
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

SİNYALİZE KAVŞAKLARDA TRAFİK IŞIK SÜRELERİNİN BELİRLENMESİ İÇİN UYARLAMALI ETKİN DİNAMİK BİR IŞIK KONTROL YÖNTEM (ALGORİTMA) ÖNERİLERİ

Tuğçe İNAĞ

DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HAZİRAN 2024

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Tuğçe İNAĞ
12/06/2024

SİNYALİZE KAVŞAKLARDA TRAFİK IŞIK SÜRELERİNİN BELİRLENMESİ İÇİN UYARLAMALI ETKİN DİNAMİK BİR IŞIK KONTROL YÖNTEM (ALGORİTMA) ÖNERİLERİ

(Doktora Tezi)

Tuğçe İNAĞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2024

ÖZET

Bu çalışma, Trafik Sinyal Kontrol (ATSC) algoritmalarının trafik verimliliğini arttırmak ve güvenliği sağlamak amacıyla geliştirilmesinde ortaya çıkan zorlukları ele almaktadır. Geleneksel sinyal kontrol yöntemleriyle kıyaslandığında, ATSC algoritmalarının trafik verimliliğinde belirgin bir artış sağlayabildiği ancak aynı zamanda güvenlik konularında tutarsızlıkların olduğu belirtilmektedir. Özellikle, sadece verimliliğe odaklı ATSC algoritmalarının trafik güvenliğini olumsuz etkileyebileceği görülmüştür. Çalışma kapsamında Webster tabanlı Yeni Verimli Dinamik Adaptif Trafik Işığı Kontrol Algoritması (EDATLC) önerilmiştir. Bu yöntem, sürücü davranış analizi (SDA) dâhil olmak üzere çeşitli teknik ve çevresel parametreleri dikkate alarak daha bütüncül bir yaklaşım sunmaktadır. EDATLC, sürücü davranışları, hava durumu, araç tipi, yol geometrisi, hatalı şerit kullanımı, hızlanma/yavaşlama ivmesi, ortalama hız, doygun akış oranı, doygunluk ilerlemesi, sürücü tecrübesi, takip mesafesi ve çevresel faktörlerin etkileşimini kapsamaktadır. Ayrıca, Webster tabanlı ve modifiye Webster tabanlı Karınca Kolonisi Algoritmaları (KKA) ile Mamdani tipi bulanık çıkarım sistemi ve ANFIS modellerini kullanarak bulanık mantık tabanlı akıllı trafik ışık kontrol modelleri geliştirilmiştir. Bu yenilikçi modeller, trafik yönetiminde hem verimliliği artırmayı hem de güvenliği sağlamayı hedeflemektedir. Çalışma kapsamında geliştirilen tüm bu yöntemler, mevcut sabit zamanlı yöntemler ve Webster tabanlı yöntemlerle karşılaştırılarak etkinlikleri gösterilmiştir. Performans değerlendirmeleri için SUMO trafik simülatörü kullanılmış ve simülasyon sonuçları, Ankara ili Polatlı Refik Cesur Kavşağı verileriyle test edilmiştir. Sonuçlar, EDATLC'nin sabit zamanlı yöntemler, bulanık mantık ve KKA tabanlı yöntemlere kıyasla daha üstün performans sergilediğini göstermiştir.

Bilim Kodu	:	90610
Anahtar Kelimeler	:	Adaptif trafik ışık kontrolü, SUMO simülatörü, karınca kolonisi trafik sıkışıklığı, hava koşulları, sürücü davranışı, şerit değiştirme
Sayfa Adedi	:	111
Danışman	:	Dr. Öğr. Üyesi Murat ARIKAN

PROPOSALS FOR AN EFFECTIVE DYNAMIC ADAPTIVE TRAFFIC LIGHT CONTROL METHOD (ALGORITHM) FOR DETERMINING SIGNAL DURATIONS AT SIGNALIZED INTERSECTIONS

(Ph. D. Thesis)

Tuğçe İNAĞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2024

ABSTRACT

This study addresses the challenges encountered in developing Adaptive Traffic Signal Control (ATSC) algorithms to improve traffic efficiency and ensure safety. Compared to traditional signal control methods, ATSC algorithms can significantly enhance traffic efficiency; however, they also present inconsistencies regarding safety. Specifically, ATSC algorithms focusing solely on efficiency can adversely affect traffic safety. A new Webster-based Efficient Dynamic Adaptive Traffic Light Control Algorithm (EDATLC) is proposed in this context. This method adopts a more holistic approach by considering various technical and environmental parameters, including Driver Behavior Analysis (DBA). EDATLC encompasses the interactions of driver behaviors, weather conditions, vehicle types, road geometry, improper lane usage, acceleration/deceleration rates, average speed, saturation flow rate, saturation progression, driver experience, following distance, and environmental factors. Additionally, fuzzy logic-based intelligent traffic light control models have been developed using Webster-based and modified Webster-based Ant Colony Algorithms (ACA), Mamdani-type fuzzy inference systems, and ANFIS models. These innovative models aim to enhance both efficiency and safety in traffic management. All these methods developed within the study were compared with existing fixed-time and Webster-based methods to demonstrate their effectiveness. Performance evaluations were conducted using the SUMO traffic simulator, and simulation results were tested with data from the Refik Cesur Intersection in Polatlı, Ankara. The results indicated that EDATLC outperformed fixed-time, fuzzy logic, and ACA-based methods.

Science Code	:	90610
Key Words	:	Adaptive traffic signal control, sumo simulator, ant colony optimization algorithm,traffic congestion, weather conditions, driver behavior, lane changing
Page Number	:	111
Supervisor	:	Assist. Prof. Dr. Murat ARIKAN

TEŞEKKÜR

Tezimin yazımında sağladığı yönlendirme ve destekler için saygıdeğer danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Murat ARIKAN'a, tez izleme komitesi jüri üyelerim Prof. Dr. M. Ali AKÇAYOL'a ve akademik annem olarak her zaman yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Serpil EROL'a derin teşekkürlerimi sunarım. Bu tezimi, her zaman varlığını hissettiğim sevgili babam Tahir DÜZCE'ye ve bizi bugünlere yalnız başına getiren annem Sevim DÜZCE'ye armağan ediyorum. Ayrıca, abim Çağrı DÜZCE'ye, kardeşlerim Menekşe DÜZCE'ye, Seden MANDACIOĞLU'na, Erdem MANDACIOĞLU'na ve bu süreçte en büyük destekçim olan sevgili eşim Yasin İNAĞ'a teşekkürlerimi sunuyorum. Bu tezi güzel oğlum Tahir Alp DÜZCE ile güzel kızlarım Hazal İNAĞ ve Defne İNAĞ'a da özel olarak armağan ediyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xi

RESİMLERİN LİSTESİ xii

SİMGELER VE KISALTMALAR xiii

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR TARAMASI 5

2.1. Trafik Işık Kontrol Stratejileri 5

2.2. Kavşak Türlerine Göre Sınıflandırma 9

2.3. Trafik Işık Kontrol Yöntemlerine Göre Sınıflandırma 20

2.4. Sürücü Davranış Analizinin (SDA) Trafik Işık Kontrol Yönetimi Üzerindeki Etkilerine Göre Sınıflandırma 24

2.5. Trafik Işık Kontrol Yönetiminde Kullanılan Şerit Değitirme Modelleri 28

3.TRAFİK IŞIK KONTROL SİSTEMLERİNDE TEMEL KAVRAMLAR 31

3.1. Sinyalizasyon Terimleri 31

3.2. Yol Yapısıyla İlgili Terimler 32

3.3. Performans Ölçütüne Dayalı Terimler 33

4.SİMÜLASYON PLATFORMU 35

4.1. SUMO (Simulation of Urban Mobility -Kentsel Hareketin Simülasyonu) Kullanımı 36

4.1.1. Ağ dosyası 37

Sayfa

4.1.2. Rota dosyaları 38

4.1.3. SUMO adımları 39

5. PROBLEM TANIMI VE ÖNERİLEN MODELLER 41

5.1. Problem Tanımı 41

5.2. Hava Koşulları ve Sürücü Davranışlarının Kavşaklarda Oluşan Trafik Üzerindeki Etkileri 43

5.3. Veri Tanımlama 45

5.4. EDATLC (Verimli Dinamik Adaptif Trafik Işığı Kontrol) Algoritması 53

5.4.1. Değerlendirme uygulaması 59

5.4.2. Değerlendirme sonuçları ve tartışma 60

5.5. Polatlı Refik Cesur Kavşağı Önerilen Model Uygulamaları 65

5.5.1. Değerlendirme uygulaması 65

5.5.2. Değerlendirme sonuçları 66

5.6. Webster ve Modifiye Webster Tabanlı Karınca Kolonisi Algoritması (KKA). 67

5.6.1. Webster ve Modifiye Webster 67

5.6.2. Karınca Kolonisi Algoritması(KKA) 70

5.6.3. Değerlendirme uygulaması 74

5.6.4. Değerlendirme sonuçları ve tartışma 78

5.7. Bulanık Mantık Tabanlı Akıllı Trafik Işık Kontrol Yöntemi 80

5.7.1. ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) 81

5.7.2. Değerlendirme uygulaması 82

5.7.3. Değerlendirme sonuçları ve tartışma 91

6. GENEL SİMÜLASYON SONUÇLARI 97

7. SONUÇ VE ÖNERİLER 99

KAYNAKLAR 101

ÖZGEÇMİŞ 110

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Kavşak türlerine göre incelenen çalışmalar 10

Çizelge 2.2. ATLC ile ilgili çalışmalar 21

Çizelge 2.3. MOBIL, IDM şerit değiştirme modellerini kullanan çalışmalar 29

Çizelge 4.1. İncelenen makalelerde kullanılan simülasyon platformları ve kısa açıklamaları 36

Çizelge 5.1. Kötü havanın sürücü davranışı üzerindeki etkisi 44

Çizelge 5.2. Birim yolcu arabası (pcu) 45

Çizelge 5.3. 2019 yılı Massachusetts Avenue ve Newbury kavşağı trafik akış örneği 46

Çizelge 5.4. Polatlı Refik Cesur kavşağı trafik akış örneği 50

Çizelge 5.5. Polatlı Refik Cesur kavşağı araç türüne göre saatlik geçen araç sayısı 51

Çizelge 5.6. Polatlı Refik Cesur kavşağı araç türüne ve yönlere göre geçen araç sayısı 52

Çizelge 5.7. Simülasyon parametreleri 60

Çizelge 5.8. Normal hava koşullarında mevcut durum, Webster, EDATLC devre süreleri ve yeşil ışık dağılımları 61

Çizelge 5.9. Kötü hava koşullarında mevcut durum, Webster, EDATLC devre süreleri ve yeşil ışık dağılımları 61

Çizelge 5.10. Normal hava koşullarında Mevcut durum, Webster, EDATLC için saniye cinsinden ortalama gecikme süreleri 61

Çizelge 5.11. Kötü hava koşullarında Mevcut durum, Webster, EDATLC için saniye cinsinden ortalama gecikme süreleri 62

Çizelge 5.12. 3 model için hesaplanmış devre ve ortalama gecikme süreleri 62

Çizelge 5.13. Birim yolcu arabası (pcu) 65

Çizelge 5.14. SUMO'da kullanılan parametreler 66

Çizelge 5.15. Webster, Modifiye Webster, EDATLC, Mevcut durum için saniye cinsinden ortalama gecikme süreleri 67

Çizelge 5.16. SUMO'da kullanılan parametreler 75

Sayfa

Çizelge 5.17. Webster, Modifiye Webster, KKA, mevcut durum devre süreleri ve yeşil ışık dağılımları 79

Çizelge 5.18. Webster, Modifiye Webster, KKA, Mevcut durum için saniye cinsinden ortalama gecikme süreleri 80

Çizelge 5.19. Üyelik Fonksiyonları Hata Değerleri..... 89

Çizelge 5.20. Sistem performansı 93

Çizelge 5.21. Gecikme zamanında sağlanan iyileşme 95

Çizelge 6.1. Polatlı Refik Cesur kavşağı için önerilen modellerin mevcut durum ile karşılaştırmalı taşıt başı gecikme süreleri(saniye/taşıt) 97

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Kentsel Trafik Adaptif Kontrol Sistem Gelişim Aşamaları 8

Şekil 5.1. Kavşaktan geçen araç türlerinin zaman bazında geçiş oranları 52

Şekil 5.2. Önerilen EDATLC Algoritması 59

Şekil 5.3. Hatalı şerit değiştirme oranın ortalama gecikme süresi ile ilişkisi 63

Şekil 5.4. Kuru zeminde kavşaktaki ağır araç oranının devre süresi ve ortalama gecikme süresi ile ilişkisi 64

Şekil 5.5. Islak zeminde kavşaktaki ağır araç oranının devre süresi ve ortalama gecikme süresi ile ilişkisi 64

Şekil 5.6. Polatlı Refik Cesur kavşak yapısı 68

Şekil 5.7. Uygulanan KKA'nın akış diyagramı 77

Şekil 5.8. Trafik Kontrol Modeli 83

Şekil 5.9. Gecikme zamanı için simülasyon sonuçları 95

Şekil 5.10. Kuyruk uzunluğu için simülasyon sonuçları 96

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 5.1. Massachusetts bulvarı-Newbury kavşak yapısı 47
Resim 5.2. Mevcut durum faz süresi ve ışık durumları 48
Resim 5.3. Faz Diyagramı 48
Resim 5.4. Massachusetts bulvarı-Newbury kavşak yapısı 49
Resim 5.5. Polatlı Refik Cesur kavşağı 50
Resim 5.6. Polatlı Refik Cesur Kavşağı Mevcut Durum Faz 53
Resim 5.7. SUMO kavşak yapısı görseli 75
Resim 5.8. ANFIS Model Structure in Matlab 82
Resim 5.9. Cadde seçimi için Mamdani tip bulanık mantık modeli 84
Resim 5.10. Seçilen cadde için çıkış üyelik fonksiyonu 85
Resim 5.11. Cadde seçimi için oluşturulan kurallar 85
Resim 5.12. Akıllı Trafik İçin Bulanık Mantık Kontrolü 88
Resim 5.13. Araç Kuyruk Uzunluğu 0-60 araç 89
Resim 5.14. Araç gecikme süresi 0-80 saniye 90
Resim 5.15. Yeşil ışık uzatma süresi 0-6 saniye 90
Resim 5.16. Bulanık Kurallar 91
Resim 5.17. Bulanık kurallar ve yeşil ışık uzatma süresi ilişkisi 92
Resim 5.18. ANFIS çıktıları için yüzey görünümleri 93
Resim 5.19. ANFIS simülasyonu 94

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
ar	Her yöne kırmızı ışık süresi
cap	Gerçek kavşak kapasitesi
c	Devre süresi
$\mathbf{c_{opt}}$	Optimal devre süresi
d	Ortalama gecikme süresi
$\boldsymbol{d_1}$	Ortalama sürekli gecikme
$\boldsymbol{d_2}$	Ortalama yüksek trafik akış gecikmesi
$\mathbf{g_{time}}$	Yeşil ışık süresi
$\boldsymbol{g_e}$	Etkin yeşil süre
$\mathbf{h_s}$	Doygunluk ilerlemesi (sn)
h	Saniyede kavşaktan geçen araç sayısı
i	Faz
k	Yeşil ışık durumu
$\boldsymbol{k_f}$	İlerleme düzeltme faktörü
l	Kayıp zaman
lt	Kalkış kayıp zamanı
$\mathbf{lt_m}$	mtipi araç için kalkış kayıp zamanı
m	Araç tipi
ming	Minimum yeşil ışık süresi
maxg	Maksimum yeşil ışık süresi
n	Toplam araç sayısı
n	İterasyon indeksi
$\mathbf{n_i}$	Komşu düğümleri kümesi
pcu	Birim yolcu arabası
$\mathbf{pcu_m}$	Araç tipi etki oranı
$\mathbf{q_m}$	Birim zamanda fazzlardan geçen araçların sayısı

Simgeler	Açıklamalar
$q^i(t)$	*t* anında trafikte *i* hareket yönündeki kuyruk uzunluğu
$q_{out}^{(i)}(t_1, t_2)$	zaman aralığı boyunca *i* hareket yönünde ayrılan araçların sayısı
r	Karıncaların uygunluk sırası
s	Doygun akış oranı (araç/saat)
sn	Saniye
$\mathbf{s_j}$	Her bir j yönü için doygunluk akış oranı(araç/sn)
$\mathbf{s_{gb}}$	Global en iyi sonucu üreten karıncanın bulduğu yol
sc	Skor değeri
t_e	Dikkate alınan değerlendirme süresi
$\mathbf{t_i}$	Araçlar arasındaki zaman farkı (sn)
$\mathbf{t_{ij}}$	i ve j düğümleri arasındaki feromon değerleri
$\mathbf{u(t)}$	0,1 aralığında rastgele bir sayı
$\mathbf{x(t)}$	Araçlar arasındaki varış süresi
x	Doyma derecesi
$\mathbf{y_i}$	i fazı için doygunluk derecesi
y	Sarı ışık süresi
$\boldsymbol{\lambda}$	Belli zaman aralığında geçen araçların ortalama sayısı
$\boldsymbol{\alpha}$	Feromon değerlerinin önem derecesi
$\boldsymbol{\beta}$	Sezgisel değerlerin önem derecesi
$\boldsymbol{\eta_{ij}}$	Sezgisel değerler
$\boldsymbol{\rho}$	Buharlaşma oranı
$\Delta\tau_{ij}^{r}$	i'den j'ye giderken r karıncası tarafından depolanan Feromon miktarı
$\Delta\boldsymbol{\tau}_{\mathbf{ij}}^{\mathbf{bs}}$	i'den j'ye giderken en iyi karınca çözümü
$f(s_r)$	Uygunluk değeri
$f(s_{gb})$	Uygunluk değeri

Kısaltmalar	Açıklamalar
ANFIS	Adaptive neuro-fuzzy ınference system
ATLC	Adaptif trafik ışık kontrol
ATM	Aktif trafik yönetimi
ATSC	Uyarlanabilir(Adaptif) trafik sinyali kontrolü
AMTSPC	Trafik sinyal fazı kontrolü ayarlama matrisi
CCL	Bağlı bileşen etiketleme
CO_2	Karbondioksit
DAITM	Trafik yönetimine merkezi olmayan yaklaşım
DQN	Deep Q-network
DRQN	Deep recurrent Q-network(derin tekrarlayan q-ağı)
DIMP	Dağıtılmış kavşak yönetimi protokolü
EDATLC	Verimli dinamik adaptif trafik ışık kontrol
HCM	Karayolları el kitabı
HTSC	Hiyerarşik çoklu ajan kontrolü
IoT	Nesnelerin interneti
KKA	Karınca kolonisi algoritması
ML	Makine öğrenimi
RA	Alan ajanı
RNN	Tekrarlayan sinir ağı
RL	Reinforcement learning (pekiştirmeli öğrenme)
SUMO	Kentsel Hareketlilik Simülasyonu
TA	Kavşak ajanı
TUIC	Geçici bilinmeyen artımlı küme
VANET	Vehicular Ad-Hoc network (Araç Ad-Hoc ağı)

1. GİRİŞ

Günümüzde dünya nüfusunun sürekli artışı, taşıt sayısında hızlı bir artışa yol açmaktadır. Bu artış, trafik tıkanıklığı, çevresel kirlilik, gürültü kirliliği, zaman kaybı ve maliyet artışı gibi çeşitli sorunlara neden olmaktadır. Ayrıca, kullanılan yakıt türlerinden kaynaklanan egzoz gazı emisyonları, çevre kirliliğine katkıda bulunurken, tüketilen yakıt ise mali kayıplara neden olmaktadır [1].

Artan ulaşım ihtiyaçları, taşıt trafiğinin yoğunluğunu artırmaktadır. Bu sürekli artan trafik, hem kentlerde hem de kentler arasında yol ağlarının genişlemesine ve yayılmasına yol açmaktadır. Yol ağlarının genişlemesi, farklı trafik akımlarının kesiştiği kavşakların oluşmasını kaçınılmaz hale getirmektedir [1].

Akıllı Ulaşım Sistemlerinin en önemli bileşenlerinden biri kavşaklardır. Bu sistemler, trafik sıkışıklığının olası olduğu stratejik noktalara konumlandırılır ve yoğun araç trafiği yaşanan bölgelerde alternatif çözüm seçenekleri sunar. Akıllı Sinyalize Kavşak Yönetim Sistemleri, trafik akışını daha etkin bir şekilde kontrol etmeye yardımcı olmaktadır. Akıllı Sinyalize Kavşak Yönetim Sistemleri sayesinde trafik akışı nispeten daha kolay kontrol altına alınmaktadır. Fakat mevcut yol ve bağlı altyapı tasarımı ve şehirlerde işletilmesi trafiğin artan taleplerini karşılamak için yeterli değildir [2]. Bu akıllı sinyalize kavşaklara sabit sinyalizasyon süreleri yerine yoğunluklara bağlı olarak dinamik süreler atanmakta ve bununla birlikte, araçların trafikte gecikme/bekleme süreleri, egzoz emisyon miktarları, yakıt tüketimleri asgariye indirilerek verimlilik artışı sağlanmaktadır.

En önemli Aktif Trafik Yönetimi (ATM) stratejilerinden biri olan Uyarlanabilir (Adaptif) Trafik Sinyali Kontrolü (ATSC), dinamik trafik talebine yanıt olarak sinyal zamanlamasını ayarlayarak sinyalize ana yolların ve şehir yollarının trafik verimliliğini arttırmaya yardımcı olmaktadır.

ATSC algoritmalarının ortak amacı, gerçek zamanlı olarak kavşak geçiş kapasitesini arttırmak, trafik gecikmesini en aza indirmek, kuyruğu azaltmak, trafik koşullarını iyileştirmektir. Geleneksel sabit zamanlı ve uyarlanmış sinyal kontrol yöntemleriyle karşılaştırıldığında, ATSC algoritmaları, sinyalize kavşaklarda trafik verimliliğinde önemli ölçüde arttırmaktadır. Fakat bazı çalışmalar ATSC algoritmalarının uygulanmasının trafik

kazalarında az miktarda artışa yol açtığını [3,4] veya trafik çatışmalarını önemli ölçüde azalttığını fakat trafik güvenliğini kötüleştirdiğini göstermiştir [5]. Mevcut ATSC algoritmalarının güvenlik etkisindeki bu tutarsızlık, bu algoritmaların trafik güvenliğini en iyi duruma getirmeyi birincil amaç olarak dikkate almamasıyla ilgili olabilmektedir. Daha da önemlisi, trafik verimliliğini optimize etmek, güvenliği optimize etmek anlamına gelmemektedir. Trafik sinyal kontrol sistemleri genellikle normal hava koşullarında trafik operasyonlarını optimize etmek amacıyla tasarlanmaktadır [6]. Ne var ki, kötü hava koşullarının, trafik düzeni ve sürücü davranışları üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Bu etkilerin göz ardı edilmesi, trafik verimliliği ve güvenliği üzerinde önemli ölçüde olumsuz sonuçlara neden olabilmektedir [7].

Bu nedenle hava durumunun, araç tiplerinin, hatalı şerit kullanımlarının, sürücü davranışlarının da dikkate alındığı sinyal planlarıyla hem ortalama gecikme zamanlarını, yakıt tüketim miktarlarını, CO_2 emisyon miktarlarını azaltıp hem de sürüş güvenliği sağlanabilmektedir.

Bu tez çalışmasının ilk aşamasında, kapsamlı bir literatür taraması gerçekleştirilmiştir. Literatür taraması bölümünde, trafik ışık kontrol stratejileri, farklı kavşak tipleri, kullanılan yöntemler ve sürücü davranış analizi gibi konular ele alınarak mevcut bilimsel çalışmaların genel bir değerlendirmesi yapılmıştır. Bu değerlendirme, ATSC algoritmalarının geliştirilmesinde karşılaşılan zorlukların ve literatürdeki boşlukların ortaya konmasına yardımcı olmuştur. İkinci bölümde, trafik ışık kontrol yönetiminde temel kavramlar incelenmiş ve bu kavramlar üzerinde detaylı bir literatür taraması yapılmıştır. Trafik sinyalizasyonunun temel prensipleri, farklı trafik akış modelleri ve güncel teknikler üzerinde durularak, mevcut yöntemlerin avantajları ve dezavantajları tartışılmıştır. Üçüncü bölüm, tercih edilen simülasyon platformunun tanıtımını ve çalışmada kullanılan yöntemlerin uygulanmasını detaylandırmıştır. SUMO trafik simülatörü, özellikle trafik modelleri oluşturmak ve farklı senaryolar üzerinde simülasyonlar yapmak için neden tercih edildiği üzerinde durulmuştur. Ayrıca, simülasyon için geliştirilen özel dosyaların ve bu dosyaların nasıl kullanıldığının anlatıldığı bir bölüm bulunmaktadır. Dördüncü bölümde, ele alınan problem ayrıntılı bir şekilde açıklanmakta ve çalışmada dikkate alınan parametrelerin nasıl seçildiğini açıklanmaktadır. Trafik ışık kontrolünde etkili olan faktörler, sürücü davranışları, hava koşulları, yol geometrisi vb. unsurlar üzerinde durularak, bu parametrelerin nasıl analiz edildiği ve modellendiği anlatılmıştır. Beşinci bölümde, önerilen her bir model ayrıntılı bir

şekilde tanıtılmış ve değerlendirme metrikleri, uygulamaları ve elde edilen sonuçları detaylı bir biçimde analiz edilmiştir. Bu bölüm, çalışmanın temel bulgularını ve önerilen yöntemlerin performansını göstermek amacıyla oluşturulmuştur. Son olarak, altıncı bölümde elde edilen sonuçlar ve öneriler sunulmuştur. Yapılan simülasyonlar ve karşılaştırmalar sonucunda elde edilen bulgular, önerilen EDATLC yönteminin sabit zamanlı yöntemlere ve diğer bulanık mantık tabanlı modellere göre daha üstün performans sergilediğini göstermektedir. Bu sonuçlar, trafik yönetiminde yeni perspektifler açılmasına ve gelecekte yapılacak çalışmalar için önemli bir referans noktası oluşturmasına katkı sağlamaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Dünya genelinde nüfus artışına paralel olarak artan araç sayılarının şehirlerde yol açtığı trafik sıkışıklığını azaltmak için trafik sinyal kontrolünün uygulanması büyük bir gereklilik haline gelmiştir. Bekleme/gecikme zamanı, seyahat süresi, yakıt tüketimi, CO yayılımını azaltarak ülke ekonomisine katkı sağlamak, çevre ve gürültü kirliliğini azaltmak amacıyla farklı kavşak tiplerinde çeşitli trafik ışık kontrol stratejileri ve trafik ışık optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Bu alanda pek çok çalışmalar yapılmıştır. Bu bölümde öncelikli olarak trafik ışık kontrol stratejilerine dayalı bir sınıflandırma yapılmıştır. Daha sonra ise, kavşak türlerine göre ATLC yöntemi kullanılarak yapılan çalışmalar incelenmiştir. Son olarak, trafik ışık kontrolünde kullanılan yöntemler araştırılmıştır.

2.1. Trafik Işık Kontrol Stratejileri

Trafik sinyal kontrolünün esas amacı, bir yolun kavşak noktalarında güvenliği arttırmak için güvenilir ve maliyet açısından uygun bir yöntem bulmak ve aynı zamanda çakışan trafiğe istatistiksel olarak makul bir zaman dağılımı sağlamaktır. Üç temel trafik kontrol stratejisi kullanılmaktadır: sabit zamanlı, uyarmalı ve adaptif trafik sinyal kontrol yöntemleri. Bu yöntemler, trafik sinyal kontrolü alanındaki kontrol stratejilerinin tarihsel gelişimini yansıtmaktadır.

Sabit zamanlı trafik ışık kontrol yöntemi

Sabit zamanlı trafik sinyal kontrolünde önceden devre süresi ve faz düzeni belirlenerek denetim sağlanmaktadır. Trafik taleplerindeki dinamik değişikliklere bağlı olmaksızın, her kavşak için önceden belirlenmiş olan devre süresi ve ışık planları kullanılmaktadır. Bu nedenle, trafik taleplerinde beklenmeyen bir değişiklikle başa çıkma yeteneğine sahip değildir. Sabit zamanlı trafik sinyal kontrolü, geçmiş trafik verilerine dayanarak en yoğun trafik akışına yönelik en uzun yeşil süreyi belirler ve sinyalize edilen kavşak için periyodik olarak aynı programı tekrarlar [8]. Webster algoritması, en klasik ve en yaygın kullanılan trafik ışık kontrol yöntemidir. Tek kavşaklı trafik sinyali zamanlama algoritmasıdır. Bu algoritmanın temel amacı, trafik akış gecikmesini en aza indirmek ve yeşil süreyi uygun bir şekilde ayarlamaktır. Webster algoritmasının avantajı, ana yol yoğun trafik akışına ve ikincil yol daha az trafik akışına sahipken, bu algoritma ana yol trafiğini güvence altına alarak ve

ikincil yolun yeşil süresini boşa harcamaktan kaçınmaktadır. Dezavantajı ise algoritmanın zamanlama etkisinin yol aşırı doygun olduğunda yeterince etkin olamamasıdır [9]. Bu dezavantajını ortadan kaldırmak için Zakariya ve Rabia, Webster optimal döngü uzunluğu formülünün modifiye edilmiş bir versiyonunu önermiştir. Webster formülü yıllar önce geliştirilmiş olmasına rağmen, hala çağdaş sistemlerde etkin bir şekilde uygulanabilmektedir [10].

Uyarmalı trafik ışık kontrol yöntemi

Sabit zamanlı trafik sinyali kontrol yönteminden farklı olarak, uyarmalı trafik sinyal kontrol yöntemi, araç ve/veya yaya taleplerine bağlı olarak her fazın yeşil süresini ayarlayabilmektedir. Talepler, araç detektörleri ve yaya butonları tarafından belirlenmektedir. Bu yöntemde, mevcut yeşil fazı uzatması veya kesmesi kararı yalnızca aktif yeşil fazdaki talebin varlığına bağlanmaktadır.

İki farklı araç detektörü türü kullanılmaktadır. Bunlar, durma hattı detektörleri ve arka detektörlerdir. Durma hattı detektörleri, faz sinyali kırmızı olduğunda trafik talebini tespit etmek amacıyla kullanılır. Bu sayede, trafik ışık kontrolörü, belirli bir döngüde belirli bir yönde talep olmadığında fazı atlar. Arka detektörler ise yeşil faz süresini belirlemek için önceden belirlenmiş bir mesafeye bağlı olarak uzatma veya sonlandırma kararı almak amacıyla kullanılır. Uyarmalı trafik sinyal kontrol yöntemi, gerçek zamanlı trafik taleplerine anında tepki verir. Bu nedenle, trafik talepleri gün içinde önemli ölçüde değiştiğinde veya ana yol trafik akışındaki kesintileri azaltma amacı olduğunda etkili bir performans sergiler. Bu yöntem, sabit zamanlı trafik sinyal kontrolü ile kıyaslandığında daha yüksek bir verimlilik sağlar. Ancak, kavşaktaki trafik talebi arttıkça, uyarmalı trafik sinyal kontrolü, sabit zamanlı kontrolle benzer bir şekilde çalışarak verimliliğin azalmasına neden olabilir.

Uyarmalı trafik sinyal kontrol yönteminin avantajı, gerçek zamanlı trafik taleplerine etkili bir şekilde yanıt verebilmesidir. Bu yöntemde, tüm trafik sinyal fazları belirli bir minimum veya maksimum yeşil zaman sınırlamasına tabidir. Minimum yeşil süreler, sürücülerin yeşil süre aralığının başlangıcına tepki vererek sürücü beklentilerini karşılamak için kullanılırken, maksimum yeşil süreler, taleplere bağlı olarak uzatılan yeşil sürenin sınırsız bir şekilde devam etmesini önlemek amacıyla kullanılır. Böylece, mevcut çalışan fazın talebine bakılmaksızın, çakışan fazlarda bir talep olduğunda ve maksimum yeşil süresi sona

erdiğinde, çakışan faza geçiş hakkı verilmektedir. Uyarmalı trafik sinyal kontrolü, yoğun trafik talepleri durumunda sabit zamanlı trafik sinyal kontrol yöntemi gibi davranabilir. Bu nedenle, trafik yoğunluğu arttığında sabit zamanlı trafik sinyal kontrolünün dezavantajları ortaya çıkar [8].

Uyarmalı trafik sinyal kontrol stratejisinin çalışma prensibi son derece basit ve anlaşılabilir olup, optimizasyon algoritmalarına ihtiyaç duymamaktadır. Bu nedenle, bu yönteme ilişkin çok sınırlı sayıda yayın vardır. Geliştirilen uyarmalı trafik sinyal kontrol stratejisi, tasarımına bağlı olarak yarı uyarmalı ve tam uyarmalı olmak üzere iki ana türe ayrılmaktadır. Yarı uyarmalı trafik sinyal kontrolünde, sadece bir kavşaktaki yan yollar için detektörler kullanılır. Özellikle ana yolda düzenli bir trafik akışı olduğunda, yan yollardan gelen düşük taleplere hizmet etmek için etkilidir. Yan yol üzerinde bir talep algılandığında hizmet verilir, aksi takdirde ana yollardaki fazlara devam edilir. Ancak, ana yol trafik akışı ile ilişkilendirilmiş fazları algılamak için bir mekanizma bulunmamaktadır. Tam uyarmalı trafik sinyal kontrolü, kavşaktaki tüm trafik akışlarının algılanmasıyla ilgilenerek tüm fazlar için bir işletme mekanizması sağlamayı amaçlamaktadır. Bu yöntem, tüm yollar üzerinde büyük ölçüde değişken trafik talepleri olan ve aynı zamanda izole kavşaklarda yaklaşık olarak eşit hacme sahip durumlarda ideal bir çözüm sunmaktadır.

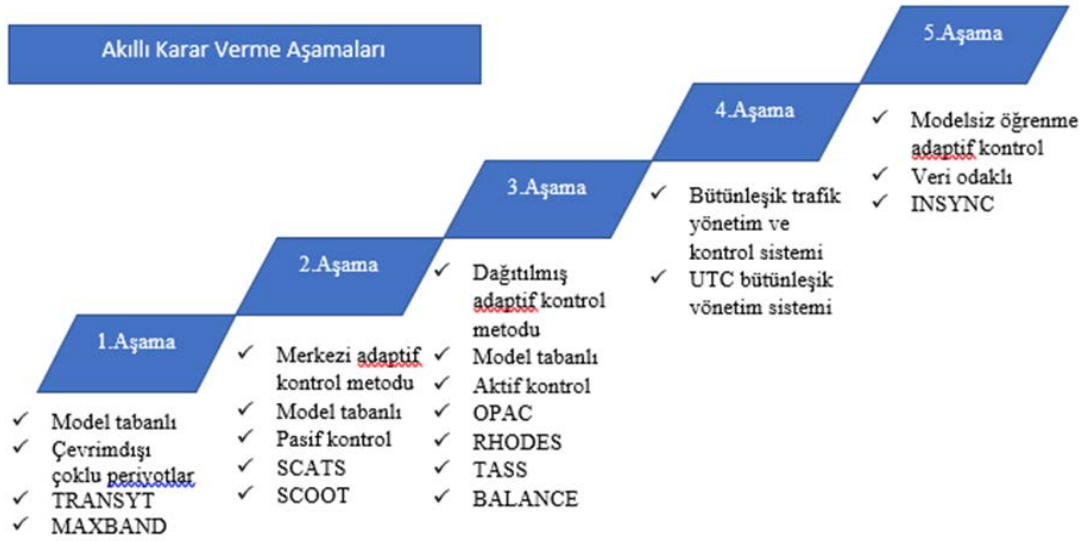
Adaptif trafik ışık kontrol yöntemi

Adaptif trafik ışık kontrol (ATLC), gerçek zamanlı trafik koşullarına yanıt olarak sinyal parametrelerini otomatik olarak ayarlayan bir sinyal kontrol teknolojisidir. Bir ATLC sisteminde, araç verileri, bir yukarı, aşağı akış noktasında stratejik olarak yerleştirilmiş sensörler vasıtasıyla tespit edilmektedir. Daha sonra, akış aşağısındaki kavşaktaki trafik durumunu tahmin etmek ve sinyal zamanlama parametrelerini ayarlamak için özel bir algoritma kullanılmaktadır. Trafik tahmini ve sinyal zamanlama optimizasyonu için farklı algoritmalara rağmen, tüm ATLC sistemleri benzer bir işlemi takip etmektedir:

1) Trafik koşullarını belirlemek için bir tespit sistemi aracılığıyla veri toplanı ve işlenir;
2) Bir trafik modeli kullanarak alternatif sinyal zamanlama planları değerlendirilir,
3) Bir performans ölçüsüne göre en iyi sinyal zamanlama stratejisi belirlenir ve bu sinyal kontrol cihazında uygulanır. Bu adımlar belli aralıklarla tekralanmaktadır [11].

Trafiğin sorunsuz bir şekilde akması için yukarıdaki üç adım 24 dakikada birkaç kez tekrarlanmaktadır. ATLC teknolojisi gerçek koşulları dikkate alarak, sıra uzunluğunu, trafik gecikmesini ve seyahat sürelerini azaltması amacı ile tasarlanmıştır.

Wang vd., adaptif sinyal kontrol sistemi gelişimini Şekil 2.1'deki gibi 5 aşamada tanımlamıştır [12].



Şekil 2.1. Kentsel Trafik Adaptif Kontrol Sistem Gelişim Aşamaları

İlk nesil adaptif kontrol sistemi, trafik akışının basit bir şekilde düzenlenmesini sağlamak için sürenin bir bölümünün veya tamamen izole edilmiş kavşağın çok zamanlı kontrolünü ele almaktadır. Yani, çok periyodlu zamanlama kontrol sistemini, bir gün içinde gelen trafik akışını birden fazla döneme (en yüksek, en yüksek olmayan gibi) ayıran, günlük trafik talebindeki farklı zaman dilimlerinde sinyal zamanlama düzenini optimize etmek için değişiklikler yapan yöntemlerdir [13].

İkinci nesil trafik sinyali kontrol sistemi, sinyal zamanlama şemasının (sinyal periyodu, yeşil sinyal oranı ve faz farkı) parametrelerini dinamik olarak ayarlamaktadır. Birinci nesil kontrol sistemi ile karşılaştırıldığında, ikinci nesil sistem kontrol sisteminin esnekliğini ve uyarlanabilir ayar yeteneğini büyük ölçüde geliştirmektedir [13].

Üçüncü nesil kontrol sistemi, kavşaktaki zamanla değişen trafik akışının dalgalanmasına yanıt olarak sinyal zamanlama parametresini dinamik olarak ayarlamak için ikinci nesille benzer bir fikir kullanmaktadır.

Dördüncü nesil kendinden uyarlamalı trafik sinyal kontrol sistemi, ağ trafiğinin entegre yönetimini gerçekleştirebilen ve birden fazla alt sistemin teknik ve performans avantajlarını en üst seviyeye çıkarabilen entegre bir trafik yönetimi ve kontrol sistemidir [14].

Beşinci nesil adaptif trafik sinyal kontrol sistemi, otomatik araçlarda ve normal araç ortamlarında kendi kendine öğrenme ve yüksek verimlilik hesaplama yeteneklerine dayanmaktadır [15]. Adaptif trafik sinyal kontrol sistemi, trafik kontrol bilgisini bağımsız olarak öğrenerek, karar optimizasyonunun hesaplama yükünü akıllıca azaltmaktadır.

