



**T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**AKILLI ŞEHİRLER İÇİN KOORDİNELİ
ADAPTİF TRAFİK SİNYALİZASYON
KONTROLÜ**

Muzamil Eltejani Mohammed Ali

DOKTORA TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

**Haziran-2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Muzamil Eltejani Mohammed Ali tarafından hazırlanan “**AKILLI ŞEHİRLER İÇİNKOORDİNELİ ADAPTİF TRAFİK SİNYALİZASYON KONTROLÜ.**” adlı tez çalışması 25 /06 /2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik-Elektronik Mühendisliği** Anabilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Burak YILMAZ

.....

Danışman

Doç. Dr. Akif Durdu

.....

Üye

Prof. Dr. Ömer AYDOĞDU

.....

Üye

Doç. Dr. Seyfettin Sinan Gültekin

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi. Barış Samim Nesimioğlu

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Sait GEZGİN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

İmza

Muzamil Eltejani Mohammed Ali

Tarih: 25 /06 /2021

ÖZET

DOKTORA TEZİ

AKILLI ŞEHİRLER İÇİN KOORDİNELİ ADAPTİF TRAFİK SİNYALİZASYON KONTROLÜ

Muzamil Eltejani Mohammed Ali

**Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Akif DURDU

2021, 111

Jüri

Prof. Dr. Ömer AYDOĞDU

Doç. Dr. Akif DURDU

Doç. Dr. Seyfettin Sinan Gültekin

Dr. Öğr. Üyesi Barış Samim Nesimioğlu

Dr. Öğr. Üyesi Burak YILMAZ

Geçen yüzyılın başından itibaren araç sayısının her geçen gün artması nedeniyle trafik sinyal kontrol sistemleri ilgi çekmeye başlamıştır. Bu durum, büyük ve kalabalık şehirlerde daha da önem verilen bir konu olmuştur. Nitekim trafik sinyal kontrol sistemleri kullanılmayan modern ve akıllı şehirler düşünülemez. Akıllı şehirler, gelişmiş trafik sinyali kontrol algoritmaları ile etkin ve verimli trafik yönetimi sağlayan akıllı ulaşım sistemleri ile daha da anlamlıdır. Karayolu altyapısının her zaman değiştirilememesi ve araç sayısının her geçen gün artması nedeniyle, ana veya sıkışık yollarda bulunan trafik ışıklı kavşaklarda, genellikle uzun bekleme süresi, seyahat süresinde gecikme ve yakıt tüketimindeki artış gibi sorunlar oluşmaktadır. Trafik sinyal kontrolü, kavşaklardaki araç yoğunluğuna bağlı olarak trafik akışlarını yönetmek amacıyla kullanılan bir tekniktir. Bu tezde, Webster'in optimal döngü uzunluğu formülüyle birleştirilen bulanık mantık, geri basınç ve takviyeli öğrenme yöntemleri kullanılarak akıllı şehirler için koordineli adaptif trafik sinyal kontrolünün tasarımına odaklanılmıştır. Bir anayol ağı için merkezi olmayan koordineli adaptif bulanık mantık ile Webster tabanlı, koordineli geri basınç, döngüsel ve döngüsel olmayan takviyeli öğrenme tabanlı yöntemler önerilmektedir. Önerilen yöntemlerin performansını araştırmak için, gerçek ortam trafiğinin koşullarını taklit etmek üzere SUMO trafik simülatörü kullanılmaktadır. Simülasyon sonuçları, aynı trafik koşulu altında gerçek ve sentetik trafik senaryoları oluşturarak gerçekleştirilmiştir. İzole edilmiş kavşaklardan ve bir anayol ağından elde edilen sonuçlar ayrı ayrı değerlendirilmiştir. İzole edilmiş kavşaklarda ortalama araç gecikmesi, ortalama hız ve ortalama seyahat süresi açısından sabit zamanlı ve bulanık mantık tabanlı trafik kontrol yöntemlerine kıyasla, önerilen yöntemlerin daha iyi performansa sahip olduğu görülmüştür. Anayol ağında önerilen yöntemler, toplam ve ortalama durak sayısı, ortalama bekleme süresi, ortalama seyahat süresi, ortalama seyahat hızı ve toplam kuyruk uzunluğu açısından daha iyi performans göstermişlerdir. Şehirlerde uygulaması bulunan akıllı izole kavşakların koordineli bir şekilde ve gerçek zamanlı olarak kontrol edilmesine yönelik referans niteliğinde bir tez çalışması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akıllı şehir, Bulanık mantık kontrolü, Geri basınç, Koordineli trafik kontrolü, SUMO simülatörü, Takviyeli Öğrenme, Adaptif trafik kontrolü, Webster'in optimal döngü formülü.

ABSTRACT

Ph.D THESIS

COORDINATED ADAPTIVE TRAFFIC SIGNAL CONTROL FOR SMART CITIES

Muzamil Eltejani Mohammed Ali

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
SELÇUK UNIVERSITY**

**THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

Advisor: Assoc. Dr. Akif DURDU

2021, 111

Jury

Prof. Dr. Ömer AYDOĞDU

Assoc. Dr. Akif DURDU

Assoc. Dr. Seyfettin Sinan Gültekin

Assist. Prof. Dr. Barış Samim Nesimioğlu

Assist. Prof. Dr. Burak YILMAZ

Since the beginning of the last century, traffic signal control systems have received attention due to the daily increase in the number of vehicles. This has become a more important issue in big and congested cities. Modern and smart cities are unthinkable without using traffic signal control systems. Smart cities are even more meaningful with advanced traffic signal control algorithms and smart transportation systems that provide effective and efficient traffic management. Due to the limitation of road infrastructure compared to the increasing rate of the vehicle number, problems such as long waiting times, delays in travel time, and increase in fuel consumption often occur at signalized intersections on arterial or congested roads. Traffic signal control is a technique used at intersections to manage conflicting movements by determining the right-of-way to certain traffic flows. This thesis focuses on the design of coordinated adaptive traffic signal control for smart cities using fuzzy logic, backpressure, and RL that combined with Webster's optimal cycle length formula. Decentralized coordinated adaptive fuzzy logic-based with Webster, coordinated backpressure, cyclic and non-cyclic reinforcement learning-based methods are proposed for an arterial road network. To investigate the performance of the proposed methods, the SUMO traffic simulator is used to mimic the traffic conditions of a real traffic environment. The simulation results are obtained using real and synthetic traffic scenarios under the same traffic conditions. Results from isolated intersections and an arterial road network were evaluated separately. It has been seen that the proposed methods under isolated intersections have better performance in terms of average waiting time, average speed, and average travel time compared to fixed-time and fuzzy logic-based traffic control methods. While the proposed methods under arterial road network performed better based on total and average number of stops, average waiting time, average travel time, average travel speed, and total queue length that used as performance indices. A reference study has been conducted for the coordinated and real-time control of smart isolated intersections that have applications in modern cities.

Keywords: Adaptive traffic control, Backpressure, Coordinated traffic control, Fuzzy logic control, Reinforcement Learning, Smart city, SUMO simulator, Webster's optimal cycle formula.

ÖNSÖZ

İlk olarak, bu tezin tamamlanmasını sağlayan Rabbime şükreder ve hayati boyunca tüm eğitimimde beni destekleyen ve Aralık ayında kaybettiğim kardeşim Abbas’a rahmet dilerim.

Bu çalışmada bana her türlü bilimsel katkı, kişisel yardım ve fedakârlığı sağlayan, başta danışmanım Doç. Dr. Akif DURDU hocama, tez izleme komitemde bulunan Prof. Dr. Ömer AYDOĞDU ve Öğretim Üyesi Dr. Barış Samim NESİMİOĞLU ’ya derin şükranlarımı sunarım.

Doktora eğitimi sırasında kendilerinden aldığım derslerle, önerileri ve yardımlarıyla bu tezin oluşmasında katkıda bulunan Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’ndeki değerli hocalarıma ve Selçuk Üniversitesi Türkçe Öğretimi Uygulama ve Araştırma Merkezi’ndeki Öğr. Gör. Dr. Ahmet KOÇAK hocama şükranlarımı sunarım.

Doktora programımı desteklediği için Yurtdışı Türkler ve Akraba Topluluklar Başkanlığı’na (YTP), Gezira Üniversitesi (Sudan) ve bana destek ve veri sunarak çalışmamı gerçek bir problem üzerinde modelleyebilme imkânı sağladığı için Mosaş Akıllı Ulaşım Teknolojiler AŞ ve tüm ekibine, teşekkür ederim.

Hepsinden öte, her zaman iyiye ve doğruya yönelmemi sağlayan sevgili anneme, babama ve kardeşlerime, ayrıca, beni sabırla destekleyen ve tüm sıkıntılarımı benimle göğüsleyen sevgili eşime ve çocuklarıma bütün kalbimle teşekkürü bir borç bilirim.

Muzamil Eltejani Mohammed Ali
KONYA-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bakış	1
1.2. Motivasyon.....	2
1.3. Problem Tanımlaması	5
1.4. Araştırma Hedefi ve Katkısı.....	6
1.5. Tez Organizasyonu.....	7
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	9
2.1. Trafik Kontrol Stratejilerine Dayalı Sınıflandırma	9
2.2. Kavşak Tiplerine Dayalı Sınıflandırma	13
2.3. Trafik Sinyal Kontrol Optimizasyon Yöntemlerine Dayalı Sınıflandırma	16
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	23
3.1. Trafik sinyal kontrolünün temel terminolojileri.....	23
3.1.1. Trafik sinyal kontrol parametrelerine dayalı kullanılan terimler.....	23
3.1.2. Yol yapısı ve trafik hareketine dayalı terimler	25
3.1.3. Etkililik Ölçütlerine (Measures of Effectiveness) dayalı terimler	26
3.2. Webster Yöntemi	27
3.3. Bulanık Mantık.....	29
3.4. Geri Basınç Algoritması.....	33
3.5. Takviyeli Öğrenme.....	36
3.5.1 Derin Öğrenme	38
3.5.2 Derin Takviyeli Öğrenme	38
3.5.3 Düello DTÖ	40
3.5.4 Çift Derin Takviyeli Öğrenme	41
3.5.5 Çift Düello Derin Takviyeli Öğrenme	43
3.6 Simülatöre Genel Bakış	43
3.6.1 Ağ dosyası.....	44
3.6.2 Trafik talep dosyası.....	45
3.7 Araştırma Metodolojisi	47
4. KOORDİNELİ ADAPTİF TRAFİK SİNYAL KONTROL UYGULAMASI	49
4.1 İzole Kavşak için Önerilen Adaptif Algoritma	49
4.1.1 Döngü uzunluğunun hesaplanması	50

