban mobility) and osm (open street map) implementation, *2022 11th International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART)*, Moradabad, India, 534-538, DOI: 10.1109/SMART55829.2022.10046720.
- Mou, J., 2020, Intersection traffic control based on multi-objective optimization, *IEEE Access*, 8, 61615-61620, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2983422.
- Mualifah, L. N. A., & Abadi, A. M., 2019, Optimizing the traffic control system of Sultan Agung street Yogyakarta using fuzzy logic controller, *Journal of Physics:*

- Conference Series*, Yogyakarta, Indonesia, 1320, 012028, DOI: 10.1088/1742-6596/1320/1/012028.
- Murat, Y. Ş., 2006, Sinyalize kavşaklardaki taşıt gecikmelerinin bulanık mantık ile modellenmesi, *İMO Teknik Dergi*, 17(83), 3903-3916.
- Ouster, 2024, LIDAR [online], <https://ouster.com/insights/blog/ouster-at-its-america-2023> [Erişim Tarihi: 16 Aralık 2024].
- Ouster, 2024, LIDAR sensor [online], <https://ouster.com> [Erişim Tarihi: 18 Aralık 2024].
- Öztürk, E. A., & Balaban, S., 2022, Tam trafik uyarmalı sinyalizasyon sisteminde gecikmede sağlanan iyileşmeler, *Kent Akademisi*, 15(2), 564-577, DOI: 10.35674/kent.1058968.
- Patel, D., & Rohilla, Y., 2020, Infrared sensor based self-adaptive traffic signal system using arduino board, *2020 12th International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks (CICN)*, Bhimtal, India, 175-181, DOI: 10.1109/CICN49253.2020.9242560.
- Preethi, P., Varghese, A., & Ashalatha, R., 2016, Modelling delay at signalized intersections under heterogeneous traffic conditions, *Transportation Research Procedia*, 17, 529-538, DOI: 10.1016/j.trpro.2016.11.107.
- Qiao, Y., Meng, T., Qin, H., Hu, Z., & Zhong, Z., 2023, Vehicle-to-infrastructure-based traffic signal optimization for isolated intersection, *Sustainability*, 15(8), 6631, DOI: 10.3390/su15086631.
- Rachmadi, M. F., Al Afif, F., Jatmiko, W., Mursanto, P., Manggala, E. A., Ma'sum, M. A., & Wibowo, A., 2011, Adaptive traffic signal control system using camera sensor and embedded system, *TENCON 2011-2011 IEEE Region 10 Conference*, Bali, Indonesia, 1261-1265, DOI: 10.1109/TENCON.2011.6129009.
- Raveendran, B., Mathew, T. V., & Velaga, N. R., 2020, A Heuristic adaptive traffic control algorithm for signalized intersections, *2020 International Conference on COMMunication Systems & NETworkS (COMSNETS)*, Bengaluru, India, 82-86, DOI: 10.1109/COMSNETS48256.2020.9027325.
- Ren, Y., Wang, Y., Yu, G., Liu, H., & Xiao, L., 2016, An adaptive signal control scheme to prevent intersection traffic blockage, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(6), 1519-1528, DOI: 10.1109/TITS.2016.2609917.
- Ribeiro, I. M., & Simões, M. D. L. D. O., 2015, The fully actuated traffic control problem solved by global optimization and complementarity, *Engineering Optimization*, 48(2), 199-212, DOI: 10.1080/0305215X.2014.995644.
- Saha, A., Chandra, S., & Ghosh, I., 2017, Delay at signalized intersections under mixed traffic conditions, *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 143(8), 04017041, DOI: 10.1061/JTEPBS.0000070.

- Saldivar-Carranza, E. D., & Bullock, D. M., 2024, Deriving verified vehicle trajectories from LiDAR sensor data to evaluate traffic signal performance, *Future Transportation*, 4(3), 765-779, DOI: 10.3390/futuretransp4030036.
- Shahpar, A. H., Aashtiani, H. Z., & Faghri, A., 2011, Development of a delay model for unsignalized intersections applicable to traffic assignment, *Transportation Planning and Technology*, 34(5), 497-507, DOI: 10.1080/03081060.2011.586119.
- Shaker, H., & Bigdeli Rad, H., 2018, Evaluation and simulation of new roundabouts traffic parameters by Aimsun software, *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 2(3), 146-158, DOI: 10.22034/jcema.2018.91996.
- Shankaran, S., & Rajendran, L., 2021, Real-time adaptive traffic control system for smart cities, *2021 international conference on computer communication and informatics (ICCCI)*, Coimbatore, India, 1-6, DOI: 10.1109/ICCCI50826.2021.9402597.
- Shao, C., 2009, Adaptive control strategy for isolated intersection and traffic network, Doktora Tezi, *Civil Engineering*, The University of Akron, 106.
- Shirvani Shiri, M. J., & Maleki, H. R., 2017, Maximum green time settings for traffic-actuated signal control at isolated intersections using fuzzy logic, *International Journal of Fuzzy Systems*, 19, 247-256, DOI: 10.1007/s40815-016-0143-7.
- Sikar, R. B., & Aslan, H., 2022, Calculation of the delays of autonomous vehicles at signalized intersections using the Webster method, *Academic Perspective Procedia*, 5(3), 222-232, DOI: 10.33793/acperpro.05.03.3561.
- Smith, D., Djahel, S., & Murphy, J., 2014, A SUMO based evaluation of road incidents' impact on traffic congestion level in smart cities, *39th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks Workshops*, Edmonton, AB, Canada, 702-710, DOI: 10.1109/LCNW.2014.6927724.
- Soh, A. C., Rahman, R. Z. A., Rhung, L. G., & Sarkan, H. M., 2011, Traffic signal control based on adaptive neural-fuzzy inference system applied to intersection, *2011 IEEE Conference on Open Systems*, Langkawi, Malaysia, 231-236, DOI: 10.1109/ICOS.2011.6079251.
- Sumo, 2024, SUMO simulation program [online], <https://eclipse.dev/sumo> [Erişim Tarihi: 6 Haziran 2024].
- Thunig, T., Scheffler, R., Strehler, M., & Nagel, K., 2019, Optimization and simulation of fixed-time traffic signal control in real-world applications, *Procedia Computer Science*, 151, 826-833, DOI: 10.1016/j.procs.2019.04.113.
- Uddin, M. S., Das, A. K., & Taleb, M. A., 2015, Real-time area based traffic density estimation by image processing for traffic signal control system: Bangladesh perspective, *2015 International Conference on Electrical Engineering and*