2.2. Kavşak Türlerine Göre Sınıflandırma

Kavşaklar, komşu kavşaklarla olan ilişkilerinin dikkate alınıp alınmaması durumuna bağlı olarak iki tipte kategorize edilebilmektedir. Bunlar: İzole kavşaklar ve çoklu kavşaklardır. İzole kavşaklar, diğer kavşaklarla bağlantısı bulunmayan ya da bağlantıları dikkate alınmayan kavşaklardır. Çoklu kavşaklar ise, birden fazla kavşak birleşiminden oluşan kavşakların birbirleri üzerindeki etkilerini dikkate alan kavşak türleridir. Bu alanda son beş yıla ait yapılan çalışmalar Çizelge 2.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 2.1. Kavşak türlerine göre incelenen çalışmalar

Yazar(yıl)	*Yöntem*	*Amaç*	*Veri türü*	*Kavşak türü*	*Simülasyon platformu*
[16]	Trafik ışığı çizelgeleme yöntemi	Durma sıklığını azaltmak, Gecikme süresini azaltmak	Gerçek veri	İzole kavşak	Vehicles in Network Simulation" (VEİNS)
[17]	Uyarlanabilir Trafik Işık Kontrol Algoritması	Gecikme sürelerini en aza indirmek	Gerçek sensör verisi	İzole kavşak	SUMO
[18]	Çok ajanlı sistem ve pekiştirmeli öğrenme	Durmaları azaltmak	Gerçek veri	İzole kavşak	-
[19]	Tekrarlayan sinir ağı (RNN) Deep Q-Network	Gecikme sürelerini en aza indirmek	GPS verisi	İzole kavşak	SUMO
[20]	Pekiştirmeli öğrenme Bilgisayar Görüntüleme	Gecikme sürelerini en aza indirmek	Gerçek veri	İzole kavşak	-
[21]	T-zamanlı Petri Ağları	Gecikme sürelerini en aza indirmek, Max araç geçişini sağlamak	Gerçek sensör verisi	İzole kavşak	MATLAB
[22]	Yeşil zaman Optimizasyon stratejisi	Gecikme sürelerini en aza indirmek	Gerçek veri	İzole kavşak	MATLAB
[23]	Kuyruk modeli Dinamik programlama	Gecikme sürelerini en aza indirmek, Kuyruk uzunluğu	Gerçek sensör verisi	İzole kavşak	MATLAB
[24]	Uyarlanabilir Trafik Işık Kontrol Algoritması	Max araç geçişini sağlamak	Gerçek sensör verisi	İzole kavşak	MATLAB
[25]	Görüntü işleme Uyarlanabilir Trafik Işık Kontrol Algoritması	Gecikme süresini, Yakıt tüketimini en aza indirmek	Gerçek veri	İzole kavşak	-
[26]	Geçici Bilinmeyen Artımlı Küme (TUIC)	Gecikme sürelerini en aza indirmek, Max araç geçişini sağlamak	Gerçek veri	İzole kavşak	MATLAB
[27]	dağıtılmış kavşak yönetimi protokolü (DIMP)	Gecikme sürelerini en aza indirmek, Kuyruk uzunluğu	Hipotetik	İzole kavşak	SUMO

Çizelge 2.1. (devam). Kavşak türlerine göre incelenen çalışmalar

Yazar(yıl)	*Yöntem*	*Amaç*	*Veri türü*	*Kavşak türü*	*Simülasyon platformu*
[28]	Öğrenme algoritması	Ortalama Gecikme, Süresini En Aza İndirmek	Hipotetik	İzole kavşak	-
[29]	Reinforcement öğrenme Ajan tabanlı yaklaşım	Gecikme sürelerini en aza indirmek	Gerçek veri	İzole kavşak	SUMO
[30]	Oyun teorisi Akıllı trafik sinyal kontrol modeli	Gecikme sürelerini en aza indirmek	Hipotetik	İzole kavşak	MATLAB
[31]	Sığ yapay sinir ağları	Gecikme sürelerini en aza indirmek	Hipotetik	İzole kavşak	
[32]	Pekiştirmeli öğrenme, öz düzenlemeli ağ	Gecikme sürelerini en aza indirmek, Max araç geçişini sağlamak	Open data set	İzole kavşak	
[17]	Trafik ışığı kontrol algoritması	Gecikme sürelerini en aza indirmek, Kuyruk uzunluğu	Gerçek sensör verisi	İzole kavşak	SUMO
[33]	Trafik ışığı kontrol algoritması	Gecikme sürelerini en aza indirmek, Kuyruk uzunluğu	Gerçek sensör verisi	İzole kavşak	SUMO
[22]	Trafik ışığı kontrol algoritması	Gecikme sürelerini en aza indirmek	Hipotetik	İzole kavşak	SUMO, OMNET++
[34]	Sayısal monte Carlo deneyi	Gecikme sürelerini en aza indirmek, Kuyruk uzunluğu	Hipotetik	İzole kavşak	VISSIM
[35]	Monte Carlo simülasyonu	Gecikme sürelerini en aza indirmek, Kuyruk uzunluğu	Gerçek Veri	İzole kavşak	VISSIM
[36]	Koruyucu trafik ışığı kontrol algoritması	Gecikme sürelerini en aza indirmek, Kuyruk uzunluğu	Gerçek Veri	İzole kavşak	VISSIM
[37]	Ajan tabanlı pekiştirmeli öğrenme algoritması, Yapay zeka, Makine öğrenmesi	Gecikme sürelerini en aza indirmek	Gerçek Veri	İzole kavşak	SUMO

Çizelge 2.1. (devam). Kavşak türlerine göre incelenen çalışmalar

Yazar(yıl)	*Yöntem*	*Amaç*	*Veri türü*	*Kavşak türü*	*Simülasyon platformu*
[38]	Yeşil hesaplama tabanlı adaptif trafik ışığı kontrol algoritması	Gecikme sürelerini en aza indirmek, Zehirli gaz yayılımını en küçükleme	Gerçek veri	Çoklu kavşak	ONE(Opportunistic Network Environment simulator)
[39]	Trafik ışığı kontrol algoritması	Gecikme süresini en küçüklemek.	Gerçek veri	İzole kavşak	SUMO
[20]	Reinforcement learning	Gecikme süresini en küçüklemek, Gecikme sürelerini en aza indirmek	Gerçek veri	İzole kavşak	-
[40]	Trafik yoğunluğu hesaplama algoritması	Trafik Yoğunluğunu En Küçüklemek	Gerçek veri	İzole kavşak	-
[41]	Wsn tabanlı adaptif trafik ışık kontrol algoritması	Trafik Yoğunluğunu En Küçüklemek	Gerçek veri	İzole kavşak	SUMO
[42]	Uyarlanabilir Nöro Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) yöntemi Bağlı Bileşen Etiketleme (CCL)	Gecikme sürelerini en aza indirmek, Yakıt tüketimini en aza indirmek	Gerçek veri	İzole kavşak	MATLAB
[43]	Bulanık mantık Uyarlanabilir Nöro Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) yöntemi	Gecikme sürelerini en aza indirmek	Gerçek veri	Çoklu kavşak	MATLAB

Wu vd. izole kavşaklarda durma sıklığı ve gecikme süresini azaltmak amacıyla 3 farklı model önermişlerdir. Bunlar, kesişim modeli, sinyal fazı dağıtım modeli ve V2I (araçtan altyapıya iletişim) haberleşme tabanlı boru hattı modelidir. Ayrıca trafikte oluşabilecek acil durumları da dikkate alabilmek için yeşil dalga trafik ışık çizelgeleme modeli de ele alınmıştır. Araçların türlerini ve dönüş yönlerini de göz önünde bulundurarak "talep atama" ilkesine dayanan akıllı bir trafik ışığı çizelgeleme yöntemi (ITLM) önermişlerdir [16]. Rida vd. gerçek sensör verilerini kullanarak trafik hacmi ve gecikme süresi gibi birçok trafik faktörünü dikkate alan adaptif trafik ışığı kontrol yöntemi önermişlerdir. Bu yöntemdeki temel yaklaşım en uzun kuyruğa öncelik verilmesidir. Önerilen algoritma simülasyon

ortamında kısa kuyruğa öncelik veren algoritma ile kıyaslandığında bu yöntemin gecikme sürelerini azalttığı gösterilmiştir [33].

Rezzai vd. çalışmalarında trafikteki gecikmeleri azaltmak amacıyla çoklu ajanlı sistemler ve pekiştirmeli öğrenme algoritmalarına dayalı yeni bir mimari kurmuşlardır. Fakat yapılan çalışmanın etkinliği simülasyon ortamında kanıtlanmamıştır [18].

Zeng vd., gerçek zamanlı GPS verilerini kullanarak trafikteki gecikme sürelerini en küçüklemek istemişlerdir. İki farklı yöntemi birleştirerek yeni bir yöntem DRQN (Deep Recurrent Q-learning) yöntemini geliştirmişlerdir. Tekrarlayan sinir ağını (RNN) ve Deep Q-Network (DQN) yöntemlerini hibritleyerek DRQN yöntemini geliştirmiş ve klasik DQN ile karşılaştırmışlardır [14]. Rida ve Hasbi, gerçek sensör verilerini kullanarak yeni bir uyarlanabilir trafik ışık kontrol algoritması önermişlerdir. Bu algoritma temelde en uzun kuyruğa öncelik vererek araçların gecikme sürelerini en küçüklemeye çalışmaktadır. Çalışmanın etkinliği SUMO trafik simülatörü ile gösterilmiştir [19].

Zaatouri ve Ezzedine gerçek zamanlı trafik ışık kontrol yönetimi yapabilmek için ilk olarak akışın karakterini anlamak için makine öğrenmesi ve bilgisayar görüntüleme yöntemlerini kullanmışlardır. Görüntüleme, derin bir Evrimsel Sinir Ağına dayanan son teknoloji ürünü, gerçek zamanlı nesne tespiti yapan YOLO ile gerçekleştirilmiştir. YOLO, gömülü kontrolöre, sınırlı donanım kaynakları üzerinde Derin Sinir Ağını gerçekleştirmeyi mümkün kılan Reinforcement Öğrenme tekniği kullanılarak uygulanmıştır. Gecikme sürelerini minimize etmek amacıyla Derin öğrenme tabanlı kendi kendine uyarlanabilir trafik ışık kontrol algoritması kullanmışlardır [20].

Tajer vd. T-zamanlı Petri Ağları (T-TPN'ler) kullanarak gerçek zamanlı olarak kentsel sinyalize kesişimin uyarlanabilir bir kontrol stratejisi önermişlerdir. İzole kavşakları kontrol eden trafik sinyallerinin dinamik davranışı, Petri ağları tarafından modellenebilen ayrı bir olay sistemi olarak görülmüştür. Çalışmanın amacı gecikmeleri en küçüklemek, kavşaktan geçen araç sayısını ise en büyüklemektir. Gerçek detektör verileri kullanılmıştır [19]. Tan vd., reinforcement learning- RL modellerinde katlanarak artan olası durumlarla ve büyük ölçekli trafik sinyali kontrol ağı için yapılan işlemlerle ilgili sorunların üstesinden gelmek üzere, merkezi olmayan bir bulanık güçlendirme öğrenme yaklaşımı olan dağıtılmış algoritma önerilmiştir [44].

Guo vd. yeni bir zamanlama stratejisi önermişlerdir. Bu strateji, yeşil zaman optimizasyonu ve şerit kombinasyonu hesaplamasını içermektedir. Hipotetik ve gerçek trafik verilerinin simülasyon sonuçları, önerilen stratejinin kavşaklarda trafik verimliliğini% 15'ten daha fazla artırabileceğini, araç gecikmelerini azalttığını ve trafik sıkışıklığını azaltabileceğini göstermiştir. Matlab kullanılarak yapılan karşılaştırmalar sonucunda sabit zamanlı kontrol planı göre yüzde 15-20 iyileşme sağladığı gösterilmiştir [45]. Bie vd. detektörlerden gelen gerçek veriler kullanılarak kuyruk alanına giren araçlar için bir kuyruk modeli geliştirilmiştir sonrasında dinamik programlama kullanılarak gerçek zamanlı bir sinyal kontrol yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntem klasik yöntemlerle kıyaslanınca araç gecikmesi ve kuyruk uzunluğunu yüzde 20 azalttığı gösterilmiştir [23]. Li vd. gerçek sensör verilerini kullanarak araçların hızlarına göre ışık süreleri belirlenmiştir. Amaç kavşaktan geçen araç sayısını en büyükleyerek trafik sıkışıklığını azaltmaktır [24].

Maheshawari vd. görüntü işleme tekniği kullanılarak araç yoğunluklarını hesaplamış ve bu değerlere göre ışıkları ayarlayan dinamik bir sistem önermişlerdir. Amaçları gecikme süresini ve yakıt tüketimini minimize etmektir [25]. Kumaran vd. Geçici Bilinmeyen Artımlı Küme (TUIC) modelini kullanarak, hareketli araçların optik akış özelliklerini geçici olarak kümeleyerek trafik akışına dayalı akıllı sinyal zamanlaması için yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Yoğun trafik kavşağında, bu yaklaşım geleneksel kümeleme yöntemlerine kıyasla 5 kat daha hızlı çalışan yeni bir çıkarım şeması önermektedir. Trafik kavşaklarında sinyal zamanlaması için yolların küme sayıları kullanılmıştır. Kavşak, giriş ve çıkış yerlerinde ilgilenilen bölgeler (ROI) içindeki küme hareketleri tespit edilmiştir. Trafik değişimlerini parametrelendirmek için Gauss regresyonu kullanılarak kalkış oranları hesaplanmıştır. Öğrenilen parametrelerin küme sayımının bir fonksiyonu olarak kullanılmasıyla, Verim ve Ortalama Gecikme Süresi Optimizasyonu sağlayan uyarlamalı bir sinyal zamanlama algoritması önerilmiştir [26]. Liang vd. kavşaktan geçen araçları yönetmek için VANET protokolü olan dağıtılmış kavşak yönetimi protokolü (DIMP) önermişlerdir. Yöntemde, önce gelen küme kavşağı önce terkeder ve kesişen kümeler var ise öncelik gecikme süresi fazla olana verilmektedir. Kesişmeyen kümelerin eş zamanlı hareket etmesi sağlanarak araç gecikme süresi ve bekleyen araç sayısını azaltmak amaçlanmaktadır [27].

Louati vd. çalışmalarında yeni bir trafik sinyal kontrol algoritması tasarlamışlardır. Simülasyon optimizasyonunu, yoğunlaştırılmış en yakın komşu algoritmasını ve kural

tabanlı bir sistemi birleştiren yeni bir öğrenme algoritması geliştirmişlerdir. Geliştirilen algoritma, geleneksel sabit zamanlı trafik sinyal kontrol algortiması ve en uzun kuyruğa öncelik yaklaşımı ile karşılaştırılmıştır. Bu algoritmanın diğer iki yöntemden daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir [28]. Juntao vd. pekiştirmeli öğrenme ve Ajan tabanlı yaklaşımı kullanarak araçların gecikme sürelerini en aza indirmeyi amaçlamışlardır [34]. Guo ve Harmati, karar alma işlemlerine dayanan oyun teorisi çerçevesi kullanan bir akıllı trafik sinyal kontrolü modeli sunmaktadır. Bu model, trafik sıkışıklığını azaltmak ve şehir içi ulaşım sisteminde araçların gecikme süresini en aza indirmek için en uygun çözümü bulmayı amaçlamaktadır. Kesişimdeki her gelen bağlantı için (yani bölümler) trafik sinyallerini kontrol etmek ve böylece araçların en iyi şekilde dağılmasını sağlamak için oyunun teorisi çerçevesinde beklenen stratejiler üretilebilmektedir. Bu sistemde, gelen her bağlantı tek bir oyuncu olarak kabul edilir ve sinyal ışığının durumu (yeşil veya kırmızı) bu oyuncular tarafından alınan kararlar olarak kabul edilmektedir. Böylece, en iyi araç rotalarını seçmek için küresel optimal çözüm, tüm kararları birleştirerek ve bu oyunda maliyet işlevini değerlendirerek bulunmaktadır [30].

Movius ve Vuuren, sabit zamanlı bir kontrol stratejisi ve kendi kendini organize eden yeni bir algoritmayı, bir dizi performans ölçümü göstergesi (PMI) kullanılarak karşılaştırmıştır. Karşılaştırmalar, sekiz sinyalize kavşaktan oluşan gerçek bir yol ağının mikroskobik trafik simülasyon modeli kapsamında gerçekleştirilmiştir [38]. Kurmankhojayev vd. adaptif trafik ışık kontrolünün karmaşıklığını analiz etmişlerdir. Shallow sinir ağlarının, sinir ağlarına kıyasla trafik talep tahmininde izole kavşaklar için daha etkin sonuçlar verdiği gösterilmektedir [40]. Kao vd. Nesnelerin İnterneti (IoT) sayesinde trafikte tıkanıklık sorunu için daha etkili ve verimli çözümler üretilebileceğini göstermektedirler. Ayrıca, Makine Öğrenimi (ML) modellerinin varlığı ile ML modellerini benimseyen ATC sisteminin IoT yaklaşımı ile iyileştirilebileceği düşünülmektedir. Çalışmada, uyarlamalı trafik ışığı kontrol sistemi için bir makine öğrenme modeli önerilmektedir. İlk olarak, trafik verilerinin internete bağlı IOT algılama cihazlarından verilerin toplandığı varsayılmaktadır. Daha sonra, önerilen makine öğrenme modeli bulutta analiz edilen verileri alır ve çıktı olarak en uygun trafik ışığı döngülerini oluşturmaktadır. Son olarak, optimum trafik ışığı süresi, kavşaklardaki IoT çalıştırma cihazlarına iletilecek olan trafik ışığı ayar sinyallerine dönüştürülmektedir [41].

Guo, yol bölümündeki tüm şerit yönlerinde acil araçları ve acil olmayanları dikkate alan adaptif bir trafik ışığı kontrol yöntemi sağlamaktadır. Bu kontrol yönteminde, üç trafik ışığı

çalışma modu önerilmiştir ve trafik ışığı üç çalışma modu arasında dönüştürülebilmektedir: Normal mod, Uyarı modu ve Öncelik modu. Dahası, kavşaktaki acil araçların ambulans, itfaiye vb. ortogonal şeridi üzerinde yaklaşmakta olan acil olmayan araçların çarpışma tahmini yapılmaktadır. Acil araç olmayanların ortogonal doğrultuda güvenli hareketliliğini garanti etmek için önceden tanımlanmış bir mesafede emniyete alınması sağlanmaktadır. Daha sonra, trafik ışığı yaklaşan sürücülere bir uyarı ve tamponlama süresi sağlamak için Uyarı moduna girmektedir. Ardından, acil durum aracı kavşaktan çıkıncaya kadar trafik ışıkları öncelik moduna geçmektedir. Trafik ışıkları Normal moda geri dönmeden önce, trafik ışıklarının değişmesi durumunda acil olmayanları takip etmek için yeterli fren süresini sağlamak için Uyarı modu tekrar yapılmaktadır [42].

Leverents vd., yalıtılmış kontrollü kavşakta trafik akışının hareketini taklit eden bir model kurmuşlardır. Ardından sayısal bir Monte-Carlo deneyi ile araçların kuyruk uzunluğunun belirlenmesi sağlanmaktadır [43].

Andarov vd., trafik kavşağında yaya trafiğinin varlığı veya yokluğu da dahil olmak üzere çeşitli trafik durumlarında adaptif kontrolün etkinliğini değerlendirmek için kullanılabilecek bir sinyal kontrollü kavşak simülasyon modeli oluşturmuşlardır. Model Monte Carlo yöntemi kullanılarak yapılan sayısal bir deneye dayanmaktadır. Çalışma sonucunda, araç gecikmeleri, kuyruk uzunluğu ve trafik ışık döngülerinin süresi, gelen trafik akışlarının farklı yoğunluklarına ve yaya trafiğinin varlığına veya yokluğuna bağlı olarak hesaplanmaktadır [44].

Kapusta vd., koruyucu trafik ışığı kontrolü için yeni bir algoritma önermektedirler. Bu algoritma, acil durum aracının konumu ve kavşak sırası uzunluğu verilerine dayanmaktadır. Bu verileri kullanarak algoritma, sinyalize bir kavşaktaki sinyal programını dinamik olarak ayarlamaktadır. Önerilen algoritma, kullanım durumu olarak gerçekçi bir şekilde simüle edilmiştir. İzole bir kavşak kullanılarak dört farklı senaryoda test edilmiştir. Elde edilen sonuçların analizi, acil durum araçlarının seyahat sürelerinin %13'e kadar azaltılabileceğini göstermektedir. Aynı zamanda, ağdaki tüm araçların toplam seyahat süreleri üzerindeki olumsuz etkilerin azaltılabileceği veya hatta telafi edilebileceği gösterilmektedir [45].

Mousavi vd., iki tür pekiştirmeli öğrenme tabanlı bir algoritma geliştirmişlerdir. Bunlar, trafik kesişimi için mümkün olan en iyi trafik sinyalini tahmin edebilen derin politika-

gradyan (PG) ve değer-fonksiyon tabanlı ajanlardır. Her adımda, trafik engelleyici kontrol ışığı ajanları, bir grafiksel trafik simülatörünün mevcut durumunun bir görüntüsünü alır ve buna göre kontrol sinyalleri üretir. PG tabanlı ajan, gözlemini doğrudan kontrol sinyaline iletir. Daha sonra, değer-fonksiyon-bazlı ajan ilk önce tüm yasal kontrol sinyalleri için değerleri tahmin etmektedir. Yani önce trafik tüm zaman aralıklarında simüle edilir. Daha sonra iki farklı pekiştirmeli öğrenme yöntemlerinin adımları uygulanmaktadır [46].

Ahmad vd., ilk olarak, araçların gecikme süresini azaltmak amacıyla uyarlamalı bir trafik ışığı kontrol algoritması önermişlerdir. Dört farklı faz modellenmektedir ve talep fonksiyonunu, trafik yoğunluğu vb. gibi çoklu trafik faktörlerine dayanarak her faz için yeşil ışık süresi ayarlanmaktadır. Kavşak verimini en üst düzeye çıkarmak amaçlanmaktadır. Böylece ışık tarafından durdurulmuş araç sayısı en aza indirilebilmektedir. Ek olarak, araçların CO_2 emisyonlarını hesaplamak için bir CO_2 emisyonu tahmin modeli sunulmaktadır. Son olarak, geleneksel sabit zamanlı trafik ışık kontrol yöntemleri ile karşılaştırıldığında simülasyon sonuçları, önerilen planın aracın ortalama gecikme süresini, durma sürelerini ve CO_2 emisyonlarını etkin bir şekilde azaltabileceğini göstermektedir [48].

Zaatouri vd., gerçek zamanlı trafik ışık kontrol yönetimi yapabilmek için ilk olarak akışın karakterini anlamak amacıyla makine öğrenmesi ve bilgisayar görüntüleme yöntemleri kullanılmıştır. Görüntüleme işlemi, derin bir Evrimsel Sinir Ağına dayanan son teknoloji ürünü, gerçek zamanlı nesne tespiti ile yapılmaktadır. YOLO, gömülü kontrolör sayesinde, Sınırlı Donanım Kaynakları üzerinde Derin Sinir Ağını gerçekleştirmeyi mümkün kılan Transfer Öğrenme tekniği kullanılarak uygulanmıştır[49]. Pratama vd. görüntü işleme tekniği ile elde ettiği verileri kullanarak trafik yoğunluğu hesaplama algoritması ile hesaplama yapmıştır. Bu yoğunluk sayesinde ışık süreleri hesaplanmaktadır [50].

Andayani vd., Her bir trafik kavşağındaki yoğunluk ve yol genişliğine göre ışık sürelerini otomatik olarak ayarlayan yeni bir sistem önermişlerdir. Bu metodun adı Uyarlanabilir Nöro Bulanık Çıkarım Sistemi(ANFIS)'tir. CCL (bağlı bileşen etiketleme) yöntemi ile video kayıtlarından yoğunluk durum tespiti yapılmaktadır. Yoğun yolla boş yol karşılaştırılarak yoğunluk hesaplanmaktadır. Önerilen yöntemin test edilmiş 36 görüntü için doğruluğu yüzde 98'e çıkmıştır [51]. Zaatouri vd. Wsn tabanlı adaptif trafik ışık kontrol algoritması önermişlerdir. Gerçek veriler kullanılarak yapılan simülasyon sonucunda etkinlik

hesaplanmıştır. Kullanılan algoritmanın etkinliğinin diğer algoritmalardan yüksek olduğu gözlemlenmiştir [52].

Lee vd. trafik akışını maksimize etmeyi ve kesişme noktalarında araçların gecikme süresini azaltmayı amaçlayan yeni bir uyarlamalı trafik ışığı sinyal kontrol algoritması önermişlerdir. SUMO trafik simülatörünü kullanarak algoritmanın trafik çıktısını ve ortalama seyahat süresi bakımından etkinliğini incelemişlerdir[11]. Garg vd. uyarlanabilir gerçek zamanlı trafik optimizasyonu için gerçek verileri kullanarak, gradyan algoritmasına dayanan vizyon temelli, Derin pekiştirmeli öğrenme yaklaşımı önermişlerdir. Amaç yol kavşaklarında seyahat eden araçların seyahat sürelerini optimize etmektir. Üç boyutlu sanal gerçeklik simülatörünü kullanarak klasik yöntemlerden üstünlüğünü kanıtlamışlardır [15]. Mohammadian vd. gerçek sensör verilerini kullanarak kavşakların haberleşebilmesi için çok ajanlı bulanık mantık yöntemini kullanmışlardır [17].

Benhamza ve Seridi, çalışmalarında, çoklu kavşaklarda gerçek zamanlı trafik verilerini kullanarak ajan tabanlı uyarlamalı trafik kontrol algoritması önermişlerdir. Her ağ kesişimindeki trafik akışı bağımsız bir ajan tarafından kontrol edilmektedir. Oluşturulan modelin, anlık trafik yoğunluğunu belirlemede, yeşil ışık sıralarını ayarlamada ve çevre kavşaklar arasında iyi bir koordinasyon sağlamada oldukça başarılı olduğu gösterilmiştir. Geliştirlen modelin simülasyon ortamında, sabit zamanlı sinyal kontrol yöntemi ve yeşil dalga yöntemiyle karşılaştırıldığında daha iyi sonuç verdiği kanıtlanmıştır. Yapılan çalışma ile hem kavşaktan geçen araç sayısı maksimize edilmiş hem de gecikme süreleri minimize edilmiştir [25]. Castillo vd., işbirlikçi olmayan bir oyun teorisi yaklaşımı kullanarak sürekli zamanlı, ayrık durumlu trafikli sinyal kontrol problemini ele almışlardır. Çalışmada sürekli zamanlı kuyruk modeli önerilmiştir. Önerilen modelin gecikme zamanını ve kuyruk uzunluğunu azalttığı gösterilmiştir [26].

Yang vd. çalışmalarında merkezi olmayan bir koordinasyon grafiği algoritması önermişlerdir. Önerilen algoritma, eşzamanlı olmayan çoklu ajan tabanlı derinlemesine öğrenme yöntemine ve bir koordinasyon grafiğine dayanmaktadır. Bu algoritma tarafından kullanılan yeni bir ödül fonksiyonu ve Trafik Sinyal Fazı Kontrolü Ayarlama Matrisi (AMTSPC) önerilmiştir. Böylece araçların ortalama gecikme süreleri en küçüklenmiştir. Önerilen model, Kavşak Trafik Yönetimine Merkezi Olmayan Yaklaşım (DAITM), trafik işareti kontrolü için hiyerarşik çoklu ajan kontrolü (HTSC), Trafik işareti kontrolü için

Dağıtılmış Kavşak Yönetimi Protokolü (DIMP), Dağıtılmış trafik işareti kontrolü için gerçek dünya topolojisine dayanan Derin Q-Öğrenme (DQNRWT) yöntemleri ile kıyaslanmış ve en iyi sonucu vermiştir [28]. Mark, farklı stratejilerin uygulamasıyla pekiştirmeli öğrenme temelli kontrol yaklaşımının yanı sıra sabit zaman, boşluk bazlı ve zaman bazlı kontrol yaklaşımlarının da değerlendirildiği bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yeni Derin pekiştirmeli öğrenme yaklaşımı, faz seçimi ve geçiş zamanlamaları seçimiyle ilgili olarak trafik ışık kontrol eylem alanının modellenmesine yardımcı olmaktadır ve böylece ortalama gecikme süresi en küçüklenmektedir. Önerilen modeller geleneksel sabit zamanlı trafik sinyal kontrol yöntemi ile karşılaştırılmış ve daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir [29].

Junchen vd. ajan tabanlı pekiştirmeli öğrenme algoritmasından yararlanmıştır. Sistem, RA (alan ajanı), IA (kavşak ajanı)ve TA (dönme hareket ajanı) dâhil olmak üzere 3 seviyeden oluşmaktadır. Her bir hiyerarşi seviyesinin tanıtıldığı, hiyerarşik birçok-ajanlı modelleme yöntemi geliştirilmiştir. Amaç trafik sıkışıklığını azaltarak araç gecikme sürelerini en küçüklemektir [30]. Gao vd., 5 farklı meta sezgisel yöntemin etkinliğini incelemiştir. Genetik algoritma, karınca kolonisi, tabu arama, 2016 yılında ortaya atılan jaya algoritması ve yerel arama sezgiseli karşılaştırılmıştır. Toplam gecikme süresine göre yapılan karşılaştırmalar sonucunda en iyi sonucu karınca kolonisi sezgiseli vermiştir [33]. Rani ve Shaw, çalışmalarında, kavşaklardaki trafik gecikmesini en aza indirmek için faz sırasını ayarlayarak trafik sinyali zamanlamalarını kontrol etmeyi amaçlamışlardır. Trafik ağını modellemek için, dağıtılmış mod da üç katmanlı toplu öğrenmeye dayalı çoklu ajan metodu önermişlerdir. Önerilen model SUMO simülatörü ile simüle edilmiş ve adaptif kontrol metodu, toplu öğrenmeye dayalı çoklu ajan metodu ve benzer bir platformda çoklu ajan bazlı tam uyarılı kontrol metodu arasında karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır. Sonuçlar, önerilen trafik kontrol modelinin her koşulda mevcut diğer kontrol yöntemlerinden daha iyi performans gösterdiğini göstermektedir [35].

Wei vd., ajan tabanlı pekiştirmeli öğrenme algoritmasını kullanmışlardır. Kavşaktan geçen araç sayısını en büyüklemek amacıyla yapılan çalışmada önerilen model, sabit zamanlı yeşil dalga yöntemi ile karşılaştırılmış ve daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir [37]. Huang vd., yeşil hesaplama tabanlı adaptif trafik kontrol algoritmasını kullanarak ışık sıralarını ve olması gereken araç hızlarını hesaplamışlardır. Böylece ortak amaç az frene basarak, gecikme sürelerini azaltmak ve zehirli gaz yayılımını en aza indirmektir [47].

Liu vd. tüm kontrol sisteminin performansını arttırmak için komşu kavşaklardaki trafik bilgilerini, araç ve yaya trafiğini dikkate alarak dağıtılmış çok ajanlı Q öğrenme yöntemini kullanarak akıllı bir trafik ışığı kontrol çözüm yöntemi önermişlerdir. Önerilen çok ajanlı Q öğrenme algoritmasını kullanarak hem araç hem yaya trafiğini optimize etmek amaçlanmıştır. Gerçek dünyada trafik ışığı kontrolü için birçok kısıtlama/kural bulunmaktadır, çalışmada bu kısıtlamalar öğrenme algoritmasına dâhil edilmiştir. Bu sayede önerilen çözümün gerçek operasyonel senaryolarda uygulanması kolaylaşmaktadır. Gerçek verilerle yapılan simülasyon sonuçları da, önerilen çözümün, araç ve yaya trafiği, kavşaklardaki gecikme süreleri ve diğer birçok önemli performans ölçütleri açısından mevcut çözümleri geride bıraktığı ispatlanmıştır [54]. Walukov vd. sistem kontrol algoritmalarından olan Bulanık Mantık yöntemini kullanmışlardır, özellikle trafik akışı gibi dinamik ve doğrusal olmayan sistemler için kullanıldığında, kuyruk gecikme zamanını gerçek zamanlı ayarlarda optimum hassasiyetle arttırabileceğini göstermişlerdir. Böylece ışıkların hareketi ihtiyaç duyulan koşulları veya durumları takip edebilmektedir [55].

2.3. Trafik Işık Kontrol Yöntemlerine Göre Sınıflandırma

Ekonomik ve sosyal büyüme gelişen kentlerde yol tıkanıklığı, trafikte zaman ve yakıt gibi sorunlara sebep olmaktadır [46-48]. Özellikle kavşaklarda sunulan çözüm önerileri ile bu tıkanıklıklara çözümler üretilmektedir. Mevcut literatüre göre akıllı yöntemler, geleneksel kontrol yöntemlerine göre daha yüksek performans göstermektedir. Trafik ışık kontrol yönetiminde yaygın olarak kullanılan yöntemler, yapay sinir ağları, pekiştirmeli öğrenme (reinforcement learning), parçacık sürü optimizasyonu (PSO), GA (Genetik algoritma), ACO (Karınca Kolonisi), ABC (Yapay Arı Kolonisi), makine öğrenmesi algoritmaları, bulanık tabanlı yaklaşımlar, adaptif kontrol algoritmaları ve çizelgelerdir [49]. Son yıllarda ise sürü zekâsı algoritmaları bu alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. İlgilenilen problem için geliştirilen sürü zekâsı algoritmaları arasında, karınca kolonisi [33,49-51], guguk kuşu arama [52], yapay arı kolonisi [53-55], yarasa [56,57], parçacık sürü [58], tabu arama [59] algoritmaları bulunmaktadır. Adaptif trafik ışık kontrol planlarının kavşak ışık yönetiminde kullanılması kavşak kapasitelerini arttırmakta, gecikme, seyahat ve gecikme sürelerini azaltmaktadır.

Literatürde önerilen modeller hava durumu, doygun akış oranı (saturation flow rate), hız, hızlanma/yavaşlama ivmesi, trafik hacmi ve kalkış kayıp süresi (start up lost time) gibi girdi

metriklerine göre çözüm önerileri sunmuşlardır ve amaç yeşil ışık süresi ve devre süresini minimize etmektedir. Çizelge 2.2'de literatürde önerilen modellerin kullandığı metrikler ve amaçları gösterilmiştir.

Çizelge 2.2. ATLC ile ilgili çalışmalar

	Girdi						Çıktı		
Referanslar	Hava durumu	Doygunluk akış oranı	Hız	İvmelenme	Trafik hacmi	Kalkış kayıp süresi	Yeşil süre	Devre süresi	Model
[7]	✓	✓	✓	✓	✓			✓	Hava durumuna duyarlı ışık kontrol algoritması
[60]	✓				✓		✓	✓	Vehicle-actuated management model
[22]			✓		✓		✓		ATLC
[61]					✓		✓	✓	Akıllı Trafik Işık Kontrol algoritması
[62]			✓		✓		✓	✓	ATLC
[6]	✓	✓	✓		✓	✓	✓		Modifiye edilmi trafik ışık kontol algoritması
[63]	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	Tavlama benzetimi(SA), ATLC
[64]	✓	✓			✓	✓	✓	✓	Modifiye edilmiş trafik ışık kontol algoritması
[65]					✓		✓		ATLC çizelgeleme algoritması
[66]		✓			✓		✓		ATLC çizelgeleme algoritması
[58]		✓			✓		✓		Çok amaçlı ATLC, parça sürü algoritması(PSO)
[17]					✓		✓	✓	ATLC
[67]					✓		✓	✓	ATLC
[68]					✓		✓	✓	ATLC
[69]			✓		✓		✓	✓	ATLC
[70]			✓		✓		✓		ATLC

Faezi ve diğerleri kavşak geometrisi, trafik talebi, doygunluk akış oranı (saturation flow rate), ortalama istenen hız (mean desired speed), istenen yavaşlama/hızlanma ivmesi (desired acceleration/decleration) parametrelerini kullanarak toplam gecikme süresini optimize eden bir model önermişlerdir. Çalışmanın amacı optimal devre süresi elde etmektir. Önerilen model hava durumuna duyarlı çizelgeleme olarak isimlendirilmektedir. Önerilen modelin etkinliği VISSIM ve SYNCHRO simülasyon programları kullanılarak gösterilmiştir. Sabit zamanlı ışık modeline göre toplam gecikmelerde %2-%15 arasında azalma olduğu gösterilmiştir. Sert hava koşullarında ortalama istenen hızın %23 - %36 arasında azaldığı, doygunluk akış oranının %20- %30 arasında azaldığı, kalkış kayıp süresinin %23 arttığı yapılan istatistiksel analiz yöntemleriyle ortaya konmuştur [7].

Cakıcı vd. çalışmalarında minimum yeşil süreler dedektör konumu ve maksimum yeşil süreler, trafik hacim parametrelerini kullanarak matematiksel model tabanlı bir çözüm önermişlerdir. Farklı hava koşulları için hem yeşil ışık hem de devre süresi optimizasyonu yapmışlardır. Modelin etkinliği simülasyon ortamında test edilmiştir. Önerilen modelin ortalama gecikme süresini %15, yakıt tüketimi ve gaz emisyonunu %10 azalttığı gözlemlenmiştir [60].

Guo vd. adaptif trafik ışık kontrol algoritması önermişlerdir. Bu çalışmada acil durum araçlarının trafikteki varlığı dikkate alınmıştır. Trafik yoğunluğu, araç tipi gibi parametreler dikkate alınarak yeşil ışık süreleri ve devre süresi belirlenmiştir [22].

Alharbi vd. araç trafik yoğunluğu yüksek olan faza yeşil ışık önceliği vererek bir çözüm önerisi sunmuştur. Her faza minimum yeşil ışık süresi ataması yapılmıştır. Önerilen model ile fazlarda oluşacak uzun kuyruklar ve ortalama gecikme süresi optimize edilmiştir. Ancak kısa kuyrukların oluştuğu fazdaki araçların gecikme süresinin arttığı gözlemlenmiştir. Modelin etkinlik kriteri olarak kavşak kullanım kapasitesi dikkate alınmıştır [61].

Mao vd. serbest akış seyehat süresi (free-flow travel time), yol hız sınırı (link speed limit), yol kapasitesi (link capacity), ve şerit sayılarını girdi olarak kullanarak araç toplam seyehat süresini minimize eden yeşil ışık sürelerini belirlemişlerdir. Önerilen modelin etkinliği AIMSUN simülatöründe ölçülmüştür. Ortalama seyahat süresi yaklaşık %50 oranında azaltılmıştır [62].

Lu vd. doygunluk akış oranı, kalkış kayıp süresi, ve serbest akış hızı (free flow speed) verilerini kullanarak toplam kavşak gecikmesini minimize etmeye çalışmışlardır. Modifiye edilmiş önceden belirlenmiş ışık süresi yöntemi (Modifying pre signal timing method) kullanılarak farklı hava koşulları için sarı ışık değişimi ve kırmızı boşluk süresini belirlemişlerdir. VISSIM ve Synrcho mikroskobik simülasyon programlarını kullanarak toplam kavşak gecikmelerini %5 ile %15 arasında azaltılabileceğini göstermişlerdir. Kötü hava koşullarında ortalama araç hızlarının %16.9 ve doygunluk akış oranı %17-%25 arasında azaldığını göstermişlerdir [6].