4.1.2 Etkin yeşil sürenin hesaplanması	51
4.1.3 Yeşil süresinin ayarlanması	52
4.2 İzole Edilmiş Kavşaklar İçin Kullanılan Kıyaslama Kontrol Yöntemleri	56
4.2.1 Sabit zamanlı trafik sinyal kontrolü	56
4.2.2 Bulanık mantık tabanlı trafik sinyal kontrolü	56
4.3 Arteriyel Yol Ağı için Önerilen Koordineli Adaptif Yöntemler	57
4.3.1 Merkezi olmayan koordineli adaptif bulanık mantık ve Webster'in optimal döngü formülü (MKUBW)	57
4.3.1.1 Optimal döngü uzunluğunun ve etkili yeşil süresinin belirlenmesi.....	58
4.3.1.2 Kavşaklar arasında koordinasyonun sağlanması	58
4.3.1.3 Yeşil süresinin Ayarlanması	61
4.3.2 Geri basınç tabanlı merkezi olmayan koordineli yöntem	61
4.3.3 Takviye öğrenme tabanlı koordineli trafik sinyal kontrolü	63
4.3.3.1 DTÖ, ÇDTÖ, DDTÖ ve ÇDDTÖ tabanlı koordineli trafik sinyal kontrol yöntemi	64
4.3.3.2 Döngüsel olmayan ÇDDTÖ tabanlı trafik sinyal kontrol yöntemi.....	66
5 SİMÜLASYON SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR.....	71
5.1 İzole Edilmiş Kavşaklar İçin Elde Edilen Sonuçlar.....	71
5.1.1 Simülasyon ve oluşturulan senaryolar	71
5.1.2 Elde edilen sonuçlar ve tartışmalar	78
5.1.2.1 Dört yollu kavşak için rastgele üretilen taleplerden elde edilen sonuçlar	79
5.1.2.2 Dört yollu kavşak için sahadan toplanan gerçek verilerden elde edilen sonuçlar	80
5.1.2.3 Üç ve beş yollu kavşakları için sahadan toplanan gerçek verilerden elde edilen sonuçlar	81
5.2 Arteriyel Yol Ağı İçin Elde Edilen Sonuçlar	82
5.2.1 Simülasyon ve oluşturulan senaryolar	83
5.2.1.1 Farklı trafik rejimleri	85
5.2.1.2 Rastgele dağıtılmış akışlar	86
5.2.2 Elde edilen sonuçlar ve tartışmalar	87
5.2.2.1 Farklı trafik rejimlerinden elde edilen sonuçlar.....	87
5.2.2.2 Rastgele dağıtılmış akışlardan elde edilen sonuçlar	96
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	100
6.1 Sonuçlar	100
6.2 Öneriler	102
KAYNAKLAR	104
YAYINLAR.....	111

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$\mu A(x)$	: Üyelik fonksiyonu.
A	: Acente eylem uzayı.
a_t	: t anında acente eylemi.
C_o	: Optimal döngü uzunluğunu.
G_i	: i 'inci faz etkin yeşil süreler
$I(j_i)$	: Giriş düğüm kümesi.
L	: Döngü içindeki toplam kavşağın kayıp zamanı.
N_a	: Giriş düğüm.
N_b	: Çıkış düğüm.
$O(j_i)$	: Çıkış düğüm kümesi.
Q_{ab}	: N_a de duran ve N_b düğümüne hareket etmeyi bekleyen araç sayısı.
R_{bc}	: N_b 'den ayrılan ve N_c 'ye giden araç sayısının oranı.
r_t	: t anında ödül fonksiyonu.
S	: Ortamın durum uzayı.
s_t	: t anında ortamın durumu.
X_{ab}	: Kavşaktan geçebileceği araçların oranı.
y_i	: i 'inci yol kritik akışını.
α	: Öğrenme oranı.
β	: Hedef ağ parametrelerin yumuşak güncelleme.
γ	: Azaltma faktörü.
θ	: Değerlendirme ağ parametreleri.
θ^*	: Hedef ağ parametreleri.

Kısaltmalar

AHV	: Araç Hız Vektörü.
APV	: Araç Pozisyon Vektörü.
AUS	: Akıllı Ulaşım Sistemi.
BÇDDTÖ	: Bağımsız ÇDDTÖ.
ÇDDTÖ	: Çift Düello Derin Takviyeli Öğrenmeye.
ÇDTÖ	: Çift Derin Takviyeli Öğrenmeye.

ÇYF_KS	: Çalışmakta olan Yeşil Fazın Kalan Süresi.
DDTÖ	: Düello Derin Takviyeli Öğrenmeye.
DP	: Dinamik Programlama.
DTÖ	: Derin Takviyeli Öğrenmeye.
GA	: Genetik Algoritma.
GO	: Geçiş Oranı.
KKU	: Kalan Kuyruk Uzunluğu.
KATSK	: Koordineli Adaptif Trafik Sinyal Kontrolü.
LSTM	: Uzun Kısa Süreli Bellek.
MKP	: Markov Karar Proses.
MKUBW	: Merkezi olmayan koordineli adaptif bulanık mantık ve Webster'in optimal döngü formülü.
MOVA	: Optimize Edilmiş Araç Çalıştırma stratejisi.
OPAC	: Adaptif Kontrol için Optimizasyon Kurallar.
PASSER	: İlerleme Analizi ve Sinyal Sistemin Değerlendirme Rutini.
PSDÇDDTÖ	: Paylaşılan Sinyal Durumları Çift Düello Derin Takviyeli Öğrenmeye.
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyon.
RHODES	: Gerçek Zamanlı Hiyerarşik Optimizasyon Dağıtılmış Etkili Sistem.
SCATS	: Sydney Koordineli Adaptif Trafik Sistemi.
SDV	: Sinyal Durumu Vektörü.
SUMO	: Kentsel Hareketlilik Simülasyonu.
SS	: Standart Sapma.
TÖ	: Takviyeli Öğrenme.
TraCI	: Trafik Kontrol Arayüzü.
TRANSYT	: Trafik Ağı Öğrenim Aracı.
UDA	: Uzatma Değiştirmeme veya Azaltma.
UTCS-1	: Birinci Nesil Kentsel Trafik Kontrol Sistem.

1. GİRİŞ

1.1. Genel Bakış

Trafik sinyal kontrol sistemleri, sosyal ve ekonomik etkileri nedeniyle dünya çapında dikkat çekmektedir. Kentsel alanlardaki özel araca sahip kişilerin artması sonucunda trafik sıkışıklığı sorunu giderek artmaktadır. Karayolu altyapısının sınırlanmasıyla beraber araç sayısının artması nedeniyle, kavşaklarındaki trafik sıkışıklığı kentsel şehirlerin ana problemlerinden biri haline gelmektedir. Bu durum, seyahat süresinin, enerji tüketiminin, CO2 emisyonunun ve sürücüler için stresinin artmasına neden olmaktadır (Rida ve ark., 2020). Kalabalık şehir merkezlerinde bunun önemi daha da belli olmaktadır. Trafik sinyal kontrol optimizasyonu, akıllı ulaşım sistemi alanında önemli ve ilgi çeken bir problemidir. Ayrıca, konuyla alakalı bilimsel literatür zenginliğine rağmen hala aktif bir araştırma alanı olarak kabul edilmektedir (Rasheed ve ark., 2020).

Günümüzde yeni inşa edilen şehirlerde, trafik sıkışıklığını azaltmak için trafik sinyal kontrolü yerine köprüler veya altgeçitler kullanılmaktadır. Ancak antik veya eskiden kurulmuş şehirlerde, bazı durumlardan ya da fiziki alan yetersizliğinden dolayı böyle çözümleri ortaya koymak kolay değildir veya imkânsızdır. Ayrıca, köprüler veya altgeçitler inşa edilerek tıkanıklık sorununu her zaman çözülememektedir. Tersine, trafik akışları anayol başlangıcından kontrol edilmeden sinyalize kavşaklara itildiği için, anayolun ortasında veya sonunda bulunan kavşaklardaki tıkanıklığın kaynağı olabilmektedir.

Trafik sıkışıklığı problemi, yollardan geçen trafik akış miktarına uyum sağlanamaması nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Bu, yol kapasitesinin sınırlandırılmasından ve/veya yolun verimsiz şekilde kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Bu sorunu çözmenin iki yolu vardır, yeni yollar inşa etmek veya yolu verimli bir şekilde kullanmaktır. İlk çözüm genellikle pratik olmayan ve maliyetli bir çözümdür. Ayrıca şehir merkezi gibi bazı yerlerde yeni yolların yapılması imkânsızdır. İkinci çözüm ise uygulanabilir bir yöntem olup bir trafik sinyal kontrolünün oluşturulmasıyla sağlanabilir.

Trafik sinyal kontrolü, belirli bir sürede için belirli bir sıkışan trafik akışına geçiş hakkı belirleyerek, trafik akışlarının çakışan hareketini yönetmek için kavşaklarda kullanılan bir yöntemdir. Doğal olarak karışık olan trafik akışı; taşıtlar, motosikletler, bisikletler ve yayalar gibi farklı bileşen türlerinden oluşmaktadır. Genel olarak, bir trafik kontrol sistemi tasarlanırken yalnızca araçlar ve yayalar dikkate alınmaktadır. Karmaşık

sistemlerinin tipik örneklerinden biri olarak kabul edilen trafik sinyal kontrolü, doğrusal olmayan dinamiklere ve zamanla değişkenliğe sahiptir (Chedjou ve Kyamakya, 2018). Trafik sinyal kontrolü, çalışma prensibine bağlı olarak üç tipten oluşan sabit zamanlı, uyarımalı (actuated) ve adaptif (adaptive) trafik sinyal kontrolü olarak sınıflandırılabilir.

Adaptif trafik sinyal kontrol yöntemi, kentsel alanlarda trafik sıkışıklığını azaltmak amacıyla güçlü bir yaklaşım olarak kabul edilir ve aynı zamanda kavşaklardaki trafik dinamikleri ile ilgilenebilmektedir. Nitelikli bir adaptif trafik sinyal kontrol sistemi tasarlamak için optimizasyon algoritmaları kullanılmalıdır. Adaptif trafik sinyali kontrolünün performansını iyileştirmek amacıyla; Genetik Algoritma (Genetic Algorithm), Takviyeli Öğrenme (Reinforcement learning), Geri Basınç (Backpressure), Bulanık Mantık (Fuzzy logic) ve Parçacık Sürü Optimizasyonuna (Particle Swarm Optimization) benzer pek çok optimizasyon algoritması son zamanlarda uygulanmaktadır. Bu algoritmalar, kavşaklardaki trafiğin çakışan akışlarını yönetmek için kullanılmaktadır. Trafik sinyal kontrolünde optimize edilebilecek parametreler ise döngü uzunluğu, faz yeşil süreleri ve faz dizisidir. Bu parametreler, sabit veya trafik durumuna bağlı olarak adaptif olarak uyarlanabilir (Aljaafreh ve ark., 2014).

Teknolojideki gelişmelerin neticesi olarak şehirler ve şehirlerdeki yaşam tarzı, akıllı çevreye uyum sağlama ihtiyacı hissetmektedir. Akıllı şehir terimi ilk olarak yirminci yüzyılın sonlarında tam olarak 1990'larda kullanılmıştır (Albino ve ark., 2015). Akıllı şehir, mevcut tüm teknoloji ve kaynakları dikkate alarak şehirleri akıllı ve koordineli bir şekilde yönetme anlamına gelmektedir. Yollar, köprüler, tüneller, demir yolları, metrolar ve havaalanları şehirlerin en önemli ulaşım kaynakları olarak kabul edilmektedir. Trafik sinyal kontrolü alanında birçok araştırma gerçekleştirilmesine rağmen, akıllı şehirler kavramının ortaya çıkmasıyla birlikte şehirlerdeki yolların yönetimi için farklı akıllı yöntemler geliştirilmesi zorunluluğunu ortaya çıkmıştır. Bu açıdan, akıllı şehirler için Koordineli Adaptif Trafik Sinyal Kontrolü (KATSK) önerilmiştir. KATSK, tüm Akıllı Şehir Misyon Projelerinin en önemli bileşenlerinden biri olarak düşünülebilmektedir. Ayrıca bu yöntem, trafik gecikmelerini azaltmak ve seyahat süresini iyileştirmek için kullanılan bir tekniktir. Dahası bu önerilen yöntem ile, birbirine bağlanan ardışık kavşaklarda aşamalı ve koordineli bir yeşil sinyal sağlanabilmektedir.