- Information Communication Technology (ICEEICT)*, Savar, Bangladesh, 1-5, DOI: 10.1109/ICEEICT.2015.7307377.
- Ulusoy, B. E., & Köfteci, S., 2022, Sinyalize bir kavşakta performans analizinin yapılması ve sinyal planının egzoz emisyonlarına etkisinin araştırılması, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(Özel Sayı), 144-150, DOI: 10.17780/ksujes.1188075.
- Umair, M., Nadeem, H., & Mir, J., 2024, Density control smart traffic signal using image processing, *2024 International Conference on Engineering & Computing Technologies (ICECT)*, Islamabad, Pakistan, 1-6, DOI: 10.1109/ICECT61618.2024.10581232.
- Vidhya, K., & Banu, A. B., 2014, Density based traffic signal system, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(3), 2218-2222.
- Wan, C. H., & Hwang, M. C., 2018, Value-based deep reinforcement learning for adaptive isolated intersection signal control, *IET Intelligent Transport Systems*, 12(9), 1005-1010, DOI: 10.1049/iet-its.2018.5170.
- Wang, Y., Yang, X., Liang, H., & Liu, Y., 2018, A review of the self-adaptive traffic signal control system based on future traffic environment, *Journal of Advanced Transportation*, 2018(1), 1096123, DOI: 10.1155/2018/1096123.
- Wavetronix, 2024, Radar sensor [online], <https://www.wavetronix.com/smartsensor> [Erişim Tarihi: 14 Kasım 2024].
- Webster, F. V., 1966, Traffic signal, *Road Research Technical Paper*.
- Wei, J., & Ju, Y., 2024, Research on optimization method for traffic signal control at intersections in smart cities based on adaptive artificial fish swarm algorithm, *Heliyon*, 10(10), e30657.
- Wei, Y., & He, X., 2022, Adaptive control for reliable cooperative intersection crossing of connected autonomous vehicles, *International Journal of Mechanical System Dynamics*, 2(3), 278-289, DOI: 10.1002/msd2.12050.
- Wen, K., Qu, S., & Yumei, Zhang, Y., 2007, A stochastic adaptive control model for isolated intersections, *2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Sanya, 2256-2260, DOI: 10.1109/ROBIO.2007.4522521.
- Wolshon, B., & Taylor, W. C., 1999, Analysis of intersection delay under real-time adaptive signal control, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 7(1), 53-72, DOI: 10.1016/S0968-090X(99)00011-X.
- Wu, X., Levinson, D. M., & Liu, H. X., 2009, Perception of waiting time at signalized intersections, *Transportation Research Record*, 2135(1), 52-59, DOI: 10.3141/2135-07.

- Wu, Y., Lu, J., Chen, H., & Yang, H., 2015, Development of an optimization traffic signal cycle length model for signalized intersections in China, *Mathematical Problems in Engineering*, 2015(1), 954295, DOI: 10.1155/2015/954295.
- Yalçınlı, F., Akdemir, B., Durdu, A., & Yıldız, Ö., 2023, Tam trafik uyarmalı sinyalizasyon sisteminin simülasyon modellemesi ve iyileştirme oranlarının saptanması, *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 7(6), 1–7, DOI: 10.59287/ijanser.887.
- Yu, C., Ma, W., Han, K., & Yang, X., 2017, Optimization of vehicle and pedestrian signals at isolated intersections, *Transportation Research Part B: Methodological*, 98, 135-153, DOI: 10.1016/j.trb.2016.12.015.
- Yu, D., Tian, X., Xing, X., & Gao, S., 2016, Signal timing optimization based on fuzzy compromise programming for isolated signalized intersection, *Mathematical Problems in Engineering*, 2016(1), 1682394, DOI: 10.1155/2016/1682394.
- Zhai, C. J., Li, K. L., & Xu, J. M., 2017, Adaptive control of an isolated intersection based on the complete phase group, *2017 Chinese Automation Congress (CAC)*, Jinan, China, 2808-2813, DOI: 10.1109/CAC.2017.8243254.
- Zheng, B., Lin, C. W., Shiraishi, S., & Zhu, Q., 2019, Design and analysis of delay-tolerant intelligent intersection management, *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, 4(1), 1-27, DOI: 10.1145/330018.
- Zheng, J., Ma, X., Wu, Y. J., & Wang, Y., 2013, Measuring signalized intersection performance in real-time with traffic sensors, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 17(4), 304-316, DOI: 10.1080/15472450.2013.771105.
- Zheng, T., Xiang, S., Zhang, S., & Wu, Y., 2023, Variability of traffic-related air pollutants at two-and four-phase intersections, *Atmospheric Pollution Research*, 14(12), 101936, DOI: 10.1016/j.apr.2023.101936.