Li vd. çalışmalarında ortalama gecikmeyi en aza indirecek döngü uzunluğu ve yeşil ışık sürelerini belirlemişlerdir. Çalışmada farklı hava koşullarının sürücüleri ve kavşak kullanımını ne düzeyde etkilediği ortaya koyulmuştur. Modelin çözümünde tavlama benzetimi kullanılmıştır. Modelin etkinliği VISSIM simülatöründe ölçülmüştür. Ortalama gecikmenin %13 ile %25 arasında azaltılabileceği gösterilmiştir. Kötü hava koşullarında kayıp zamandaki artışlar da incelenmiştir [63].

Bisht vd, minimum yeşil ışık, maksimum yeşil ışık süreleri, trafik hacmi, şerit sayısı, her altmış saniyedeki maksimum ve minimum pcu (birim yolcu arabası) sayısı parametrelerini dikkate alarak adaptif trafik çizelgeleme algoritması önermişlerdir. Önerilen algoritma ortalama gecikme süresinde %35, ortalama seyehat süresinde ise %10 iyileştirme sağlamıştır [65].

Bisht vd. çalışmalarında ambulans itfaiye gibi öncelikli araçların varlığını ve araç tiplerinin sürücü davranışları üzerindeki etkisini de dikkate alan adaptif trafik ışık çizelgeleme algoritması önermişlerdir. Araçların sağa ve sola dönüşlerdeki etki oranlarını Bisiklet 0.5 pcu, araba 1 pcu, otobüs 3.5 pcu olarak belirlenmişlerdir. Minimum yeşil ışık, maksimum yeşil ışık süreleri (sec), trafik hacmi, şerit sayısı, varış zamanı, araç tipi parametrelerini kullanarak ortalama seyahat ve gecikme süresini minimize eden yeşil ışık sürelerini belirlemişlerdir. Modelin etkinliğini göstermek için SUMO simülasyon platformunu kullanmışlardır. Önerdikleri modelin ortalama seyahat süresini %15, ortalama gecikme süresini %35 azalttığı gözlemlenmiştir [66].

Rida vd. ortalama gecikme zamanını minimize etmek için kuyruk uzunluğu en kısa olan faza öncelik veren bir algoritma önermişlerdir. Girdi parametreleri kuyruk uzunluğu, araç

gecikme zamanı, araç geliş oranı, araç kalkış oranıdır. Önerilen algoritmanın teorik olarak klasik en uzun kuyruğa öncelik veren algoritmalardan daha iyi olduğu iddia edilmiştir [17].

Yousef vd. kuyruk uzunluğu, varış zamanı, sensör uzaklığını girdi olarak kullanan ve kavşak kapasitesini arttırmaya çalışan bir algoritma önermişlerdir. Çalışmalarında acil durum araçlarının varlığı dikkate alınmıştır. Performans değerlendirmesinde önerilen algoritmanın kavşak çıktı oranını azalttığı fakat acil durum araçlarının gecikmesini ve güvenliğini arttırdığını ortaya koymuşlardır [67].

Aleko ve Djahel, kavşak etrafındaki araç akışlarının gerçek zamanlı dağılımına göre bir trafik ışığı yönetim algoritması önermişlerdir [68]. Haddad vd. trafik durumu hakkında ilgili bilgileri gerçek zamanlı olarak toplayarak trafik kalitesini iyileştirmek için faz sırasını ve yeşil ışık sürelerini dinamik olarak belirleyen yeni bir algoritma önermişlerdir. Hem Ortalama Gecikme Süresine hem de farklı faz kuyruklarındaki araç sayısına göre faz sırası belirlenmiştir. Böylece öncelik, ortalama gecikme zamanı ve kuyruk uzunluğunun en yüksek olduğu faza verilmiştir [69].

Zhou vd. adaptif bir trafik ışık kontrol algoritması önermişlerdir. Çeşitli kavşakları gerçek zamanlı olarak yönetebilen bir algoritmanın geliştirilmesini vurgulayan çalışmalara rağmen, yazarlar yöntemlerini yalnızca iki yönlü kavşaklar için test etmişlerdir. Çalışmalarında temel amaç,ortalama gecikme zamanını minimize ederken kavşak çıktı oranını maksimize etmektir [71].

Kwatirayo vd. yeni bir adaptif kontrol algoritması önermişlerdir. Asıl amaçları kavşak çıktı oranı ve ortalama gecikme süresini sürdürülebilir bir şekilde geliştirebilmektir. Trafik hacmi, araç uzunluğu, kavşak geometrik yapısı, araçlar arası boşluk, hız gibi parametreleri kullanarak SUMO simülatöründe önerilen algoritmanın etkinliği kanıtlanmıştır [70].

2.4. Sürücü Davranış Analizinin (SDA) Trafik Işık Kontrol Yönetimi Üzerindeki Etkilerine Göre Sınıflandırma

Sürücü davranış analizi (SDA), araç trafiğinde gerçekleşen olumlu-olumsuz olaylar bütününe sürücülerin etkisinin incelenmesidir. Kavşaklarda ışık kontrol planlamada sürücü davranış analizinin etkilerinin araştırıldığı makaleler daha ayrıntılı incelenmiştir. Kavşaklarda sürücü davranışlarını etkileyen sebepler 4 temel başlık altında toplanmıştır.

Bunlar; hava durumu, faz sırası değişikliği, araç tipi ve şerit ihlalleri, acil durum araçlarının varlığı, tek şerit kazaları gibi minör olaylardır.

Faz sırasındaki değişikliği inceleyen makaleler, güvenlik açısından yalnızca sinyal ayarlarının değişmesine izin verilmesinin ve aşama, faz sırasının mevcut ayarlara mümkün olduğunca yakın tutulması gerektiğini ve test edilen çerçeve planında yalnızca sınırlı uzamaya veya yeşil sürelerde azalmaya izin verilmesi gerektiğini ve herhangi bir fazın atlanması o aşama için herhangi bir araç varlığı tespit edilmese bile yasaklanması gerektiğini ortaya koymaktadır [72-74].

Tian ve Zhang, çalışmalarında çoklu kavşaklar için TRANSYT trafik modelleme yazılımını kullanarak sabit zamanlı trafik ışık planı çıkarmışlardır. Daha sonra uyarlanabilir bir trafik sinyal planı çıkarılarak, bu sabit zamanlı trafik ışık planı ile karşılaştırılmıştır. Uyarlanabilir planda güvenlik açısından faz sırası mevcut ayarlara çok yakın tutulmuştur. Şeritteki araba sayısı sıfır bile olsa faz atlanmadan o faza da süre verilmiştir. Simülasyonla yapılan canlandırmalar sonucunda uyarlanabilir trafik planının gecikme zamanını sabit zamanlı plana göre oldukça azalttığı gösterilmiştir. Çalışma ayrıca sürücü davranışı, güvenlik endişeleri ve daha kısa döngüler ve trafik değişikliklerine daha yüksek yanıt verme arasındaki ödünleşmelerle ilgili en uygun trafik planının belirlenmesi konularını dikkate almıştır [72].

Essa ve Sayed, güvenlik optimizasyonu gerçekleştirmişlerdir. Uyarlanabilir trafik ışık kontrol stratejileri ile yapılan çalışmalar genellikle, gecikme süresi/gecikme süresi veya geçen araç sayısı optimizasyonu üzerine yapılmaktadır. Bu çalışmada ise güvenlik optimizasyonu yapılmaktadır. Sürücü davranışları, serbest sürüş, yaklaşma, takip etme ve frenleme (ivmelenme) olarak 4 sınıfta kategorize edilmektedir. Bu davranışlar öğrenilerek eğitim kümesi sürekli test edilmektedir [75].

Hava durumu sürücü davranışları üzerinde oldukça etkilidir. Kötü hava koşullarında sürücüler daha yavaş hızlanma, öndeki araçla daha fazla mesafe koyma ve daha düşük hızla seyahat etme eğiliminde olmaktadırlar. Bu da daha düşük doygunluk oranlarına sebep olmaktadır [76]. Hava durumunun sürücü davranışlarına ve sinyal planına etkilerini inceleyen çalışmalar bölümün devamında incelenmiştir. Mevcut çalışmaların çoğunda trafik sinyali kontrol sistemi normal hava koşulları için tasarlanmıştır ve bu nedenle kar, yağmur

vb. doğa olaylarının yaşandığı sırada, değişen trafik modelleri ve sürücü davranışları nedeniyle güvenli ve verimli bir şekilde trafiği kontrol etmek mümkün olmamaktadır. Lu vd., hava durumuna duyarlı sinyal kontrol planı oluşturmuştur. Bu çalışmanın temel amacı, olumsuz hava koşulları altında trafik sinyal kontrolünün nasıl değiştirileceğini göstermektir. Bu çalışmada iki parametre dikkate alınmıştır. İlk olarak, kış mevsiminin iki temel trafik parametresi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu parametreler, doygunluk akış oranı ve başlangıçta kaybedilen süredir. Bu iki parametre dikkate alınarak hava durumuna duyarlı sinyal kontrol planı oluşturulmuştur. Trafik seviyesi az, orta, yoğun olarak sınıflandırılmış ve orta yoğunluk seviyesinde bu planın oldukça faydalı olduğu ortaya konmuştur. Kış koşullarının trafik yoğunluğunu %20 oranında, araçların ortalama hızlarını %30 oranında düşürdüğü kalkış kayıp sürelerinin ise %5 ile %10 arasında arttırdığı söylenmektedir [64].

Utah, Salt Lake City'de yapılan bir çalışmada, sinyalize ana yollarda doygunluk akış oranlarının, olumsuz hava koşullarında normal hava koşullarına göre yüzde 20'ye kadar daha düşük olduğu bulundu. Çamurlu havalarda ortalama hız, kuru kaplamaya göre % 30 daha düşük bulunmuştur. Başlangıç kayıp süresi, hava durumuna bağlı olarak yüzde 5 ila 10 oranında artabildiği ortaya konmuştur [77].

Kanadalı trafik mühendisleri arasında yaygın bir rehber olan Kanada Sinyalize Kavşaklar için Kapasite Kılavuzunda (CCG), kış doygunluk akış oranlarının yaz doygunluk akış oranlarından yaklaşık %5 ila % 20 daha düşük olduğu yazılmıştır [78].

Gomez ve Clempner, aşırı doygunluk, olaylardan kaynaklanan gecikmeler, hava koşullarından kaynaklanan tıkanıklık gibi faktörleri dikkate almışlardır. Bu makale, Sürekli Zamanlı Markov Oyunlarını (CTMG) kullanarak birden çok kavşak için Trafik-Sinyal Kontrolü problemini çözmek için yeni bir Pekiştirmeli Öğrenme (RL) yaklaşımı sunmaktadır [79].

Lu vd., farklı hava koşullarında yol verimliliğini ve güvenliğini arttıracak sinyal planı önermektedir. Yağmurlu ve karlı günler ve az, orta, çok şeklinde üç yoğunluk durumu için plan hazırlanmıştır. Çalışmalarının sonucunda kavşak doygunluk oranı yağmurlu ve karlı günlerde normal günlere göre %17-%25 oranında azaldığı, ortalama hızın ise yağışlı günde %16,9, karlı günde ise %23,3 oranında azaldığı ortaya konmuştur [6].

Amison vd. normal hava koşullarıyla kıyaslandığında karlı havaların doygunluk oranını %21 oranında düşürdüğü ortaya konmaktadır [80]. Maki, olumsuz hava koşulları nedeniyle ortalama hızda% 40 azalma, doygunluk akış hızında% 11 azalma ve başlatma kayıp süresinde% 50 artış bildirmektedir [81]. Perrin vd., kötü hava koşullarında doygunluk oranlarının % 20, hızların % 30 azaldığını ve kalkış kayıp sürelerinin % 23 oranında arttığını ortaya konmuştur [77].

Araç tipi ve trafik hacminin sinyal planları üzerindeki etkisini inceleyen makaleler aşağıda verilmiştir.

Tomescu vd. sürücü davranışları ile araçların veya araç gruplarının hareketi arasındaki ilişkinin analizinin sonuçlarıyla geliştirilmiş yeni bir uyarlanabilir trafik ışığı kontrol planı sunmuşlardır. Hava koşullarının normal araçların hızını 20 km/sa kadar düşürdüğü, ağır araçların ise hızlanmak için daha fazla zamana ihtiyacı olduğu ve daha düşük hıza sahip olduğu ortaya konmaktadır. Ağır araçların normal araçların hızını 15 km/sa kadar etkileyebildiği söylenmektedir [2]. Guo vd., Lu vd., Roshandeh vd., Shi vd., çalışmalarında, araç tipi ve hızının en önemli trafik parametrelerinden olduğunu ortaya koymaktadırlar [45,64,82,83].

ATLC uygulamaları çoğunlukla kavşak çıktı oranı maksimizasyonuna odaklanmaktadır. Güvenlik ve sürüş deneyimini dikkate almamaktadır. Liao vd. çalışmalarında trafik kontrol sistemindeki güvenlik ve kavşak çıktı oranını dengelemek için pekiştirmeli öğrenme tekniği ile zaman farkı cezalandırılmış trafik sinyali zamanlama yöntemini önermektedirler. İlk olarak, şerit değiştirme, arabayı takip etme, trafik ışığının önceki aşaması ve süresi dahil olmak üzere hem trafik ışıklarının hem de yol araçlarının dinamiklerini entegre etmek için bir mikrokozmik durum temsili önerilmiştir. Daha sonra 8 sinyal fazı içeren bir eylem planı hazırlanmıştır. Şerit değiştirmelerini, dayanılmaz yeşil ışık sürelerini de dikkate alarak kavşak verimliliğini arttıran adaptif bir sinyal planı oluşturulmuştur [84].

Pohana vd.'ye göre, sürücülerin kavşaklardaki davranışları, yol ve araç yoğunluğu çalışmaları ile belirlenmektedir. Çalışmanın amacı, sürücülerin davranışlarını görmek ve bir kavşakta trafik ışıklarını kontrol ederek trafiği kontrol edebilmektir. Sonuç olarak sürücü davranışlarının araç yoğunluğuna, yol genişliğine ve yeşil ışık süresinin uzunluğuna bağlı olarak değiştiği ortaya konmaktadır [85].

2.5. Trafik Işık Kontrol Yönetiminde Kullanılan Şerit Değitirme Modelleri

Trafik akışını anlamak ve trafiği daha etkin bir şekilde yönetmek için şerit değiştirme davranışlarını incelemek oldukça önemlidir. Özellikle kavşaklar gibi trafik yoğunluğunun arttığı ve hızların düştüğü noktalarda, araçların şerit değiştirme davranışları daha belirgin hale gelmektedir. Bu nedenle, farklı şerit değiştirme modellerinin incelenmesi ve analiz edilmesi, trafik akışını iyileştirmek için kritik bir öneme sahiptir. Araçların nasıl ve ne zaman şerit değiştireceklerini belirleyen matematiksel formüller ve parametreler içeren bu modeller, trafik sıkışıklığının azaltılması ve trafik yönetim stratejilerinin geliştirilmesi açısından önemli bir araç olabilir. Bu bölümdeki temel amaç, bu modellerin kavşaklardaki trafiği nasıl etkilediğini ve trafik sıkışıklığını azaltma potansiyellerini araştırmaktır. Araçların şerit değiştirme davranışını modellendiren farklı şerit değiştirme modelleri bulunmaktadır. Bu modeller, araçların nasıl ve ne zaman şerit değiştireceklerini belirleyen matematiksel formüller ve parametreler içermektedir. Sürüş teknolojilerinde şerit değiştirme kararları üzerine yapılan çalışmalar, kural tabanlı ve makine öğrenmesi tabanlı yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadır. Kural tabanlı yöntemler, önceden tanımlanmış bazı parametrelere dayanmaktadır. En yaygın olarak kullanılanlar ise yanal karar verme için MOBIL (Minimizing Overall Braking Induced by Lane Changes) [86] ve boylamsal karar verme için IDM (Intelligent Driver Model) [87]'dir. Çizelge 2.3’te bu alanda yapılan ve ayrıntılı incelediğimiz çalışmalar gösterilmektedir.

Çizelge 2.3. MOBIL, IDM şerit değiştirme modellerini kullanan çalışmalar

Yazar	*Şerit Değiştirme Modeli*	*Performans Kriteri*
Kesting vd. [86]	MOBIL	Verimlilik, güvenlik
Treiber vd. [87]	IDM	Verimlilik, güvenlik
Cui vd. [88]	MOBIL ve IDM	Verimlilik, güvenlik
Alzubaidi [89]	MOBIL	Verimlilik, güvenlik
Yuan vd.	MOBIL, ACC(adaptive cruise control)	Güvenlik
Tang vd.	MOBIL	Verimlilik, güvenlik
Zheng vd.	MOBIL, IDM	Gecikme zamanı, Seyehat süresi, güvenlik, verimlilik

Literatürde, pek çok farklı yöntem şerit değiştirme davranışını tahmin etmeye çalışmaktadır. Bu konuda yapılan ilk çalışma, 1980'lerin ortasında Gipps [90] tarafından önerilen şerit değiştirme modelidir. Yakın zamanda önerilen ve yaygın olarak tercih edilen modellerden biri ise, Kesting vd. tarafından önerilen şerit değiştirme kaynaklı genel frenlemenin en aza indirilmesi (MOBIL) modelidir. Bu model kural tabanlı yaklaşımlara dayanmaktadır [86].

Gipps'in önerdiği model, şerit değiştirme davranışının modellenmesi için ilk yöntemlerden biridir. Bununla birlikte, çok şeritli trafik modellemede en yaygın kullanılan yaklaşım, kural tabanlı MOBIL modelidir. Bu model, araçların mevcut şeridindeki hızları ile hedef şeritlerindeki hızlarının farklarını dikkate alarak şerit değiştirme davranışlarını belirlemektedir. MOBIL modeli, araçların diğer araçlarla olan takip mesafelerini de dikkate almaktadır [90].

IDM şerit değiştirme modeli ise, araçların hedef şeritlerindeki hızlarını ve takip mesafelerini dikkate alarak şerit değiştirme davranışlarını belirlemektedir. Bu model, araçların hedef hızlarına yaklaştıklarında şerit değiştirme eğiliminde olduklarını varsaymaktadır[87].

Cui vd., manuel sürüş araçlarının yanal ve boylamsal kararları için MOBIL ve IDM şerit değiştirme modellerini kullanmışlardır. Otonom sürüş araçları içinde derin takviyeli öğrenmeye dayalı model önermişlerdir. Simülasyon sonucunda otonom sürüş karar verme güvenliği ve verimliliğinin mevcut yöntemlere kıyasla arttığı ortaya konmuştur [88].

Alzubaidi vd. şerit değiştirme kararı için, derin pekiştirmeli öğrenme modeli önermişlerdir. Bu modelin etkinliğini MOBİL şerit değiştirme modeli ile kıyaslamışlardır. Güvenlik açısından fark olmamasına rağmen MOBIL modeline göre yapılan şerit değiştirmelerinin önerilen yöntemden daha uzun sürdüğü ortaya çıkmıştır [89].

Yuan vd., VSL (variable speed limit- değişken hız limit) kontrol yöntemini önermişlerdir. Amaçları, otomatik araçlar ve manuel araçların birlikte olduğu hibrit trafiklerde şerit değiştirme kaynaklı güvenlik problemlerini ortadan kaldırmaktır. Önerdikleri yöntemi MOBIL ve IDM şerit değiştirme modelleriyle karşılaştırmışlardır. VSL'nin güvenlik açısından daha iyi sonuçlar verdiği söylenmiştir [91].

Tang vd. önerdikleri derin pekiştirmeli öğrenmeye dayalı model ile MOBIL ve IDM şerit değiştirme modellerini kıyaslamışlardır. Önerilen yöntemin etkileşimli trafik ortamında güvenli şerit değiştirme manevralarında ve yüksek hızda seyir yapmada diğer yöntemlere kıyasla daha iyi sonuç verdiğini göstermişlerdir. Aynı zamanda güvenlik açısından da daha etkin bir yöntem olduğu ortaya konmuştur [44].

Zheng vd. işbirlikçi şerit değiştirme stratejisi önermişlerdir. Modelin etkinliğini, seyehat süresi, trafik akış verimliliği, güvenlik açısından ele almışlardır. MOBIL ve IDM şerit değiştirme modelleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Önerilen modelin mevcut şerit değiştirme modellerinden daha etkin olduğu ortaya konmuştur [92].

3. TRAFİK IŞIK KONTROL SİSTEMLERİNDE TEMEL KAVRAMLAR

Trafik ışık kontrol sistemlerinde optimizasyon işlemlerinin daha iyi anlaşılabilmesi için bazı trafik terimlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu bölümde genel trafik ışık kontrol sistemlerini oluşturan temel bileşenler açıklanmıştır [2, 93].

3.1. Sinyalizasyon Terimleri

Devre süresi, kavşaktaki her akıma en az bir kez geçiş hakkının verildiği toplam süredir. Sinyalize bir kavşakta ışıkların bir tam devir yapacak şekilde sıra ile yanıp söndüğü saniye olarak toplam süredir. Yani, trafik akımları için ayrılan yeşil süreler ile yeşiller arasındaki sürelerin (kayıp zaman) ve koruma sürelerinin toplamından oluşmaktadır.

Akım, belirli bir noktadan belirli bir zaman diliminde geçen araç sayısını ifade etmektedir. Kritik akış, belirli bir kavşakta optimum trafik akışını sürdürebilmek ve trafiği etkili bir şekilde yönetebilmek için dikkate alınan ana yol veya yollar üzerindeki araç akışını ifade etmektedir. En genel haliyle, her fazın maksimum yoğunluğunun doygun akım oranına bölünerek bulunmaktadır.

Faz, kavşakta en az bir ya da daha fazla akıma geçiş hakkı verilen süredir. Bir akımın ilk yeşil yanmaya başladığı andan sonraki akımın yeşil almasına kadar geçen süre bir fazdır. Faz düzeni (Akım düzeni), kavşaktaki akımların tümünün kavşaktan geçmesini sağlayan, akımların geçiş sırasını belirleyen düzenlemedir. Akan akımların oklar ile duran akımların düz çizgiyle gösterildiği, akımların kavşaktan hangi sırada geçeceklerini gösteren temsili resimlerdir. Seçilecek faz sistemi, kavşak kollarındaki trafik hacmine, kavşağın geometrik yapısına, kavşağa giriş yapan kol sayısına, kavşakta dönüş yapan akımların sayısına ve kavşakta kesişen akımlara bağlıdır. Yeşil süre, bir fazda yeşil ışığın verildiği süredir. Yani bir yönde hareket eden akıma geçiş hakkı verilen süredir.

Etkili yeşil süresi veya etkin yeşil zaman, hiçbir kayıp olmadığı ve yeşil sürenin araçlar tarafından etkin bir şekilde kullanıldığı zamandır. Yeşiller arası süre, bir fazın yeşil ışık süresinin sonlandırılıp bunu takip eden fazın yeşil ışık süresinin başlatılması arasındaki süredir. Yeşiller arası süreler, sarı süreler ile her yöne kırmızı süreleri kapsayan sürelerdir. Kavşaktaki akımlardan birine verilen yeşil ışığın bittiği andan diğer faz için yeşil sinyalin

verilmeye başladığı ana kadar geçen süreye yeşiller arası süre denir. Bir devre süresi içindeki toplam kayıp süre, her faza ait sarı süreler, koruma süreleri ve her yöne kırmızı sürenin toplamıdır.

Kalkış kayıp süresi, HCM'de açıklandığı gibi, kalkış kayıp süresi, ilk dört aracın hareket etmesinden kaynaklanan toplam zaman kaybını ifade etmektedir. Çalışmalarda bu sürenin hava koşulları kötüleştikçe ortalama %10 oranında arttığı ortaya konmuştur. Sarı süre, bir fazda sarı ışığın verildiği süredir. Sarı ışıklı sinyalin amacı sürücülere, geçiş hakkının sona ermek üzere olduğunu bildirmektir. Bu ışık, kavşağa uzak mesafede olan sürücülerin duruşa geçmelerini, duramayacak kadar yakınlaşmış olanların da güvenle geçerek kavşağı boşaltmalarını sağlamayı amaçlar. Sarı sürelerin uzunluğu taşıtların sinyalize tesise yaklaşım hızlarına bağlı olarak belirlenir. Kırmızı süre, bir fazda kırmızı ışığın verildiği süredir.

Koruma süresi, geçiş hakkı sona eren bir yönden kavşağa giren ve kavşağı boşaltan son taşıt ile bundan sonraki fazda kavşağa girecek ilk taşıtın, kesişme noktasında çarpışmamaları için fazlar arasında bırakılması gereken ve yeşiller arası sürenin bir bölümünü oluşturan, tüm fazlara kırmızının yandığı zamandır. Kırmızı+Sarı süre, bir kavşakta herhangi bir yöne yeşil ışıkla geçiş hakkı verilmeden önce, harekete geçecek taşıtların hazırlanmaları ve zaman kaybetmelerini önlemek üzere, kırmızı ışıkla beraber sarı ışığın da yakıldığı süredir.

Devre süresi hesaplanırken bu sürenin belirlenmesi için ayrıca bir hesap yapılmaz (genellikle 2-3 saniye olarak alınır), bu süre kırmızı ışık süresi içindedir. Bekleme/gecikme süresi, bir aracın yolda sinyalizasyon, kavşak yapısı, kaza vb. durumlarından dolayı ne kadar zaman kaybettiğini ifade etmektedir. Trafik kontrol sistemlerinde performans değerlendirme kriterlerinden biridir. Kavşak kapasitesi, herhangi bir yol veya kavşaktan birim zamanda geçebilecek maksimum araç sayısıdır. Trafik sinyali, taşıt veya yaya trafiğini düzenleyen ışıklı ve/veya sesli sistemdir.

3.2. Yol Yapısıyla İlgili Terimler

Yollar, bağlantılar, şeritler gibi trafik altyapısının temel unsurlarını ifade etmektedir. Anayol, genellikle şehirleri, bölgeleri veya ülkeleri birbirine bağlayan, uzun mesafeli ulaşımın ana arterlerinden biridir. Kavşak, yolların kesiştiği noktadır. Kavşaklarda

genellikle trafik ışıkları bulunur ve bu ışıklar aracılığıyla trafik düzenlenir. Izole kavşak, kara yolu ağında diğer kara yollarından fiziksel olarak ayrılan ve genellikle trafik sinyalizasyonu ile kontrol edilen kavşaklardır. Araç trafiğini daha kontrollü bir şekilde yönlendirmek ve yaya güvenliğini artırmak için tasarlanmıştır. Genellikle karmaşık kara yolu ağlarında, yüksek trafik yoğunluğuna sahip bölgelerde veya büyük şehirlerde bulunmaktadır. Doygun akım, belirli bir yoldaki trafik yoğunluğunun, o yoldaki kapasiteye ulaştığı veya üzerine çıktığı bir durumu ifade eder. Başka bir deyişle, doygun akım, bir yolun belirli bir zamanda taşıyabileceği maksimum trafik miktarına ulaşıldığında ortaya çıkar.

Doygun akım oranı, bir yolun belirli bir zaman diliminde taşıyabileceği maksimum trafik akımı ile mevcut trafik akımı arasındaki oranı ifade eder. Eğer doygun akım oranı yüksekse, yani mevcut trafik akımı yolun taşıma kapasitesine yaklaşıyorsa veya aşıyorsa, bu durum trafik sıkışıklığı, uzun kuyruklar ve artan seyahat süreleri gibi sorunlara neden olabilir. Doygun akış hızı, bir yolun veya bir şeridin maksimum kapasitesine ulaştığı durumda, bu kapasitenin sürdürülebilen en yüksek ortalama hızını ifade eder. Yani, doygun akış hızı, trafik yoğunluğunun en üst seviyeye çıktığı bir durumda, bu yoğunluğa rağmen sürücülerin koruyabildikleri ortalama hızı temsil eder. Doygunluk derecesi, bir yolun veya bir şeridin trafik kapasitesine ne kadar yaklaşıldığını veya bu kapasitenin üzerine çıkıldığını ölçen bir kavramdır. Genellikle bir yüzde olarak ifade edilir ve belirli bir zaman dilimindeki gerçek trafik akımının, o yolun taşıma kapasitesine oranını gösterir. Doygunluk ilerlemesi, bir yolun veya bir şeridin taşıma kapasitesine ulaştığı durumda, araçlar arasındaki mesafenin zaman cinsinden değerini ifade eder.

3.3. Performans Ölçütüne Dayalı Terimler

Bekleme/gecikme süresi, bir aracın bir kavşakta veya bir yol üzerinde belirli bir noktada hareket etmeye başlaması için geçen süreyi ifade etmektedir. Seyahat süresi, kavşaktan geçen bir aracın veya sürücünün başlangıç noktasından varış noktasına ulaşana kadar geçen zamanı ifade etmektedir.

Araç hızı, bir aracın belirli bir zaman diliminde katettiği mesafeyi ifade eden bir ölçümdür. Sürücülerin ve trafik mühendislerinin trafik akışını değerlendirmeleri, güvenli sürüş koşullarını belirlemeleri ve trafik yönetimi ile ilgili kararlar almaları için önemli bir parametredir.

Araç hızı, trafik kuralları ve güvenlik standartlarına uygun bir şekilde sürüşü değerlendirmek, trafik akışını düzenlemek ve hız sınırlarını belirlemek açısından önemlidir. Ayrıca, trafik yönetimi ve planlaması süreçlerinde de dikkate alınan bir faktördür. Kuyruk uzunluğu, bir kavşağın önündeki yollarda bekleyen toplam araç sayısını ifade eder. Bu ölçüm, trafik sinyal kontrol algoritmalarının etkinliğini değerlendirmek için kullanılan önemli bir parametredir. Ayrıca, araçların durma sayısı veya gecikmesi ile ilişkilidir ve genellikle bu performans ölçütleriyle birlikte değerlendirilir.

Durma sayısı, kavşaktaki araçların trafik sinyallerine göre durmalarını ifade etmektedir. Kavşaklarda trafik sinyal kontrolleri genellikle yeşil, sarı ve kırmızı ışıkları içermektedir. Durma sayısı, bu sinyallerin araç trafiğini yönlendirmesi sonucunda, sürücülerin araçlarını durdurmalarının toplam sayısını temsil etmektedir. Dolayısıyla, bir kavşakta durma sayısı, trafik akışının düzenlenmesi ve kavşaktaki araçların etkili bir şekilde yönetilmesi açısından önemli bir performans ölçütüdür. Düşük durma sayısı, trafik akışının daha verimli ve sürekli olduğunu gösterirken, yüksek durma sayısı, trafik sıkışıklığı ve sürücülerin gecikmek zorunda kaldığı anlamına gelmektedir.

Kavşak çıktı oranı, genellikle yeşil ışığın yandığı süre içinde kavşaktan geçen araç sayısı ile toplam geçen araç sayısının oranı olarak ifade edilmektedir. Yüksek bir kavşak çıktı oranı, trafik akışının düzenli ve etkili olduğunu, sürücülerin minimum durma süresiyle kavşaktan geçebildiklerini göstermektedir.

4. SİMÜLASYON PLATFORMU

Araç trafiğini, rotalama süreçlerini, hareketliliği ve trafik akışı optimizasyonunu değerlendirmek üzere çeşitli simülasyon araçları geliştirilmektedir. Seçilen herhangi bir simülasyon aracı, temelde kesişim mimarisini, trafik verilerini ve yönlendirme yöntemlerini kapsamak durumundadır. Bununla birlikte, bu simülasyon aracı ayrıca elde edilen sonuçları, istatistikleri, grafikleri vb. anlamlı ve detaylı bir çıktı biçiminde sunabilmelidir.

Önerilen metodolojilerin pratikte uygulanarak elde edilmesi, genellikle yüksek maliyetli, zaman alıcı ve zahmetli bir süreci içermektedir. Bu sebeple, genel araştırmaların önemli bir bileşeni olan simülasyonlar, önerilen metodolojilerin etkinliğini değerlendirmede yaygın olarak kullanılmaktadır. Önerilen yöntemin etkililiğini göstermek adına, çeşitli test senaryolarını simüle etmek üzere farklı simülasyon platformları kullanılmaktadır. Seçilen simülasyon platformunun en önemli özelliği, yol durumunu ve trafik talebini gerçeğe uygun bir şekilde taklit edebilmesidir. Simülasyon platformunun ve temel tanımlamanın bir özeti Çizelge 4.1'de sunulmaktadır.

Çizelge 4.1.İncelenen makalelerde kullanılan simülasyon platformları ve kısa açıklamaları

Simülasyon Platformu	*Tanımı*	*Ulaşılabilirlik*	*Sıklık*
SUMO [56]	Kentsel Hareketliliğin Simülasyonu (SUMO), büyük yol ağlarını idare etmek için tasarlanmış mikroskobik ve sürekli bir karayolu trafik simülasyon paketidir.	Açık Kaynak	16
VISSIM [57]	VISSIM, kentsel trafik ve toplu taşıma operasyonlarını modellemek için geliştirilen mikroskobik, zaman aşamalıve davranış temelli bir simülasyon modelidir. Harici bir programdan COM (bileşen nesne modeli) komutları çalıştırarak VISSIM'deki bazı görevleri otomatikleştirmek mümkündür.	Ticari	3
MATLAB [59]	MATLAB, algoritma geliştirme, veri görselleştirme, veri analizi, sayısal hesaplama için etkileşimli bir ortam ve üst düzey bir teknik kullanabilen hesaplama dilidir.	Ticari	9
ANYLOGIC [60]	Farklı simülasyon metodolojilerini (sistem dinamikleri, kesikli olaylar, ajan tabanlı) aynı modelde birleştirebilme imkanı veren simülasyon modelidir.	Açık Kaynak	1
CITY FLOW [61]	Büyük ölçekli şehir trafiği senaryosu için çok ajanlı bir pekiştirici öğrenme ortamıdır. Her aracın davranışını taklit eden ve en üst düzeyde ayrıntı sağlayan mikroskobik trafik simülatörüdür.	Açık Kaynak	1
VEINS [62]	Araç ağı simülasyonlarını çalıştırmak için bir çerçevedir. İki tanınmış simülatöre dayanmaktadır: OMNeT ++ ve SUMO.	Açık Kaynak	1

İncelenen çalışmalarda en çok kullanılan simülasyon aracı SUMO'dur. İncelenen makalelerin %38'inde bu simülatör kullanılmaktadır. Açık kaynak olması hem mikroskobik hem de sürekli olayları simüle edebildiği için daha çok tercih edilmektedir.

4.1. SUMO (Simulation of Urban Mobility -Kentsel Hareketin Simülasyonu) Kullanımı

SUMO (Simulation of Urban Mobility), trafik simülasyonları için kullanılan açık kaynaklı bir yazılımdır. Bu simülatör, şehir içi hareketliliğin mikroskobik düzeyde modellemesine odaklanmaktadır ve çeşitli trafik senaryolarını analiz etme imkanı sunmaktadır.

SUMO'nun temel özellikleri, mikroskobik modelleme yapabilmesi, araçlar arası etkileşimi dikkate alabilmesi, açık kaynaklı, kolay erişilebilir olması, farklı çıktı formatlarını desteklemesidir. Mikroskobik modelleme, her bir aracın, yayaların ve diğer taşıma birimlerinin davranışlarını ayrıntılı bir şekilde modelleyerek, şehir içi trafiği mikroskobik

düzeyde simüle edebilmesini ifade etmektedir. Araçlar, kavşaklar, yollar ve diğer trafik unsurları arasındaki etkileşimleri gerçekçi bir şekilde yansıtarak, karmaşık trafik durumlarını modelleyebilmektedir. SUMO'nun kaynak kodu açık, erişilebilir ve değiştirilebilirdir. Bu, araştırmacıların ve geliştiricilerin ihtiyaçlarına göre özelleştirmeler yapabilmelerini sağlamaktadır. Simülasyon sonuçları, farklı çıktı formatlarında alınabilmektedir. Bu, araştırmacıların analizlerini yapmalarını ve sonuçları değerlendirmelerini kolaylaştırmaktadır.

SUMO, altyapı düzenleyicisi (NETEDIT) ve trafik kontrol arayüzü (TraCI) içeren bir yazılım paketi sağlamaktadır. Bu paketler, kullanıcının karayolu altyapısına yeni ağlar tasarlamasına, uygulamasına ve trafik simülasyonu sırasında veri alışverişi yapmasına olanak tanımaktadır [94].

TraCI, simülasyon çalışma süresi sırasında araçların davranışını kontrol etmek için kullanılmaktadır [94]. Bu teknik, araçların simülasyon içindeki hareketlerini izleme, kontrol etme ve etkileşime geçme yeteneği sağlar. Yani, TraCI, simülasyon sırasında dinamik bir şekilde araçların konumlarını, hızlarını ve diğer özelliklerini izleyerek ve gerektiğinde bu araçların davranışlarını etkileyebilmektedir. Bu, kullanıcının simülasyonu gerçek zamanlı olarak gözlemlemesini ve müdahale etmesini mümkün kılar, bu da daha etkili ve özelleştirilebilir trafik simülasyonlarına olanak tanımaktadır.

4.1.1. Ağ dosyası

Trafik simülasyonlarında ağ dosyaları, şehir içi ulaşım sistemlerini modellemek ve analiz etmek amacıyla kritik öneme sahiptir. Bu ağ dosyaları, genellikle karmaşık bir yol ağı, kavşaklar, yollar ve bağlantıları içermektedir. İlk olarak, simülasyon yapılacak alanın haritasının detaylı bir şekilde çıkarılması gerekmektedir. Bu harita, şehir içindeki farklı yolların, kavşakların ve bağlantı noktalarının konumlarını içermelidir.

Ardından, oluşturulan haritaya dayanarak belirli rota dosyaları hazırlanmalıdır. Bu rota dosyaları, simülasyon içinde hareket edecek araçların belirli rotalarda seyahat etmelerini sağlamaktadır. Rota dosyaları, simülasyonun gerçekçiliğini artırmak ve çeşitli senaryoları modellemek açısından çok önemli bir rol oynamaktadır.

Oluşturulan harita ve rota dosyalarına dayanarak, kavşaklar ve bağlantı noktaları gibi önemli unsurların tanımlandığı bir ağ dosyası oluşturulur. Bu ağ dosyası, trafik akışını düzenlemek, önceden belirlenmiş rotalara göre araçları yönlendirmek ve çeşitli trafik kontrol stratejilerini uygulamak amacıyla kullanılır.

Bu süreç, trafik simülasyonlarının gerçekçi ve etkili bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için temel bir adımdır. Araştırmacılar ve planlamacılar, bu ağ dosyalarını kullanarak şehir içi trafik sistemlerini anlamak, optimize etmek ve çeşitli senaryolar üzerinde analiz yapmak için bir temel elde ederler. Bu nedenle, trafik simülasyonlarının başarılı bir şekilde yürütülebilmesi için ağ dosyalarının doğru bir şekilde oluşturulması ve kalibre edilmesi büyük önem taşımaktadır.

SUMO ağ dosyalarını oluşturmanın çeşitli yöntemleri bulunmaktadır. Bu yöntemlerden biri, belirli bir ağı tanımlayan XML dosyası kullanarak ağ dosyasını oluşturmaktır. Diğer bir yöntem ise, SUMO dışındaki kaynaklardan, örneğin OpenStreetMap gibi, alınan ağ verilerini içe aktararak SUMO ağını oluşturmaktır. Ancak, bu yöntemle oluşturulan ağ dosyasının gerçek dünya ağına tam olarak uyumlu olabilmesi için bazı değişikliklere ihtiyaç duyulabilmektedir. Bu nedenle, SUMO'da ağları oluşturmak ve düzenlemek için NETEDIT adlı bir araç kullanılmaktadır.

4.1.2. Rota dosyaları

SUMO'da rota dosyaları, şehir içi ulaşım sistemlerinin simülasyonu için önemli bir bileşeni oluşturmaktadır. Bu dosyalar, belirli bir zaman diliminde farklı güzergahlarda seyahat eden araç taleplerini tanımlayarak simülasyonun gerçekçiliğini artırmak için kullanılmaktadır.