1.2. Motivasyon

Dünya çapında yaşam standardındaki iyileşme ve araç sahibi olabilme oranının

artması, birçok insanın özel araçlarıyla seyahat etmesine yol açmaktadır. Trafikteki araç sayılarının artması, metropol şehirlerde trafik sıkışıklığının artmasına sebep olmaktadır. Bazı durumlarda tıkanıklığı azaltmak amacıyla yol altyapıları, sürekli artan trafik taleplerini karşılayacak şekilde genişletilmiştir. Ancak, mevcut alan eksikliği nedeniyle çoğu şehir merkezinde bu gerçekleştirilememektedir.

Sınırlı altyapıya sahip kalabalık ve büyük şehirlerde, akıllı trafik sinyal kontrol sistemlerinin uygulanması daha büyük bir ihtiyaç haline gelmiştir. Bu tür şehirlerde, akıllı trafik sinyal kontrol sistemlerinin bulunmaması, toplumun sosyal ve ekonomik hayatını olumsuz etkilediği gibi yakıt israfına ve araç egzozlarından karbondioksit salınımı neticesi olarak çevre kirliliğine neden olmaktadır. Ayrıca karbondioksitin ozon tabakasını etkilenmesi sebebiyle, iklim değişikliğine neden olduğu ve tüm canlı organizmaların yaşam tarzını bozduğu bilinmektedir.

Günümüzde teknolojinin gelişmesine paralel olarak şehirlerin yaşam tarzı ve altyapısı da gelişmektedir. Trafik taleplerindeki istikrarlı artışa uyum sağlamak nedeniyle şehirlerin akıllı otomatik yönetimi kullanması gereklidir. Akıllı şehir, mevcut tüm teknolojiyi ve kaynakları akıllı bir şekilde kullanmayı, aynı zamanda tüm şehrin kritik altyapılarını yönetmeyi hedeflenmektedir. Akıllı şehirlerdeki en kritik altyapılarından birisi yollardır. Şehrin yollarını verimli bir şekilde kullanmak için akıllı trafik sinyal kontrol sistemlerine ihtiyaç vardır. Akıllı şehirlerin kalitesi, akıllı ulaşım sistemlerinin kullanılmasıyla arttırılabileceği gibi verimli trafik yönetimi için geliştirilen trafik sinyal kontrol algoritmaları ile de arttırılabilir. Trafik sinyal kontrolü, ortak bir kaynağı paylaşan araçlar, motosikletler ve yayaların birbiriyle çakışan karışık hareketlerini yönetmek için kullanılan etkili ve vazgeçilmez bir yöntemdir.

Trafik koordinasyonu, belirli bir hızda giden araçların durmadan bu kavşaklardan geçmesine imkân sağlayan ve ana yol üzerindeki birbirine bağlı olan kavşakların trafik sinyallerini koordine etmeyi amaçlayan bir tekniktir. Bu teknik, yeşil dalga kontrol yöntemi olarak da bilinmektedir (Kong ve ark., 2011). MAXBAND (Little ve ark., 1981), PASSER (İlerleme Analizi ve Sinyal Sistemi Değerlendirme Rutini) (Chang ve ark., 1988) ve TRANSYT (Trafik Ağı Öğrenim Aracı) (Robertson, 1969; Jiao ve ark., 2014) gibi geleneksel koordinasyon yöntemleri, genellikle tüm kavşaklar için sabit döngü uzunluğuna sahip olmayı gerektirir ve birbirine koordineli ardışık kavşaklar arasındaki ofsetleri değiştirerek trafik akış hareketlerini kolaylaştırmayı hedefler. Bir ana yol ağında, koordineli kontrolün mantıklı varsayımları ile araç gecikmeleri ve durma sayısı azaltabilmektedir. Ancak trafik durumunun basitleştirilerek varsayımlara dayandırılması

gerçek hayat uygulamalarında iyi sonuçlar vermeyebilir (Chen ve ark., 2020). Bu tür dezavantajların üstesinden gelmek amacıyla, literatürde birçok adaptif trafik sinyal kontrol sistemi üzerine araştırma ve geliştirme yapılmıştır. Bu konuda detaylı bilgi ikinci bölümde verilmiştir.

Geçmiş yıllarda, trafik sinyal kontrolü alanında gerçekleştirilen ilerlemeler çok önemlidir. Trafik sinyal kontrolü bu süreçte ise birkaç aşamadan geçmiştir. Bu aşamalar; sabit zamanlı, uyarmalı (tam ve yarı uyarmalı) ve adaptif trafik sinyali kontrolü olarak sıralanabilir. Sabit zamanlı trafik sinyal kontrolünde, geçmiş trafik verilerine bağlı olarak sinyal planları hazırlanmaktadır. Bu tip kontrolörler, trafik talebinde yüksek değişkenliğe sahip alanlar için uygun bir trafik kontrol yöntemi değildir. Uyarmalı bir trafik sinyal kontrolünde ise, yeşil süreleri uzatma kararı, aracın yolda bulunmasına bağlı olarak alınmaktadır. Sabit zamanlı kontrolörlere göre, uyarmalı kontrol yapısı daha kullanışlı ve verimlidir. Adaptif trafik sinyal kontrol sistemleri, günümüzün trafik ihtiyacının gereksinimlerini karşılayabilecek bir yöntemdir. Adaptif trafik sinyal kontrolünün temel ilkesi, trafik talebindeki dinamik değişikliklere yanıt verebilmektir. Bu yöntemde, uyarlanabilir trafik parametrelerinin en az bir parametresi ayarlanmalıdır. Uyarlanabilir trafik parametreleri ise, döngü uzunluğu, faz yeşil süreleri, ofsetler ve faz dizileridir.

Adaptif trafik kontrolü, gerçek zamanlı optimizasyon algoritmasına sahip uyarmalı trafik kontrolünün bir sürümüdür ve bu yöntem dört nesli kapsamaktadır. Birinci nesil, trafik sinyali kontrol planlarının günün saatine ve/veya haftaya (sabah zirvesi, yoğun olmayan, öğleden sonra zirvesi, hafta içi, hafta sonu vb.) göre geçmiş trafik verilerine dayalı olarak geliştirildiği çevrimdışı (offline) bir yöntemdir. Geliştirilen planlar, doğrudan operatör tarafından seçilmesi ve uygulanması için hafıza elemanlarına kayıt edilmektedir. Birinci neslin en önemli örneği ise, birinci nesil Kentsel Trafik Kontrol Sistemidir (UTCS-1) (MacGowan ve IJ, 1979). Bu neslin temel dezavantajı, trafik talebinin öngörülemeyen dalgalanmalarına uyum sağlayamamasıdır. İkinci nesil, ilk çevrimiçi (online) optimizasyona dayalı adaptif trafik sinyal kontrol yöntemi olarak kabul edilmektedir. Döngü süresi, faz süreleri ve ofsetler gibi parametreleri çevrimiçi trafik bilgilerine göre dinamik olarak ayarlayarak, sinyal zamanlamalarını optimize etmektedir. Bu neslin uygulanmasındaki maksat, merkezi bir mimariye dayanarak ana yol boyunca trafik koordinasyonu sağlanmaktır. Sydney Koordineleli Adaptif Trafik Sistemi (SCATS) (Wales, 2006) ve Bölünmüş Döngü Ofset Optimizasyon Tekniği (SCOOT) (Hunt ve ark., 1982) adaptif trafik sinyal kontrol sistemleri bu neslin örnekleridir. Bu yöntemler, model tabanlıdır ve hem tasarım hem de operasyon aşamalarında insan müdahalesi

gerektirmektedir. Ayrıca, bu sistemler mevcut trafik akış bilgilerini toplamak için trafik detektörlerini kullanmaktadır. Toplanan bu bilgiler ile gelecekteki trafik akışları tahmin edilerek, yeşil sürelerinin ayarlandığı modeller geliştirilmektedir. Bu nesil, birinci neslin dezavantajının üstesinden gelse de, ölçeklenebilirlik, işlemin karmaşıklığı ve kullanılan iletişim ağlarının güvenilirliği gibi birçok eksikliğe sahiptir. Adaptif trafik sinyali kontrolün üçüncü nesil ise, ikinci nesildeki gibi trafik taleplerin dalgalanmasına yanıt verebilmektedir. Ancak, merkezi olmayan bir sistemdir ve merkezi sistem dezavantajının üstesinden gelmektedir. Bu nesildeki sistemler, model tabanlıdır ve dinamik programlamaya dayanmaktadır. Bu neslin en iyi örnekleri, Adaptif Kontrol için Optimizasyon Kuralları (OPAC) (Gartner ve ark., 2001) ve Gerçek Zamanlı Hiyerarşik Optimizasyon Dağıtılmış Etkili Sistem (RHODES)'dir (Little ve ark., 1981). İkinci neslin dezavantajının üstesinden geliyor olsa da, trafik talebinin dinamik ve değişken olması nedeniyle doğru trafik kontrol modeline ihtiyaç duymaktadır. Dördüncü nesil adaptif trafik sinyal kontrolü ise, üçüncü neslin eksikliklerinin üstesinden gelmeyi amaçlamaktadır. Buradaki hedefler, ortam modeline duyarlı olan ve kendi kendine öğrenen hesaplama gücüyle gerçek zamanlı olarak uygulanmada kullanılabilen bir sistem tanımlamaktır. Genetik Algoritma (GA), Takviyeli Öğrenme (TÖ), Geri Basınç, Bulanık Mantık ve Parçacık Sürü Optimizasyonuna (PSO) gibi birçok optimizasyon algoritmaları, adaptif trafik sinyali kontrolünün performansını iyileştirmek için son zamanlarda uygulanan yöntemlerdir. Genel olarak, adaptif trafik sinyal kontrol yöntemi, hem sabit zamanlı hem de uyarmalı trafik kontrol yöntemlerine kıyasla daha iyi performans göstermektedir (Wan ve Hwang, 2019).

1.3. Problem Tanımlaması

Trafik sıkışıklığı fenomeni, bu alandaki nüfus yoğunluğu ile daha çok ilişkilidir. Aynı zamanda otomobil sahibi olmak bir refah seviyesi göstergesi olarak kabul edilmektedir. Bu iki gerçek göz önüne alındığında, ekonomik ve sosyal zenginliğin olumlu bir göstergesi olarak “yol tıkanıklığı” verilebilir. Diğer yandan, başlangıç noktasından varış noktasına kadar sürüş sırasında çok fazla zaman kaybetmesi neticesinde enerji tüketimini, çevre kirliliğini ve sürücüler için stresi artırmasından dolayı ekonomiyi, toplumu ve çevreyi olumsuz etkilemektedir (Rida ve ark., 2020).