İlk olarak, simülasyon yapılacak bölgenin ve trafiğin karakteristiklerinin belirlenmesi gereklidir. Bu aşamada, yoğun trafik bölgeleri, önemli kavşaklar ve araçların sıklıkla seyahat ettiği güzergahlar dikkate alınır. Ardından, bu bilgileri temel alan bir talep modeli oluşturulmalıdır. Talep modeli, belirli bir bölgedeki güzergah taleplerini ve bu taleplerin zaman içindeki değişimini açıklamaktadır. Bu model, belirli bir zamanda belirli güzergahları tercih eden araç sayısını içermelidir. Rota dosyaları, genellikle XML formatında olup, belirlenen talep modeline göre düzenlenmektedir. Bu dosyalar, her bir aracın başlangıç ve varış noktalarını, hareket zamanlarını ve tercih edilen güzergahları içermektedir.

Ayrıca, rota dosyalarının oluşturulmasında kullanılan senaryoya özgü parametreler belirlenmelidir. Bu parametreler, simülasyonun belirli koşullara uygun olmasını sağlamaktadır. Senaryoya özgü parametreler, SUMO'da kullanılan rota dosyalarını belirlerken dikkate alınması gereken özel faktörlerdir. Bu parametreler, simülasyon senaryosunun özelliklerine ve araştırma amaçlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bunlar yoğunluk, araçların başlangıç bitiş noktaları, hareket zamanları, tercih edilen güzergah, araç türleri ve özellikleri, olaylar, acil durumlar, senaryo süresi, sürücü yetkinlikleri, hız, ivmelenme, araçlar arası boşluk, kalkış kayıp süreleridir.

Yoğunluk, Belirli bir bölgede veya yol ağında talep yoğunluğu, belirli bir zaman diliminde kaç aracın trafiğe katılacağını belirlemektedir. Bu parametre, belirli bir saate veya günün belirli bir zaman dilimine göre değişkenlik göstermektedir. Başlangıç ve varış noktaları, araçların başlangıç ve varış noktalarını ifade etmektedir. Bu noktalar, simülasyonun odaklandığı bölgeye ve araştırma sorularına göre özenle seçilmelidir. Hareket zamanları, araçların belirli bir zaman diliminde trafiğe katılma veya ayrılma zamanlarını ifade etmektedir, simülasyonun zaman çerçevesini belirlenmektedir. Tercih edilen güzergâhlar, araçların kullanabileceği tercih edilen güzergâhlar belirlenmektedir. Bu, belirli yolların veya kavşakların tercih edilmesini sağlamaktadır. Farklı araç tipleri ve özellikleri, simülasyonun belirli özelliklere odaklanmasına ve özel durumları modellemesine yardımcı olmaktadır.

Araçların uzunluğu hızı ivmelenme durumu, kalkış kayıp sürelerinin etkilerinin tanımlanabildiği yerdir. Olaylar ve engeller, simülasyona dâhil edilecek olaylar veya engeller belirlenebilir. Bu, acil durum senaryolarını veya özel koşulları modelleme imkânı sağlamaktadır. Senaryo süresi, Simülasyonun çalışma süresi de bu dosya içinde belirlenmektedir. Bu, belirli bir zaman dilimini veya olayı modellemek için senaryonun başlangıç ve bitiş tarihlerini ifade etmektedir. Bu, belirli bir günün belirli bir saatindeki trafiği modellendirme esnekliği sağlamaktadır.

4.1.3. SUMO adımları

İlk olarak, SUMO'nun en son sürümü resmi web sitesinden indirilmiş ve kurulmuştur. Komut satırı üzerinden "netedit" komutu kullanarak NETEDIT aracı aktive edilmiştir. Daha sonra kavşak yapısı modellenmeye başlanmıştır. Harita üzerinde kavşaklar oluşturulmuş ve bu kavşakları birbirine bağlayan yollar belirlenmiştir. Ele alınan kavşakların geometrik

özellikleri NETEDIT aracı sayesinde tanımlanmıştır. Araçların seyahat edeceği yolları ve bu yollar arasındaki mesafeler belirlenmiştir. NETEDIT aracı üzerinden "Add Detector" seçeneği ile dedektörler kavşak ve yollar üzerine yerleştirilmiştir.

SUMO simülasyonu başlatılarak, TraCI arayüzünü aktive edebilmek için gerekli kod PYTHON yazılım dili kullanılarak yazılmıştır ve bu sayede araçların dinamik davranışları gözlemlenerek anlık müdahaleler yapılmıştır. Dedektörlerden elde edilen veriler anlık olarak izlenmiş ve ihtiyaç duyulması halinde gerekli değişiklikler yapılmıştır.

Bu adımlar, trafik simülasyonu oluşturmak ve dedektör kullanarak kavşak yapısını analiz etmek amacıyla NETEDIT ve TraCI arayüzlerini kullanmak üzerine tasarlanmıştır. Bu süreç, trafik yönetimi ve kontrolü alanındaki tez çalışmanızın metodolojik çerçevesini oluşturacak temel adımları içermektedir.

5. PROBLEM TANIMI VE ÖNERİLEN MODELLER

Trafik kontrol sistemlerinin temel unsurları, trafik ışığı planları, devre süreleri, faz sıralamaları, yeşil ışık süreleri ve bitişik kavşaklar arasındaki trafik ışığı senkronizasyonunu içermektedir. Şehirlerde, genellikle iki ana tip trafik ışığı kontrol sistemi bulunmaktadır: statik plan kontrolü ve adaptif kontrol. Statik plan kontrolü, yeşil ışığın aynı süre boyunca tekrarlanan bir dizi aşamayla devam etmesine izin verir ve genellikle daha ekonomiktir, ancak teknolojik olarak daha eski bir yöntemdir. Diğer yandan, adaptif kontrol sistemleri, trafik değişikliklerine gerçek zamanlı olarak tepki verir ve daha modern bir yaklaşım sunmaktadır [95].

5.1. Problem Tanımı

Artan ulaşım ihtiyaçlarına cevap verebilmek, yoğun bir taşıt trafiği sonucunu doğurmaktadır. Sürekli artan trafik hacimleri gerek kentlerde, gerekse kentler arasında, yol ağlarının artmasına ve yayılmasına yol açmaktadır. Yol ağlarının yayılması, farklı trafik akımlarının çatışmalarını kaçınılmaz kılmaktadır. Bu çatışmaları düzenlemek amacıyla kavşaklar yapılmaktadır [1]. Akıllı Ulaşım Sistemlerinin en önemli parçalarından birisi de bu kavşaklardır. Akıllı Sinyalize Kavşak Yönetim Sistemleri sayesinde trafik akışı nispeten daha kolay kontrol altına alınmaktadır. Bu akıllı sinyalize kavşaklara sabit sinyalizasyon süreleri yerine yoğunluklara bağlı olarak dinamik süreler atanmakta ve bununla birlikte, araçların trafikte gecikme süreleri, egzoz emisyon miktarları, yakıt tüketimi asgariye indirilerek verimlilik artışı sağlanmaktadır.

En önemli Aktif Trafik Yönetimi (ATM) stratejilerinden biri olan Uyarlanabilir (Adaptif) Trafik Sinyali Kontrolü (ATSC), dinamik trafik talebine yanıt olarak sinyal zamanlamasını ayarlayarak sinyalize ana yolların ve şehir yollarının trafik verimliliğini artırmaya yardımcı olmaktadır. Ancak, uygulama durumundaki ATSC'lerin güvenlik etkileri tutarlı değildir. Bazı araştırmalar, ATSC'lerin kurulumunun kaza sayısını azalttığını göstermektedir.

Bu çalışmanın ana odak noktası, Akıllı Trafik Sinyal Kontrol (ATSC) algoritmalarının trafik verimliliğini artırmak ve güvenliği sağlamak amacıyla geliştirilmesinde ortaya çıkan belirli zorlukları ele almaktadır. Geleneksel sinyal kontrol yöntemleri ile karşılaştırıldığında, ATSC algoritmalarının trafik verimliliğinde belirgin bir artış sağlayabildiği, ancak aynı

zamanda güvenlik konularına odaklanmada tutarsızlıklar olduğu belirtilmektedir. Özellikle, ATSC algoritmalarının sadece verimlilik odaklı olmalarının, trafik güvenliğini olumsuz etkileyebileceği görülmüştür.

Mevcut literatürde genellikle ATSC algoritmalarının trafik verimliliği üzerindeki etkileri ele alınmış, ancak güvenlik boyutu genellikle ikinci plana atılmıştır. Bu çalışma, ATSC algoritmalarının sadece trafik verimliliğini değil, aynı zamanda güvenliği de optimize etmeyi amaçlamaktadır. Özellikle sürücü davranışlarını dikkate alarak, algoritmaların sadece kuyrukları azaltmak veya gecikmeyi en aza indirmek yerine aynı zamanda trafik çatışmalarını önleme ve güvenliği artırma amacını taşıdığını vurgulamaktayız.

Ayrıca, bu çalışma, Sürücü Davranış Analizi (SDA) ile birlikte ATSC algoritmalarının etkisini değerlendirerek, sadece maddi maliyetleri değil, aynı zamanda zaman, güvenlik, çevresel etkiler gibi geniş bir perspektifi ele almaktadır. Sürücü davranışlarını analiz ederken sürücü, araç, yol geometrisi ve çevresel faktörlerin etkileşimini ele alarak daha kapsamlı bir yaklaşım benimsenmiştir.

Son olarak, bu çalışma, adaptif trafik ışık kontrol sistemlerinin tasarımında dikkate alınması gereken çevresel ve teknik parametreleri göz önünde bulunduran bir öneri sunmaktadır. Geliştirilen Kavşaklar için Verimli Dinamik Adaptif Trafik Işığı Kontrol Algoritması (EDATLC), literatürde yaygın olarak kullanılan yöntemlerle karşılaştırılarak etkinliği gösterilmektedir. Önerilen modelin detayları ve performans değerlendirmesi verilmektedir. Hava durumu, araç tipi ve hatalı şerit kullanım oranı gibi çeşitli faktörler dikkate alınarak, akıllı sinyalize kavşaklarda yeşil ışık süresi optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Önerilen model, mevcut durum ve yaygın olarak kullanılan Webster yöntemi ile karşılaştırılmış ve gösterdiği etkinlik öne çıkarılmıştır.

Çalışmaların tümü, SUMO mikroskobik simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir, bu da önerilen algoritmaların çeşitli trafik senaryolarında test edilebilirliğini sağlamaktadır. Daha sonra, KUTEM'den verilerini temin ettiğimiz Polatlı Refik Cesur kavşağının üzerinde algoritmanın etkinliği somut bir şekilde gösterilmiştir, bu da önerilen modelin gerçek dünya koşullarında başarılı bir şekilde uygulanabilirliğini vurgulamaktadır.

Webster ve modifiye Webster tabanlı KKA (Karınca Kolonisi Algoritmaları) önerisi, dört kollu bir kavşaktaki trafik ışıklarının kontrolü için akıllı denetleyicilerin uygulanmasını içermektedir.

Ayrıca, araç kuyruk uzunluğu dikkate alan bir Bulanık Mantık denetleyicisi önerilmiştir. Bu denetleyici sayesinde faz sırası belirlenmiştir. Daha sonra, gecikme süreleri ve kuyruk uzunluğu verilerini işlemek için ANFIS kullanılarak yeşil trafik ışıklarının uzatılma süresi belirlenmiştir.

Çeşitli trafik senaryolarında uygulanan önerilen algoritmaların orijinal veri üzerindeki performansı değerlendirilmiş ve bu algoritmalar arasında yapılan karşılaştırmalarla öne çıkan avantajlar belirlenmiştir. Bu sonuçlar, önerilen modelin trafik sinyal kontrol sistemlerinde etkili bir şekilde kullanılabilecek potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

5.2. Hava Koşulları ve Sürücü Davranışlarının Kavşaklarda Oluşan Trafik Üzerindeki Etkileri

Herhangi bir hava durumuna duyarlı trafik yönetim stratejisi geliştirebilmek için ilk adım, sürücülerin çeşitli hava koşullarında nasıl farklı davrandığını anlamaktır [6]. Optimum trafik sinyali zamanlama ayarları, geçerli trafik akış düzenlerinden ve sürücü davranışlarından etkilenmektedir. Örneğin, yağışlı havalarda sürücüler daha yavaş araç kullanacağından, daha yavaş durma, hızlanma eğilimi göstereceğinden kavşak doygunluk akış oranı daha düşük olacaktır.

Mevcut durumu, Webster yöntemini ve önerilen modeli simüle etmek için kavşak optimizasyonunu etkileyen, ortalama hız, hızlanma/yavaşlama ivmesi, doygun akım, kalkış kayıp süresi ve araç tipi tanımlanmış ve etki oranları literatür destekli olarak aşağıda açıklanmıştır.

Ortalama Hız: Araçların kavşağa girişinden güvenli bir şekilde çıkışına kadar sahip olunan ortalama hızdır. Islak zeminlerde sürücüler araçlarını kuru zemine göre daha düşük hızda kullanmaktadır. Faezi ve Dolabati'ye göre sürücüler araç hızlarını kuru zeminlere göre %30'a kadar düşürmektedir [7].

Hızlanma/yavaşlama ivmesi: Araçların hızının zamana bağlı değişim oranıdır. Araçların kavşaklara yaklaşırken yavaşlama, kavşaktan çıkarken hızlanma oranıdır. Islak zemin, yol yüzeyi ile lastikler arasındaki sürtünmeyi azaltmaktadır, bu nedenle sürücüler, kuru zemin koşullarına kıyasla daha düşük ivmeler ile hızlanmakta veya yavaşlamaktadır. Özellikle kavşaklarda sola-sağa dönüşlerde sürücüler, savrulmayı önlemek için ivmelenmeyi azaltmaktadırlar. Kötü hava koşullarının sürücülerin araç kullanımı üzerindeki etkileri Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

Doygunluk akış oranı: Işıklı bir kavşakta şeritteki ışığın yeşil olduğu sürede kavşaktan geçebilecek araç sayısıdır. Başka bir ifade ile kavşak kolunda sürekli bir kuyruk bulunması ve ışığın bir saat süreyle yeşil yanması durumunda bir şeritten geçebilecek olan en yüksek araç sayısıdır. Doygunluk akış oranını elde etmek için minimum 30 devre süresi incelenmelidir [7]. h_s, saniyedeki doygunluk ilerlemesini ifade etmektedir. s, doygunluk akış oranı, t_i araçlar arasındaki zaman farkını ifade etmektedir [96].

$$s = \frac{3600}{h_s} \tag{5.1}$$

$$h_s = t_i - t_{i-1} \tag{5.2}$$

Kalkış kayıp süresi: HCM'de açıklandığı gibi, kalkış kayıp süresi, ilk dört aracın hareket etmesinden kaynaklanan zaman kaybının toplamı olarak hesaplanır. Çalışmalarda bu sürenin hava koşulları kötüleştikçe ortalama %10 oranında arttığı ortaya konmuştur [97].

Çizelge 5.1.Kötü havanın sürücü davranışı üzerindeki etkisi

Ref.	*Doygunluk akış oranı (%) azalış*	*Ortalama hız(%)azalış*	*Kalkış kayıp süresi (%)artış*
[6]	17	17	6
[98]	12	23	21
[96]	17-25	35	16.9
[97]	2-24	30	23
[77]	20	30	5-10
[78]	5-20	-	-
[99]	13	-	30
[100]	17-25	16.9	23.3

Araç tipi: Kavşaklara giren araç tipleridir. Farklı araç tiplerinin kavşaktan geçiş süreleri boyutu, ağırlığı, motor gücü vb. sebeplerden farklılık göstermektedir [66].

Her bir araç tipinin kavşaktan geçiş süreleri yolcu arabası cinsinden ifade edilmiştir ve Çizelge 5.2'de gösterilmiştir. Pcu (passenger car unit) değerleri SUMO'da hesaplanmıştır.

Çizelge 5.2.Birim yolcu arabası (pcu)

Zemin türü	Araç tipi	Düz	Sağa dönüş
Kuru	Yolcu arabası	1	1
	Ağır araç	1.63	1,9
Islak	Yolcu arabası	1,13	1,13
	Ağır araç	1,81	2,12

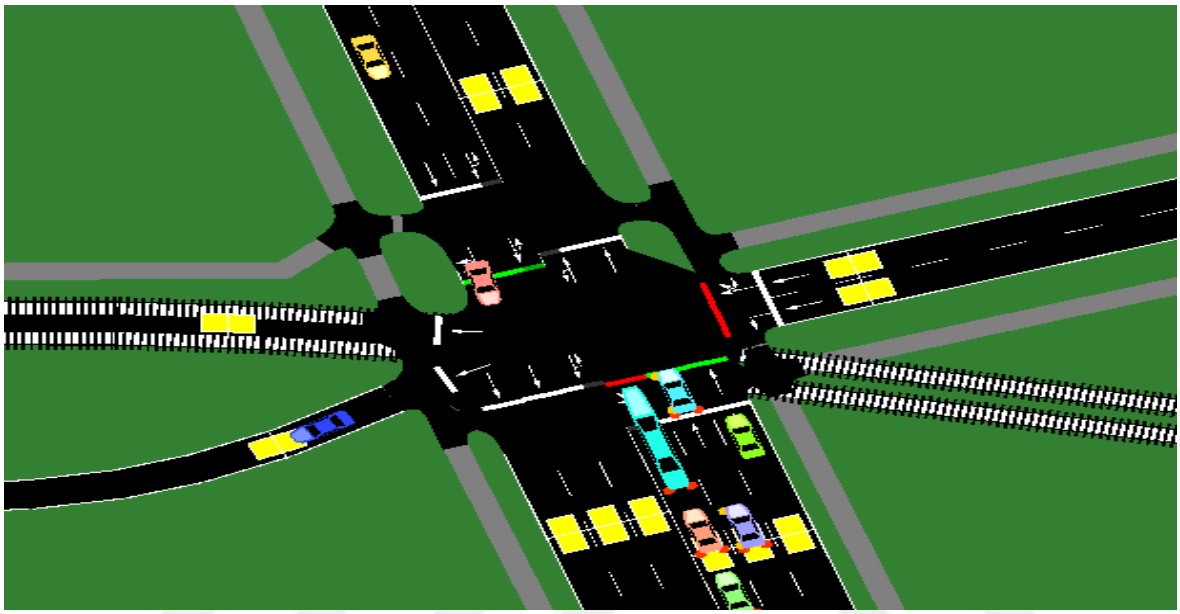
5.3. Veri Tanımlama

Çalışmamızda iki farklı veri seti kullanılmıştır. İlk olarak açık kaynak verisi kullanılmıştır. Bu veriler "https://data.boston.gov/dataset/traffic-related-data" internet adresinden alınmıştır. Link şuanda aktif olmamakla beraber Ek 1'de verilmiştir. Çizelge 7'de veri setinin bir kısmı gösterilmektedir. Bu veriler, 07:00 -17:45 saatleri arasında trafik yoğunluğunun fazla olduğu Massachusetts Avenue ve Newbury caddelerinin kesişimindeki kavşaktan alınmıştır. Çizelge 5.3'te yolcu arabaları ve ağır araçlar için sabah 07:00 ve 09:00 arasında 15 dakikada bir gelen araçların sayıları, rotaları, faz bilgileri bulunmaktadır. Veri setinin tamamında araç rotaları, tipleri, sayıları, hava durumu, faz bilgileri yer almaktadır.

Çizelge 5.3. 2019 yılı Massachusetts Avenue ve Newbury kavşağı trafik akış örneği

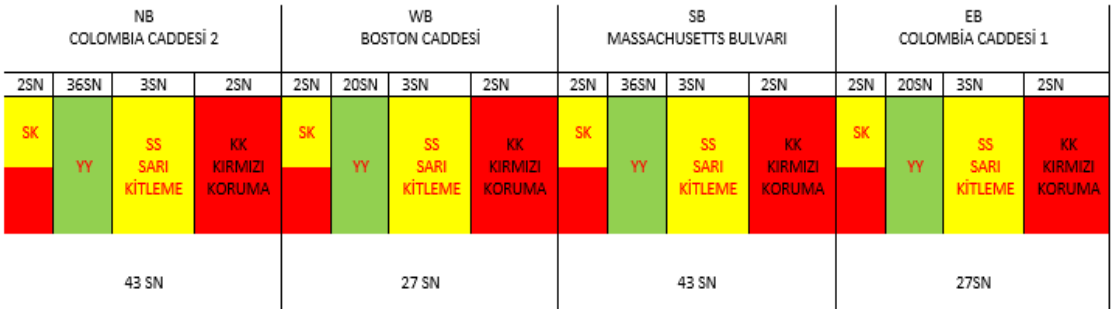
	Massachusetts Avenue Kuzeye doğru				*Massachusetts Avenue Güneye doğru*			
Saat	U-dönüş	Sol(90)	Sol(KB)	Düz	U-dönüş	Düz	Sağ(90)	Sağ(KB)
07:00	0	28	3	57	0	80	36	4
07:15	0	53	0	61	0	76	58	3
07:30	0	50	2	61	0	96	69	7
07:45	1	36	0	74	0	115	76	6
08:00	0	42	1	75	0	96	67	4
08:15	0	39	2	85	0	93	29	12
08:30	0	40	3	65	0	89	23	11
08:45	2	32	8	63	0	93	26	10
09:00	1	36	7	44	0	103	38	8
	Newbury Street Doğuya doğru				*Newbury Street Batıya doğru*			
Saat	U-dönüş	Sol	Düz	Sağ	Sol	Düz(90)	Düz(KB)	Sağ
07:00	0	0	0	0	11	21	8	13
07:15	0	0	0	0	27	19	5	12
07:30	0	0	0	0	12	17	9	8
07:45	0	0	0	0	11	27	9	11
08:00	0	0	0	0	23	15	11	14
08:15	0	0	0	0	24	24	8	13
08:30	0	0	0	0	22	10	5	7
08:45	0	0	0	0	16	16	21	8
09:00	0	0	0	0	17	17	15	14

Simüle edilen kavşak Resim 5.1'de gösterilmektedir. Kavşak, 7 yol kesişiminden oluşmaktadır. Kuzey ve güney yönündeki yollarda 3 şerit gidiş 3 şerit geliş bulunmaktadır. Doğu yönündeki yol 2 şeritlidir. Batı yönündeki yol ise tek şeritli 2 farklı yoldan oluşmaktadır. Kavşakta birbiriyle çakışmayan, aynı anda yeşil ışık yakılabilen 4 adet faz ve ışık mevcuttur. Faz düzeni Resim 5.2 ve Resim 5.3'te gösterilmektedir.



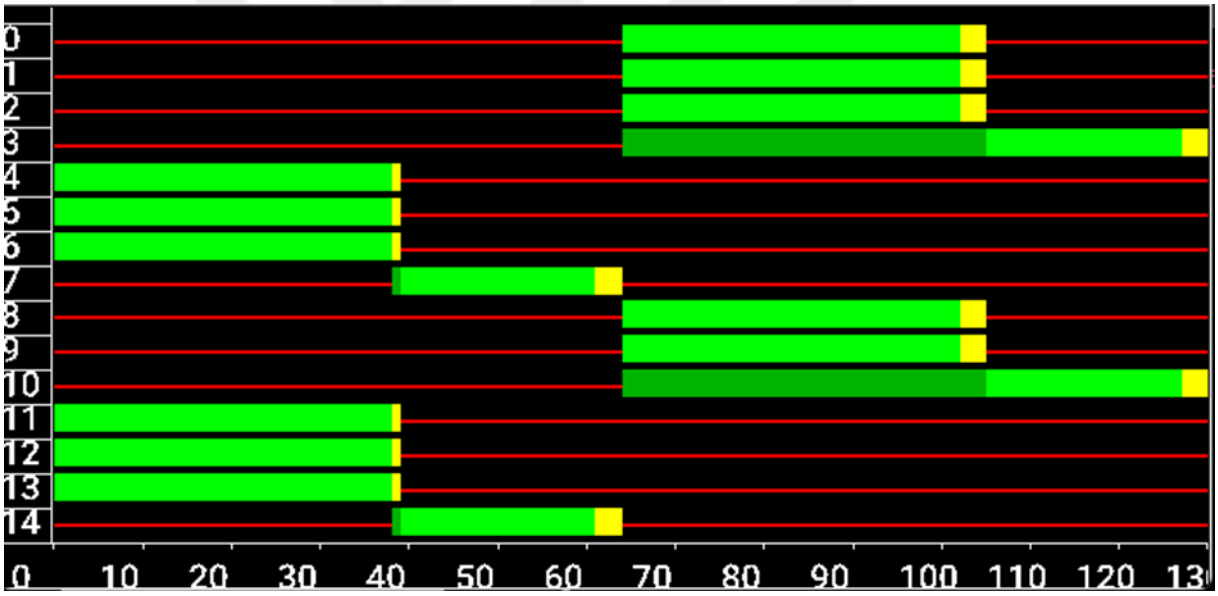
Resim 5.1.Massachusetts bulvarı-Newbury kavşak yapısı

Kavşaktaki bütün kollara en az bir kez yeşil ışığın yakıldığı toplam süre olan devre süresi, 90 saniye olarak tanımlanmıştır. Kavşak simüle edilirken, farklı hava koşulları için (kuru-ıslak zemin), trafik hacmi (araç sayısı, kuyruk uzunluğu), doygunluk akış oranı, ortalama hız, hızlanma/yavaşlama ivmesi, kalkış kayıp süresi, araç tipi parametreleri dikkate alınmıştır. Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te veri setinin alındığı kavşağın ışık düzeni ve süresi gösterilmiştir. SUMO paket programında ışık durumu doğu yönünden başlayarak saat yönünde devam etmektedir. NB (Kuzey) yönü Colombia 1 caddesini, WB (Batı) yönü Boston caddesini, SB (Güney) yönü Massachusetts bulvarını, EB (Doğu) yönü ise Colombia 2 caddesini ifade etmektedir. Örneğin, NB yönü için etkin yeşil süre 38 sn, sarı ışık 3 sn, kırmızı koruma süresi 2 sn'dir.



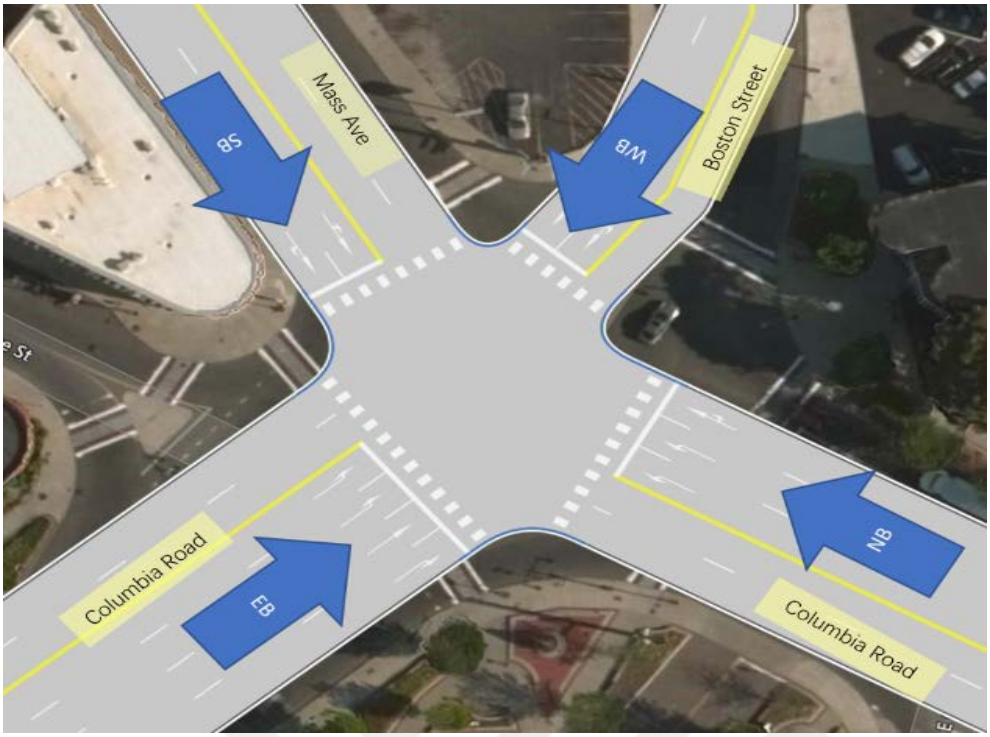
Resim 5.2.Mevcut durum faz süresi ve ışık durumları

Kavşaktaki bütün kollara en az bir kez yeşil ışığın yakıldığı toplam süre olan devre süresi 150 saniyedir. Tüm kollar için sarı-kırmızı ışık süresi 2 sn, kontrollü geçiş kırmızı ışık koruma süresi 2 sn, sarı ışık süresi 3 sn olarak belirlenmiştir.



Resim 5.3. Faz diyagramı

Y ekseni her bir yönü temsil etmektedir. Resim 5.4'te kavşak yapısının görseli gösterilmektedir. Işık planı Kuzey (NB) yönünden başlayıp saat yönünde devam etmektedir.



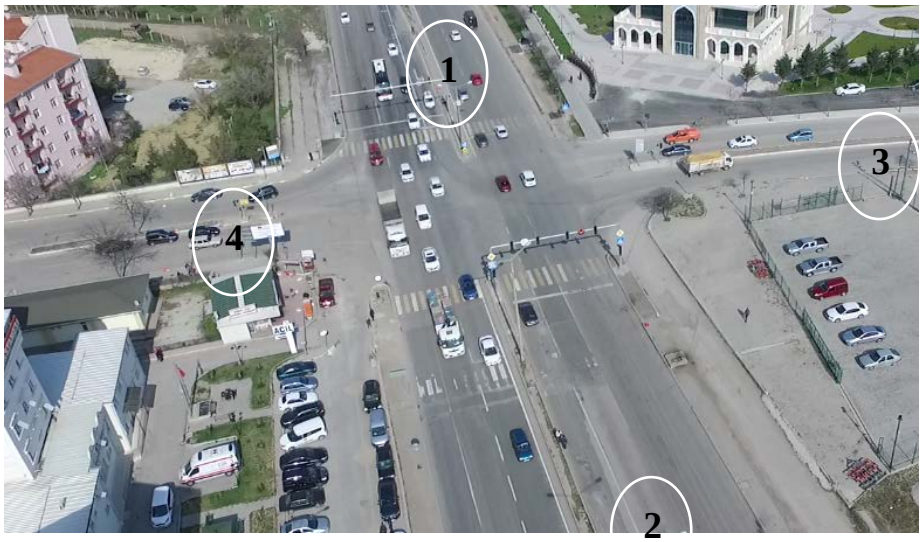
Resim 5.4. Massachusetts bulvarı-Newbury kavşak yapısı

İkinci olarak ise Polatlı Refik Cesur kavşağıyla ilgili veriler, Gazi Üniversitesi Kent Ulaşım Teknolojileri Erişilebilirlik Uygulama ve Araştırma Merkezi (KUTEM) tarafından elde edilmiştir. Bu veri seti, araç sayıları, araç tipleri, hava koşulları, araç rotaları, mevcut faz bilgileri ve 08:00 ile 16:00 saatleri arasındaki mevcut ışık planını içermektedir. Trafikte beş tür araç bulunmaktadır: otomobiller, otobüsler, römorklar, orta yük taşıma araçları (OYT) ve kamyonlar. Arabalar için veri seti örneği Çizelge 5.4'te gösterilmiştir. Çizelge, farklı yönlere giden arabaların bir saatlik aralıklarla kavşağa giriş sayılarını sunmaktadır.

Çizelge 5.4. Polatlı Refik Cesur kavşağı trafik akış örneği

Taşıt Cinsi	*Sayım Saati*	*Yön 1 (Eskişehir-Ankara)*			*Yön 2 (Ankara-Eskişehir)*			*Yön 3 (Polatlı- Huzur evi)*			*Yön 4 (Huzur evi-Polatlı)*		
		1 - 2	1 – 3	1 - 4	4 – 1	4 - 2	4 – 3	2 -1	2 - 3	2 - 4	3 – 1	3 - 2	3 – 4
OTOMOBİL	08-09	400	42	25	21	55	105	437	132	22	25	205	95
	09-10	443	38	14	20	51	95	401	126	20	20	190	80
	10-11	563	43	11	27	54	80	380	121	18	16	169	75
	11-12	505	40	13	25	50	75	466	116	16	15	171	60
	12-13	606	38	17	23	45	69	529	109	15	18	168	56
	13-14	599	29	16	42	29	146	571	95	25	6	251	61
	14-15	675	32	17	25	28	85	630	209	29	23	242	125
	15-16	825	26	15	35	24	91	697	215	48	13	265	102

Ankara iline bağlı Polatlı Refik Cesur kavşağının mevcut durumu incelenmiş ve önerilen modellerin uygulanmasının sonuçları ele alınmıştır. Kavşağın genel düzeni Resim 5.5'te gösterilmiştir. Beş fazdan oluşan dört yönlü bir kavşaktır ve bunlardan biri yaya geçidi fazını içermektedir; toplamda on şerit bulunmaktadır. Resim 5.5'teki sayılar yönleri temsil etmektedir. Kavşak, düz gitme, sağa dönme ve sola dönme imkânı sağlamaktadır. Sekiz trafik lambası bulunmaktadır ve farklı trafik lambaları sağa dönüşleri kontrol etmektedir.



Resim 5.5. Polatlı Refik Cesur kavşağı

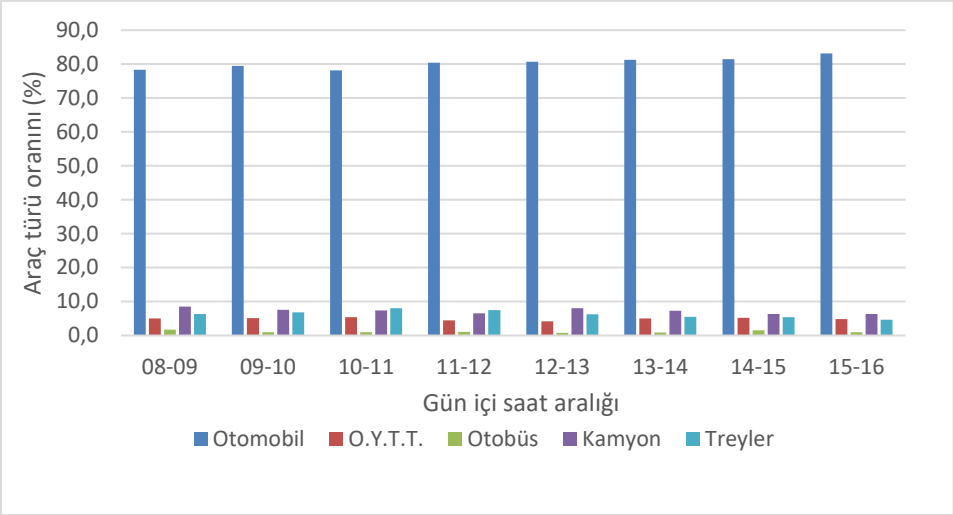
Çizelge 5.5'te Polatlı Refik Saydam kavşağında 08:00 – 16:00 saatleri arasında araç türüne göre geçen araç sayıları verilmiştir. Bu Çizelgeya göre farklı saatlerde geçen aynı tip araç yoğunluğu değişimi hesaplanmıştır. Araçların farklı türde olması, kalkış kayıp süresi, ivmelenme, boyut gibi farklı özelliklerinden dolayı kavşaktan geçiş süreleri değişmektedir.

Gün içerisinde sayım saatine göre en az geçen araç sayısı ile en çok geçen araç sayısı arasındaki değişim oranları verilmiştir. Örneğin Çizelgede otomobil verisi için, 08 – 09 arası 1564 otomobil kavşaktan geçerken, 15- 16 arası 2356 otomobil geçmektedir. Bu da yaklaşık saat dilimleri arasında %50 değişim demektir.

Farklı saat dilimlerinde otomobil geçiş sıklığı yaklaşık %50, O.Y.T.T(Orta yük taşıyan taşıt). %57, Otobüs %100, Kamyon %43, Treyler %27 oranlarında farklılık göstermektedir. Şekil 5.1'de toplam araç sayısına göre araç türlerinin zaman bazında geçiş oranları gösterilmiştir.

Çizelge 5.5. Polatlı Refik Cesur kavşağı araç türüne göre saatlik geçen araç sayısı

	Otomobil	*O.Y.T.T*	*Otobüs*	*Kamyon*	*Treyler*	*Toplam*
08-09	1564	100	35	171	127	1997
09-10	1498	97	19	143	129	1886
10-11	1557	107	20	148	160	1992
11-12	1552	87	21	126	145	1931
12-13	1693	87	16	169	132	2097
13-14	1870	115	21	168	126	2300
14-15	2120	136	39	165	142	2602
15-16	2356	137	28	180	131	2832



Şekil 5.1.Kavşaktan geçen araç türlerinin zaman bazında geçiş oranları

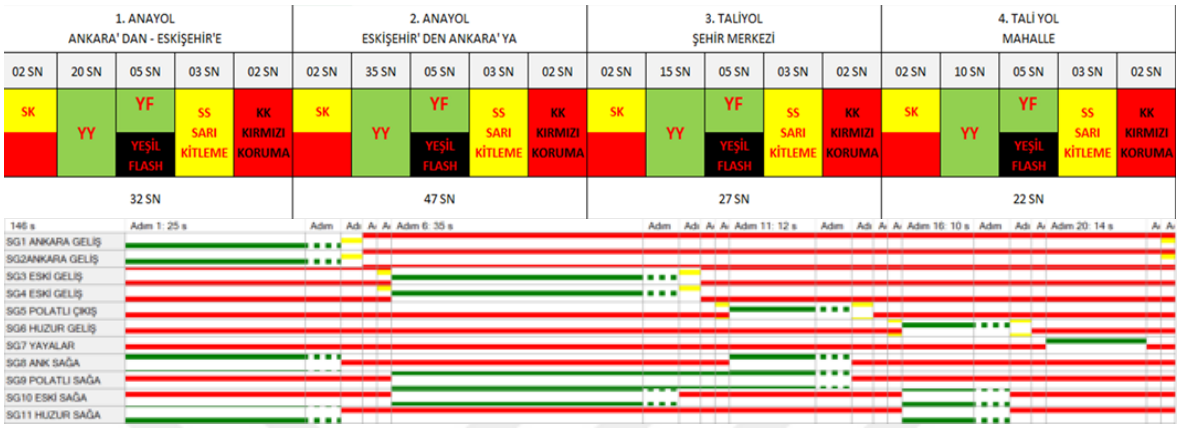
Çizelge 5.5'te Polatlı Refik Cesur kavşağında yönlere göre geçen araç türü ve sayısı verilmiştir. Eskişehir - Ankara istikametinde geçen araçların yaklaşık %81'i otomobil, %3,5'i, O.Y.T.T., %1,25'i otobüs, %7,6'sı kamyon ve %6,5'i treyler türü araçlardır. Kavşağa giren araçların türü gecikme süresini de doğrudan etkilemektedir. Çizelge 5.6'da gösterildiği üzere, kavşağa giren otobüslerin %39'u Eskişehir - Ankara , %40'ı Ankara - Eskişehir, %11'i Polatlı - Huzur evi ve %10'u huzur evi – Polatlı yönüne kamyon ve treyler türü araçların %37'si Eskişehir - Ankara, %43'ü Ankara - Eskişehir, %10'u Polatlı - Huzur evi ve %10'u huzur evi – Polatlı yönüne gitmektedir.

Çizelge 5.6.Polatlı Refik Cesur kavşağı araç türüne ve yönlere göre geçen araç sayısı

	Yön 1 (Eskişehir-Ankara)	*Yön 2 (Ankara-Eskişehir)*	*Yön 3 (Polatlı- Huzur evi)*	*Yön 4 (Huzur evi- Polatlı)*
Otomobil	5032	5427	2451	1300
O.Y.T.T	218	220	311	117
Otobüs	77	79	22	21
Kamyon	470	459	183	158
Treyler	401	568	31	92

Kavşağın mevcut faz diyagramı Resim 5.6'da gösterilmektedir. Satırlar düz gidiş, sağa ve sola dönüşlerin yapıldığı yönleri ifade etmektedir. Sütunlar ise ışık sürelerini göstermektedir.

Her bir yön için gerekli olan ışık süreleri ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Örneğin Ankara-Eskişehir yönü için etkin yeşil süre 25 sn, sarı ışık süresi 3 saniye, kırmızı koruma süresi 2 sn'dir.



Resim 5.6.Polatlı Refik Cesur Kavşağı Mevcut Durum Faz

Kavşağın mevcut durumdaki sabit devre süresi yaya fazı dâhil olmak üzere 145 sn'dir. Sarı - kırmızı ışık süresi 2 sn, kontrollü geçiş kırmızı ışık koruma süresi 2 sn. yeşil ışık flaşörü 5 sn. ve sarı ışık süresi 3 sn olarak belirlenmiştir. Her bir yön için yeşil ışık süresi farklı hesaplanmıştır. Yön 1 (Ankara-Eskişehir) için 20 sn., yön 2 (Eskişehir-Ankara) için 35 sn, yön 3(şehir merkezi) için 15 sn. ve yön 4 (mahalle) için 10 sn. olarak belirlenmiştir.

5.4. EDATLC (Verimli Dinamik Adaptif Trafik Işığı Kontrol) Algoritması

Bu bölümde önerdiğimiz, kavşaklar için Verimli Dinamik Adaptif Trafik Işığı Kontrol Algoritması (EDATLC) modelinin detayları açıklanmaktadır. EDATLC, Webster yöntemi ile devre süresi hesaplamakta ve yeşil ışık süresi optimizasyonu gerçekleştirmektedir. Önerdiğimiz model SUMO simülasyon aracı ile simüle edilmiştir. Simülasyon ortamında normal yolcu arabası ve ağır/uzun araç olmak üzere 2 farklı araç tipi, kuru zemin ve ıslak zemin olmak üzere 2 farklı hava koşulu ve sürücü davranışı olarak daha önce açıklanan hatalı şerit kullanım oranına göre incelemeler gerçekleştirilmiştir.

Önerilen model Massachusetts bulvarı-Newbury kavşağı için, belirtilen koşullar ile webster devre süresi belirleme yöntemi ve mevcut durum ile karşılaştırılmıştır. Daha sonra ise, Türkiye'de gerçek bir kavşak verisi üzerinde uygulanarak etkinliği ispat edilmiştir. Model 4 ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar:

1. Veri tipi ve dağılımı: Kullanmış olduğumuz veri her 15 dakikada bir kavşağa giren araç sayını ve tipini vermektedir. Model ile her 2 saniyede bir kavşağa giren araç sayısı ve tipi belirlenmiştir. Farklı hava koşulu ve araç tipi ile dağılım gerçekleştirilmiştir.
2. Devre süresi belirlenmesi: Önerdiğimiz modelde webster devre süresi belirleme yöntemi kullanılmıştır.
3. Faz sırası: En yoğun fazdan başlayarak saat yönünde devam edecek şekilde ayarlanmıştır.
4. Yeşil ışık süresi: Devre süresi belirlendikten sonra her faz için hesaplanmış bir skor değerine göre ve kavşağa anlık giren araç sayısı ve tipine göre belirlenmiştir.

Veri setinde, 15 dakikalık zaman diliminde kavşağa gelen her faz için araç sayıları ve tipleri verilmektedir. Fakat her bir araç için varış zamanı bilinmemektedir. Bu yüzden, 15 dakikalık aralıktaki varış zamanının, gerçek trafiğin iyi bir tahmini olan bir poisson dağılımını takip ettiği varsayılmıştır. Araçların kavşağa giriş zamanını belirlemek için kullanılan poisson dağılımı formülü şu şekildedir:

Araçlar arası varış süresi x(t) olarak tanımlanırsa aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$x(t) = -\frac{\mathrm{In}\big(1 - \mathrm{u(t)}\big)}{\lambda} \qquad \text{t: } 1,2,3, \dots, \mathrm{n} \qquad (5.3)$$

t: 1,2,3,…,n n; Her 15 dakikalık zaman aralığında geçen toplam araç sayısı
λ: 15 dakikada bir ortalama geçen araç sayısı
u(t): [0,1] arasında değişen rastgele bir sayı

Varış zamanları önerilen model girdisi olarak kullanılmakta ve simüle edilmektedir. Önerdiğimiz modelin tanımlanmasında kullanılan metrikler aşağıda tanımlanmıştır.

Resim 5.1’de yeşil ışık süresini optimize ettiğimiz kavşağın SUMO görüntüsü gösterilmektedir. Bu kavşakta bir fazda en fazla 4 yöne hareket edilebilmektedir. Her yöne gidecek araç sayısı ve tipi veri setinden elde edilmektedir. Her bir faz için skor değeri (SC) hesaplanarak bir sonraki yeşil ışık yakılacak faz ve yeşil ışık süreleri hesaplanmaktadır.

Araç tipi farklılığı kalkış kayıp ve kavşaktan güvenli geçiş sürelerini etkilemektedir. Uzun ve ağır araçların kayıp süresi normal araçlardan daha farklı olmaktadır. Kavşaktaki tüm parametreler eşit kabul edilmiştir. Fazdaki ışığın sürekli yeşil yandığı varsayılmıştır. Fazdan birim zamanda geçen araç sayısı (Q_m) hesaplanmıştır. Burada, m (m=1, 2; 1=otomobil, 2=ağır araç) araç tipini ifade etmektedir. Araç tipi etki oranı için aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$pcu_m = Q_1/Q_m \qquad \text{m=1,2} \qquad (5.4)$$

SUMO simülasyon aracı ile yapılan incelemede uzun-ağır araç tipinin düz gidişlerde kuru zeminde 1.63, ıslak zeminde 1.81 oranında kavşaktan daha geç çıkış yaptığı tespit edilmiştir.

Kavşaklarda devre süresi hesaplamada Webster yöntemi, HCM2000 ve Avusturya modeli olmak üzere 3 farklı yöntem incelenmiştir [101-103]. Webster yöntemi her faz için oluşan kayıp süreleri dikkate alarak hesaplama gerçekleştiren bir yöntemdir [101]. Her fazda oluşacak yoğunluk, araç tipi, hava durumu ve farklı durumları içerecek şekilde hesaplanmaktadır. Bu sebeple, çalışmamızda her bir faz için farklı doygunluk oranları bulunması, hatalı şerit kullanım oranı ve kuru-ıslak zemin etkileri incelendiğinden en uygun model olarak Webster yöntemi belirlenmiştir.

Webster yöntemine göre kavşağın kapasitesi, devre içindeki kayıp sürelerin (L) toplamına bağlıdır. Kavşakta her fazın toplam kayıp süresi (l), her bir faz için kalkış kayıp ve sarı ışık sürelerinin toplamıdır. AR tüm kırmızı ışık süreleridir. Döngüdeki toplam kayıp zaman, her fazdaki kayıp zamanın ve tüm kırmızı ışıkların toplamıdır.

$$L = \sum n * l + AR \qquad (5.5)$$

Bir fazdaki doygunluk derecesi (y), fazdaki gerçek akımın kapasiteye oranıyla elde edilmektedir. Kavşaktaki toplam gecikme süresini en aza indirgeyecek en uygun devre süresi (c_{opt}) Webster modeli ile şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$C_{opt} = \frac{1.5\,L + 5}{1 - \sum y_i} \tag{5.6}$$

Önerilen model ile araçların kavşakta gecikme süresinin en aza indirgenmesi, yani kavşaktaki araç yoğunluğunun azaltılması amaçlanmaktadır. Dolayısıyla, her faza yoğunluğunu temsil eden bir skor değeri (SC) tanımlanmıştır. SC için gerekli olan veriler; şeritte bekleyen araç sayısı, araç tipi, kavşağa geliş zamanı, ortalama gecikme süresi (w), ve eş zamanlı yeşil ışık yanan faz bilgileridir. Poisson dağılımı ile birim zamanda kavşağa giren araçlar belirlenmiş ve geliş zamanları tanımlanmıştır. SC hesaplamasında kavşağa gelen araç tipine göre etki oranı (pcu_m), her t saniyede kavşağa gelen ilgili araç sayısı ile çarpılmıştır. Kavşağa verilen yeşil ışık süresi (g_{time}) boyunca kavşaktan saniyede geçen araç sayısı (h) tespit edilip yoğunluktan çıkarılmıştır. Ayrıca araçların ilk kalkış anında oluşan kayıp süresi (lt) hesaplamaya dâhil edilmiştir.

SC değeri şu şekilde hesaplanmıştır;

$$SC_t = w * \left(\sum_{m=1}^{M} Q_m * pcu_m - g_{time} * h \right) - lt \tag{5.7}$$

Devre süresi Webster yöntemi ile belirlendikten sonra her faza verilecek yeşil ışık süreleri optimize edilmelidir. Webster yönteminde, bu süreler fazların yoğunluğuna göre verilmektedir. Ancak bizim önerdiğimiz EDATLC modelinde kavşaklarda anlık gelen araçların sayısına, aracın tipine, zemin durumuna ve hatalı şerit kullanımına göre süreler belirlenmektedir. Bu sebeple Webster yöntemi ile devre süresi belirlendikten sonra problemimize göre yeşil ışıksüreleri önerilen EDATLC ile belirlenmiştir.

Yeşil ışık süresi belirlenirken her bir faz için minimum yeşil ışık süresinin (MinG)ne olacağına karar verilmelidir. MinG, kavşaktaki bir aracın güvenli bir şekilde kavşağı geçene kadar olan süredir. Bu süre belirlenmesinde araç kalkış kayıp süresi, araç tipi ve zemin durumu önemli parametrelerdir. Literatürdeki çalışmalarda MinG hesaplamasında sarı ışık ve tüm ışıkların kırmızı olduğu durum (clearance interval), yeşil ışık yakılan fazdaki geçiş yapan araçlar için kullanılabilir zaman olarak belirlenmiştir.

SUMO ile gerçekleştirdiğimiz incelemelerde bir aracın geçişi için verilen yeşil ışık süresi ile dört aracın geçişi için geçen sürelerin oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Baz etkisi olarak adlandırılan bu durumun araçların kalkış kayıp sürelerinden kaynaklı olduğunu tespit edilmiştir. Bu sebeple bir faz için MinG, dört aracın geçişi için gerekli süreye eşit alınmıştır.

Literatürdeki çalışmaların aksine tüm ışıkların kırmızı olduğu zaman o faz için kullanılabilir olarak kabul edilmemiştir ve aşağıdaki gibi formüle edilmiştir.

$$MinG = \frac{4 * pcu_m}{s_j} - Y + lt_m \tag{5.8}$$

Burada, s_j, j fazı için araç/saniye cinsinden doygun akış oranını, Y, sarı ışık süresini, lt_m, m tipi aracın kayıp zamanını, pcu_m, m araç tipinin araba sayısı cinsinden karşılığını göstermektedir.

Önerilen modelde bir faza verilebilecek maksimum ışık süresi, kavşaktaki diğer fazlara verilen minimum ışık süresi, sarı ışık ve tüm ışıkların kırmızı olduğu durum dışında kalan süredir. k adet ışık yakma durumuna sahip bir kavşakta bir faza verilebilecek maksimum ışık süresi şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$MaxG = C_{opt} - k * (MinG + Y + AR) \tag{5.9}$$

Faz düzeninde aynı anda farklı yönlerde yeşil ışık olabilmektedir. Buradaki kısıt kavşakta kaza ve karışıklığa sebep olmayacak şekilde fazların benzer ışık türlerine sahip olmasıdır. Önerdiğimiz EDATLC algoritmasında fazlarda yeşil ışık yakılan 3 durum dikkate alınmıştır. Her bir durum için yeşil ışık süresi hesaplanırken MinG ve MaxG hesaplanmaktadır.

Herhangi bir t zamanında en yüksek SC değerine sahip kuyruktan başlayarak yeşil ışık süresi hesaplanmaktadır. Faz sırası, uluslararası kabullerde olduğu gibi trafiğin sağdan aktığı devletler için saat yönünde devam edecek şekilde belirlenmektedir [103].

Önerdiğimiz modelin geçerliliğini kanıtlamak ve simüle etmek için kullandığımız veri seti, 15‘er dakikalık aralıklarla fazlarda bulunan araç sayısı ve tipini içermektedir. Daha önce

açıklandığı gibi poission dağılımı ile her 2 saniyede bir fazda bulunan araç sayısı ve tipi belirlenmiştir. Bu sebeple yeşil ışık süresi belirlenirken 2 saniyelik zaman dilimlerinde inceleme yapılmıştır. Önerdiğimiz modelde, t zaman diliminde yeşil ışık süresi belirlenirken tüm fazlarda araç akışı devam etmektedir. Bu sebeple, model dinamik bir yapıya sahiptir.

Şekil 5.2'de gösterildiği gibi, algoritmanın ilk adımında her ışık durumu için minimum ışık süresinden başlayarak SC değerleri hesaplanmıştır. Algoritmanın amacı en düşük SC değerine sahip yeşil ışık sürelerini belirlemektir. Bu sebeple tüm fazlar için MinG ile MaxG arasındaki tüm opsiyonlar denenmiştir. Devre süresi sonunda toplam SC'nin minimum olduğu durum fazlara verilecek yeşil ışık sürelerini belirlemektedir. Elde edilen yeşil ışık süreleri SUMO ile simüle edilerek ortalama gecikme süreleri hesaplanmıştır.

Input: Data set, w(average waiting time),

Set x_t

Set S_j

Set SC_t

Set C_{opt}

Set $MinG$

Set $MaxG$

- Calculate position distribution for data set
- For all vehicle types
- For all lines at the intersection
- For intersection
- For 4 vehicles

Output: $g_{newcase1}, g_{newcase2}, g_{newcase3}$

Begin:

Find maximum SC and start with that line

- From calculated SCs for all lines on the cycle time
- g_{case1} is green light time for case 1 lines

1. **for** g_{case1}=*MinG,….,MaxG* **do**
2. **for** g_{case2}= g_{case1},….,*MaxG* **do**
3. g_{case1}= *MaxG*- g_{case2} -g_{case1}
4. Calculate sum of SC_t for all line
5. **if** SC_t is minimum **then**
6. $g_{newcase1} = g_{case1}$
7. $g_{newcase2} = g_{case2}$
8. $g_{newcase3} = g_{case3}$
9. **end if**
10. **end for**
11. **end for**

Şekil 5.2. Önerilen EDATLC Algoritması

5.4.1. Değerlendirme uygulaması

Çalışmamızda kullandığımız kabuller ve parametreler bu alt bölümde açıklanmıştır. Sürücü davranışından kaynaklı hatalı şerit değişimi etkileri SUMO ile elde edilmiştir. Hava durumunun etkileri daha önce açıklandığı gibi literatürde yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçların ortalaması alınarak belirlenmiştir. Bu veriler ile Çizelge 5.7'de hava durumuna göre araç değişken parametreleri gösterilmiştir. Zemin durumu; ortalama hız, ivmelenme, kalkış kayıp süresi ve kavşaktan geçen araç sayısını etkilemektedir.

Çizelge 5.7. Simülasyon parametreleri

	Kuru	*Islak*
Ortalama hız(yolcu arabası)(m/s)	65	52
Ortalama hız(ağır araç)(m/s)	50	40
Hızlanma/yavaşlama (yolcu arabası)(m/s^2)	3,3/2,75	2,97/2,47
Hızlanma/yavaşlama (ağır araç m/s^2)	2,31/1,92	2,07/1,72
Kalkış kayıp süresi(yolcu arabası)(sec)	4	4,4
Kalkış kayıp süresi (ağır araç)(sec)	6	5,4
Sarı ve kırmızı süre	4	5
Doygunluk akış oranı (araç/saat)	1808	1432

SUMO ile elde edilen veriler ile farklı hava koşullarında algoritmanın etkinliği, farklı araç tipleri ve hatalı şerit değişimleri dikkate alınarak ortalama gecikme sürelerinin hesaplanmasıyla belirlenmiştir.

Doygunlık akış oranı hesaplamak için 34 döngü devre süresi incelenmiştir. 34 döngü boyunca hem kuru hem kaygan zemin için doygunluk ilerlemesi belirlenmiş ve Eş 5.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

5.4.2. Değerlendirme sonuçları ve tartışma

EDATLC, webster yöntemi ve mevcut durum karşılaştırılmış ve analiz sonuçları bu alt bölümde açıklanmıştır. Hesaplamalar, sürücü hatasının olmadığı ve veri setinde olduğu gibi kavşaktaki ağır araç oranın %10 olduğu durum için yapılmıştır. Webster yöntemi ve EDATLC yöntemlerinde devre süresi Eş 5.5 ve Eş 5.6 ‘ya göre hesaplanmıştır. Ortalama gecikme süreleri ıslak ve kuru zemin için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Çizelge 5.8’de, normal hava koşullarında mevcut durum, Webster ve EDATLC (Efficient Dynamic Adaptive Traffic Light Control) algoritmalarının devre süreleri ve yeşil ışık dağılımları sunulmuştur.

Çizelge 5.8. Normal hava koşullarında mevcut durum, Webster, EDATLC devre süreleri ve yeşil ışık dağılımları

	Devre süresi	*SB*	*WB*	*NB*	*EB*
Mevcut Durum	150	38	22	38	22
Webster	160	36.2	18.1	21.2	54.4
EDATLC	160	35.1	17	20.6	52.6

Çizelge 5.9'da kötü hava koşullarında mevcut durum, Webster ve EDATLC algoritmalarının devre süreleri ve yeşil ışık dağılımları verilmiştir.

Çizelge 5.9. Kötü hava koşullarında mevcut durum, Webster, EDATLC devre süreleri ve yeşil ışık dağılımları

	Devre süresi	*SB*	*WB*	*NB*	*EB*
Mevcut Durum	130	38	22	38	22
Webster	160	33.4	16.7	19.6	50.1
EDATLC	160	31.7	15.8	18.6	47.6

Çizelge 5.10'da, normal hava koşullarında mevcut durum, Webster ve EDATLC algoritmaları için yaklaşım kollarına göre saniye cinsinden ortalama gecikme süreleri gösterilmektedir.

Çizelge 5.10.Normal hava koşullarında Mevcut durum, Webster, EDATLC için saniye cinsinden ortalama gecikme süreleri

Yaklaşım Kolu	*Mevcut durum*	*Webster Modeli*	*EDATLC*
1 NB	20.7	13.7	7.4
2 SB	35.4	11.3	12.2
3 EB	53.1	21.2	18.3
4 WB	17.7	13.8	6.1

Çizelge 5.11'de, kötü hava koşullarında mevcut durum, Webster ve EDATLC algoritmaları için yaklaşım kollarına göre saniye cinsinden ortalama gecikme süreleri gösterilmiştir. Örneğin, yaklaşım kolu 1'de (NB), mevcut durumda 23.9 saniye, Webster modelinde 12.4 saniye ve EDATLC'de 7.9 saniye bekleme/gecikme yaşanmıştır.

Çizelge 5.11.Kötü hava koşullarında Mevcut durum, Webster, EDATLC için saniye cinsinden ortalama gecikme süreleri

Yaklaşım Kolu	*Mevcut durum*	*Webster Modeli*	*EDATLC*
1 NB	23.9	12.4	7.9
2 SB	40.1	20.8	13.3
3 EB	61	31.7	20.2
4 WB	20.3	10.5	6.7

Çizelge 5.12'de, üç farklı model için hesaplanmış devre süreleri ve ortalama gecikme süreleri sunulmuştur. Çizelge'dan anlaşılacağı üzere mevcut duruma göre webster yöntemi normal hava koşullarında %53, kötü hava koşullarında ise %48'lik bir iyileşme sağlamıştır. Mevcut duruma göre yeni önerilen algoritma gecikme süresi üzerinde, normal hava koşullarında %65, kötü hava koşullarında ise %66 oranında, iyileşme sağlamıştır. Önerilen algoritma Webster yöntemine göre normal hava koşullarında %26.6, kötü hava koşullarında ise %33.5 oranında bir iyileşme sağlamıştır.

Çizelge 5.12. 3 model için hesaplanmış devre ve ortalama gecikme süreleri

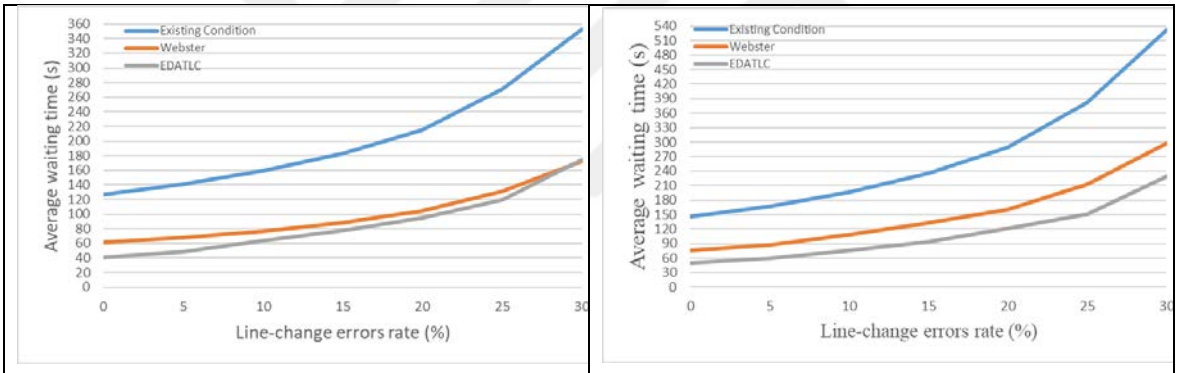
	Mevcut durum	*Webster*	*EDATLC*
Devre süesi (s)	90	160	160
Ortalama gecikme süresi (s)	127	60	44
Kötü havada ortalama gecikme süresi (s)	146	76	49

Şekil 5.3'te hatalı şerit değiştirme oranın ortalama gecikme ile olan ilişkisi gösterilmiştir. Şekil 5.3a'da kuru zeminde Şekil 5.3b'de ise ıslak zeminde gerçekleşen ortalama gecikme süreleri, mevcut durum, webster yöntemi ve önerilen EDATLC algoritması için

gösterilmiştir. Hatalı şerit kullanım oranı artıkça ortalama gecikme süresinin her 3 durumda da artığı gözlemlenmiştir. Önerilen model en az gecikme süresi elde edilmiştir.

Islak zeminde kuru zemine göre ortalama gecikme süresi artmaktadır. Bu artış, ıslak zeminde ortalama hızın ve ivmelenmenin daha düşük olması sebebiyle baz etkisi ile açıklanabilir.

Kuru zeminde hatalı şerit değiştirme oranı %30'a vardığı durumda önerilen modelde webster modeline göre ortalama gecikme süresinde daha fazla artış gerçekleştiği gözlemlenmektedir. Hatalı şerit kullanımı oranı belirli seviyenin üstüne çıktığında kavşakta trafik akışını tıkamaktadır. Bu sebeple %30 ve üzeri hatalı şerit kullanımı sonrası modelimiz webster yöntemine paralele yakın ortalama gecikme süresi göstermektedir. Aynı durumun ıslak zeminde gerçekleşmemesinin sebebi, kavşağa giren araçların ortalama hızının kuru zemine göre daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır.



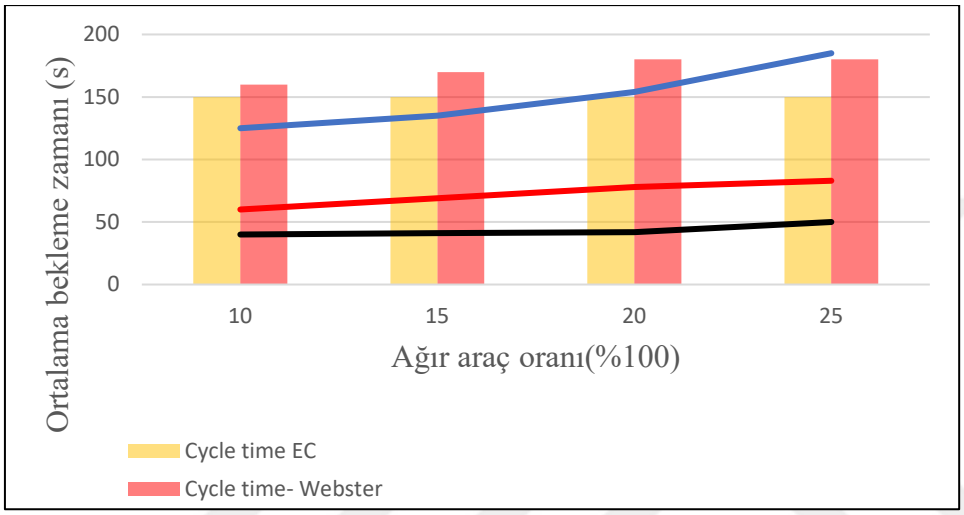
a) Kuru zemin hata oranı

b) Islak zemin hata oranı

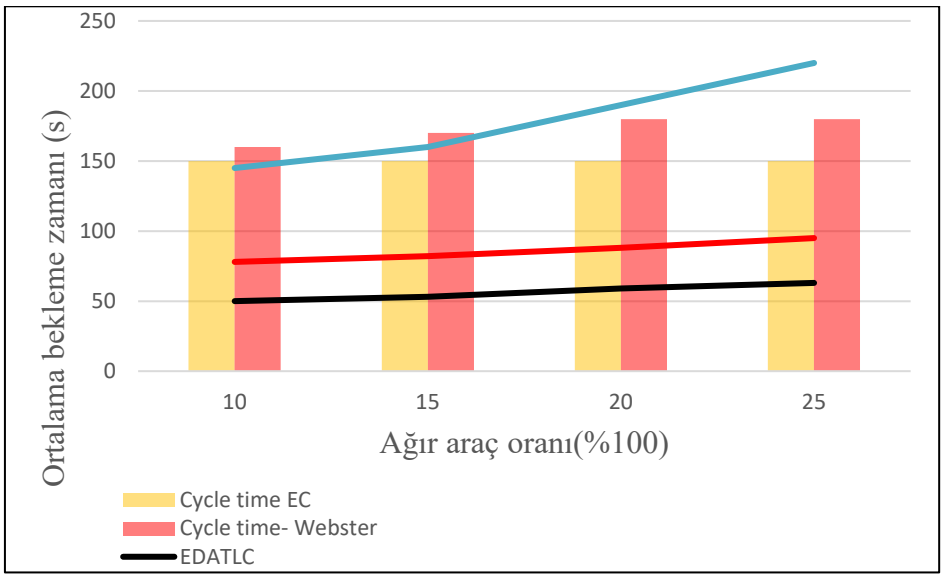
Şekil 5.3. Hatalı şerit değiştirme oranın ortalama gecikme süresi ile ilişkisi

Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'de kuru ve ıslak zeminde kavşaktaki ağır araç oranının devre ve ortalama gecikme süresi ile olan ilişkisi gösterilmiştir. Kavşağa giren ağır araç oranı, doygunluk akış oranını doğrudan etkilemektedir. Webster yönteminde devre süresi, doygunluk akış oranına göre hesaplanmaktadır. Bu sebeple bu oran artıkça hesaplanan devre süresi de artmaktadır. Webster ve EDATLC algoritmalarında sırasıyla ağır araç oranı %10, %15, %20, %25 olduğu durumlarda devre süresi 160 sn,170 sn,180 sn, olarak hesaplanmıştır. Mevcut durumda devre süresi sabit ve 150 sn dir. Şekilden, EDATLC yöntemi kavşağa giren ağır araç oranı değişiminden en az etkilenen yöntem olduğu

anlaşılmaktadır. Özellikle dinamik bir yapıda yeşil ışık süresi anlık fazlarda oluşacak yoğunluğa göre belirlenmektedir. Bu da ağır araç yoğunluğundan daha az etkilenmesine sebep olmaktadır. Kuru zemin ve ıslak zemin karşılaştırıldığında mevcut durum ve webster yönteminde ortalama gecikme süresi değişiminin EDATLC'ye göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu değişim oranı, devre süresi içerisinde EDATLC'nin daha iyi yeşil ışık süresi paylaşımı yaptığını göstermektedir.



Şekil 5.4. Kuru zeminde kavşaktaki ağır araç oranının devre süresi ve ortalama gecikme süresi ile ilişkisi



Şekil 5.5. Islak zeminde kavşaktaki ağır araç oranının devre süresi ve ortalama gecikme süresi ile ilişkisi

Farklı hava durumundaki zemin yüzeyleri, sürücü davranışları, hatalı şerit kullanımı, farklı araç tipleri ve her faz için doygunluk akış oranına göre devre ve yeşil ışık süresi belirleyen EDATLC algoritması, gerçek bir veri seti kullanarak Webster ve mevcut durumla karşılaştırılmıştır. SUMO simülasyon aracından yararlanılarak yapılan karşılaştırmada, karşılaştırma parametresi olarak ortalama gecikme süresi kullanılmıştır. Önerilen model ile kavşaklarda ortalama gecikme süresi mevcut duruma göre yaklaşık %68, Webster yöntemine göre yaklaşık %33 oranında azalmıştır. Önerilen algoritmanın kavşağa giren ağır araç oranı değişiminden daha az etkilendiği gözlemlenmiştir.

5.5. Polatlı Refik Cesur Kavşağı Önerilen Model Uygulamaları

5.5.1. Değerlendirme uygulaması

Çizelge 17'de farklı araç türlerinin birim yolcu arabası (pcu) olarak ifade edilen trafik yoğunluğunu temsil etmektedir. Her bir araç tipi için, hem düz giden hem de sağa dönüş yapan durumlar için pcu değerleri verilmiş. Örneğin, Kamyonlar için, düz giden durumda 1.63 pcu ve sağa dönüş yapan durumda ise 1,9 pcu değerleri belirlenmiştir. Bu değerler, kamyonların trafiğe olan etkisini farklı manevra durumlarında nicel olarak temsil etmektedir. Düz giden durumunda 1.63 pcu olan değer, kamyonun düz bir hat boyunca ilerlerken yol üzerindeki trafik yoğunluğunu temsil etmektedir. Sağa dönüş yapan durumda ise 1,9 pcu olan değer, kamyonun sağa dönüş yaparken yol üzerindeki trafik yoğunluğunu temsil etmektedir. Bu değerler, trafiğin simülasyonun da ve analizinde kullanılarak, farklı araç tiplerinin trafiğe olan etkilerinin hesaplanmasına yardımcı olmaktadır. Bu tür analizler, trafik akışının yönetimi ve planlaması açısından önemli bilgilerdir.

Çizelge 5.13.Birim yolcu arabası (pcu)

Araç tipi	*Düz*	*Sağa dönüş*
Araba	1	1
Kamyon	1.63	1,9
Otobüs	1.7	1.98
Treyler	1.7	1.98
OYTT	1.56	1.62

Çizelge 5.13, SUMO (Simulation of Urban MObility) adlı trafik simülasyon yazılımında kullanılan çeşitli araç tipleri için belirlenmiş parametreleri içermektedir. Bu parametreler, trafik simülasyonu yapılırken araçların davranışlarını, hareketlerini ve etkileşimlerini modellemek için kullanılan önemli bilgilerdir.

Çizelge 5.14. SUMO'da kullanılan parametreler

Araç Tipi	*Uzunluk (m)*	*Ortalama Hız (km/s)*	*Hızlanma ivmesi (m/s^2)*	*Yavaşlama İvmesi (m/s^2)*	*Kalkış kayıp süresi (s)*	*Doygunluk akış oranı (araç/saat)*
Araba	3.5-5.5	90	3	4	4	1890
Kamyon	6-14	50	1-2	3-4	6	
Otobüs	10-18	70	2-3	3-4	6	
Treyler	10-18	80	1-2	2-3	5	
OYTT	6-9	80	2-3	3-4	5	

5.5.2. Değerlendirme sonuçları

Çizelge 5.15'te, farklı trafik akışlarının ve yaklaşım kollarının taşıt başına gecikme sürelerini saniye cinsinden ifade etmektedir. İlgili modellerin (Webster, Modifiye Webster, EDATLC) mevcut duruma göre gecikme sürelerini karşılaştırmak üzere tasarlanmıştır. Bu tür analizler, trafik akışlarının etkisini değerlendirmek ve iyileştirme stratejileri geliştirmek için önemlidir. Çizelgeda yer alan ana kategoriler şunlardır: Yaklaşım kolu, incelenen trafik akışının veya yaklaşım kolu segmentinin adını belirtmektedir. Taşıt başına gecikme (sn/taşıt), her bir taşıtın bu bölgede geçirdiği ortalama gecikme süresini ifade etmektedir.

Çizelgedaki diğer sütunlar ise Webster Modeli, Modifiye Webster, EDATLC yöntemlerinin mevcut duruma göre belirli trafik akışlarında öngördüğü taşıt başına gecikme sürelerini içermektedir. Analiz, özellikle trafik akışının etkili bir şekilde yönetilmesi ve trafiğin akıcı hale getirilmesi için önemlidir. Modeller arasındaki karşılaştırmalar, Polatlı Refik Cesur kavşağındaki trafik yoğunluğunu anlamak ve trafiği optimize etmek için yönetim kararları alınmasına yardımcı olabilecek niteliktedir.

Çizelge 5.15.Webster, Modifiye Webster, EDATLC, Mevcut durum için saniye cinsinden ortalama gecikme süreleri

Yaklaşım Kolu	Taşıt başına gecikme (sn/taşıt)			
	Mevcut durum	*Webster Modeli*	*Modifiye Webster*	*EDATLC*
1 (Eskişehir-Ankara)	76,17	51,25	44,86	36,2
2 (Ankara-Eskişehir)	80,45	67,34	63,53	39
3 (Polatlı- Huzur evi)	58,14	56,53	58,46	49
4 (Huzur evi- Polatlı)	62,41	64,72	63,24	40,30

Önerilen modelin kavşaklardaki ortalama gecikme süresinde sağladığı belirgin iyileşme, mevcut duruma göre yaklaşık %40,65, Webster yöntemine göre yaklaşık %31,41 ve Modifiye Webster yöntemine göre yaklaşık %28,50 oranında azalma olarak gözlemlenmiştir. Bu iyileşmenin temel nedeni, önerilen algoritmanın kavşağa giren ağır araçların oranındaki değişikliklerden daha az etkilenmesidir. Bu durum, trafik yönetimi ve kavşak tasarımı açısından önemli bir gelişme olarak değerlendirilebilir.

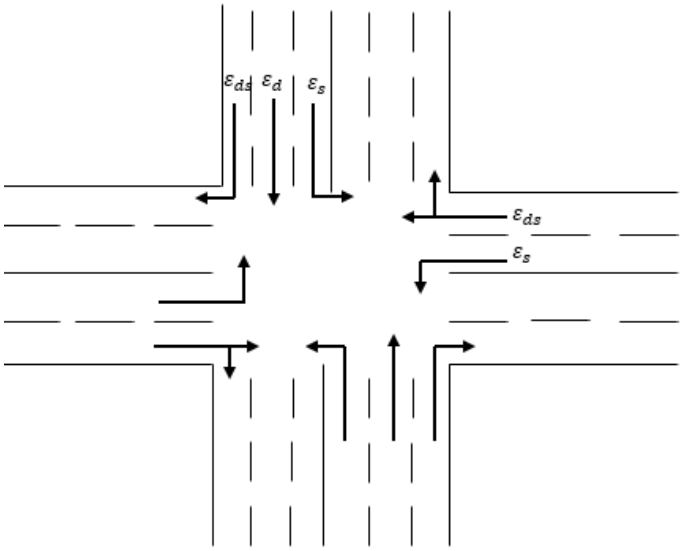
5.6. Webster ve Modifiye Webster Tabanlı Karınca Kolonisi Algoritması (KKA)

Ele alınan problem için geliştirilen diğer bir yöntem ise, Webster ve Modifiye Webster yöntemleri kullanılarak gecikme süreleri ve kuyruk uzunluğu değerleri hesaplandıktan sonra mevcut kavşak için yeşil ışık süreleri KKA kullanılarak elde edilmiştir.

5.6.1. Webster ve Modifiye Webster

Webster'in, 1958 yılında önermiş olduğu minimum gecikme için optimal devre süresi formülü yayınlandığı günden beri izole kavşaklarda sabit zamanlı trafik kontrolü alanında yaygın olarak kullanılmaktadır [104]. Webster'in minimum gecikme formülü için optimal devre süresi formülünün modifiye edilmiş pek çok hali bulunmaktadır. Çalışmada Zakariya ve Rabia tarafından önerilen Webster'in optimal devre süresi formülünün geliştirilmiş bir versiyonu olan Modifiye Webster yöntemi de kullanılmıştır. Bu iki yöntem de modern sistemler için optimal devre sürelerinin hesaplanmasında ve etkin yeşil ışık sürelerinin belirlenmesinde hala yaygın olarak kullanılmaktadır[105].

Şekil 5.6'da görüldüğü gibi, Polatlı Refik Cesur kavşağında doğu batı yönünde 2 şeritli, kuzey güney yönünde ise 3 şeritli yollar bulunmaktadır. Her yoldan düz, sağ ve sol yönlerinde gidişe izin verilmektedir. ε_{ds}, ε_d, ε_s, sırasıyla, sağ dönüş yapan, düz giden, sola dönüş yapan araç sayılarını ifade etmektedir. 2 şeritli yollarda ise ε_{ds}, ε_s , sırasıyla, sağ dönüş yapan/düz giden ve sola dönüş yapan araç sayılarıdır. s_i, her bir faz için doygun akış oranını göstermektedir.



Şekil 5.6.Polatlı Refik Cesur kavşak yapısı

İki ve üç şeritli yollarda kritik şerit akış oranları, sırasıyla, Eş. 5.10 ve Eş. 5.11 ile hesaplanmaktadır [105]. Kritik şerit, her bir kavşak kolu için maksimum akışın olduğu şeridi ifade etmektedir. Kritik akış oranı, kritik şerit akış değerinin, doygun akış değerine bölünmesiyle bulunmaktadır.

$$y_i = \frac{\max(\varepsilon_s, \varepsilon_d, \varepsilon_{ds})}{S_i} \tag{5.10}$$

$$y_i = \frac{\max(\varepsilon_s, \varepsilon_{ds})}{S_i} \tag{5.11}$$

Optimal devre süresi (C_0), Webster (Eş. 5.12) ve Modifiye Webster (Eş. 5.13) yöntemleri kullanılarak hesaplanmıştır [106].

$$C_o = \frac{1.5L + 5}{1 - \sum_{i=1}^{n} y_i} \tag{5.12}$$

$$C_o = \frac{1.978L + 5.109}{1.978 - 0.9013 \sum_{i=1}^{n} y_i} \tag{5.13}$$

Burada, L toplam kavşak kayıp zamanını ve y_i, i kolunun kritik akışoranını ifade eder (i=1,2,3,4).