Metropol şehirlerde bulunan ana yollar, küçük şehirlerdekiyle ile karşılaştırıldığında, farklı özellikler göstermektedir ve üzerlerindeki trafik yoğunluğuna

bağlı olarak yan yollar da önemli hale gelmektedir. Bu “trafik yoğunluğu” sorununu çözmek için, kavşaklardaki ana yollarla beraber yan yollarla da ilgilenen arteriyel trafik sinyal kontrolü için uygun bir kontrol algoritması kullanılmalıdır. Arteriyel trafik kontrol algoritmasının temel amacı, trafiği daha akıcı hale getirmektir. Böylece yol kullanıcılarının, ana yol ağında seyahat sırasında mümkün olduğunca az zaman harcamasını sağlamaktadır. Mevcut arteriyel trafik sinyal kontrol algoritmalarının literatür taraması yapıldığında, çoğunun yalnızca ana yol trafiğini dikkate aldığı görülmüştür. Akıllı şehirlerde, sensörler (loop dedektörleri, kameralar, Bluetooth, RFID’ler, RADAR’lar, vb.) tarafından kapsamlı bir şekilde elde edilen trafik verileri mevcuttur. Bu verileri ana yol ağlarını akıllıca yönetmek için verimli bir şekilde kullanılabilir. Bu tezde akıllı şehirler için yeni bir koordineli adaptif trafik sinyal kontrolü önerilmiştir.

1.4. Araştırma Hedefi ve Katkısı

Trafik kontrol algoritmaları, son yıllarda önemli ölçüde geliştirilmiştir. Arteriyel yol ağlarının koordinasyonu ile alakalı mevcut çalışmalarda, verilen trafik hacmine göre toplam araç gecikme zamanını en aza indirmek veya koordinasyon aralık genişliğini maksimize etmek amaçlanmaktadır. Koordinasyon planları, günün saatine ve sabit döngü uzunluğuna göre yapılmaktadır. Bu yaklaşımlar, dinamik trafik durumuna uygun olmayabilmektedir. Bu nedenle, trafik akışını kontrol etmek için daha iyi potansiyele sahip bir yöntem kullanılmalıdır. Bu yöntem, trafik talebindeki dinamik değişikliklerin çevrimiçi olarak öğrenilmesi ve uygun kontrol tekniğinin kullanılmasına uyumlu olmalıdır. Akıllı trafik sinyal kontrolü alanında pek çok araştırma bulunmaktadır. Bunların çoğu bulanık mantık, dinamik algoritma ve GA tabanlı kontrol algoritmasına dayanmaktadır. Akıllı trafik sinyal kontrolünün uygulanması, trafik sıkışıklığını azaltmanın ve trafik verimliliğini artırmanın en düşük maliyetli yollarından biri olarak kabul edilmektedir (Guo, 2020). Bir trafik kontrol sisteminin performansı genellikle ortalama gecikme zamanı, ortalama hız, ortalama seyahat süresi, kuyruk uzunluğu, kavşak çıktı hacmi (Throughput) ve durma sayısı gibi farklı Etkinlik Ölçütleri (Measures of Effectiveness) ile değerlendirilmektedir.

Bu bölümde, önerilen yöntemlerin amaçları ve katkıları sunulmaktadır. Bu tez araştırmasının temel amacı, insanoğlunun günlük yaşamını birçok bakımından etkileyen ulaşımın zararlı etkilerinin azaltılması için, hibrid KATSK yöntemini önermek ve tasarlamaktır. Trafik kontrol yöntemlerin kullanılması, hem bekleme süresi, seyahat süresi,

kavşaktaki durma sayısını ve trafik sıkışıklığını azaltmakta hem de araçların ortalama hızını artırmaktadır. Önerilen yöntemlerin performansını ölçmek için; durma sayısı, ortalama bekleme süresi, ortalama seyahat süresi, aracın ortalama hızı ve kavşaktaki toplam kuyruk uzunlukları performans endeksi olarak dikkate alınmaktadır.

Bulanık mantık, Webster'in optimal döngü formülü, geri basınç ve TÖ kullanılarak hibrid denetleyiciler geliştirilmiştir. Sensörler (loop dedektörleri, kamera vb.) kullanılarak araç bilgilerin gerçek zamanlı ölçümüne dayalı olarak yerel kavşakların durumuna göre döngü uzunluğu, faz süreleri ve fazların sıralanması sağlanmaktadır. Bu araştırmanın amaçları şu şekilde sıralanabilir:

- Benzetim modeli kullanılarak geliştirilenler:
 - 1- Farklı mimarilerde olan izole edilmiş kavşaklar için uygun bir denetleyici gerçekleştirmesi.
 - 2- Birden çok izole kavşak için koordineli yeni trafik kontrol yöntemlerinin geliştirilmesi ve kavşak potansiyelinin artırılması.
- Önerilen modeli tasarlamak ve test etmek amacıyla SUMO trafik simülatörü ve Python kullanılmaktadır. Trafik simülatörü, trafik akışlarını simüle edilmesi için kullanılan güçlü bir araçtır. Python ortamı ise, geliştirilen trafik kontrol modellerinin tasarım, optimizasyon ve test süreçlerini basitleştiren zengin bir işlevler kümesi sağlamaktadır.

Bu çalışmanın katkısı şu şekilde özetlenebilir, önerilen yöntem mevcut yöntemlerden farklı olarak sadece ana yolları değil, aynı zamanda yan yolları da dikkate almakta olan kentsel alan yol ağları için bir hibrid KATSK'dir. Bu tez çalışmasında, sadece simülasyon ortamındaki verilerden değil aynı zamanda gerçek zamanlı verilerden de faydalanmak ve analizler yapmak suretiyle literatürde pek karşılaşılmayan deneyler yapılmıştır.

1.5. Tez Organizasyonu

Bu tez altı bölümden oluşacak şekilde düzenlenmiştir. Bu bölüm, tezin incelemesini, araştırma problemlerine yönelik motivasyonu, araştırmanın temel amaçlarını ve katkısı ayrıca tez organizasyonunu içermektedir.

İkinci bölüm, bu tezde ele alınan konularla ilgili önceki araştırmaların ayrıntılı bir literatür taramasını kapsamaktadır.

Üçüncü bölümde ise, trafik sinyal kontrolünün temel terminolojilerini, Webster

yöntemi, bulanık mantık, geri basınç ve TÖ gibi kullanılan yöntemlerin ilkesini, bu çalışmada kullanılan metodolojini ve simülatöre genel bakışı kapsamaktadır.

Dördüncü bölüm, izole edilmiş ve arteryel sinyalize kavşaklar için önerilen modellerin uygulanmasının ve geliştirilmesinin altını çizmektedir.

Beşinci bölümde, gerçek hayattan alınan ve rastgele trafik verileri kullanılarak simülasyonda elde edilen sonuçlara vurgu yapmaktadır. Bu bölüm iki alt bölüme ayrılmıştır: ilk alt bölüm, izole edilmiş kavşaklara uygulanan bulanık mantık ve Webster tabanlı yöntemden elde edilen sonuçları içermekte ve sonuçlar, kıyaslamalı trafik kontrol yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. İkinci alt bölümde, ana yol ağına uygulanan bulanık mantık ve Webster tabanlı, geri basınç ve TÖ tabanlı yöntemleri içeren önerilen koordineli algoritmalarından elde edilen sonuçları ile bu araştırmadaki bulgu sonuçlarının tartışılmasını içermektedir.

Son olarak, altıncı bölümde, tez sonuçları ve önerilerini sunulmaktadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Günümüzdeki trafik sıkışıklığı problemini azaltmak amacıyla kentsel alanlarda trafik sinyal kontrolü uygulamak acil hale gelmiştir. Performans artışı elde etmek üzere farklı kavşak mimarilerine dayalı çeşitli kontrol stratejileri ve trafik optimizasyon yöntemleri kullanılarak bu alanda birçok çalışma yapılmıştır. Bu bölümde trafik sinyali kontrol optimizasyon yöntemleri literatüründe yapılan çalışmaları tartışılmaktadır. Tartışma, kontrol stratejileri, kavşak türleri ve trafik sinyali kontrol optimizasyon yöntemlerine dayalı olarak üç ana sınıflandırmaya ayrılmıştır.

2.1. Trafik Kontrol Stratejilerine Dayalı Sınıflandırma

Trafik sinyal kontrolünün temel amacı, bir karayolunun kesişme noktalarında yol güvenliğini iyileştirmek niyetiyle güvenilir ve uygun maliyetli bir yöntem bulmak ve aynı zamanda çakışan akışların her birine istatistiksel olarak makul bir zaman dağılımı sağlamaktır. Trafik sinyal kontrolünde üç ana trafik kontrol stratejisi kullanılmaktadır: sabit zamanlı, uyarmalı ve adaptif trafik sinyal kontrol yöntemleridir. Bu yöntemler, bu alandaki kontrol stratejilerinde takip edilen tarihsel gelişimi yansıtmaktadır.

Sabit zamanlı trafik sinyal kontrol yöntemi:

Sabit zamanlı trafik sinyal kontrolü, trafik taleplerindeki dinamik değişiklikten bağımsız olarak her kavşakta önceden belirlenmiş döngü uzunluğunu ve yeşil sürelerini kullanmaktadır. Bu nedenle trafik taleplerindeki beklenilmeyen bir değişiklik ile baş edilememektedir. Sabit zamanlı trafik sinyal kontrolü, geçmiş trafik verilerine göre en yoğun trafik akışına en uzun yeşil süresi belirlemektedir ve sinyalizasyon kavşak için periyodik olarak aynı programı tekrarlamaktadır.

Sabit zamanlı trafik sinyal kontrolü, günün saatinin trafik taleplerine bağlı olduğundan izole kavşaklar için uygun ve ideal bir çözümdür. Diğer bir deyişle, oldukça istikrarlı ve düzgün trafik hacimleri için uygundur. Bazı sabit zamanlı trafik sinyal kontrol stratejileri, farklı zaman aralıkları (sabah ve akşamın en yoğun dönemler gibi) kullanılarak önceden belirlenmiş planları düzenlemektedir. Sabit zamanlı strateji uygulamasının temel bir ilkesi ise bir kavşakta trafik talepleri her zaman değişmemekte ve geçmiş talep verileri kullanarak uygun sinyal plan değerleri hesaplamaktır (Eom ve Kim, 2020). Bu stratejideki denetleyicinin işlemesi için kavşak kollarında detektör

kurulumuna ihtiyaç duyulmamaktadır. Sonuç olarak, uygulama maliyetinin yanı sıra bakım çabalarına duyulan ihtiyacı, uyarmalı ve adaptif trafik sinyal kontrolörlerinden önemli ölçüde daha düşüktür. Bunlar ise, bu yöntemin ana avantajı olarak kabul edilmektedir. Bu yöntemin diğer bir avantajı, fazların yeşil süresin başlangıcı ve bitiminin tahmin edilebilirliği nedeniyle, ayrıca trafik taleplerin ve biçimlerin güne göre sabit olması ile arteriyel kavşakların koordinasyonu için ideal olarak uygun bir yöntemdir. Bu stratejinin ana dezavantajı ise, trafik modelindeki veya talepteki dalgalanmalara tepki verememesidir. Kavşak trafik kontrolüne uygulanan ilk yöntem olduğu için, sabit zamanlı trafik sinyal kontrolü, trafik sinyal kontrolünün bir temeli olarak da düşünülebilmektedir. İzole edilmiş (Smith, 1979) ve ana yol ağı (Gazis, 1964) tipi kavşaklara sabit zamanlı trafik sinyal kontrolü uygulanmaktadır.