Etkin yeşil süreler (G_i) fazlara ait şeritlerin kritik akış değeriyle orantılı olarak Eş. 5.14 kullanılarak hesaplanmaktadır. Optimal devre süresi de efektif yeşil sürelerle toplam kayıp sürelerin toplamıdır. Dolayısıyla, toplam kayıp zamanı devre süresinden çıkartılır ve kalan süre, fazlara yeşil süre olarak dağıtılır [105].

$$G_i = \frac{y_i}{\sum_{i=1}^{n} y_i} (C_o - L) \tag{5.14}$$

KKA'da girdi olarak kullanılacak olan ortalama gecikme sürelerinin hesabında sabit zamanlı trafik sinyali kontrolü için, yaygın olarak kullanılan Webster eşitliği (Eş. 5.15- Eş. 5.17) ile Zakariya ve Rabia'nın önerdiği Kanada Kapasite Kılavuzu ve Karayolu Kapasitesi Kılavuzunda (HCM) kullanılan zamana bağlı gecikme formülü (Eş. 5.18- Eş. 5.20) kullanılmıştır [10,51,107]. Bazı durumlarda Webster yöntemi, yüksek akım oranlarında aşırı tahminler yaparak, faza gereğinden fazla yeşil ışık süresi verebilmektedir. Modifiye Webster yöntemi ise, yüksek akım oranlarında daha dengeli yeşil ışık süresi tahsis ederek sinyal optimizasyonunu daha iyi gerçekleştirebilmektedir. Sonuç olarak, Webster ve modifiye Webster yöntemleri arasındaki temel fark, Webster yönteminin yoğunluğa oransal bağlı, modifiye webster yönteminin ise lineer bağımlı olmasıdır.

$$\lambda = \frac{G}{C} \tag{5.15}$$

$$x = \frac{q}{\lambda s} \tag{5.16}$$

$$D = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0{,}65\left(\frac{c}{q^2}\right)^{1/3} x^{2+5\lambda} \tag{5.17}$$

D, ortalama araç gecikmesini, *C*, devre süresini ifade ederken, *q*, ilgili fazdaki en yüklü akım değerini (en yoğun fazdaki bekleyen araç sayısı), *G,* faza ait yeşil ışık süresini, *s* doygun akış değerini ifade etmektedir. Doygun akış değeri, 1 saat, 15 dakika gibi birim zamanda kuyruklanma olmadan geçebilen maksimum araç sayısını ifade etmektedir.

Modifiye Webster yöntemi gecikme süresi hesabı aşağıdaki gibidir.

$$D = k_f d_1 + d_2 \tag{5.18}$$

k_f, ilerleme düzeltme faktörüdür ve izole kavşaklar için 1 alınmaktadır [78]. d_1, ortalama sürekli gecikme, d_2, ortalama yüksek trafik akış gecikmesini tanımlamaktadır.

$$d_1 = \frac{C(1-\frac{g_e}{C})^2}{2(1-\min(x,1)\frac{g_e}{C})} \tag{5.19}$$

$$d_2 = 15t_e\left[x-1+\sqrt{(x-1)^2+\frac{240x}{capt_e}}\right] \tag{5.20}$$

x, gerçek trafik akımının, doygun akım değerine bölünmesiyle elde edilen doyma derecesidir. *cap*, gerçek kavşak kapasitesini, *C* devre süresini, t_e, dikkate alınan değerlendirme süresini (8 saat), g_e, hiçbir kayıp zamanın olmadığı ve yeşil sürenin araçlar tarafından etkili bir şekilde kullanıldığı etkin yeşil süreyi ifade etmektedir.

Webster ve Modifiye Webster (Zakariya ve Rabia) yöntemleri kullanılarak gecikme değerleri ve kuyruk uzunluğu girdileri hesaplandıktan sonra mevcut kavşak için yeşil ışık süreleri KKA kullanılarak elde edilmiştir.

5.6.2. Karınca Kolonisi Algoritması (KKA)

Karınca Kolonisi Algoritması (KKA), hesaplama açısından zor kombinatoryal optimizasyon (KO) problemlerini çözmek için kullanılan meta-sezgisel bir yaklaşımdır. Başka bir deyişle, kabul edilebilir bir hesaplama süresinde yeterince iyi çözümler elde etmek için kullanılabilecek bir algoritmadır. Karıncaların gerçek hayattaki davranışlarından esinlenen karınca kolonisi algoritması, her bir ajana yapay karınca adı verilen çok ajanlı bir sistemdir.

Karıncaların yuvaları ile yiyecek arasındaki en kısa yolu seçerken sergiledikleri davranışların benzetimini yaparak en iyi ya da en iyiye yakın çözümleri bulmaya çalışmaktadır. Karıncalar yuvalarından yiyeceklere giderken ve tersi yönde hareket ederken geçtikleri yerlere feromon denilen kimyasal bir madde bırakmaktadırlar. Karar verme noktalarına gelen karıncalar feromon maddesini koklayarak hangi tarafa gideceklerini olasılıklı bir seçim ile karar vermektedir. Feromon kimyasal bir madde olduğu için buharlaşmaktadır. Fakat kısa yol ilerleyen aşamalarda daha fazla karınca tarafından kullanılacağı için feromon yoğunluğuna bağlı olarak seçim olasılığı artacaktır [108]. Sürü akıllı sistemlerinin en başarılı örneklerinden biridir ve klasik gezgin satıcı problemi, yol rotalama ve ağ rotalama gibi birçok farklı türde problemi çözmek için uygulanmıştır [109].

KKA'nın ana adımları şu şekilde özetlenebilir:

- Her düğümdeki feromon değerlerine sabit bir değer verilmesi

- Her bir karınca bir başlangıç düğümüne atanır ve feromon değerine göre komşu düğüme hareket eder. Geçiş olasılıklarını seçmenin birçok farklı yolu vardır. Ancak, günümüzde KKA literatüründe hala en sık olarak Eş. 5.21'de verilen formül kullanılmaktadır. Bu formülle karıncaların i düğümünden j düğümüne hareket etme olasılıkları hesaplanır.

$$p_{ij} = \begin{cases} \dfrac{\tau_{ij}^{\alpha}\eta_{ij}^{\beta}}{\sum_{j\in N_i}\tau_{ij}^{\alpha}\eta_{ij}^{\beta}}, & if\ j \in N_i \\ 0, & if\ j \notin N_i \end{cases} \tag{5.21}$$

Burada N_i, i'nin komşu düğümleri kümesini, $\mathcal{T}_{ij}$, i ve j düğümleri arasındaki feromon değerlerini, η_{ij} ise sezgisel değerleri temsil etmektedir. α ve β değerleri genellikle uygulamaya bağlıdır, sırasıyla feromon ve sezgisel değerlerin önemini ifade ederler. Algoritma, Eş. 5.22 kullanarak her yoldaki feromonu günceller.

$$\mathcal{T}_{ij}(n+1) = (1-\rho)\mathcal{T}_{ij}(n) \tag{5.22}$$

n, iterasyon indeksidir. $\rho \in (0,1]$, buharlaşma oranıdır. $\Delta\mathcal{T}_{ij}$, i ve j arasındaki yol segmentinin güncellenmesi gereken feromon miktarındaki değişimi ifade etmektedir. Bu değer, feromon

salınımı ve buharlaşma oranı gibi faktörlere bağlı olarak hesaplanmaktadır. Yollardaki feromonlar daha sonra Eş. 5.23'e göre güncellenir.

$$\mathcal{T}_{ij}(n+1) = \mathcal{T}_{ij}(n) + \Delta\mathcal{T}_{ij} \tag{5.23}$$

- Durdurma kriteri gerçekleşene kadar bu iterasyonlar devam etmektedir. Durdurma kriteri genellikle maksimum koloni sayısı kadar veya bir önceki iterasyonla son iterasyon arasında değişim oranının 0 olduğu iterasyon sayısı olarak belirlenmektedir.

Literatürde orijinal Karınca Sistemi algoritması (KS), Elitist Karınca Sistemi ve Sıra tabanlı Karınca Sistemi, En Büyük ve En Küçük Karınca Sistemi dahil olmak üzere birçok farklı KKA algoritması bulunmaktadır. Farklı KKA algoritmaları için başlatma ve çözüm oluşturma prosedürleri aynıdır, sadece feromonu güncelleme adımı farklıdır.

KKA'da kullanılan karınca sayısı önemli bir parametredir. Karınca sayısının fazla olması, her iterasyonda daha fazla keşif yapılmasını ve daha fazla feromon salınımı yapılmasını sağlamaktadır. Bu durum daha iyi çözümlere yönelme şansını artırmaktadır. Az karınca kullanmak algoritmanın tüm avantajlarından yararlanamamamıza sebep olabilirken karınca sayısını çoğaltmak da hesaplama yükünü arttırmaktadır. Diğer KKA algoritmalarına kıyasla Sıra Tabanlı Karınca Sistemi genellikle daha az karınca gerektirmektedir. Bu da hesaplama açısından ve uyarlanabilir trafik ışık kontrolü gibi gerçek zamanlı uygulamalar için daha uygundur. Sıra Tabanlı Karınca Sisteminin genel çalışma prensibine göre, hızlı çözüm üretmek için karıncaların çözüm maliyetleri sıralanır ve en yüksek maliyetli olan çözüm uzayından atılır. İyi çözümler bulunduğunda, feromonlar daha hızlı birikmektedir ve bu sebeple en iyi çözümlere daha fazla ağırlık verilmektedir. Trafik ışık optimizasyonu alanında yapılan çalışmalarda da ortalama gecikme süresini ve algoritma karmaşıklık maliyetini en aza -indiren algoritma versiyonunun Sıra Tabanlı Karınca Sistem Algoritması olduğu gösterilmiştir [53,109]. Bu sebeple, bu çalışmada feromon güncellenmesi bu algoritma ile gerçekleştirilmiştir.

Sıra Tabanlı Karınca Sistemi algoritmasında, feromon depolanmadan önce karıncaların çözümleri kalitesine göre sıralanır. Yalnızca *(w-1)* en iyi çözüme sahip karıncanın ve şimdiye kadarki en iyi karıncanın feromon bırakmasına izin verilir. Şimdiye kadarki en iyi çözüm w ile *r,* en iyi karınca $max\{w-r, 0\}$ ile ağırlıklandırılır. Feromon güncelleme kuralı Eş. 5.24'te gösterildiği gibidir [110,111].

$$\mathcal{T}_{ij}(n+1) = \mathcal{T}_{ij}(n) + \sum_{r=1}^{w-1} (w-r)\,\Delta\tau_{ij}^{r} + w\Delta\tau_{ij}^{bs} \tag{5.24}$$

W, feromon bırakan karıncaların sayısını belirleyen, kullanıcı tarafından seçilen bir değerdir. Her bir saniyede 1 karınca gönderilmiştir. Bu değer devre süresine göre farklı alınmıştır. r, karıncaların uygunluğuna göre sıralamasını ifade etmektedir. Daha iyi uygunluk daha düşük sıralama ile ilişkilidir. $\Delta\tau_{ij}^{r}$, i'den j'ye giderken r karıncası tarafından depolanan feromon miktarını göstermektedir. $s_{gb,}$ global en iyi sonucu üreten karıncanın bulduğu yolu ifade eder. $\Delta\tau_{ij}^{bs}$, i'den j'ye giderken en iyi karınca çözümü (s_{gb}), tarafından depolanan feromon miktarıdır. $f(s_r)$, $f(s_{gb})$, sırasıyla, r karıncasının ve global en iyi sonucu üreten karıncanın çözüm uygunluk (fitness) değerlerini ifade etmektedir.

Burada, Eş. 5.25 ve Eş. 5.26 ile karıncaların bırakacağı feromon izleri hesaplanmaktadır. Böylece, daha iyi çözümlere sahip karıncaların daha güçlü feromon izleri bırakması ve diğer karıncalar tarafından bu yolların takip edilmesi sağlanır [110].

$$\Delta\tau_{ij}^{r} = \frac{1}{f(s_r)} \tag{5.25}$$

$$\Delta\tau_{ij}^{bs} = \frac{1}{f(s_{gb})} \tag{5.26}$$

KKA'da girdi olarak, her faz için mevcut trafik kuyruğu, ortalama gecikme süreleri kullanılmıştır.

$q^{i}(t)$, *t* anında trafikte *i* hareket yönündeki kuyruk uzunluğunu göstermektedir. *i*, hareket yönlerini ifade etmektedir. Literatürde kuyruk uzunluğunu hesaplayan formüller aşağıdaki gibidir [51].

$$q(t) = q^{i}(t) \qquad i = 1,2,3,4 \tag{5.27}$$

$q_{out}^{(i)}(t_1, t_2)$, (t_1, t_2) zaman aralığı boyunca *i* hareket yönünde ayrılan araçların sayısının ifade etmektedir. $u(t_1, t_2)$= yeşil ise,

$$q_{out}^{(i)}(t_1, t_2) = min\left[q^i(t_1), 1 + int\left(\frac{t_2 - t_1}{h_w}\right)\right] \quad (5.28)$$

h_w, kavşaktan ayrılan araçlar arasındaki süreyi ifade etmektedir. $u(t_1, t_2)$, (t_1, t_2) zaman aralığındaki ışık durumudur. *"int(.)"* tamsayıya çevirme fonksiyonudur. $u(t_1, t_2)$= kırmızı ise, $q_{out}^{(i)}(t_1, t_2)$=0'dır. (t_1, t_2) zaman aralığında gelen araçların sayısı $q_{in}^{i}(t_1, t_2)$'dir. Gelişler arası süre bilinmediği için, sistemin simülasyonu için gerçek dağılımın iyi bir tahmini olan Eş. 5.29'da verilen poisson dağılımı kullanılmıştır.

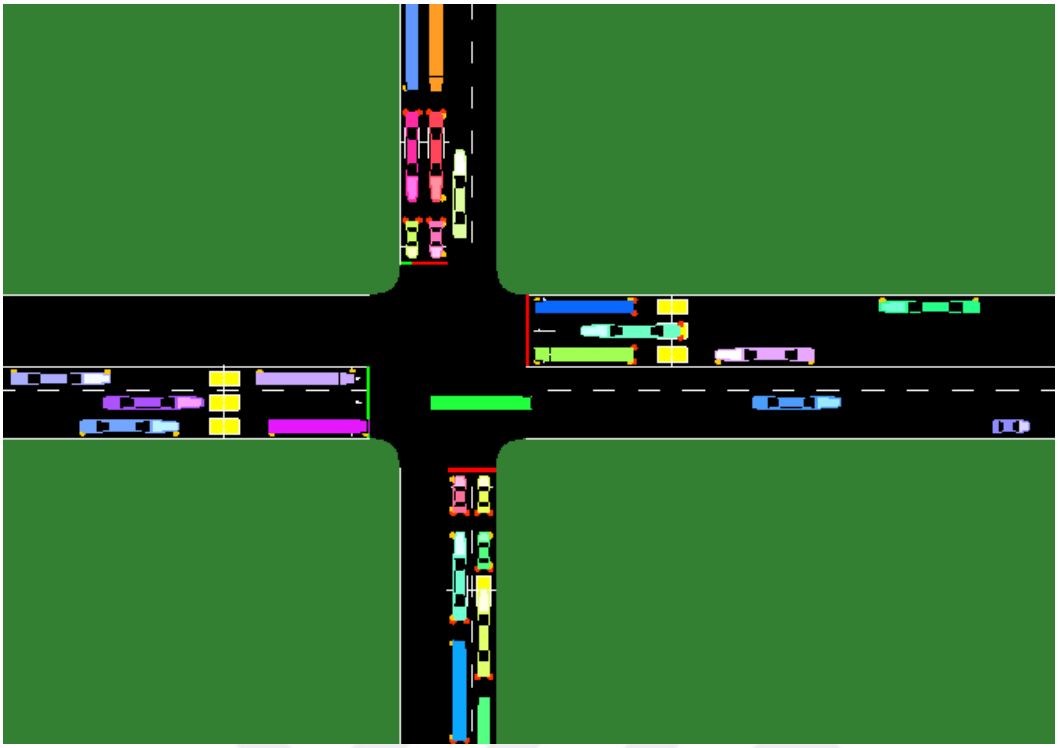
$$P(n) = \frac{(\lambda \Delta t)^n e^{-\lambda \Delta t}}{n!} \quad (5.29)$$

n, pozitif bir tamsayıdır, λ, ortalama araçlar arası varış oranı, Δt, zaman aralığını ifade etmektedir. Trafik akışını temsil eden dinamik formülasyon da şu şekildedir.

$$q(t) = q(t-1) + q_{in}^{i}(t) - q_{out}^{(i)}(t) \quad (5.30)$$

5.6.3. Değerlendirme uygulaması

Çalışmanın bu bölümünde mevcut kavşağın trafik akışı SUMO simülasyon platformunda canlandırılmıştır. Resim 5.7'de Polatlı Refik Cesur Kavşağının SUMO simülasyon ortamındaki görseli verilmiştir. Mevcut kavşak yapısı dikkate alınarak 4 kollu, 4 fazlı, 8 adet trafik lambalı, 10 şeritli bir kavşak tasarlanmıştır. Eldeki veriler ışığında 5 farklı araç türünün bulunduğu trafik akışı simüle edilmiştir.



Resim 5.7.SUMO kavşak yapısı görseli

Webster ve modifiye webster yöntemleri kullanılarak yeşil ışık ve devre süreleri hesaplanmıştır. Veri setinde olduğu gibi simülasyonda Sarı - kırmızı ışık süresi 2 sn, kontrollü geçiş kırmızı ışık koruma süresi 2 sn. yeşil ışık flaşörü 5 sn. ve sarı ışık süresi 3 sn olarak kabul edilmiştir. Yayalar için tüm ışıkların kırmızı olduğu durum 14 sn. olarak alınmıştır. Simülasyon ortamında kullanılan parametreler Çizelge 5.16'da gösterilmektedir.

Çizelge 5.16.SUMO'da kullanılan parametreler

Araç Tipi	*Uzunluk (m)*	*Ortalama Hız (km/s)*	*Hızlanma ivmesi (m/s^2)*	*Yavaşlama İvmesi (m/s^2)*
Araba	3.5-5.5	90	3	4
Kamyon	6-14	50	1-2	3-4
Otobüs	10-18	70	2-3	3-4
Treyler	10-18	80	1-2	2-3
OYTT	6-9	80	2-3	3-4

Trafik ışık planlamasında en temel amaçlardan biri gecikme süresini minimize etmektir. Çalışmada karıncalar tarafından depolanan feromon miktarı ortalama gecikme süresi ile doğrudan ilişkilidir. KKA'da girdi olarak, her faz için mevcut trafik kuyruğu, ortalama gecikme süreleri kullanılmıştır. Her bir sinyal fazının optimal süresi algoritmanın çıktı değeridir. Veri setinde, her faz için kavşağa gelen saatlik araç sayıları ve tipleri verilmektedir. Fakat her bir araç için varış zamanı bilinmemektedir. Bir önceki bölümde bahsedildiği gibi, saatlik varış zamanının, poisson dağılımını takip ettiği varsayılmıştır. KKA algoritması da, kuyrukta bulunan araçların bekleme/gecikme süresi ve bu süre içinde kavşağa gelecek olan araçların tahmini gecikme süresini içeren ortalama gecikme süresini minimize edecek en uygun yeşil ışık süresini belirlemektedir.

t_1 , başlangıç zamanını, t_2, herhangi bir çevrim zamanını, $t_2 - t_1$, yeşil ışık süresini, q, $t_2 - t_1$, zamanında kuyruktaki araç sayısını, t_{min}, minimum, t_{max}, maksimum yeşil ışık süresini göstermektedir ve $t_{min} < t_2 - t_1 < t_{max}$, olmak zorundadır. hw, araçlar arasındaki mesafeyi ifade etmektedir. t_a^i, i aracının varış zamanıdır.

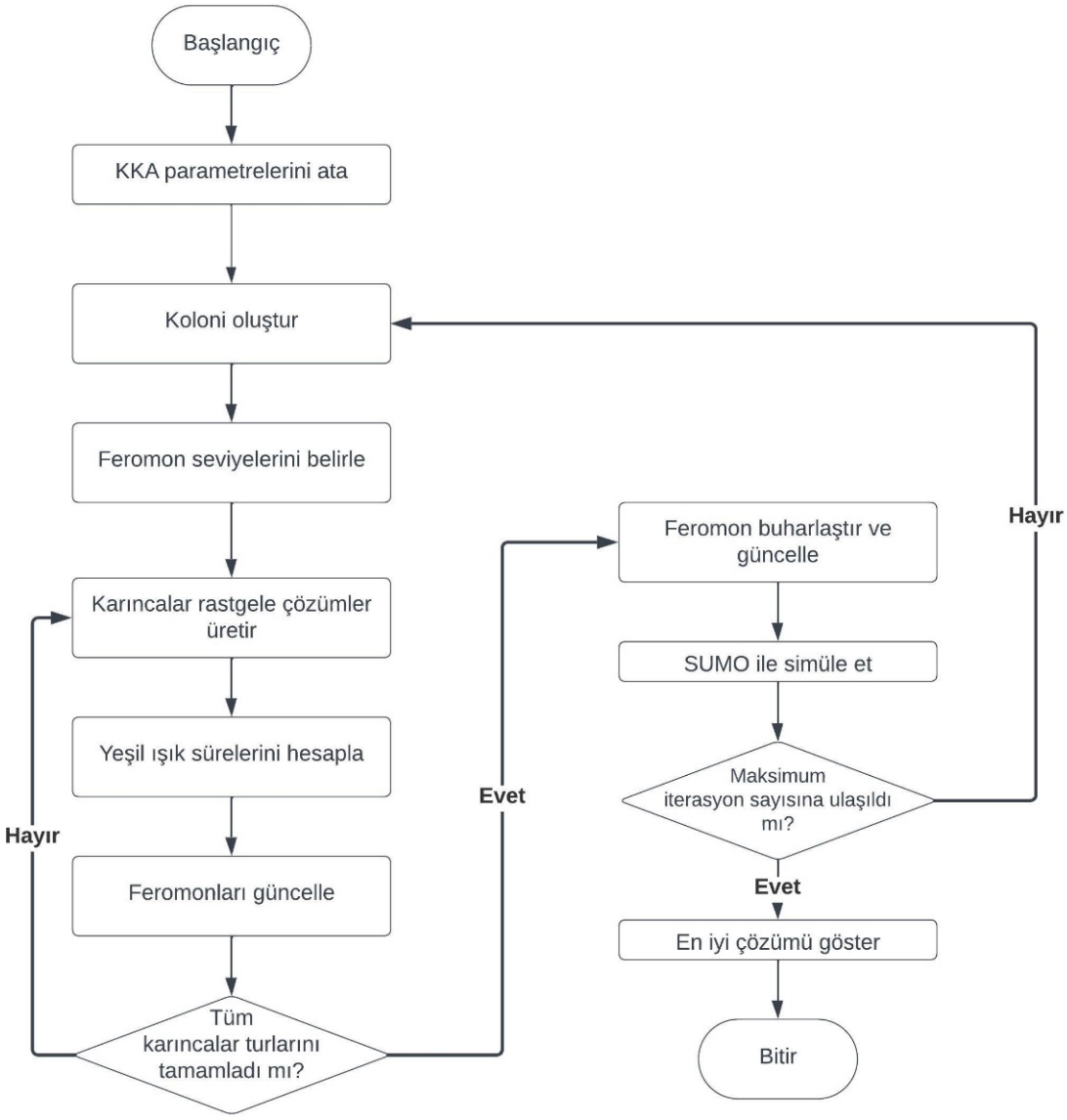
Girdiler elde edildikten sonra, yeşil ışık süresi Eş. 5.31'e göre hesaplanmaktadır [109].

$$j_{1green}(t_1, t_2) = \frac{q(q-1)hw}{2} + \sum_{i=1}^{q}(t_1 - t_a^i) + \frac{\lambda\left((q-1)hw\right)^2}{2} + \frac{\lambda((q-1)hw)\left[\lambda\left((q-1)hw\right)-1\right]hw}{2} \quad (5.31)$$

Eş. 31'deki yeşil ışık süresi, her iterasyonda karınca hareketlerine bağlı olarak tekrar hesaplanmaktadır. İterasyon sonuçlarının birbirlerine yaklaşması, yani ortalama gecikme farklarının sıfır olması ile algoritma sonlandırılmaktadır.

KKA ele alınan probleme uygulanırken alınan kararlar şu şekildedir. Kavşaktaki yeşil ışık durumları, en kısa ve en uzun yeşil ışık süreleri, ışıkların durum değiştirme sırası KKA parametreleri olarak atanmaktadır. Yeşil ışık durumları, aynı anda yeşil veya kırmızı yanan fazları belirtmektedir. Kavşakta karışıklığa sebep vermeyecek şekilde birden fazla faz için yeşil ışık yanabilir. KKA'nın akış diagramı Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Webster yöntemi ile belirlenen devre süresi kavşaktaki bir tur ışık döngü süresini vermektedir. HCM kuralları dikkate alınarak kavşakta kontrollü geçişi ve güvenliği sağlayan sarı + kırmızı ve sarı ışık süreleri belirlenmiştir. Bu süre daha önce Şekil 5.1'de gösterildiği üzere toplam 20 saniyedir.

Yine HCM kurallarına göre her bir faz için en kısa yeşil ışık süresi 5 sn. olarak belirlenmiştir. Kavşak güvenliği için yeşil ışık süresi sonunda kullanılan yeşil ışık flaş süresi de dâhil edilerek en uzun yeşil ışık süresi 85 olarak hesaplanmıştır. Tüm bu değerler, KKA algoritmasının başlangıç değerleri olarak atanmıştır.



Şekil 5.7.Uygulanan KKA'nın akış diyagramı

KKA doğası gereği ihtiyaca göre karınca kolonisi oluşturulmakta ve feromon seviyeleri belirlenmektedir. Koloni sayısı daha hızlı çözüm üretmek ve algoritmanın çalışma zamanını belirlemek için önemlidir. Bu önem dikkate alınarak sıra tabanlı KKA kullanıldığı daha önce açıklanmıştı. Sonraki adımda karıncalar Eş. 5.21'e göre rastgele çözümler üretmektedir.

Üretilen çözümler ile her faz için yeşil ışık süreleri Eş. 5.31'e göre hesaplanmakta ve Eş. 5.24'e göre feromonlar güncellenmektedir. Elde edilen yeşil ışık sürelerine göre Çizelge 5.16'da verilen parametreler ile SUMO ile simüle edilmektedir. Önerilen model maksimum iterasyon sayısına erişince tamamlanmaktadır. Maksimum iterasyon sayısı değişim (iyileşme) olmadan geçen en yüksek koloni sayısı olarak belirlenmiştir. Her fazdaki araç yoğunluğu ve yeşil ışık süresine göre KKA tarafından belirlenen oranda feromon salınır. Feromonların buharlaşma oranına göre de karınca sayısı değişmektedir. Buharlaşma farkı oluşmadığı son durum bizim için, maksimum iterasyon sayısıdır.

KKA'da doğası gereği ihtiyaca göre karınca kolonisi oluşturulmakta ve feromon seviyeleri belirlenmektedir. Koloni sayısı daha hızlı çözüm üretmek ve algoritmanın çalışma zamanını belirlemek için önemlidir. Bu önem dikkate alınarak sıra tabanlı KKA kullanıldığı daha önce açıklanmıştı. Sonraki adımda karıncalar Eş. 5.21'e göre rastgele çözümler üretmektedir. Üretilen çözümler ile her faz için yeşil ışık süreleri Eş. 5.31' e göre hesaplanmakta ve Eş. 5.24'e göre feromonlar güncellenmektedir. Elde edilen yeşil ışık sürelerine göre Çizelge 5.16'da verilen parametreler ile SUMO ile simüle edilmektedir. Önerilen model maksimum iterasyon sayısına erişince tamamlanmaktadır. Algoritma, maksimum iterasyon sayısını değişim (iyileşme) olmadan geçen en yüksek koloni sayısı olarak belirlenmektedir. Her fazdaki araç yoğunluğu ve yeşil ışık süresine göre KKA tarafından belirlenen oranda feromon salınmaktadır. Feromonların buharlaşma oranına göre de karınca sayısı değişmektedir. Ancak, buharlaşma farkı oluşmadığı son durum, algoritmanın durdurma koşulu olan maksimum iterasyon sayısını temsil etmektedir.

5.6.4. Değerlendirme sonuçları ve tartışma

Çizelge 5.17'de, mevcut durum ile birlikte webster, Modifiye webster, Webster gecikmeli KKA ve Modifiye webster gecikmeli KKA için hesaplanmış yeşil ışık devre süreleri ve her yön için hesaplanmış yeşil ışık süreleri verilmiştir. Webster modeli için devre süresi 170 sn. olarak, modify webster modeli için 165 sn olarak hesaplanmıştır. 8 saatlik veri seti simülasyonunda mevcut durumda yaklaşık 200 kere kavşaktaki ışık döngüsü tekrarlanırken Webster ile yaklaşık 170 kere tekrarlanmıştır.

Çizelge 5.17.Webster, Modifiye Webster, KKA, mevcut durum devre süreleri ve yeşil ışık dağılımları

	Devre süresi	*Y1*	*Y2*	*Y3*	*Y4*
Webster	170	37	41	17	11
Modifiye Webster	165	35	39	17	10
Webster Gecikmeli KKA	170	40	43	15	10
Modifiye Webster Gecikmeli KKA	165	37	40	16	10
Mevcut Durum	145	20	35	15	10

Veri seti incelendiğinde yoğunluğun daha yüksek olduğu yön 1 ve yön 2 ye yeşil ışık süresi webster yöntemi ile daha uzun hesaplanmıştır. Çünkü webster yöntemi, doygun akım değerini temel alan bir yöntemdir. Birim zamanda geçen araç sayısı daha yüksek olduğundan bu fazlara daha uzun yeşil ışık süresi atanmıştır. Simülasyon ortamında araç türüne göre ivmelenme, araç boyutu ve kalkış kayıp süreleri dikkate alınarak modifiye webster ile süreler yeniden hesaplanmıştır. Bu sürelerin ortalama gecikme süresi üzerindeki etkisi SUMO ile incelenmiştir.

Çizelge 5.18'de her bir yön için ortalama gecikme süreleri hesaplanmıştır. Devre süresinin artması ile 8 saatlik simülasyonda devre döngü sayısı azalmasına rağmen ortalama gecikme süresi azalmıştır. Özellikle araç yoğunluğunun yüksek olduğu yön 1 için yeşil ışık süresi mevcut duruma göre %95 artarken ortalama gecikme süresi %47 oranında azalmıştır. Yön 2 için yeşil ışık süreleri %15 artarken ortalama gecikme süresi %43 oranında azalmıştır. Kavşaktaki tüm araçlar için en kötü gecikme süresi mevcut durumda yaklaşık 310 sn.'yi bulmaktadır.

KKA ile bu süre 360 sn. olarak hesaplanmıştır. En kötü durumda KKA ile hesaplamanın yüksek çıkmasının sebebi devre süresinin daha yüksek olmasıdır. Özellikle kavşağın en yoğun zamanında yön 4'teki araçlar bu sürelere erişebilmektedir. Ancak ortalama gecikme süresi ile tüm araçları için mevcut duruma göre yaklaşık %40 oranında azaldığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.18.Webster, Modifiye Webster, KKA, Mevcut durum için saniye cinsinden ortalama gecikme süreleri

Yaklaşım Kolu	Taşıt başına gecikme (sn/taşıt)				
	Mevcut durum	*Webster Modeli*	*Modifiye Webster*	*Webster Tabanlı KKA*	*Modifiye Webster Tabanlı KKA*
1 (Eskişehir-Ankara)	76,17	51,25	44,86	41,26	40,11
2 (Ankara-Eskişehir)	80,45	67,34	63,53	57,31	55,40
3 (Polatlı- Huzur evi)	58,14	56,53	58,46	56,73	54,78
4 (Huzur evi- Polatlı)	62,41	64,72	63,24	63,75	62,87

Hesaplama sonuçları, gecikme süresinin, Webster ve Modifiye Webster yöntemleri ile yaklaşık sırasıyla %32 ve %42 oranlarında azaltmanın mümkün olduğunu göstermiştir. Kavşaktaki araç türünün farklılığı dikkate alınarak gerçekleştirilen modifiye webster ile ortalama gecikme sürelerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Çalışmada ortalama gecikme süresi azalırken en kötü senaryoda en uzun gecikme süresi artmıştır. Bu artış hesaplanan devre süresi artışından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, optimum devre süresi ve KKA ile hesaplanan yeşil ışık süreleri ile ortalama gecikme azaltılarak kavşaklardaki trafik yoğunluğunun azaltılması sağlanmaktadır.

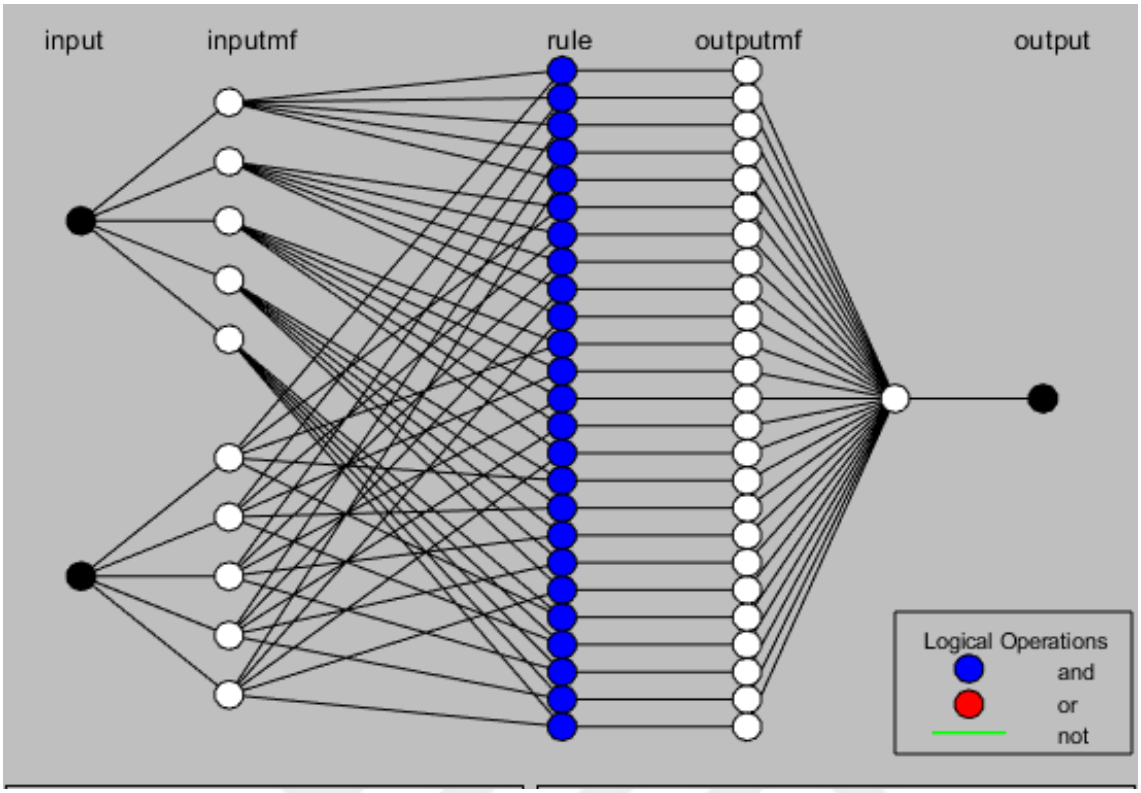
5.7. Bulanık Mantık Tabanlı Akıllı Trafik Işık Kontrol Yöntemi

Ele alınan problemin çözümü için geliştirilen bir diğer yöntem ise Bulanık Mantık tabanlı akıllı trafik ışık kontrol yöntemidir. Bu yöntemde her bir kavşak kolundaki kuyruk uzunluğu bir giriş parametresi olarak kullanılmıştır. Çıktı, Bulanık Mantık kurallarına göre öncelik verilecek cadde veya faz sırasının seçimidir. Yeşil faz sırası belirlendikten sonra ANFIS tabanlı bir ışık kontrol planı önerilmiştir. Bekleme/gecikme süresi ve kuyruk uzunluğunu trafik ışığı kontrolörü için girdi olarak kullanılmış ve yeşil ışığın uzatılma süresi belirlenmiştir. Yöntem, Polatlı Refik Cesur kavşağınna uygulanmıştır.

5.7.1. ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)

ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), karmaşık problemleri çözmek amacıyla bulanık mantık ve yapay sinir ağlarının temel prensiplerini birleştiren bir hesaplama modelidir. Bu model, özellikle belirsizlik ve kesin olmayan durumlarla başa çıkmak için tasarlanmış matematiksel bir çerçeve olan bulanık mantığı temel alır. Bulanık mantık, verilerdeki bu tür belirsizlikleri ele almak için dil değişkenleri, bulanık kümeler ve bulanık kurallar kullanır. Öte yandan, yapay sinir ağları, insan beyninin yapısından ve işleyişinden ilham alarak tasarlanmış hesaplama modelleridir.

Yapay sinir ağları, bağlı düğmelerden oluşan sinir hücreleri ile bilgiyi işleyen ve ağırlıklı bağlantılar aracılığıyla bilgiyi aktaran yapılardan oluşur. Yapay sinir ağları, verileri öğrenebilme yeteneği ile bilinir ve farklı görevler için kullanılabilir, bu görevler arasında desen tanıma, regresyon ve sınıflandırma yer alır. ANFIS, hem bulanık mantığın hem de yapay sinir ağlarının güçlü yönlerini birleştirir. Nöro-fuzzy sistemler olarak bilinen bu yaklaşım, özellikle verilerin eksik veya kesin olmadığı karmaşık alanlarda sorunları çözmek için esnek ve güçlü bir yaklaşım sunar. Kontrol sistemleri, karar destek ve gerçek dünya problemlerini modelleme gibi alanlarda, karmaşık, belirsiz ve kesin olmayan senaryoları ele almak için bu tür nöro-fuzzy sistemler etkili bir araç sağlarlar. Resim 5.8’de ANFIS modelimizin genel yapısı gösterilmiştir.



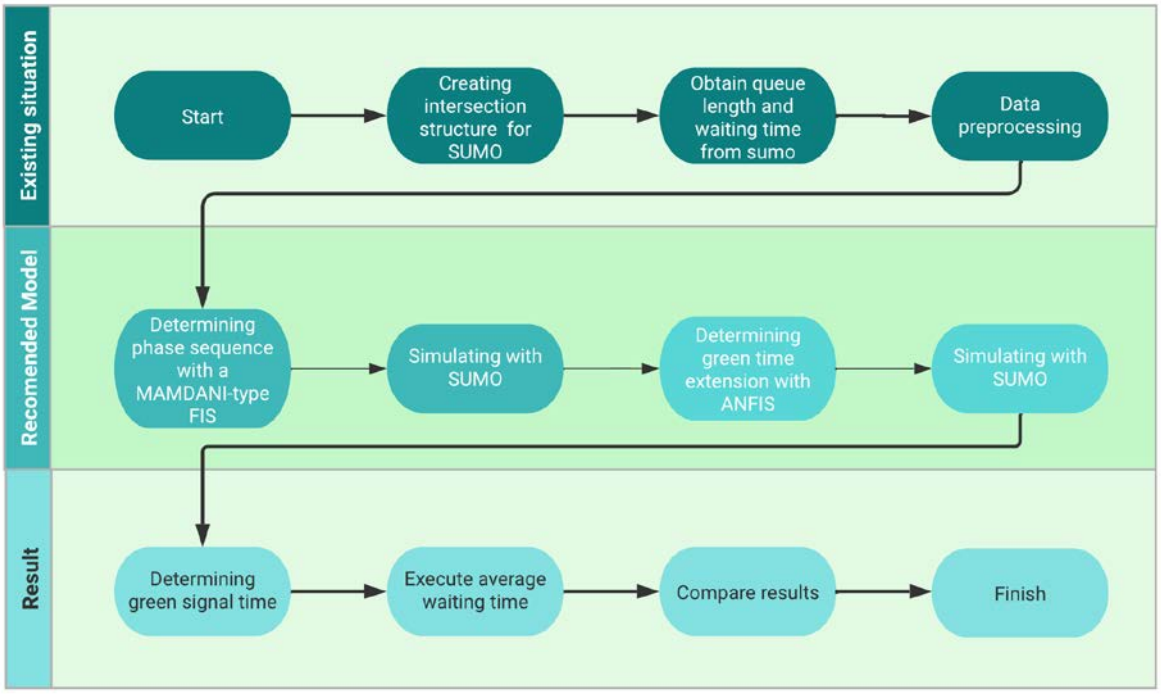
Resim 5.8. Matlab ANFIS Model Yapısı

"inputmf (input membership functions)" ve "outputmf (output membership functions)" terimleri, bu modelin giriş (input) ve çıkış (output) değişkenlerinin hangi tür bulanık mantık üyelik fonksiyonlarına sahip olduğunu ifade etmektedir.

5.7.2. Değerlendirme Uygulaması

Bu bölümde, Polatlı Refik Cesur kavşağı için Bulanık Mantık ve ANFIS tabanlı bir akıllı denetim mekanizması önerilmiştir. Bu mekanizma, araçların geliş zamanlarını önceden bilmeden, trafik akışının Poisson dağılımına uygun olduğu varsayımıyla çalışır.

Çalışmanın devamında kavşaktaki trafik ışıklarının kontrolünü sağlayan bulanık mantık tabanlı bir akıllı denetim mekanizması sunulmuştur. Temel hedef, trafik akışını iyileştirmek ve kavşak kapasitesini artırarak gecikme sürelerini azaltmaktır. İlk olarak, trafikte izin verilen sonraki faz belirlenir. Daha sonra, araç yoğunluğu ve gecikme süreleri dikkate alınarak yeşil ışık süresinin adaptif olarak uzatılması gereken bütünleşik bir sistem modeli oluşturulur. Model yapısı Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



Şekil 5.8.Trafik kontrol modeli

Bu tipik dört kollu kavşaklar, M/M/1 kuyruk teorisi prensibi ile çalışır. Bu teoriye göre araçlar sırayla kuyruğa girer ve hizmet alır, ilk gelen ilk hizmet ilkesi (FIFO) uygulanır. Ancak bu çalışmada sabit zamanlı ışık kontrol planları yerine akıllı bir kontrol sistemi kullanılmıştır.

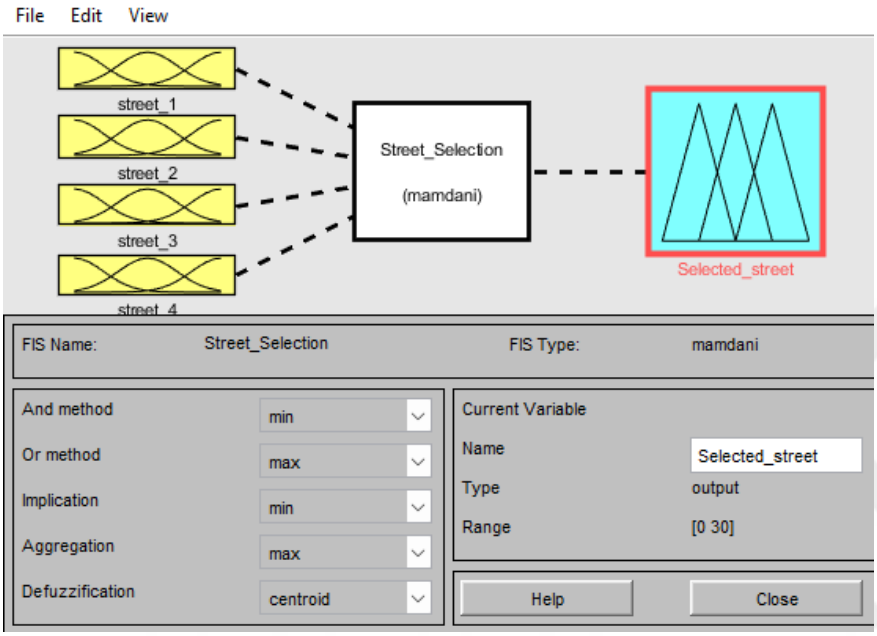
Şekil 15'te kavşağın yapısı simülatör ortamında görselleştirilmiştir. SUMO'dan anlık olarak kuyruktaki araç sayısı ve gecikme süresi verileri çekilmiş ve excel'e yazdırılmıştır. Trafiğin sağdan aktığı ülkelerde faz sırası saat yönünde ilerlemektedir. Sonraki başlıkta ise faz sırasının çalışmada belirlenme şekli açıklanacaktır.

Sonraki faz modulü

Bu aşamada, trafik kavşağının otomatik kontrolünü bulanık mantık ile tasarlayan bir sistem geliştirilmiştir. Sistemin modellenmesi için kural tabanlı Mamdani tipi bir bulanık modelleme tekniği kullanılmıştır. Her bir caddedeki araç yoğunluğu, faz sırası cadde seçimi için sistem parametreleri olarak tanımlanmış ve bu parametrelerin üyelik fonksiyonları, bulanık mantık tarafından belirlenmiştir. Sumo'dan çekilen veriler kullanılarak, kuyruk uzunluğu (çok kısa, kısa, uzun, çok uzun, aşırı uzun) her yol için tanımlanmıştır. En uzun

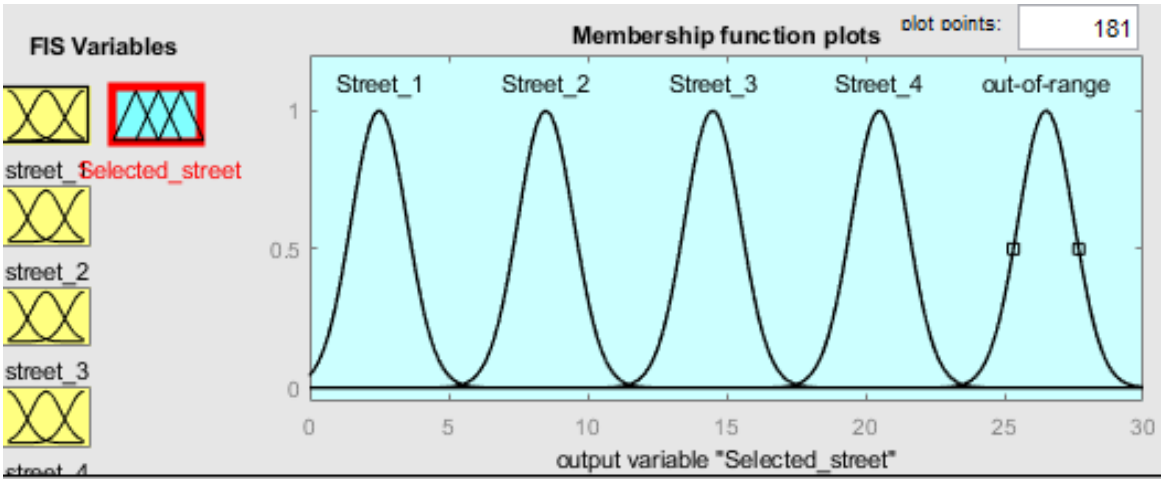
kuyruk olan cadde bir sonraki fazda yeşil ışık verilecek caddedir. Bu işlem sonucunda, bir sonraki trafik fazı belirlenmektedir.

İlk olarak, Resim 5.9'da gösterilen Mamdani bulanık mantık sistemi tarafından hangi caddeye yeşil ışık verileceğine karar verilir.

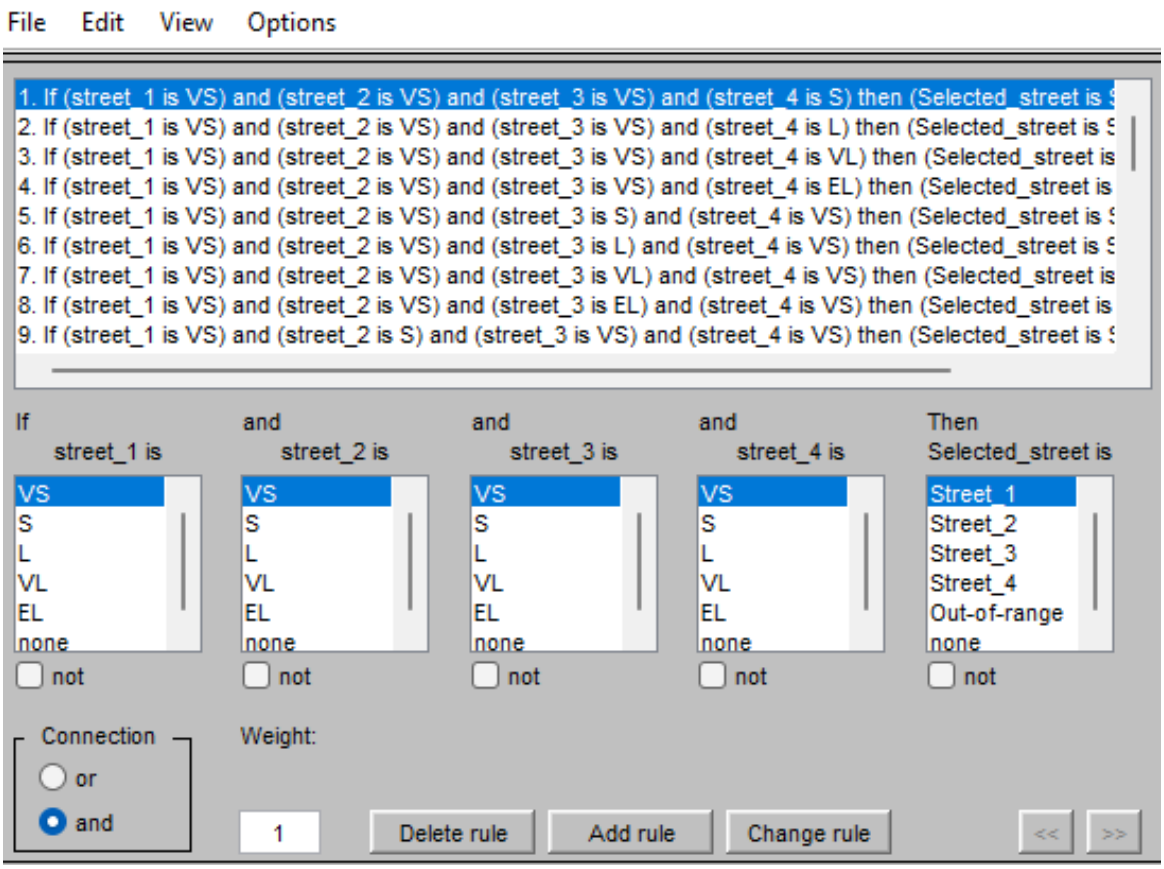


Resim 5.9. Cadde seçimi için Mamdani tip bulanık mantık modeli

Bulanık mantık modelleme sürecinde, önce giriş ve çıkış parametreleri belirlendikten sonra, her biri için farklı dilsel değişkenlerin sayısına karar verilir. Daha sonra üyelik fonksiyonlarının türü seçilir. Bu çalışmanın ilk bölümünde, giriş parametresi olarak kuyruk uzunluğu, çıkış parametresi olarak cadde seçimi kullanılmıştır. Gauss üyelik fonksiyonları tercih edilmiştir. Kavşaktaki yollar sırasıyla street_1, Street_2, Street_3 ve Street_4 olarak adlandırılmış ve giriş parametreleri için her yolun kuyruk uzunluğu "çok kısa", "kısa", "uzun", "çok uzun", "aşırı uzun" şeklinde isimlendirilmiştir. Her yol için farklı Gauss üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır. Çıkış fonksiyonları cadde seçiminde "cadde 1", "cadde 2", "cadde 3", "cadde 4" şeklinde belirlenmiştir. Bu tasarlanan giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları Resim 5.10'da gösterilmektedir.



Resim 5.10.Seçilen cadde için çıkış üyelik fonksiyonu



Resim 5.11.Cadde seçimi için oluşturulan kurallar

Resim 5.11'de gösterildiği gibi sistem tarafından akıllı kontrol mekanizması sağlanabilmesi amacıyla belirli kurallar oluşturulmuştur. Bu kurallar, her bir yolun trafik yoğunluğu düzeyine dayalı olarak bir cadde seçilmesini içerir. Örneğin, ikinci kurala göre, eğer

Street_1, Street_2 ve Street_3 kuyrukları çok kısa ise ve Street_4 kuyruğu kısaysa, Street_4 tercih edilir.

Bulanık mantık yaklaşımıyla elde edilen çıktıları daha anlamlı hale getirmek ve kullanıcıya daha açıklayıcı bilgiler sunmak için bir durulaştırma işlemi yapmak gerekebilmektedir. Durulaştırma, bulanık çıktıları kesin bir sayıya dönüştürerek yorumlanabilir sonuçlar elde etmenize yardımcı olur.

Durulaştırma işlemi, Mamdani tipi bulanık mantık sistemlerinde genellikle kullanılır. Bu işlem, bulanık çıktıları net bir sayısal değere dönüştürmek için kullanılır.

Matlab'da durulaştırma işlemi genellikle centroid veya bisector gibi durulaştırma yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Çalışmamızda “evalfis” fonksiyonu, yani ağırlık merkezi yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin seçilme sebebi oluşan her tür çıkarım kümesine çözüm bulma kabiliyetine sahip olmasıdır [112].

Yeşil ışık uzatma süre modülü

Bu modülde, ilk aşamada belirlenen trafik fazının yeşil ışık süresinin ne kadar uzatılması gerektiği hesaplanmaktadır. Bu süre, trafik yoğunluğu ve gecikme süresine bağlı olarak ayarlanabilir. ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), araç gecikme süresi ve kuyruk uzunluğunu gözlemleyerek trafik ışıklarını kontrol etmektedir. Bu sayede trafik sinyali zamanlaması, trafik yoğunluğuna ve her bir caddedeki araç sayısına göre ayarlanabilir, bu da trafik akışını daha düzenli hale getirebilir [113].

Bu sistem, trafik sinyali faz sıralarını Bulanık Mantık kullanarak belirler ve her bir trafik fazı için yeşil ışık süresini ANFIS teknolojisi ile ayarlayarak trafik akışını yönlendirir. Bu yaklaşım, trafik akışının daha verimli hale gelmesini sağlar. ANFIS modelinin kullanılma sebebi ise bu süreyi trafik durumlarına göre dinamik olarak ayarlayabilmesidir.

Yeşil ışık sürelerini faza atayan süreç, bulanık mantık veya bulanık çıkarım sistemi (FIS) tarafından modellenmektedir. Bulanık mantıkta temelde, ilk olarak kuralın öncülüne uygunluk derecesine bakılır. Elde edilen uygunluk derecesi her kuralın sonucundan çıkarılır. Sonuçların hepsi toplam sonuç elde etmek için bir araya getirilir.

ANFIS trafik sinyal kontrolcüsünde Sugeno türü bulanık mantık sistemini kullanmaktadır. Kuralların sonuç bölümünde, birinci dereceden Sugeno türü FIS, çıkış üyelik fonksiyonlarını modellemek için bir lineer sistem kullanmaktadır. Bu sistem belirli kurallara göre işlemektedir. FIS, çıkış üyelik fonksiyonunu aşağıdaki kurallara dayanarak oluşturmaktadır.

If input_1= x and input_2=y Then output_z= ax+by+c şeklinde hesaplanır. İki girdinin lineer bir kombinasyonunu kullanarak bir çıkış değeri hesaplar. "a" ve "b" terimleri, girdi değerlerinin katlarını temsil ederken, "c" sabit bir terimdir. a, b ve c parametreleri trafik ışığı kontrolüyle ilgilidir ve yeşil ışık süresini belirlemek için kullanılır. Bu parametreler, belirli bir trafik sinyali kontrol stratejisinin veya algoritmasının sonuçlarını hesaplamak için kullanılır. a ve b, trafik ışığı süresini belirlerken kullanılan girdilerin (örneğin, kuyruk uzunluğu veya gecikme zamanı) ağırlıklarıdır. a, kuyruk uzunluğunun yeşil ışık süresine olan etkisini temsil eder. Büyük bir "a" değeri, kuyruk uzunluğunun yeşil süreyi daha fazla etkilediği anlamına gelir. b, gecikme zamanının yeşil ışık süresine olan etkisini temsil eder. Büyük bir "b" değeri, gecikme zamanının yeşil süreyi daha fazla etkilediği anlamına gelir. c, trafik ışığının başlangıç değerini temsil eder. Yani, yeşil ışığın başlangıç süresini ifade eder. Örneğin, c = 2 gibi bir değer, yeşil ışığın başlangıç süresini 2 birim süreyle başlatır.

Simülasyon sonuçlarını optimize etmek amacıyla, regresyon analizi kullanılarak belirlenen optimal ağırlıklar a = b = 0.026 ve sabit bir değer olan c = 2 kullanılmaktadır. Bu değerler, analitik süreçlerle elde edilen veri setlerini en iyi şekilde uyumlayarak, simülasyon sonuçlarının istenen performansı elde etmesini sağlamak üzere belirlenmiştir.

Bu kural, girdilere dayalı olarak bir çıkış üretmek için lineer bir model kullanır ve bu çıkışları toplam sonucu elde etmek için birleştirir. Bu sayede, yeşil fazların uzatma süreleri belirli bir mantık temelinde ayarlanabilir ve trafik akışını optimize etmek için kullanılabilir.

Input_1 (x) = Trafik Gecikme Süresi, W_t (0 - 80 saniye)

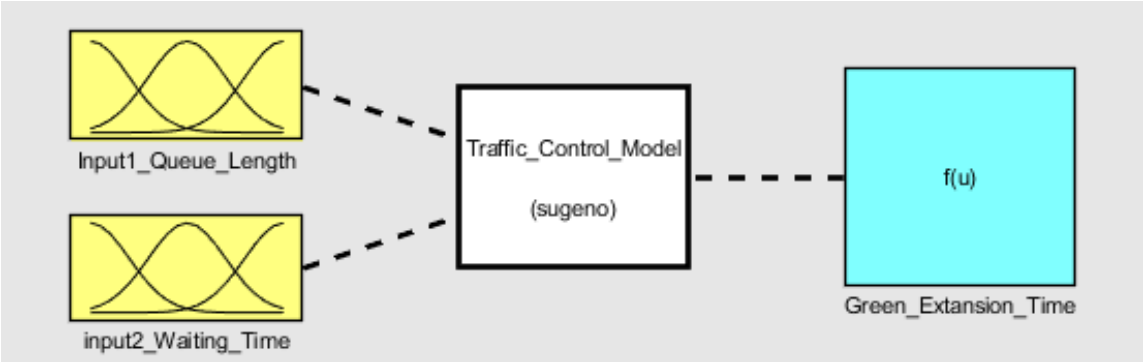
Input_2 (y) = Trafik Kuyruk Uzunluğu, Q_t (0 - 60 araç)

Output_z = Trafik Yeşil Işık Uzatma Süresi, E_t (0 - 6 saniye).

Bu nedenle, Yeşil Işık Uzatma Süresi Çıkışı, $E_t = a[W_t] + b[Q_t] + c$ şeklinde ifade edilir.

Veri Ön İşleme adımında eldeki veriler analiz edilerek anlamlı bir şekilde veriler temizlenmiştir, eksik değerler doldurulmuştur, aykırı değerler düzeltilmiştir.

Veriler, MATLAB yazılımı kullanılarak iki ayrı bölümde ele alınmıştır: eğitim verileri (%70) ve test verileri (%30). Eğitim verileri, modelin eğitildiği verileri içerirken, test verileri ise eğitilen modelin performansının değerlendirilmesi amacıyla kullanılmıştır. Eğitim seti üzerinde ANFIS modeli eğitilmiş ve bu eğitilmiş model daha sonra test verileri üzerinde değerlendirilmiştir. Önerilen Akıllı Trafik Kontrol Sistemi ağ tasarımı Resim 5.12'de gösterilmektedir.



Resim 5.12.Akıllı Trafik İçin Bulanık Mantık Kontrolü

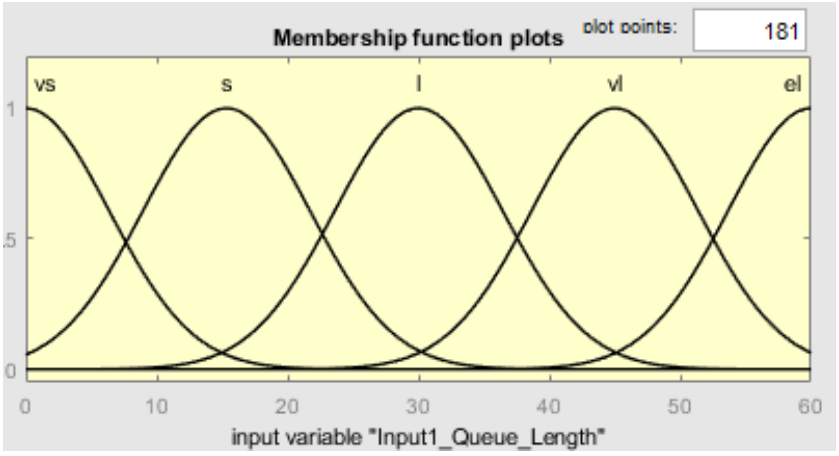
Çizelge 5.19'da farklı üyelik fonksiyonları ve bu fonksiyonlara karşılık gelen MATLAB isim kodları ile bunların hata değerleri verilmiştir. Hata değeri, belirli bir üyelik fonksiyonunun belirli bir uygulamadaki performansını ölçen bir metrik olarak kullanılabilmektedir. Örneğin, hata değerleri ne kadar düşükse, belirli bir üyelik fonksiyonunun o uygulamadaki performansının o kadar iyi olduğu söylenebilir. Bu, üyelik fonksiyonlarının belirli bir problem bağlamında ne kadar etkili olduğunu değerlendirmemize yardımcı olabilmektedir.

Çizelge 5.19.Üyelik Fonksiyonları Hata Değerleri

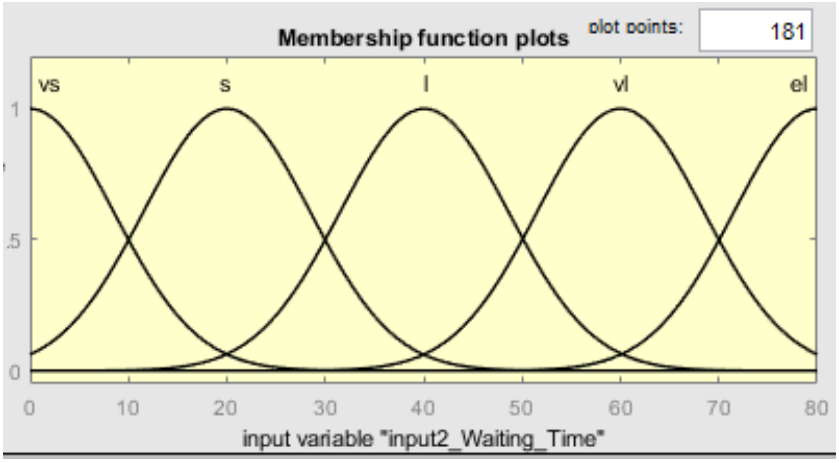
Üyelik Fonksiyonu	*Matlab İsim Kodu*	*Hata Değeri*
Üçgen Üyelik Fonksiyonu	trimf	0,92391
Yamuk Üyelik Fonksiyonu	trapmf	0,92398
Çan Şekilli Üyelik Fonksiyonu	gbellmf	0,92387
Gauss Üyelik Fonksiyonu(tam simetrik)	gaussmf	0,92386
Gauss Üyelik Fonksiyonu	gauss2mf	0,92387
∏ Üyelik Fonksiyonu	pimf	0,92411
Sigmodial Üyelik Fonksiyonu(tam simetrik)	dsigmf	0,92411
Sigmodial Üyelik Fonksiyonu	psigmf	0,92412

Trafik ışık kontrolü için gerekli olan tüm girdi ve çıktı değişkenlerinin ayrı ayrı üyelik fonksiyonları belirlenmiştir. Bu girdiler, kuyruk uzunluğu (Q_t), gecikme zamanı(W_t) olarak tanımlanmaktadır. Çıktı değişkeni ise yeşil ışık süresinin uzatılma süresidir (E_t). Verilere dayalı olarak, girdi üyelik fonksiyonlarının aralığı şu şekilde tanımlanmıştır: SUMO'dan elde edilen verilere göre, kuyruk uzunluğu için 0 ila 60 araç arasında, gecikme süresi ise 0 ila 80 saniye arasında değişmektedir. Girdi üyelik fonksiyonları Resim 5.13 ve Resim 5.14'te grafiksel olarak gösterilmiştir. 5 farklı etiket tanımlanmıştır. Bunlar very short(VS), short(S), long(L), very long(VL), extremely long(EL)'dir.

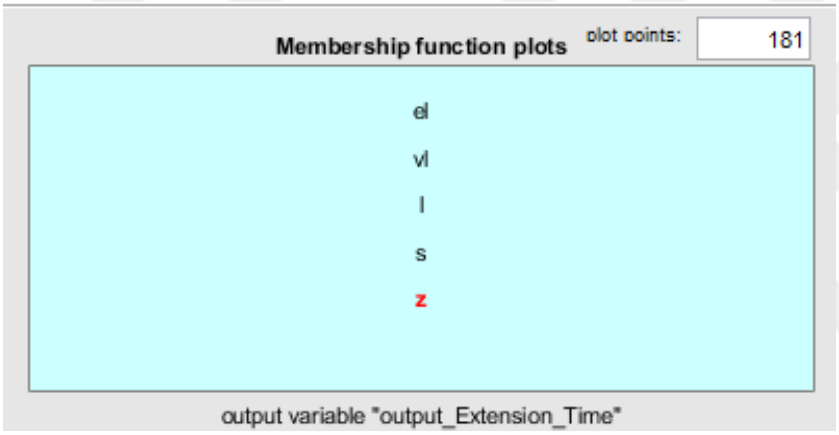
Çıktı üyelik fonksiyonlarının aralığı ise 0 ile 6 saniye arasında değişmektedir ve bu fonksiyonlar Resim 5.15'te sunulmuştur.



Resim 5.13.Araç Kuyruk Uzunluğu 0-60 araç

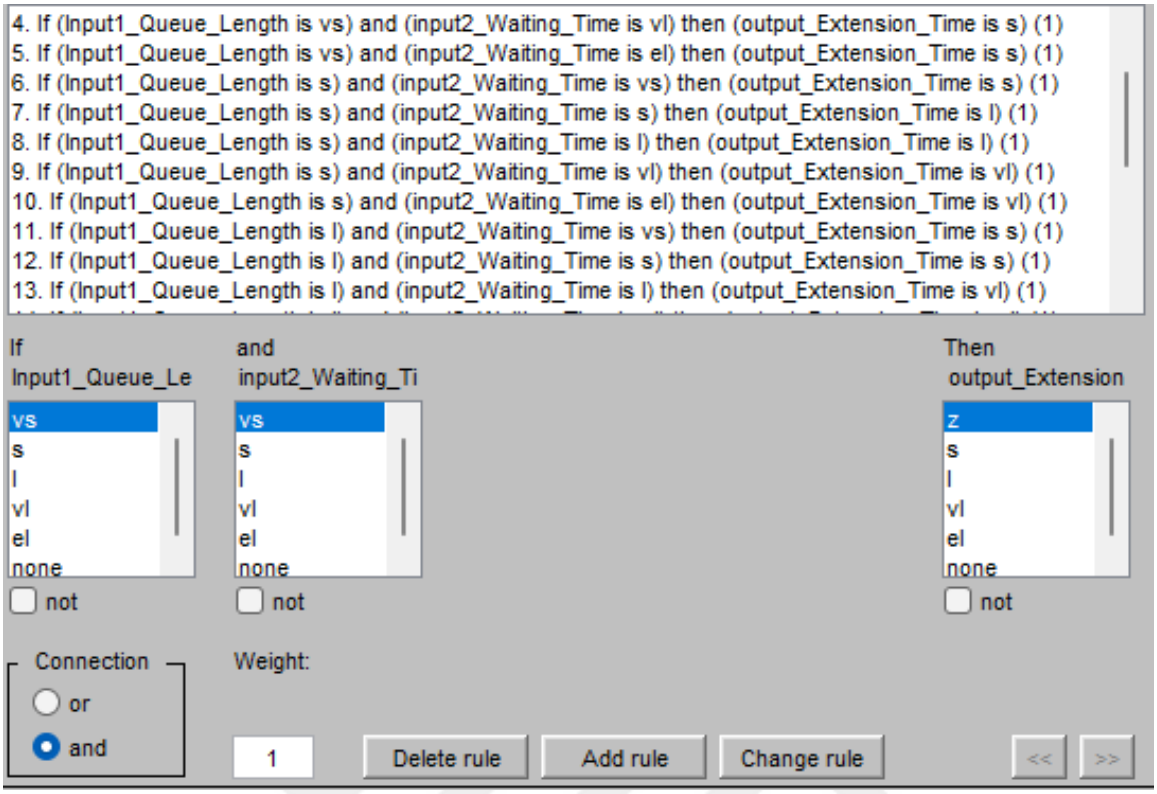


Resim 5.14.Araç gecikme süresi 0-80 saniye



Resim 5.15.Yeşil ışık uzatma süresi 0-6 saniye

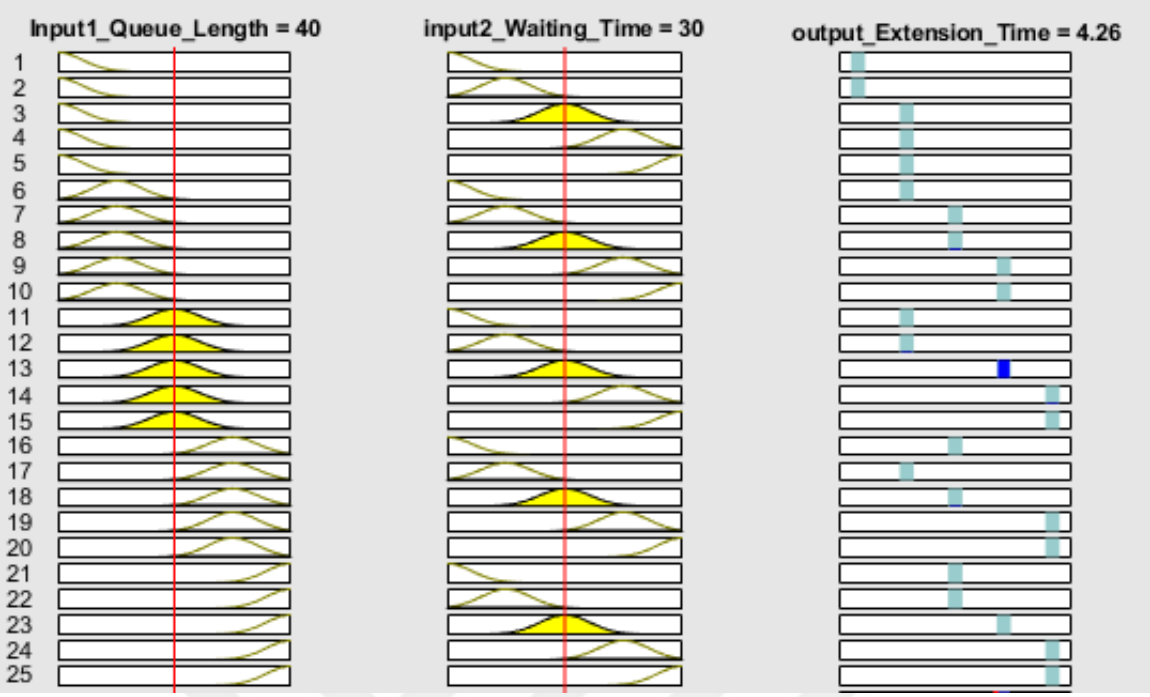
Daha sonra IF-THEN ifadelerini kullanarak bulanık kurallar yazılmıştır. IF kısmından sonra karşılanması gereken koşul, THEN ifadesinden sonra koşul karşılandığında yapılması gereken sonucu göstermektedir. Kurallar Şekil 5.16'da gösterilmiştir.



Resim 5.16.Bulanık Kurallar

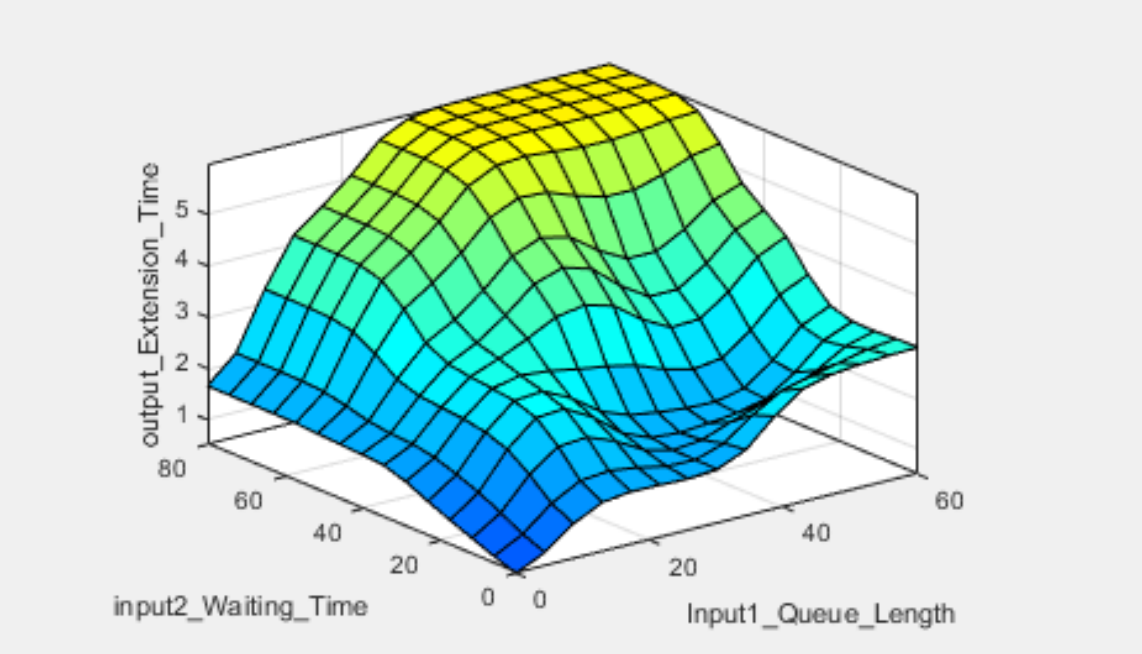
5.7.3. Değerlendirme Sonuçları ve Tartışma

Polatlı Refik Cesur kavşağı SUMO simülasyon platformu kullanılarak canlandırılmıştır. Daha sonra, PYTHON yazılım dili ile bu simülasyon platformundan elde edilen araç gecikme süreleri ve kuyruk uzunluk bilgileri çekilmiştir. İlk aşamada, bu verileri kullanarak Mamdani tipi Bulanık Mantık modeli kullanılarak yeşil ışığın hangi fazda yanması gerektiği belirlenmiştir. Faz sırasının belirlenmesinin ardından, cadde üzerindeki kuyruk uzunluğu ve gecikme sürelerini dikkate alan ANFIS modeli kullanılarak yeşil ışık süresinin nasıl ayarlanacağına karar verilmiştir. ANFIS trafik kontrolörünün çıktısı Resim 5.17'de gösterilmiştir. Bu yöntem, karmaşık trafik kontrol problemlerini ele almak için simülasyon ve bulanık mantık modellemesini birleştiren bir yaklaşım sunar ve trafik akışını daha etkili hale getirmek amacıyla yeşil ışık sürelerini uyarlamada kullanılır.



Resim 5.17.Bulanık kurallar ve yeşil ışık uzatma süresi ilişkisi

Herhangi bir faz için kuyruk uzunluğu 40 araç ve gecikme süresi 30 saniye olarak kabul edildiğinde, ANFIS tabanlı model, yeşil ışık süresinin 4,26 saniye uzatılması gerektiğini hesaplamaktadır. Resim 5.18'de, iki girdi değişkeni ve bir çıktı fonksiyonunun yüzey grafiğini göstermektedir. Bu grafik, araç kuyruk uzunluğu ve gecikme süresinin artmasıyla yeşil ışık süresinin arttığını göstermektedir. Bu süre maksimumda 6 saniyeye kadar çıkabilmektedir. ANFIS denetleyici, farklı trafik yoğunlukları ve gecikme süreleri için yeşil ışık süresini etkili bir şekilde ayarlamaktadır. Resim 5.18'de farklı gecikme süreleri ve kuyruk uzunlukları senaryolarına göre yeşil ışık süresindeki artışlar ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Bu sonuçlar, trafik akışının yönetiminde ANFIS tabanlı kontrolün etkinliğini vurgular.



Resim 5.18. ANFIS çıktıları için yüzey görünümleri

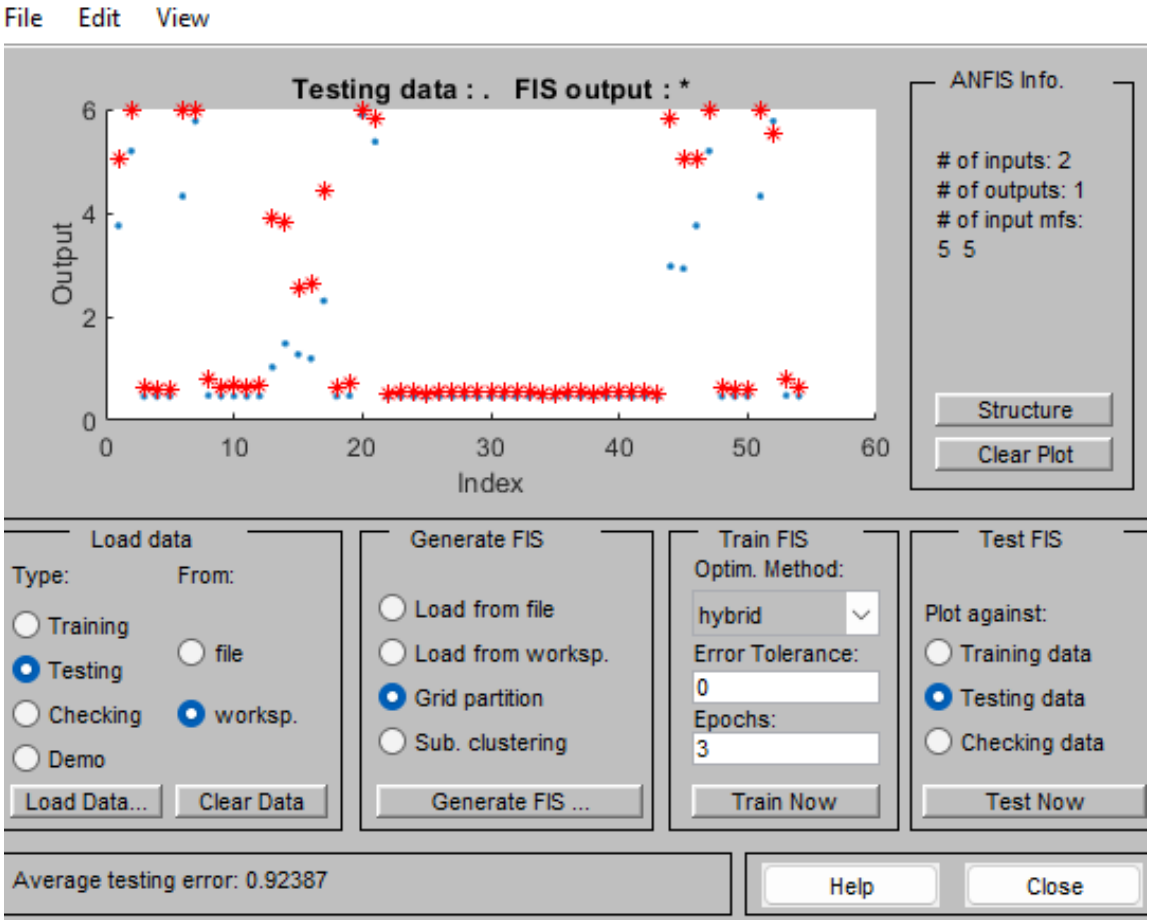
Kuyruk uzunluğu ve araçların gecikme süresi arttıkça, yeşil ışık uzatma süresi aşamalı olarak artış göstermektedir. En yüksek 6 saniyeye ulaşmıştır. Çizelge 5.20'de gösterildiği gibi, ANFIS denetleyicisi, farklı trafik yoğunlukları ve gecikme süreleri verildiğinde yeşil ışık uzatma süresini etkili bir şekilde atamaktadır.