Webster, 1958'de izole bir kavşak gecikmesini en aza indirmek için popüler optimal döngü uzunluğu formülünü yayınladığından beri, sabit zamanlı trafik kontrolü alanında uygulamalarda tercih edilmiştir (Webster, 1958). Ancak sabit zamanlı bir trafik sinyali kontrolü için geçmiş verilerden en uygun döngünün hesaplanmasında bu formül sınırlıdır. Orijinal Webster formülünün (Wolput ve ark., 2016; Zakariya ve Rabia, 2016) aşırı tahmininin üstesinden gelmeye çalışan minimum gecikme formülü için Webster optimal döngü uzunluğunun modifiye edilmiş versiyonları mevcuttur. Zakariya ve Rabia, Webster optimal döngü uzunluğunun formülünün modifiye edilmiş bir versiyonunu önermişlerdir (Zakariya ve Rabia, 2016). Webster formülü yıllar önce formüle edilmiş olmasına rağmen, modern sistemlere hala aktif uygulanabilmektedir.

Uyarmalı trafik sinyal 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 (loop detektörleri, kameralar, RFID'ler vb.) ve/veya yaya butonları tarafından belirlenmektedir. Bu yöntemde, mevcut yeşil fazı uzatması veya kesmesi kararı yalnızca aktif yeşil fazdaki talebin varlığına bağlanmaktadır (Zheng ve Recker, 2013).

İki tür araç detektörü kullanılmaktadır: durma hattı detektörleri ve arka detektörleri. Durma hattı detektörleri, faz sinyali kırmızı gösterirken trafik talebini tespit etmek için kullanılmaktadır. Buna bağlı olarak, trafik sinyal kontrolörü, belirli bir döngüde belirli bir yön için talep yoksa fazı atlamaktadır. Arka detektörler ise, önceden tanımlanmış mesafesine bağlı olarak yeşil faz süresinin uzatma veya sonlandırma kararını

belirlemek için kullanılmaktadır. Uyarmalı trafik sinyal kontrol yöntemi, gerçek zamanlı trafik taleplerine tepki vermektedir. Dolayısıyla trafik talepleri gün içinde önemli ölçüde değiştiğinde veya ana yolu trafik akışındaki kesintilerin azaltması amacı olduğunda iyi performans göstermektedir. Bu yöntem, sabit zamanlı trafik sinyal kontrolü ile kıyaslandığında daha iyi verimlilik sağlamaktadır. Öte yandan, kavşaktaki trafik talebi arttıkça, uyarmalı trafik sinyal kontrol sabit zamanlıya benzer şekilde çalışmakta dolayısıyla verimliliğin azalmasına sebep olmaktadır.

Uyarmalı trafik sinyal kontrol yönteminin avantajı, gerçek zamanlı trafik taleplerine etkileyici bir şekilde tepki verebilmesidir. Bu yöntemde, tüm trafik sinyal fazları önceden belirlenmiş minimum veya maksimum yeşil zaman sınırlamasına sahiptir. Minimum faz yeşil süreleri, sürücülerin yeşil süre aralığının başlangıcına cevap vererek sürücü beklentisini karşılamak için kullanılırken, maksimum yeşil süreleri, taleplerin varlığına bağlı olarak uzatılan yeşil sürenin sonsuza gitmesini önlemek amacıyla kullanılmaktadır. Böylelikle, şimdiki çalışan fazın talebine bakmadan, 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 davranabilmektedir. Bu sebeple, trafik sıklığı yoğun olduğunda sabit zamanlı trafik sinyal kontrolünün dezavantajları meydana gelmektedir.

Çalışma prensibi çok basit ve kolay anlaşılan uyarmalı trafik sinyal kontrol stratejisi, optimizasyon algoritmalarını kullanımına gerek duymamaktadır. Bu nedenle bu yöntemle ilgili çok az yayın bulunmaktadır (Lin, 1991). Tasarlanan uyarmalı faza göre yarı uyarmalı ve tam uyarmalı olarak iki tür trafik sinyal kontrol yöntemi bulunmaktadır. Yarı uyarmalı trafik sinyal kontrolünde, yalnızca bir kavşaktaki yan yollar için detektörler kullanılmaktadır. Özellikle ana yolda tekdüze trafik akışı varken, yan yoldan gelen düşük talepleri karşılamak için etkilidir. Yan yol üzerinde bir talep olduğunda hizmet verilmekte, aksi takdirde ana yolların fazlarına hizmet etmeye devam edilmektedir. Ancak, ana yol trafik akışı ile ilişkili fazları algılama mekanizması bulunmamaktadır. Tam uyarmalı trafik sinyal kontrolü, tüm fazalar için bir çalıştırma mekanizması sağlamak amacıyla kavşaktaki tüm trafik akışlarının algılanması ile ilgilenmektedir. Tüm yollarda aşırı derecede değişen trafik talepleri olan ve aynı zamanda yaklaşık olarak eşit hacme sahip izole kavşaklarda ideal bir yöntemdir.

Adaptif trafik sinyal kontrolü:

Bu bölümde tartışılan sabit bir zamanlı veya uyarmalı geleneksel trafik sinyal kontrol yöntemlerinin, günümüzdeki trafik taleplerinin ihtiyaçlarını karşılamak için uygun ve uyumlu olmadığı anlaşılmaktadır. Adaptif trafik sinyal kontrolü, trafik sinyal kontrolü alanında modern ve en yeni çözüm olarak düşünülmüştür. Bu tür trafik sinyal kontrolünde, genellikle uyarmalı trafik sinyal kontrolünde olduğu gibi benzer detektör verileri kullanılmaktadır. Adaptif bir trafik sinyal kontrol yönteminin temel ilkesi, trafik taleplerindeki dinamik değişikliklere yanıt verebilmesidir. Bu teknikte, döngü uzunluğu, yeşil süreleri, faz sıraları ve ofset gibi parametrelerden en az biri ayarlanmalıdır. Uyarmalı trafik sinyal kontrolünün aksine, ayarlanabilir parametreleri hesaplamak (sinyal planını optimize etmek), mevcut yeşil fazı devam ettirmek veya başka bir faza geçmeye karar vermek için tüm kavşağın durumunu hesaba katmaktadır.

Genel olarak, adaptif bir trafik sinyal kontrolün çevrimiçi optimizasyonunu gerçekleştirmek üzere iki ana yöntem kullanılmaktadır: ikili seçimli (*binary choice*) sabit fazlama tekniği ve rastgele sıralama (*random sequencing*) tekniği olarak adlandırılmaktadır (Zheng ve Recker, 2013). *İkili seçim sabit fazlama tekniğinde*, zamanı genellikle 2-5 saniye arasında kısa aralıklara dağıtmakta ve her aralığın sonunda mevcut yeşil fazı uzatma veya sonlandırma kararını verilmektedir. Modernize ve Optimize Edilmiş Araç Çalıştırma stratejisi (Modernized Optimized Vehicle Actuation strategy (MOVA)), bu yöntemin iyi bir örneği olarak kabul edilmektedir (Vincent ve Young, 1986). Genel olarak, (Gu ve ark., 2020; Ma ve ark., 2020)'de açıklamış olduğu gibi sabit bir faz sıralamasına ve değişken döngü uzunluğuna sahip döngü tabanlı bir sinyal planıdır. Bu teknikte gerçekleştirilen eylem, mevcut yeşil fazı uzatmayı ($a = 0$) veya sonlandırmayı ve bir sonraki faza geçmeyi ($a = 1$) gösteren ikili bir sayı kullanmaktadır. *Rastgele sıralama tekniğinde*, karar verme aralığı oldukça uzundur, gelecekteki bir zamanlama periyodu için optimal sinyal sıralama değişimi yapılabilir ve faz atlama sınırlandırması gevşetilmiştir (Ge ve ark., 2019). Bu yöntem ikili seçimli sabit faz yönteminden daha verimli olsa da, bazı fazlarda atlama sebebiyle, sabit bir faz kullanmaya alışkın sürücülerin kafasını karıştırabilmektedir.

Bölüm 1'de tartışıldığı gibi, adaptif bir trafik sinyal kontrolü dört nesilden oluşmaktadır. Birinci nesil, günün saatine bağlı olarak geçmiş trafik verilerine dayalı olarak trafik sinyali kontrol planları çevrimdışı bir şekilde geliştirilir ve bu neslin örneği Birinci Nesil Kentsel Trafik Kontrol Sistemidir (First Generation Urban Traffic Control System (UTCS-1)) (MacGowan ve IJ, 1979). İkinci nesil, ilk çevrimiçi optimizasyon

adaptif trafik sinyal kontrol yöntemi olarak kabul edilmektedir. Döngü süresi, faz süreleri ve ofsetler gibi parametreleri çevrimiçi trafik bilgilerine göre dinamik olarak ayarlayarak sinyal sürelerini optimize etmektedir. Sydney Koordineli Adaptif Trafik Sistemi (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System (SCATS)) (Wales, 2006) ve Bölünme Döngü Ofset Optimizasyon Tekniği (Split Cycle Offset Optimization Technique (SCOOT)) (Hunt ve ark., 1982) gibi merkezi bir sistemdir. Üçüncü nesil adaptif trafik sinyal kontrolü, merkezi olmayan bir sistemdir. Merkezi olmayan bir sistem olduğundan, merkezi sistemin dezavantajının üstesinden gelmektedir. Bu nesildeki sistemler model tabanlıdır ve çoğu dinamik programlamaya dayanmaktadır. Adaptif Kontrol için Optimizasyon Kuralları (Optimization Policies for Adaptive Control (OPAC)) (Gartner ve ark., 2001) ve Gerçek Zamanlı Hiyerarşik Optimizasyon Dağıtılmış Etkili Sistem (Real-time Hierarchical Optimizing Distributed Effective System (RHODES)) (Mirchandani ve Wang, 2005) bu nesil için iyi örneklerdir. Dördüncü nesil ise, önceki neslin sınırlamasının üstesinden gelmeyi amaçlamaktadır. Bu neslin amacı, ortamın mükemmel modeline daha az duyarlı ve gerçek zamanlı olarak uygulanacak makul hesaplama gücüyle kendi kendine öğrenen bir sistem tanımlamaktır.

2.2. Kavşak Tiplerine Dayalı Sınıflandırma

Şehirlerin içinde bulunan kavşaklar, komşu kavşaklarla ilişkili çalışmalarına bağlı olarak üç tipte kategorize edilebilmektedir. Bunlar: İzole kavşak, ana yol ağı ve trafik yolu ağıdır.