Çizelge 5.20.Sistem performansı

Kuyruk Uzunluğu (Queue Length)	*Bekleme/gecikme süresi (Waiting Time)*	*Işık uzatma süresi (Extension Time*
5	10	1,17
10	10	1,75
15	15	2,56
20	20	2,87
25	25	2,97
30	25	3,32

Test kümesinin ortalama hatası 0.92648 sn olarak hesaplanmıştır. Resim 5.19’da, MATLAB'da oluşturulan ANFIS simülasyonunu göstermektedir. Mavi noktalar gerçekte olan kuralları, kırmızı renkler ise bizim modelimizin kurallarını ifade etmektedir.

Optimizasyon modeli "hybrid" olarak seçilmiştir. Bu model, ANFIS modelinin eğitimi sırasında hem genetik algoritma hem de gradient tabanlı yöntemlerin bir kombinasyonu kullanılıyor anlamına gelmektedir. Bu, ANFIS modelinin daha iyi performans göstermesine yardımcı olabilir. Epoch (eğitim süreç döngüsü) değeri 3 olarak ayarlanmıştır. Bu, ANFIS modelinin en fazla 3 dönem boyunca eğitildiği anlamına gelmektedir. Her eğitim süreç döngüsü, eğitim verileri üzerinde modelin güncellenmesini ve öğrenme sürecini ifade etmektedir. Daha fazla epok, modelin daha fazla eğitildiği anlamına gelir, ancak fazla eğitim süreç döngüsü kullanmak aşırı uyum sorunlarına yol açmaktadır [114]. Bu nedenle epok değeri 3 alınmıştır.



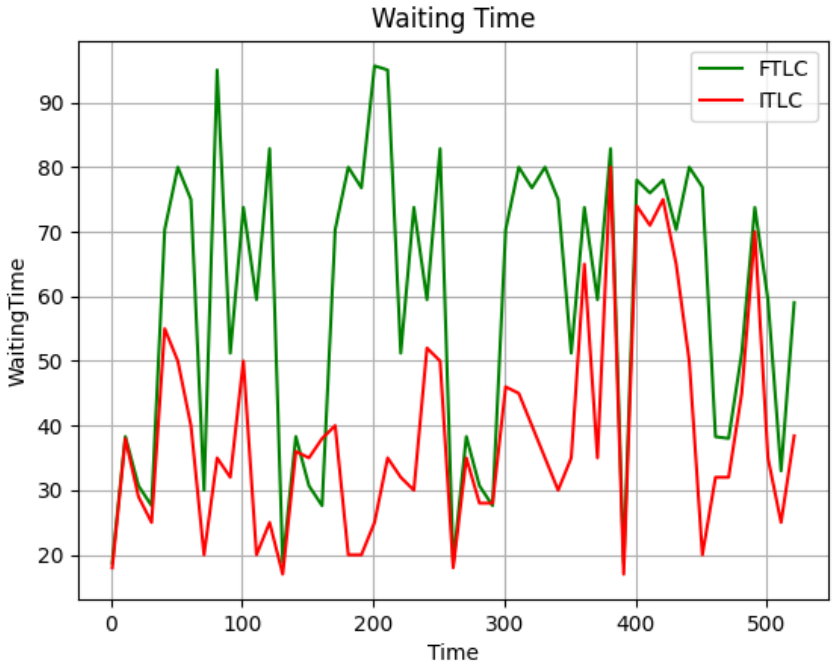
Resim 5.19.ANFIS simülasyonu

Önerilen yeni Akıllı Trafik Kontrol modeli, SUMO (Simulation of Urban MObility) simülasyon platformu ile entegre edilerek, taşıt başına gecikme süreleri üzerindeki etkisi detaylı bir şekilde araştırılmıştır. Araştırma sonuçları, her bir caddenin gecikme sürelerinde gözlemlenen iyileştirmeleri Çizelge 5.21'de sunmaktadır.

Çizelge 5.21.Gecikme zamanında sağlanan iyileşme

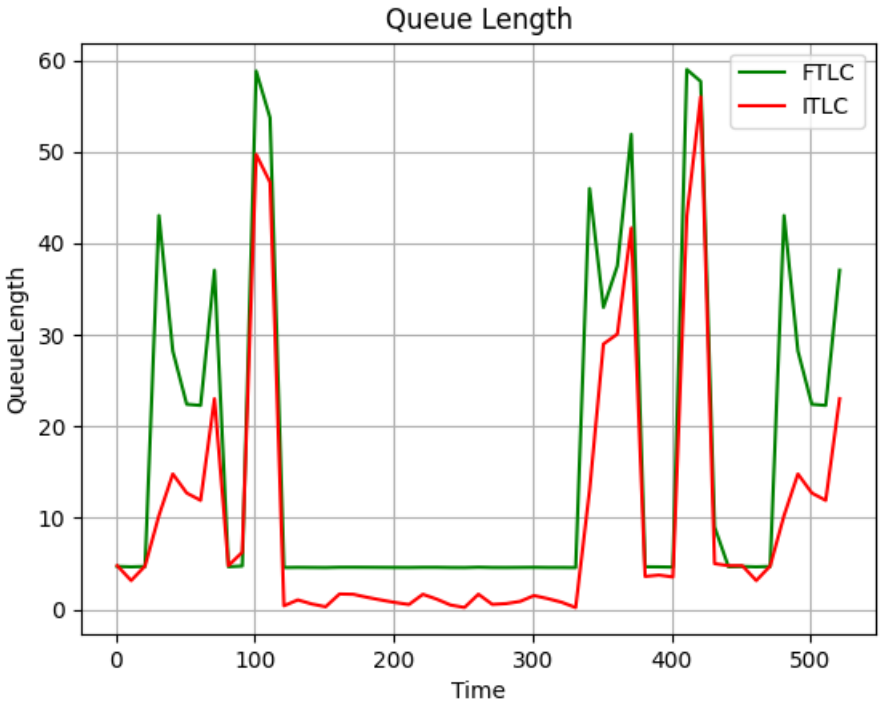
Cadde adı	*Sabit zamanlı iken taşıt başına gecikme süresi (sn/taşıt)*	*Önerilen model sonrası taşıt başına gecikme süresi (sn/taşıt)*	*Gecikme süresinde sağlanan iyileşme (sn/taşıt)*	*Gecikme süresinde sağlanan iyileşme (%)*
Street 1	80.45	38	42.45	53
Street 2	76.17	40.20	35.97	47.2
Street 3	58.14	50.21	7.93	13.6
Street 4	62.41	42.32	20.09	32.2

Şekil 5.9, Poisson dağılımına uygun araçların 500 saniyelik bir simülasyon süresi boyunca anlık çekilen gecikme zamanı verilerine dayalı olarak, önerilen bulanık mantık ve ANFIS temelli yeni Akıllı Trafik Işık Kontrol (ITLC) sistemi ile geleneksel sabit zamanlı trafik ışık kontrol (FTLC) sistemi arasında bir karşılaştırma sunmaktadır. Şekilden görüleceği üzere, yeni önerilen sistem belirgin bir gecikme süresi azalması sağlamıştır.



Şekil 5.9. Gecikme zamanı için simülasyon sonuçları

Şekil 5.10, SUMO (Simulation of Urban MObility) tarafından anlık olarak kaydedilen kuyrukta bekleyen araç sayılarının zaman içindeki değişimini gösteren bir grafik sunmaktadır. Önerilen sistem, kuyruktaki araç sayısını azaltma eğilimindedir. Bu durum, gecikme sürelerinde gözlenen azalmayı desteklemektedir.



Şekil 5.10.Kuyruk uzunluğu için simülasyon sonuçları

Şekil 5.9 ve Şekil 5.10 verilerine göre, kuyruk uzunluğunun düşük olduğu zamanlarda, önerilen model sabit zamanlı trafik ışık kontrol modeline kıyasla daha yüksek bir performans sergilemiştir. Kuyruk uzunluğunun arttığı durumlarda ise, modelimizin göreceli olarak daha iyi sonuçlar elde ettiği gözlenmektedir. Önerilen modelin daha başarılı olmasının temel nedenlerinden biri, kavşak kapasitesinin daha verimli bir şekilde kullanılması ve gelen araçların kavşağı daha hızlı bir şekilde boşaltabilmesidir.

6. GENEL SİMÜLASYON SONUÇLARI

Önerilen tüm yöntemlerin sonuçları incelendiğinde, mevcut duruma kıyasla genel olarak taşıt başına gecikme sürelerinde azalma olduğu görülmektedir. Çizelge 6.1'den anlaşılacağı gibi özellikle, EDATLC ve Bulanık çıkarım sisteminin bekleme/gecikme sürelerinde belirgin bir iyileşme sağladığı gözlemlenmektedir. Bu iyileşmenin, trafik akışını daha etkin bir şekilde yöneten ve kavşaklardaki geçiş sürelerini optimize eden yeni algoritmaların uygulanmasıyla gerçekleştiği gösterilmiştir. Önerilen EDATLC yöntemi, taşıt başına gecikme sürelerinde en iyi iyileşmeyi sağlayan yöntem olarak dikkat çekmektedir. Bu yöntem, diğerlerine kıyasla daha düşük gecikme süreleriyle trafik akışını etkin bir şekilde yönetmektedir.

Çizelge 6.1.Polatlı Refik Cesur kavşağı için önerilen modellerin mevcut durum ile karşılaştırmalı taşıt başı gecikme süreleri(saniye/taşıt)

Yaklaşım Kolu	Taşıt başına gecikme (sn/taşıt)						
	Mevcut durum	*Webster Modeli*	*Modifiye Webster*	*Webster Tabanlı KKA*	*Modifiye Webster Tabanlı KKA*	*Bulanık çıkarım sistemi*	*EDATLC*
1 (Eskişehir-Ankara)	76,17	51,25	44,86	41,26	40,11	38	36,2
2 (Ankara-Eskişehir)	80,45	67,34	63,53	57,31	55,40	40.20	39
3 (Polatlı- Huzur evi)	58,14	56,53	58,46	56,73	54,78	50.21	49
4 (Huzur evi-Polatlı)	62,41	64,72	63,24	63,75	62,87	42.32	40,30

Her bir yaklaşım kolunda, farklı trafik akışlarına ilişkin taşıt başına gecikme sürelerinin ayrıntılı olarak incelenmesi, trafiği etkileyen faktörlerin çeşitliliğini göstermektedir. Örneğin, Eskişehir-Ankara ve Ankara-Eskişehir yönlü akışlarda belirgin bir iyileşme görülürken, Polatlı-Huzur evi ve Huzur evi-Polatlı yönlü akışlarda iyileşme oranları daha düşüktür. Bu sonuçlar, farklı trafik akışlarının yönetilmesi için spesifik stratejilerin gerekliliğini vurgulamaktadır.

Sonuç olarak, önerilen modellerin kavşaklardaki taşıt başına gecikme sürelerindeki azalmalar, trafik yönetimi ve kavşak tasarımı alanında yapılan yeniliklerin etkisini

göstermektedir. Bu modellerin uygulanmasıyla trafik akışının daha verimli hale getirilmesi ve sürücülerin seyahat sürelerinin kısaltılması hedeflenmektedir.

Sonuçlardan da görüldüğü üzere, taşıt trafiğini akıcı ve verimli bir şekilde yönetmek için karmaşık trafik koşullarını göz önünde bulunduran EDATLC, taşıt başına gecikme sürelerinde belirgin bir iyileşme sağlamıştır. Dolayısıyla, EDATLC'nin bu sonuçları, trafik yönetimi alanında önemli bir adımı temsil etmektedir. Bu yöntemin kullanılmasıyla trafik akışının daha verimli hale getirilmesi ve sürücülerin seyahat sürelerinin azaltılması hedeflenmektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, trafik kontrolü ve yönetimi üzerine gerçekleştirilmiş üç farklı yöntem önerilmiştir, izole kavşaklarda trafik akışını optimize etme ve ortalama gecikme süresini azaltma amacını taşımaktadır. İlk olarak açık kaynak verisi kullanarak her türlü kavşak için kullanılabilecek yeni bir algoritma önerilmiştir, önerilen bu yeni EDATLC algoritması açık kaynak verisinde uygulandığında mevcut durum ve sabir zamanlı kontrol yöntemi ile kıyaslanmıştır. Önerilen algoritmanın etkinliği gösterilmiştir. Daha sonra bu algoritma KUTEM tarafından tarafımıza verilen akışın çok yoğun olduğu Polatlı Refik Cesur kavşağında uygulanmıştır. Mevcut durum ve sabit zamanlı trafik ışık planıyla karşılaştırıldığında ortalama gecikme süresi üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Daha sonra devre sürelerini ve yeşil ışık sürelerini optimize etmek için Webster, Modifiye Webster tabanlı KKA algoritması ile birlikte, belirsiz trafik koşulları altında Mamdani tipi bulanık mantık modeli ve ANFIS tabanlı sistemleri birleştirerek etkili bir yöntem önerilmiştir.

Önerilen bu üç yöntemin karşılaştırma sonuçları, önerilen yöntemlerin trafik kontrolü ve yönetimi üzerinde olumlu etkiler sağladığını göstermektedir. Özellikle, Polatlı verisi üzerinde gerçekleştirilen EDATLC yönteminin uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar, sürücü davranışları, araç tipleri ve hava durumu gibi faktörleri dikkate alarak ortalama gecikme süresini %25 oranında azalttığını göstermektedir.

Bu bağlamda, önerilen yöntemlerin genel etkisi şu şekildedir: ortalama gecikme süresindeki azalmalar, belirli bir kavşak tipi veya trafik senaryosu için önerilen algoritmaya bağlı olarak %25 ila %42,5 arasında değişmektedir. Bu sonuçlar, trafik kontrolü ve yönetimi konusunda bulanık mantık, ANFIS ve benzeri teknolojilerin kullanılmasının, trafik akışını optimize etme ve gecikme sürelerini minimize etme konusunda etkili bir yaklaşım sunduğunu ortaya koymaktadır.

Bu birleştirilmiş sonuçlar, trafik kontrol sistemlerinin geliştirilmesi ve uygulanması için önerilen metodolojilerin, belirli trafik koşulları ve kavşak tipleri için başarılı sonuçlar elde etme potansiyeline sahip olduğunu vurgulamaktadır. Bu bağlamda, belirtilen algoritmaların,

gerçek dünya trafik senaryolarında daha geniş bir uygulama alanına sahip olabileceği düşünülmektedir.

Gelecek çalışmalar için, çalışmanın uygulanabilirliği açısından, SUMO simülasyonunun entegrasyonu sayesinde bu modelin farklı kavşaklara ve kavşak türlerine uyarlanabilir nitelikte olduğu ortaya konulabilir. Yapay zeka ile desteklenen modellerin kullanımı, trafik kontrol sistemlerinde daha akıllı ve dinamik çözümler sunabilir. Özellikle üretken yapay zeka yöntemleri, önerilen modellerin performansını artırmada kritik rol oynayabilir. Makine öğrenmesi ve derin öğrenme tekniklerinin entegrasyonu, trafik tahmin ve yönetim süreçlerinde yenilikçi ve etkili çözümler getirecektir. Gelecekte, çoklu kavşaklar ve şehir genelinde trafik yönetimi üzerine yapılacak çalışmalar, trafik akışını optimize eden ve tüm kavşakları entegre bir şekilde yöneten sistemlerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Bu tür çalışmalar, şehir trafiğinin bütüncül ve verimli bir şekilde yönetilmesini mümkün kılarak, ulaşım ağlarının sürdürülebilirliğine önemli ölçüde katkıda bulunabilir.

KAYNAKLAR

1. Wang, Y., Rong, J., Zhou, C., Chang, X., Weng, Z. and Zhu, A. K. (2018). *Research on Through Lane Base Saturation Flow Rate at Signalized Intersections in Beijing, China*. 18th COTA International Conference of Transportation Professionals, USA, 1596-1606 .

2. Tomescu, O., Moise, I.M., Stanciu, A.E. and Batros, I. (2012). Adaptive traffic light control system using ad-hoc vehicular communications network. J*ournal Scientific Bulletin Series D,* 74, 67-78.

3. Kumar, R., Sharma, N. V. K. and Chaurasiya, V. K. (2024). Adaptive traffic light control using deep reinforcement learning technique. *Multimedia Tools and Applications*, *83*(5), 13851-13872.

4. Lodes, M. and Benekohal, R.F. (2013). Safety benefits of implementing adaptive signal control technology: survey results. *Brueau of Materials and Physical Research,* 0197-9191.

5. Tageldin, A., Sayed, T., Zaki, M.H. and Azab, M. (2014). *A safety evaluation of an Adaptive Traffic Signal Control system using Computer Vision*. Fourth International Conference on Road Safety and Simulation, Rome, Italy, 83-96.

6. Lu, Z., Kwon, T.J. and Fu, L. (2019). Effects of winter weather on traffic operations and optimization of signalized intersections. *Journal of traffic and transportation engineering (English edition),* 6(2), 196-208.

7. Faezi, S. and Dolatabadi, M.M. (2021). Saturation Flow Rate of Urban At-Grade Signalized Intersection Under Different Climatic Conditions (Case Study: Sattari-Mokhberi Intersection). *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-12.

8. Araghi, S., Khosravi, A. and Creighton, D. (2015). A review on computational intelligence methods for controlling traffic signal timing., *Expert Systems with Applications,* 42(3), 1538-1550.

9. Miller, A.J. (1963). Settings for fixed-cycle traffic signals. *Journal of the Operational Research Society,* 14(4), 373-386.

10. Zakariya, A.Y. and Rabia, S.I. (2016). Estimating the minimum delay optimal cycle length based on a time-dependent delay formula. *Alexandria Engineering Journal*, 55(3), 2509-2514.

11. Özdemir, M. (2001). *Benefits of signal optimization in isolated intersections.*, Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

12. Wang, Y., Yang, X., Liang, H. and Liu, Y. (2018). A review of the self-adaptive traffic signal control system based on future traffic environment. *Journal of Advanced Transportation,* 1-12.

13. Yang, W. (2015). Self-adaptive Coordinated Control Based on Close-loop Feedback for Urban Traffic Signals. *Tongji university,* 76-85.

14. Zhao, J., Liu, Y. and Li, P. (2016). A network enhancement model with integrated lane reorganization and traffic control strategies. *Journal of advanced transportation,* 50(6), 1090-1110.

15. Jiang, N. (2017). Optimal signal design for mixed equilibrium networks with autonomous and regular vehicles. *Journal of Advanced Transportation,* 2017, 1-13.

16. Wu, L., Nie, L., Khan, S.U., Khalid, O. and Wu, D. (2019). A V2I communication-based pipeline model for adaptive urban traffic light scheduling. *Frontiers of Computer Science,* 13, 929-942.

17. Rida, N., Ouadoud, M., Hasbi, A. and Chebli, S. (2018). *Adaptive traffic light control system using wireless sensors networks*. IEEE 5th International Congress on Information Science and Technology (CiSt), Morocco,552-556.

18. Rezzai, M., Dachry, W., Moutaouakkil, F. and Medromi, H. (2018). *Design and realization of a new architecture based on multi-agent systems and reinforcement learning for traffic signal control*. 6th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS), Morocco ,1-6.

19. Zeng, J., Hu, J. and Zhang, Y. (2018). *Adaptive traffic signal control with deep recurrent Q-learning*. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), China ,1215-1220 .

20. Zaatouri, K. and Ezzedine, T. (2018). *A self-adaptive traffic light control system based on YOLO*. International Conference On Internet Of Things, Embedded Systems And Communications (IINTEC), Tunisia,16-19.

21. El Idrissi, H.L., Tajer, A., Nait-Sidi-Moh, A. and Dakkak, B. (2018). *An adaptive control strategy of urban signalized intersection using petri nets*. International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD), Morocco,1-6.

22. Guo, P., Wang, M., Rong, H. and Wang, W. (2018). Intelligent traffic control method for emergency vehicles prioritization based on dsrc transportation system. *SAE Technical Papers,* 2018-01-1644.

23. Bie, Y., Liu, Z. and Wang, Y. (2017). A Real-Time traffic control method for the intersection with pre-signals under the phase swap sorting strategy. *Plos one,* 12(5), 0177637.

24. Li, J., Zhang, Y. and Chen, Y. (2016). *A self-adaptive traffic light control system based on speed of vehicles*. IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C), Austria, 382-388.

25. Maheshwari, P. Suneja, D., Singh, P., and Mutneja, Y. (2015). *Smart traffic optimization using image processing*. IEEE 3rd International Conference on Massive Open Online Courses, Innovation and Technology in Education (MITE), India, 1-4.

26. Kumaran, S.K. Mohapatra, S., Dogra, D.P., Roy, P.P., and Kim, B.G. (2019). Computer Vision-Guided Intelligent Traffic Signaling For Isolated Intersections. *Expert Systems with Applications*, 134, 267-278.

27. Liang, X., Yan, T., Lee, J. and Wang, G. (2018). A Distributed Intersection Management Protocol For Safety, Efficiency, And Driver's Comfort. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(3), 1924-1935.

28. Louati, A., Elkosantini, S., Darmoul, S. and Ben Said, L. (2019). An immune memory inspired case-based reasoning system to control interrupted flow at a signalized intersection. *Artificial Intelligence Review*, 52, 2099-2129.

29. Djuana, E., Rahardjo, K., Gozali, F., Tan, S., Rambung, R. and Adrian, D. (2018). *Simulating and evaluating an adaptive and integrated traffic lights control system for smart city application*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Indonesia ,012031 .

30. Guo, J. and Harmati, I. (2019). *Optimization of traffic signal control based on game theoretical framework*. 24th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Poland, 354-359.

31. Kurmankhojayev, D., Tolebi, G. and Dairbekov, N.S. (2019). *Road traffic demand estimation and traffic signal control*. 5th International Conference on Engineering and MIS, Astana Kazakhstan ,1-5.

32. Kao, Y.C. and Wu, C.W. (2018). *A self-organizing map-based adaptive traffic light control system with reinforcement learning*. 52nd Asilomar conference on signals, systems, and computers, USA,2060-2064.

33. Rida, N., Ouadoud, M. and Hasbi, A. (2020). Ant colony optimization for real time traffic lights control on a single intersection. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 14(2), 196-214.

34. Leverents, E., Andronov, R. and Anufrieva, T. (2018). *Simulation of queue length and vehicle delays on signal-controlled intersection*. MATEC Web of Conferences, Russia,05010.

35. Andronov, R. and Leverents, E. (2018). *Calculation of vehicle delay at signal-controlled intersections with adaptive traffic control algorithm*. Paper presented at the MATEC Web of Conferences, Russia ,04008.

36. Kapusta, B., MiletiC, M., Ivanjko, E. and Vujić, M. (2017). *Preemptive traffic light control based on vehicle tracking and queue lengths*. International Symposium on Electronics in Marine (ELMAR), Croatia,11-16.

37. Mousavi, S.S., Schukat, M. and Howley, E. (2017). Traffic light control using deep policy-gradient and value-function-based reinforcement learning. *IET Intelligent Transport Systems*, 11(7), 417-423.

38. Huang, T.K., Lee, C.K. and Chen, L.J. (2010). *Prophet+: An adaptive prophet-based routing protocol for opportunistic network*. 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications, 112-119.

39. Ahmed, A., Naqvi, S.A.A., Watling, D. and Ngoduy, D. (2019). Real-time dynamic traffic control based on traffic-state estimation. *Transportation Research Record*, 2673(5), 584-595.

40. Pratama, B., Christanto, J., Hadyantama, M.T. and Muis, A. (2018). *Adaptive traffic lights through traffic density calculation on road pattern*. International Conference on Applied Science and Technology (iCAST), 82-86.

41. Zaatouri, K., Jeridi, M.H. and Ezzedine, T., (2018). *Adaptive traffic light control system based on WSN: algorithm optimization and hardware design*. 26th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 1-6.

42. Andayani, U., Arisandi, D., Siregar, B., Syahputra, M., Muchtar, M., Manurung, O.Y. and Nasution, T., (2019). *Simulation of dynamic traffic light setting using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS)*. Journal of Physics: Conference Series, 012058 .

43. Walukow, S.B., Doringin, F.J., Katuuk, R.E. and Wauran, A.S., (2018). *Regulation of the real time traffic light at teling intersection in Manado City by using Fuzzy Logic and ANFIS*. International Conference on Applied Science and Technology (ICAST), 259-262.

44. Tang, X., Huang, B., Liu, T. and Lin, X., (2022). Highway Decision-Making and Motion Planning for Autonomous Driving via Soft Actor-Critic. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(5), 4706-4717.

45. Guo, J., Kong, Y., Li, Z., Huang, W., Cao, J. and Wei, Y. (2019). A model and genetic algorithm for area-wide intersection signal optimization under user equilibrium traffic. *Mathematics and Computers in Simulation*, 155, 92-104.

46. El Bakkal, S., Lakhouili, A. and Essoufi, E.H. (2022). Modeling and Simulation of Adaptive Traffic Control System for Multi-Intersection Management using Cellular Automaton and Queuing System. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 13(5), 938-947.

47. Mathiane, M., Tu, C., Owola, P.A. and Nawej, M.C., (2022). A SUMO Simulation Study on VANET-Based Adaptive Traffic Light Control System. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 881, 225-237.

48. Mok, K. and Zhang, L. (2022). Adaptive traffic signal management method combining deep learning and simulation. *Multimedia Tools and Applications*, 83(5), 15439-15459.

49. Fu, X., Gao, H., Cai, H., Wang, Z. and Chen, W. (2021). How to improve urban intelligent traffic? A case study using traffic signal timing optimization model based on swarm intelligence algorithm. *Sensors*, 21(8), 2631.

50. Salawudeen, A.T., Umoh, I.J., Sadiq, B.O., Oyenike, O.I. and Mu'azu, M.B. (2022). An adaptive ant colony optimisation for improved lane detection in intelligent automobile vehicles. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 19(2), 108-123.

51. Balta, M. and Ozcelik, I. (2018). *Traffic Signaling Optimization for Intelligent and Green Transportation in Smart Cities*. International Conference on Smart City and Emerging Technology, ICSCET, 31-35.

52. Cui, Z., Sun, B., Wang, G., Xue, Y. and Chen, J. (2017). A novel oriented cuckoo search algorithm to improve DV-Hop performance for cyber–physical systems. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 103, 42-52.

53. Gao, K., Wu, N. and Wang, R. (2019). *Meta-heuristic and MILP for Solving Urban Traffic Signal Control*. 2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, 1-5.

54. Gao, K., Zhang, Y., Zhang, Y., Su, R. and Suganthan, P.N. (2019). Meta-Heuristics for Bi-Objective Urban Traffic Light Scheduling Problems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,* 20(7), 2618-2629.

55. Sartikha, Ardiyanto, I. and Sulistyo, S. (2018). *A study on metaheuristics for urban traffic light scheduling problems*. 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering: Smart Technology for Better Society, 545-550.

56. Jintamuttha, K., Watanapa, B. and Charoenkitkarn, N. (2016). *Dynamic traffic light timing optimization model using bat algorithm*. 2nd International Conference on Control Science and Systems Engineering, 15-21.

57. Ochoa, A. and Oliva, D. (2019). *Smart traffic management to support people with color blindness in a Smart City*. IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence, LA-CCI, 1-8.

58. Wijaya, I.G.P.S., Uchimura, K. and Koutaki, G. (2015). *Traffic light signal parameters optimization using particle swarm optimization*. International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications, 11-16.

59. Wang, L., Gao, K., Lin, Z. and Huang, W. (2022). *Problem Feature-Based Meta-Heuristics with Reinforcement Learning for Solving Urban Traffic Light Scheduling Problems*. IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, 845-850.

60. Cakici, Z., Murat, Y.S. and Aydin, M.M. (2022). Design of an efficient vehicle-actuated signal control logic for signalized intersections. *Scientia Iranica,* 29(3 A), 1059-1076.

61. Alharbi, A., Halikias, G., Sen, A. and Yamin, M. (2021). A framework for dynamic smart traffic light management system. *International Journal of Information Technology (Singapore),* 13(5), 1769-1776.

62. Mao, T., Mihaita, A.S., Chen, F. and Vu, H.L. (2022). Boosted Genetic Algorithm Using Machine Learning for Traffic Control Optimization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,* 23(7), 7112-7141.

63. Li, Y., Nan, S.R., Ma, J., Zhou, W.H. and Chen, K.M. (2018). Optimization methods for traffic signal control of isolated intersection under rainy weather. *Journal of Traffic and Transportation Engineering,* 18(5), 185-194.

64. Lu, Z., Fu, L. and Kwon, T.J. (2016). *TRA-936: Modifying signal control at intersections under adverse weather conditons. Canadian Society for Civil Engineering,* CSCE Annual Conference, London, 1-4.

65. Bisht, A., Ravani, K., Chaturvedi, M. and Kumar, N. (2019). *A Feasibility Study on Upgrading the Static TLC Infrastructure to Adaptive TLC*. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, 2563-2568.

66. Bisht, A., Ravani, K., Chaturvedi, M., Kumar, N. and Tiwari, S. (2022). Indigenous design of a Traffic Light Control system responsive to the local traffic dynamics and priority vehicles. *Computers and Industrial Engineering,* 171.

67. Yousef, K.M., Al-Karaki, M.N. and Shatnawi, A.M. (2010). Intelligent traffic light flow control system using wireless sensors networks. *Journal of Information Science and Engineering,* 26(3), 753-768.

68. Aleko, D.R. and Djahel, S. (2020). An efficient adaptive traffic light control system for urban road traffic congestion reduction in smart cities. *Information (Switzerland),* 11(2),45-65.

69. Haddad, T.A., Hedjazi, D. and Aouag, S. (2021). An IoT-Based Adaptive Traffic Light Control Algorithm for Isolated Intersection. *Lecture Notes in Networks and Systems,* 199, 107-117.

70. Kwatirayo, S., Almhana, J. and Liu, Z. (2013). *Adaptive traffic light control using VANET: A case study*. 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, 25-28.

71. Zhou, B., Cao, J., Zeng, X. and Wu, H. (2010). *Adaptive traffic light control in wireless sensor network-based intelligent transportation system*. IEEE 72nd Vehicular Technology Conference, 1-5.

72. Tian, R. and Zhang, X. (2017). Design and evaluation of an adaptive traffic signal control system–a case study in hefei, china. *Transportation Research Procedia,* 21, 141-153.

73. He, Q., Head, K.L. and Ding, J. (2014). Multi-modal traffic signal control with priority, signal actuation and coordination. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies,* 46, 65-82.

74. Skabardonis, A. (2000). Control strategies for transit priority. *Transportation Research Record,* 1727(1), 20-26.

75. Essa, M. and Sayed, T. (2020). Self-learning adaptive traffic signal control for real-time safety optimization. *Accident Analysis & Prevention,* 146, 105713.

76. Asamer, J., Van Zuylen, H.J. and Heilmann, B. (2013). Calibrating car-following parameters for snowy road conditions in the microscopic traffic simulator vissim. *IET Intelligent Transport Systems,* 7(1), 114-121.

77. Perrin, H., Martin, P.T. and Hansen, B.G. (2001). Modifying signal timing during inclement weather. *Transportation Research Record,* 1748(1), 66-71.

78. Teply, S., Allingham, D., Richardson, D. and Stephenson, B. (2008). Canadian capacity guide for signalized intersections. *Transportation Association of Canada,* 01174161.

79. Aragon-Gómez, R. and Clempner, J.B. (2020). Traffic-signal control reinforcement learning approach for continuous-time Markov games. *Engineering Applications of Artificial Intelligence,* 89.

80. Agbolosu-Amison, S.J., Sadek, A.W. and Henry, B. (2005). Factors affecting benefits of implementing special signal timing plans for inclement weather conditions. *Transportation Research Record,* 1925(1), 146-155.

81. Maki, P.J. (1999). *Adverse weather traffic signal timing*. 69th Annual Meeting of the Institute of Transportation EngineersInstitute of Transportation Engineers (ITE), 1-8.

82. Roshandeh, A.M., Levinson, H.S., Li, Z., Patel, H. and Zhou, B. (2014). New methodology for intersection signal timing optimization to simultaneously minimize vehicle and pedestrian delays. *Journal of Transportation Engineering,* 140(5), 04014009.

83. Shi, B., Xu, L., Jiang, H. and Meng, W. (2017). Comparing fuel consumption based on normalised driving behaviour: a case study on major cities in China. *IET Intelligent Transport Systems,* 11(4), 189-195.

84. Liao, L., Liu, J., Wu, X., Zou, F., Pan, J., Sun, Q. and Zhang, M. (2020). Time difference penalized traffic signal timing by LSTM Q-network to balance safety and capacity at intersections. *IEEE Access,* 8, 80086-80096.

85. Pohana, A.H., Razakb, L.L. and Akmam, R. (2019). Application of Simulation of Queue Relationships that Occur and the Timing of Traffic Lights on Road Crossings using fuzzy logic method, *Journal of Innovation, Creativity and Change*, 8(7), 117-134.

86. Kesting, A., Treiber, M. and Helbing, D. (2007). General lane-changing model MOBIL for car-following models. *Transportation Research Record,* 1999(1), 86-94.

87. Treiber, M., Hennecke, A. and Helbing, D. (2000). Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical Review E,* 62(2), 1805.

88. Cui, J., Zhao, B. and Qu, M. (2023). An Integrated Lateral and Longitudinal Decision-Making Model for Autonomous Driving Based on Deep Reinforcement Learning. *Journal of Advanced Transportation,* 2023,1-13.

89. Alzubaidi, A., Al Sumaiti, A.S., Byon, Y.J. and Hosani, K.A. (2023). Emergency Vehicle Aware Lane Change Decision Model for Autonomous Vehicles Using Deep Reinforcement Learning. *IEEE Access*, 11, 27127-27137.

90. Gipps, P.G. (1986). A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research Part B: Methodological,* 20(5), 403-414.

91. Yuan, C., Shi, Y., Pan, B. and Li, Y. (2022). Developing a Variable Speed Limit Control Strategy for Mixed Traffic Flow Based on Car-Following Collision Avoidance Theory. *Mathematics,* 10(16), 2987.

92. Zheng, Y., Ran, B., Qu, X., Zhang, J. and Lin, Y. (2020). Cooperative Lane Changing Strategies to Improve Traffic Operation and Safety Nearby Freeway Off-Ramps in a Connected and Automated Vehicles Environment. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,* 21(11), 4605-4614.

93. Celtek, S.A., Durdu, A. and Alı, M.E.M. (2020). Real-time traffic signal control with swarm optimization methods. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation,* 166, 108206.

94. Vidali, A., Crociani, L., Vizzari, G. and Bandini, S. (2019). *A Deep Reinforcement Learning Approach to Adaptive Traffic Lights Management*. Western Orthopedic Association,42-50.

95. Rida, N., Ouadoud, M. and Hasbi, A. (2020). Coordinated Signal Control System in Urban Road Network. *International Journal of Online and Biomedical Engineering (İJOE*), 16(10), 4-22.

96. Tomescu, O., Moise, I.M., Stanciu, A.E. and Batros, I. (2012). Adaptive traffic light control system using ad-hoc vehicular communications network. *Taiwanese Association for Artificial Intelligence,* 74(2), 1-8.

97. Abuhijleh, A., Dias, C., Alhajyaseen, W. and Muley, D. (2020). Effect of U-turns and heavy vehicles on the saturation flow rates of left-turn lanes at signalized intersections. *Sustainability (Switzerland),* 12(11), 4485.

98. Faezi, S.F. and Dolatabadi, M.M. (2022). Saturation Flow Rate of Urban At-Grade Signalized Intersection Under Different Climatic Conditions (Case Study: Sattari-Mokhberi Intersection). *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering,* 46(1), 603-614.

99. Oyaro, J. and Ben Edigbe, J. (2020). The extent of capacity loss caused by rainfall at signalised intersections. *Open Transportation Journal,* 14, 214-221.

100. Lu, Z., Fu, L. and Kwon, T.J. (2016). *Modifying signal control at intersections under adverse weather conditons*. Canadian Society for Civil Engineering, 936(9), 1-9.

101. Calle-Laguna, A.J., Du, J. and Rakha, H.A. (2019). Computing optimum traffic signal cycle length considering vehicle delay and fuel consumption. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives,* 3.

102. Cheng, C., Du, Y., Sun, L. and Ji, Y. (2016). Review on theoretical delay estimation model for signalized intersections. *Transport Reviews*, 36(4), 479-499.

103. Manual, H.C. (2016). A guide for multimodal mobility analysis. *Transportation Research Board, Washington, DC,* 6.

104. Webster, F.V. (1958). Webster, F.V., Traffic Signal Settings. *Road Research Technique,* 39.

105. Ali, M.E.M., Durdu, A., Celtek, S. and 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,* 1-1.

106.Cheng, D., Messer, C.J., Tian, Z.Z. and Liu, J. (2003). *Modification of Webster's minimum delay cycle length equation based on HCM 2000*. Transportation Research Board, Washington, 1-27.

107.Wagner, P., Gartner, N., Oertel, R. and Lu, T. (2014). *Webster's Delay Formula – revisited*, 93rd Annual MeetingTransportation Research Board, Washington, 1-13.

108.Li, L., Ma, Y., Wang, B., Dong, H. and Zhang, Z. (2019). Research on traffic signal timing method based on ant colony algorithm and fuzzy control theory. *Proceedings of Engineering and Technology Innovation*, 11, 21-29.

109.Renfrew, D. and Yu, X.H. (2012). *Traffic signal optimization using ant colony algorithm*. International Joint Conference on Neural Networks, 1-7.

110.Pérez-Carabaza, S., Gálvez, A. and Iglesias, A. (2022). Rank-Based Ant System with Originality Reinforcement and Pheromone Smoothing. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(21).

111.Putha, R., Quadrifoglio, L. and Zechman, E. (2012). Comparing ant colony optimization and genetic algorithm approaches for solving traffic signal coordination under oversaturation conditions. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering,* 27(1), 14-28.

112.Pfluger, N., Yen, J. and Langari, R. (1992). *A defuzzification strategy for a fuzzy logic controller employing prohibitive information in command formulation*. IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 717-723.

113.Vuong, X.C., Mou, R.F., Vu, T.T. and Van Nguyen, H. (2021). An Adaptive Method for an Isolated Intersection under Mixed Traffic Conditions in Hanoi Based on ANFIS Using VISSIM-MATLAB. *IEEE Access*, 9, 166328-166338.

114.Noureddine, G. (2004). Intelligent Controllers for Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Systems. *International Arab Journal of Information Technology*, 1-15.



Gazili olmak ayrıcalıktır