İzole kavşaklar:

İzole kavşak, diğer komşu kavşakla hiçbir ilişkisi olmayan ve diğer trafik kontrol sinyallerinden bağımsız olarak çalışan bir kavşaktır. İzole kavşak kontrolünün temel amacı, kavşaktaki bekleme süresini ve kuyruk uzunluğunu azaltmaktır. Trafik sinyal kontrol optimizasyon algoritmalarının çoğu, izole bir kavşak için uygulanmıştır. Çünkü izole kavşaklarda optimizasyon algoritmalarının uygulaması, ana yol ve diğer yol ağlarına kıyasla oldukça basit ve anlaşılırdır. (Michalopoulos ve Stephanopoulos, 1977) ve (Smith, 1979) çalışmalarında, izole edilmiş bir kavşak optimize etmek için sabit bir zaman kontrolü uygulamışlardır. Bulanık mantık, uzman bilgisinin yorumlanması ve pratik bir gerçekliğe dönüştürülmesidir (Dimitriou ve ark., 2008). (Zaied ve Al Othman, 2011), izole sinyalizasyon kavşak için bulanık mantık trafik sisteminin tanıtıldığı bir çalışma

yapmışlardır. Sistem döngü süresi ayarlanmak suretiyle kullanılmayan yeşil faz sürelerinin en aza indirilmesi amaçlamaktadır. Yöntem, sabit zaman kontrolü ile karşılaştırıldığında araç bekleme süresi açısından üstün performans göstermektedir. Bulanık mantık kontrolü, dinamik programlama, PSO ve Q-öğrenme yöntemleri sırasıyla (Pappis ve Mamdani, 1977), (Sen ve Head, 1997), (Çeltek ve ark., 2020) ve (Pálos ve Huszák, 2020) çalışmalarında önerilmektedir. Tek bir kavşak için üç gerçek zamanlı adaptif trafik sinyal kontrolü algoritması (Aljaafreh ve ark., 2014) tarafından önerilmiştir ve bu algoritma, kavşaktaki araçların ortalama bekleme süresini azaltmayı amaçlamaktadır. Bu algoritmaların performansını test etmek için MATLAB/Simulink/Simevents aracı kullanılarak trafik ışığı kontrolörü için ayrı bir olay benzetim modeli geliştirilmiştir. Önerilen algoritmalar, geleneksel sabit bir zamanla karşılaştırılmıştır.

Ana yol ağı:

İzole kavşaklardan farklı olarak, ana yol ağı, ana akış yönleriyle tek bir düzlemde birbirine bağlanan veya birbirini takip eden kavşaklardır. Bu nedenle arteriyel (ana yol) sinyal kontrol yönteminin amacı, arteriyelden geçen araçların durma sayısını azaltarak sürekli sinyal ilerlemesini (koordinasyonu) sağlamak ve ortalama hızlarını artırmaktır. Başka bir deyişle, kavşaklarda seyahat sürelerini, durmaları ve beklemeyi azaltmak için ana yollar boyunca düzgün trafik akışı sağlamak amacı vardır. Bu amaca ulaşmak için bir ana yol ağı boyunca trafik sinyali bir şekilde koordine edilmelidir. Arteriyel koordineli trafik sinyal kontrolü, kentsel bir ana yol ağındaki trafik sıkışıklığını azaltmak için etkili bir yöntemdir. 1960'lardan beri, arteriyel koordineli kontrol araştırmaları birçok araştırmacının dikkatini çekmiştir (Wang ve ark., 2012). Bu bağlamdaki koordinasyonun, araçların birbirini takip eden bir kavşaktan sorunsuz bir şekilde geçmesine izin veren yeşil bantları en üst düzeye çıkaran koordinasyon olduğu ve TÖ'deki acente koordinasyonu ile karıştırılmaması gerektiği unutulmamalıdır.

Konvansiyonel koordinasyon (MacGowan ve IJ, 1979) genellikle günün belirli saatlerinde koordinasyon planları kullanılarak elde edilmektedir. Günün saati planı, belirli trafik akışı ve diğer değişkenlere dayalı olarak toplam gecikmeyi zamanını en aza indirerek veya arteriyel bant genişliğini maksimize ederek elde edilen sabit bir döngü planı olarak karakterize edilmektedir (Tian ve ark., 2011). Bir ana yol ağının koordinasyonu alanında çok az çalışma yapılmıştır. (Ali ve ark., 2020)'da bulanık mantık ve Webster'in optimal döngü formülü tabanlı koordineli adaptif trafik kontrol yöntemini önerilmiştir.

Yöntem, iki kesişme noktası olan bir ana yol ağına uygulamıştır. Geleneksel sabit zamanlı, koordineli ve döngüsel Geri Basınç yöntemleri ile karşılaştırılan yöntemin, ortalama bekleme süresi, ortalama seyahat süresi, ortalama hız ve toplam kuyruk uzunluğu açısından daha üstün olduğu görülmüştür.

Trafik sinyali yeniden zamanlama yöntemine dayalı yeni bir yaklaşım (Yue ve ark., 2021)'da önerilmiştir. Nevada'daki Reno Şehrin ana yolu üzerinde sekiz sinyalize kavşağa uygulanmıştır. Trafik sinyalinin performansını artırmak için ana yol kavşaklarını dinamik olarak alt alana ayıran bir başka yeni yöntem (Shen ve Yang, 2016)'de sunulmuştur. Önerilen sistem iki durum altında çalışmaktadır: izole kavşak durumu ve ardışık kavşaklar arasındaki korelasyon derecesine bağlı olan koordineli kavşak durumu. Önerilen yöntem, bu iki durum altında performans açısından üstünlük göstermesine rağmen, ana yolun doygunluğa yakın olması veya yan yollardaki trafik hacminin çok fazla ve ana yolunkine yakın olması durumunda avantajlı olmamaktadır.

Ardışık kavşaklar arasında koordinasyonu sağlamak amacıyla Derin Takviyeli Öğrenmeye (DTÖ) dayalı kooperatif Çoklu Kavşak Trafik Sinyal Kontrolü önerilmektedir (Ge ve ark., 2019). Araç konumu, hızı ve mevcut fazlar, trafik durumları olarak aynı zamanda sinir ağının girişi olarak kullanılmıştır. Mevcut fazın süresini uzatma veya sonraki faza geçme eylemi, her karar zamanında gerçekleştirilmiştir. Ödül fonksiyonu ise, iki ardışık kavşaklar arasındaki bekleyen araçların sayısı olarak kabul edilmiştir. İki Kavşak içeren arteriyel ağına uygulanmıştır. Yöntem, merkezi bir kontrol stratejisine dayanmaktadır. E-greedy kuralı kullanılmıştır. Koordinasyon sağlamak için yazarlar, kavşaktaki sadece gelen yolları değil, aynı zamanda giden yolları da göz önünde bulundurmaya önermişler. Önerilen yöntem, sabit zamanlı stratejisi ile karşılaştırılmış ve daha iyi performans göstermiştir. Bu yöntemin dezavantajı, eylem alanının trafik ağındaki kavşak sayısı ile eksponansiyel şekilde katlanarak artmasıdır.

(Diaz ve ark., 2020)'teki çalışma, trafik taleplerine bağlı olarak ofsetleri ayarlayarak bir ana yol ağının performansını artırmak için Derin Q-Ağı (DQA) önermiştir. Yöntem, faz sürelerinin ve döngü uzunluğunun geleneksel model tabanlı yöntemlerle belirlendiği ve koordineli fazların ofsetinin DQN aracılığıyla ayarlandığı kooperatif bir çalışmadır. Simi-grafik yöntemi (Chedjou ve Kyamakya, 2018), dinamik programlama (Mirchandani ve Head, 2001) ve Genetik Algoritma (Lo ve ark., 2001; Liu ve Chang, 2011) gibi yöntemler de bir arteriyel yol ağının performansını artırmak için uygulanan yöntemlerdir.

Trafik yol ağları (şebekeler):

Trafik yol ağları, birbirine bağlı yollar grubudur, normalde motorlu ve/veya motorsuz araç trafiğine hizmet vermek için tasarlanmış ikiden fazla bağlantılı kavşağı içermektedir. Bu ağlarda ana yöndeki trafik akışı, yan yöndeki ile aynı hacimde olabilmektedir. Bulanık mantık (Kelsey ve Bisset, 1993) yöntemi ilk kez önerilmiştir ve her kavşak yolundaki doygunluk derecesine dayalı olarak döngü uzunluğu, faz süresi ile ofset parametrelerini ayarlamak için sağa/sola dönüş içermeyen iki yönlü yollardaki çoklu kavşağı kontrol etmek için uygulanmıştır. Son derece düzensiz trafik akışı için uygun olan her yolda bir şeritle izole edilmiş bir kavşağın bulanık mantık tabanlı iki fazlı sinyal kontrolünü simüle etmişlerdir. Bulanık mantık teorisi uygulayarak bir grup kavşak için kooperatif trafik sinyali kontrolü (Lee ve Lee-Kwang, 1999)'de önerilmiştir. Her denetleyici, tüm kavşaklar grubunu koordine etmek amacıyla komşu denetleyici ile iş birliği yapmaktadır. Denetleyicinin performansını en üst düzeye çıkarmak için; denetleyici yalnızca faz uzunluklarını değiştirmekle kalmaz, aynı zamanda trafik koşullarına göre bir sinyalin faz sıralarını da değiştirmektedir. Önerilen denetleyici, aynı koşullar altında uyarmalı trafik sinyal kontrol yöntemiyle karşılaştırılmış ayrıca simülasyon on sekiz farklı koşul için gerçekleştirilmiş ve iyi bir performans sağlanmıştır.

Farklı bölgesel kavşaklardan elde edilen Q fonksiyonunu, hiyerarşik olarak toplayan ve tüm büyük ölçekli trafik şebekesi üzerinde nihai Q fonksiyonunu meydana getiren merkezi genel kavşak modeli (Prashanth ve Bhatnagar, 2010; Tan ve ark., 2019)'de önerilmiştir. (Gong ve ark., 2019)'de, trafik yol ağı için merkezi olmayan, adaptif, çoklu-kavşak çift düello derin Q ağ algoritması önerilmiştir. Algoritma, uyarmalı trafik sinyal kontrolüyle karşılaştırılmış, seyahat süresi ve toplam gecikme açısından performans artışı göstermiştir.

2.3. Trafik Sinyal Kontrol Optimizasyon Yöntemlerine Dayalı Sınıflandırma

Trafik sinyal kontrol optimizasyonu, akıllı ulaşım sistemleri alanında önemli ve cazip bir problemdir. Bu konuyla ilgili bilimsel literatür zenginliği olmasına rağmen hala aktif bir araştırma alanı olarak kabul edilmektedir (Rasheed ve ark., 2020). Araştırma ve geliştirme aşamasındaki en yeni adaptif trafik sinyal kontrolleri, dördüncü neslin hedeflerini yerini getirmeyi amaçlamaktadır. Trafik sinyal kontrolünün performansını iyileştirmek amacıyla Dinamik Programming (DP), Bulanık mantık, geri basınç ve TÖ gibi birçok optimizasyon algoritması son zamanlarda kullanılmaktadır. Bu bölümde, bu

algoritmalarla dayalı olarak trafik sinyal kontrolü alanında yapılan çalışmalar tartışılmaktadır.

DP, sorunu daha küçük alt problemlere bölerek çözmek için üretilen bir optimizasyon yöntemidir. Bu yöntem, genel problemin optimal çözümünün, alt problemlerinin optimal çözümüne bağlı olduğu gerçeğine tabidir. DP tabanlı yöntemin dezavantajı, ulaşılması zor olan trafik ortamı için bir durum geçiş olasılığı modelinin oluşturulmasına ihtiyaç duymasıdır. OPAC (Gartner, 1983), DP'ye dayalı olarak tasarlanmış adaptif trafik sinyal kontrol sisteminin bir örneğidir. (Chen ve Sun, 2016)'te, araç varış tahmin modelini ve bir sinyal optimizasyon algoritmasını birleştiren bir model önerilmiştir. NEMA faz yapısını desteklemektedir. Yöntemi uygulamak ve test etmek için VISSIM simülatörü kullanılmıştır. Simülasyon sonucuna göre önerilen yöntem, optimal sabit süre ve dört fazlı DP'den daha iyi performans göstermektedir. Diğer bir DP tabanlı, sırasıyla izole kavşakları ve ana yol ağlarını kontrol etmek üzere uygulanan çalışmalar (Sen ve Head, 1997; Mirchandani ve Head, 2001)'te yapılmıştır.

Bulanık mantık, trafik sinyal kontrol sisteminde kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Bunun için bu alanda yapılan çoğu çalışma bulanık mantık temeline dayanmaktadır. Kuyruk teorisini temel alarak yapılan çalışmada, MATLAB'ın Simulink ve SimEvent programlarını kullanarak, çok şeritli tek kavşak için bulanık mantığa dayalı bir trafik modeli geliştirilmiştir. Model, tek kuyruk uzunluğu tarafından belirlenen kontrol kararları ve bekleme süresinin azaltılmasını esas alınarak geliştirilmiştir (Soh ve ark., 2010). Önerilen yöntem, sadece faz süreleri değiştirmekle kalmamakta, aynı zamanda iyi bir performans elde etmek için trafik sinyalinin faz sırasını da değiştirmektedir. Önerilen trafik kontrolörünün performansını değerlendirmek amacıyla, geleneksel uyarmalı trafik sinyal kontrol ile karşılaştırılmış ve önerilen yöntem iyi bir performans göstermiştir.

Geleneksel detektörlerin dezavantajlarından kurtulmak için, kablosuz sensör ağı kullanılan başka bir çalışmada, trafik sinyal kontrolü amacıyla her faza bir denetleyiciyi tahsis edilmiştir ve çoklu dinamik bulanık mantık denetleyicisi kullanılmıştır. Araç sayısını tahmin etmek için yaygın olarak kullanılan loop detektörü yerine, Zigbee tabanlı kablosuz sensör ağı kullanılmıştır. Sistem, trafik sinyal yeşil süresini yalnızca ilgili kuyruklardaki araç sayısına bağlı olarak değerlendirmektedir. Elde edilen simülasyon sonuçlarına dayalı olarak, çoklu denetleyici yaklaşımı, özellikle yoğun trafik koşullarında araç bekleme sürelerinin azaltılması açısından daha iyi sonuçlar vermektedir (Garg ve Kaushal, 2017). İzole bir kavşak için iki aşamalı bulanık mantık tabanlı trafik sinyal kontrol sistemi (Alam ve Pandey, 2015)'da insan zekasını taklit edebilen bir teknoloji

kullanılarak bir yöntem önerilmiştir. Trafik Acil Karar modülü (TAKM) ve Süresi Uzatma Karar Modülü (SUKM) olarak adlandırılan iki modülden oluşmaktadır. Elde edilen sonuçlarda, önerilen sistemin sabit zaman kontrolüne kıyasla üstün performanslı olduğu gösterilmektedir. (Shiri ve Maleki, 2017)'de da izole bir kavşak için uyarmalı bir trafik sinyal kontrolünün maksimum yeşil süresini belirlemek üzere bulanık mantık kullanılmıştır. Bu çalışmada maksimum yeşil süresi, gerçek zamanlı olarak trafik akışına bağlı olarak belirlenmiştir. Modelin performansını ölçmek için AIMSUN trafik simülatörü kullanılmıştır. Simülatör sonucuna göre, yöntem geleneksel uyarmalı trafik sinyal kontrolünden daha iyi performans göstermektedir. Kavşaklar arasında koordinasyonu sağlamak için bulanık mantık kullanılmış ve bu alanda birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar arasında Kermanian ve diğerleri, bulanık mantık uygulayarak durum-uzay denkleminde dayalı kapsamlı bir kentsel trafik ağları için model geliştirmişlerdir. Bu çalışmada iki kavşak için kentsel trafik ağının bulanık modeli yapılmıştır. Koordineli trafik kontrolü sağlamak için yerel ve komşu trafik bilgileri kullanılmıştır. Trafik tıkanıklığı için önerilen bulanık mantık tabanlı modelin performansının, sistemin normal bir durumda olduğundan daha iyi olduğu gösterilmiştir (Royani ve ark., 2010). Shen ve Kong, komşu kavşaklar arasında bilgi paylaşımına izin veren bir ortak trafik sistemi sunarken, otobüsün kavşağı geçme önceliğini de dikkate almıştır. Yapılan çalışma bulanık mantık ve yapay sinir ağına dayalı olarak tasarlanmış, geliştirilen kontrol sistemi gerçek zamanlı olarak uygulanmıştır. Önerilen kontrolör, sistemin performans gelişimini göstermek amacıyla izole edilmiş kavşak sabit zamanlı kontrol yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Tasarlanan modelin performansının daha üstün olduğunu göstermiştir. Bu yöntemin dezavantajı ise, detektörlerin ve yayaların belirsizliğinin hesaba katılmamasıdır (Shen ve Kong, 2009). Tip-2 bulanık mantığa dayalı yapılan bu çalışma, Singapur'daki karmaşık şehir içi yol ağı trafik kontrol sistemine uygulanmıştır. Başka bir çalışmada ise benzer yöntemlerin çoklu modeli üzerine kurulmuştur (Balaji ve Srinivasan, 2011). Performans değişkenleri olarak, araçların ortalama gecikmesi ve anlık ortalama hızı kullanılmıştır. İki farklı sistemin sonuçları karşılaştırılarak sistemin performansı değerlendirilmiştir. Aynı zamanda bu sistemler aynı trafik ağında aynı koşullar altında test edilmiştir ve diğer iki modele göre daha iyi sonuç vermiştir

Bulanık mantığa ek olarak, nöro-bulanık yöntemi de bu alanda yaygın olarak uygulanmıştır. (Udofia ve ark., 2014)'da yazarlar, adaptif bir nöro-bulanık çıkarım (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System-ANFIS) sistemine dayalı trafik kontrol

sinyalinin faz sıralaması belirlemek amacıyla bir model önermişlerdir. Model, izole bir kavşağa uygulanmış ve simülasyon MATLAB üzerinde gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonucuna dayalı olarak, sabit fazlı trafik sinyal kontrolüne kıyasla önerilen modelin daha etkin olduğu gösterilmektedir.

PSO, kuş sürüsünün davranışından esinlenen popülasyon tabanlı bir sezgisel optimizasyon yöntemidir (Eberhart ve Kennedy, 1995). Son yıllarda, kentsel yol ağlarında trafik kontrolünün performansını artırmak için, trafik sinyal optimizasyonu alanında PSO algoritmalarının ve PSO varyantlarının başarısı birçok araştırmacı tarafından doğrulanmıştır (Hu ve ark., 2016). (Garcia-Nieto ve ark., 2013)'teki çalışma, bir optimizasyon algoritması olarak PSO'yu kullanarak optimal döngü ve fazı belirlemeye odaklanmaktadır.

Geri basınç yöntemi, trafik sinyal kontrol alanında en yeni yöntemlerden biri olarak kabul edilmektedir. Geri basınç, merkezi olmayan bir yöntemdir ve uygulaması kolaydır. Geri Basınç algoritmasının temel avantajı, trafik ağlarının boyutuna ve dağılımına bağlı olarak algoritmanın karmaşıklığı sabit kalmaktadır.

Trafik koşulları hakkında eksik bilgi mevcut olduğunda geri basınç kontrolünün etkinliği (Li ve ark., 2021)'de test edilmiştir. Kısmen bağlantılı yollar için uygun bir hız/yoğunluk alanı tahmin modülü önerilmiştir. Yöntem, onbir kavşaktan oluşan yol ağına uygulanmıştır. Diğer (Hao ve ark., 2019)'daki çalışmada, dağıtılmış işbirliğine dayalı geri basınç tabanlı trafik sinyal kontrol algoritması önerilmiştir. Bu algoritma, kentsel trafik ağı yollarına uygulanmıştır. Kavşak, kuyruk uzunluğu ve komşu kavşağın aktif faz süresi gibi bilgileri paylaşmak için birbirleriyle iletişim kuran akıllı bir ağ elemanı olarak davranmaktadır. Yerel bilginin yanı sıra, sonraki kavşağının aktif faz durumu, yerel kavşakta karar vermek için kullanılmaktadır. Simülasyon olarak, önerilen yöntemin sonucu orijinal geri basınç ile karşılaştırılmış ve daha iyi performans elde edilmiştir. Geri basınç temelli bir algoritma, (Gregoire ve ark., 2014)'de de önerilmiştir. Bir trafik yolu ağının sonlu kapasitelerine bağlı bir geri basınç yöntemi sunulmuştur. Kuyruk sınırlama kısıtı olarak normalize edilmiş basıncı kullanarak, orijinal geri basınç algoritmasının dezavantajının üstesinden gelmeyi amaçlamaktadır. Ayrıca, orijinal geri basınç ve sabit zamanlı trafik sinyal kontrol ile karşılaştırılmıştır. Yoğun trafik durumunda daha iyi performans elde edilmiştir.

TÖ, son yirmi yılda yapay zekânın gelişimi üzerinde önemli etkileri olan makine öğreniminin en önemli araştırma yönlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Luong ve ark., 2019). Karmaşık problemleri öğrenmeyi ve bunlara karar vermeyi amaçlayan bir tür

makine öğrenimidir (Genders ve Razavi, 2018). Son zamanlarda, TÖ popüler bir öğrenme tabanlı yöntem olarak düşünülebilmekte ve verilen ortam hakkında önceden bilgi sahibi olmadan çevrimiçi optimizasyon yapma yeteneğine sahip olduğu için trafik sinyal kontrol alanına uygulamasını önerilmiştir (El-Tantawy ve ark., 2013). Ancak, ağdaki elemanlar arasında koordinasyon ihtiyacı ve boyutluluk etkisi, TÖ'ye akıllı denetleyicileri uygulama ile ilgili iki büyük zorluktur (Elmahalawy ve ark., 2020). Son yirmi yılda, TÖ tabanlı adaptif trafik sinyal kontrolü, bu alandaki artan çalışmalarla hem akademiden hem de endüstriden önemli ölçüde ilgi görmüştür (Guo ve ark., 2019).

TÖ problemlerini çözmek için iki ana yaklaşım mevcuttur: değer temelli ve kural temelli. Ayrıca hem değer temelli hem de kural temelli yaklaşımları kullanan hibrid bir aktör-eleştirmen yaklaşımı da mevcuttur (Arulkumaran ve ark., 2017). Değere dayalı yöntemler, belirli bir durumun beklenen ödülünü tahmin etmeye dayanmaktadır. Kural tabanlı ise, yöntemlerin bir değer işlevini sürdürmesine gerek kalmadan, doğrudan en uygun kuralı aramaktadır. Aktör-eleştirmen yöntemler, değer işlevini kural gradyanları için bir temel olarak kullanmakta ve hem değere dayalı hem de kural temelli yöntemlerin avantajlarından faydalanmaktadır. TÖ, herhangi bir insan müdahalesi olmaksızın kendi kendine eğitim kabiliyetine sahiptir ve ortamı modellemeye gerek olmadan bir algoritma olarak ifade edilebilmektedir (Wan ve Hwang, 2019). Pek çok çalışmada modelsiz kontrol yöntemlerine dayalı olarak, TÖ kullanımı önerilmiştir ve geliştirilmiştir. Tablolu Q-öğrenmeye dayalı bir TÖ çalışması (Dresner ve Stone, 2005) önerilmiştir. Ayrık durumlu olarak geçerli olan bu yöntemde, bilgisayar belleğinin sınırlandırılması nedeniyle durum ve eylem alanı kısıtlamaları mevcuttur (Wu ve ark., 2020).

Birçok yeni yayın (Belletti ve ark., 2017; Lin ve ark., 2018; Shabestary ve Abdulhai, 2018; Tan ve ark., 2019) değer temelli derin öğrenme yöntemlerinin TÖ ile entegrasyonunu önermektedir. (Gu ve ark., 2020)'de, Çift Derin TÖ'ye (ÇDTÖ) dayalı dört fazlı izole kavşak adaptif trafik sinyali kontrolü önerilmektedir. Sabit faz sıralı kararlı trafik sinyal kontrol kuralı, ikili acente mimarisi kullanılarak elde edilmiştir. (Gong ve ark., 2019)'de, trafik yolu ağı için merkezi olmayan, adaptif çoklu-acenteli Çift Düello Derin TÖ (ÇDDTÖ) algoritması önerilmektedir. Algoritma, uyarmalı trafik sinyal kontrolüyle karşılaştırılmış ve seyahat süresi ile toplam gecikme açısından performans artışını ortaya çıkarmıştır.

Birçok araştırmacı, tek kavşağın trafik sinyali kontrolü için DTÖ algoritmasını uygulamıştır. Çoklu kavşaklar için birçok çalışmada çoklu-acenteli DTÖ algoritmaları önerilmiştir. Çoklu-acenteli TÖ algoritması, çoklu kavşaklardaki trafik sıklıkliğini kontrol

etmek için kullanılmaktadır. Bu algoritmalar iki türe ayrılabilir (Wu ve ark., 2020): Merkezi olmayan ve merkezileştirilmiş çoklu-elemanlı (multi-agent) TÖ'dür. Merkezi olmayan yöntemde içerisinde iki kategoriye ayrılmaktadır. İlk kategori, ağdaki elemanların (trafik sinyal elemanı) yerel trafik sinyalizasyonunu kontrol etmek için yalnızca yerel trafik koşullarını gözlemleyerek bağımsız olarak çalıştığı, tamamen izole edilmiş çoklu-elemanlı TÖ'sidir. Ancak bu yöntemde elemanlar arasındaki iş birliği bulunmamaktadır. İkinci kategori ise, işbirlikli çoklu-elemanlı TÖ yöntemidir. Burada, ardışık kavşaklar arasında bazı bilgiler paylaşılmaktadır. Başka bir deyişle, yerel trafik sinyalleri kontrol etmek için yerel trafik durumu ile komşu kavşakların kısmi durum bilgilerinin kombinasyonu söz konusudur. İkinci tip çoklu-elemanlı TÖ, ağdaki elemanların eylemlerini bir ortak vektör olarak temsil eden merkezi bir yöntemdir. Bu yöntem, tüm acentelerin durumunu tam olarak ele alıyor olsa da, boyutluluk etkisine yol açabilmektedir. Bu sebeple, bu yöntem nadiren kullanılmaktadır.

TÖ algoritmasının yakınsamasını garanti etmek için bir ÇDDTÖ stratejisi kullanılmaktadır. (Pálos ve Huszák, 2020)'da sunulan çalışma, ÇDDTÖ'nin DTÖ üzerindeki başarısını göstermiş ve ÇDDTÖ modelinin öğrenme dinamiklerinin DTÖ'ye kıyasla büyük bir ilerlemeyi temsil ettiği sonucuna varılmıştır. (Fang ve ark., 2019)'de, araç egzozunun ürettiği emisyonları optimize etmek için tek bir kavşak için bir ÇDDTÖ uygulanmıştır. (Huang ve ark., 2018)'deki çalışma, iki düello ağı arasında rastgele geçiş yaparak aynı yapıya ve farklı parametrelere sahip iki farklı düello DTÖ kullanmaktadır. Dolayısıyla, her bir düello ağ, çevrimiçi ağ veya hedef ağ olabilmektedir. Yazarlar, sanal ağda bulunan bir harita ortamı için önerilen yöntemi uygulamışlar. Çoklu-acente tekrarlayan derin deterministik kural gradyanı (multi-agent recurrent deep deterministic policy gradient) algoritması, çoklu kavşak yol ağındaki trafik sıkışıklığını optimize etmek için (Wu ve ark., 2020)'te önerilmiştir. Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) yöntemi, trafik ortamında ortaya çıkan ve kısmen gözlemlenebilen istikrarsızlığı hafifletmek için kullanılmaktadır. Tasarlanan ağın girdisi genel durumlar olarak kabul edilirken, aksiyon girdileri yerel durumlar ve eylemlerdir. Başka bir çalışma, derin tekrarlayan Q-ağına dayalı büyük ölçekli bir yol ağındaki kritik kavşakların optimal kuralını öğrenmek için (Xu ve ark., 2020)'de önerilmiştir. (Ge ve ark., 2019)'da yapılan bir başka çalışmada, acenteler arasında Q-değeri aktarımı ile işbirliğine dayalı derin Q ağına dayalı yöntem önermektedir.

TÖ algoritması aynı zamanda bir ana yol ağına da uygulanmaktadır. Bir ana yol ağında, koordineli kontrolün makul bir varsayımıyla, araç gecikmelerini ve durma

sayısını azaltabilmektedir. Ardışık kavşaklar arasındaki sinyal koordinasyonunu etkileyen ana faktörü göz önünde bulunduran arteriyel trafik sinyal koordinasyon kontrolünün önemli bir parametresi olarak ofset kabul edilir. Araçların akışını optimize etmek için trafik koşulları bilgilerinden yararlanan DTÖ kullanılarak trafik sinyali iyileştirilebilmektedir. (Wei ve ark., 2019a)'te yazarlar, ana yol ağlarındaki trafik akışını optimize etmek için merkezi olmayan bir DTÖ önermektedir. Arteryele uygulanan başka bir çalışma (Chen ve ark., 2019)'te, DTÖ kullanarak trafik sinyali kontrolünün performansını artırmak amacıyla önerilmiştir.

Bu bölümde, trafik sinyal kontrol optimizasyonu alanında araştırmacılar tarafından önemli çabaların gerçekleştirildiği açıktır. Bununla birlikte, mevcut literatürde bir ana yol ağının koordinasyonu alanında elde edilen az sayıda çalışma olduğu ve yapılan çalışmaların çoğu izole bir kavşak veya yol ağı trafiği için olduğu belirtilmiştir. Arteriyel yolda yapılan çalışmaların çoğu ya sabit sinyal planlarına dayalıdır ya da sadece arteriyelin ana yoluna odaklanarak bir kavşakta çakışan trafik akışları adaletli bir şekilde davranmasına dayalıdır. (Diaz ve ark., 2020)'te yapılan çalışma, koordineli faz ofsetlerini ayarlayarak bir ana yol ağının yanı sıra bekleme gecikmesini azaltmayı amaçlayan kural temeli bir TÖ çalışmasıdır. Bununla birlikte, sinyal planları (faz süreleri, döngü uzunluğu ve faz sıralaması), SYNCHRO gibi sabit zamanlı kontrol yöntemlerine göre hesaplanmaktadır. Bu tür yöntemler, trafik taleplerindeki dalgalanmaya yanıt verme yeteneğinden yoksundurlar.

Bu tezde, sadece ana arteriyel yollarını değil, aynı zamanda literatürde mevcut yöntemlerden farklı olarak endişe duyulan yan yolları da dikkate alan kentsel arteriyel yol ağı için hibrid bir KATSK kontrolü önerilmektedir. Bu yöntemin avantajı, şehir merkezlerinde bulunanlar gibi yoğun yan yol trafiğinin ana yollarıyla ilgilenme kabiliyetidir. Arteriyel yol kontrol operasyonunun performansını artırmak için Webster'in optimal döngü formülü, bulanık mantık, geri basınç ve TÖ'yi kullanarak hibrid yöntemler önerilmektedir. Önerilen yöntemlerin ve elde edilen sonuçların ayrıntılı bir şekilde açıklaması bir sonraki bölümlerde verilmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde Webster, bulanık mantık, geri basınç ve TÖ gibi tezde kullanılan yöntemler temel çalışma prensipleri ile ele alınmaktadır. Ayrıca, araştırma hipotezleri ve kullanılan simülatöre genel bir bakış yapılacaktır. Trafik sinyal kontrolü alanında kullanılan terimler son zamanlarda değişmeye maruz kaldığı için, bu araştırmada kullanılan trafik sinyal terminolojisinin, öncelikle açık ve düzenli bir şekilde tanımlanması gerekmektedir.

3.1. Trafik sinyal kontrolünün temel terminolojileri

Bu bölümde, üç kategoriye ayrılan trafik sinyal kontrolü ile ilgili temel kavramlar açıklanmaktadır. Bu bölüm, (Koonce ve Rodegerdts, 2008; El-Tantawy ve Abdulhai, 2012; Wei ve ark., 2019b)'larda tanımlanan terminolojilere dayanmaktadır.

3.1.1. Trafik sinyal kontrol parametrelerine dayalı kullanılan terimler

Trafik sinyal kontrollerindeki kontrol parametreleri, kontrol algoritmaları ile ayarlanabilmektedir. Döngü uzunluğu, split süresi, faz sıralaması ve ofset, trafik sinyal kontrol algoritmalarındaki en yaygın ayarlanabilir parametrelerdir.

- **Döngü uzunluğu**

Döngü süresi olarak da bilinen döngü uzunluğu, sinyalizasyon bir kavşaktaki tüm sinyal faz göstergelerinin döngüyü tamamlaması için geçen toplam süresidir.

- **Split süresi**

Split süresi, yeşil, sarı geçiş ve kırmızı koruma süreleri dahil olmak üzere farklı fazlara ayrılmış döngü uzunluğunun yüzde dağılımıdır.

- **Faz**

Bir faz, faz süresi boyunca geliş yollarına geçiş hakkı vererek, trafiğin bir veya daha fazla eşzamanlı akışına hizmet vermeyi sağlayan, sinyal grupları kümesidir. Başka bir deyişle, yaya veya araç için ışık göstergelerinin değişmeden kaldığı trafik sinyalinin döngü uzunluğunun bir kısmıdır.

- **Yeşil süresi**

Yeşil süre veya yeşil zaman, sinyalin bir veya birden fazla yöndeki çakışmayan akışa geçiş hakkı vermek için her fazda harcadığı yeşil zamandır.

- **Etkin yeşil süresi**

Etkili yeşil süresi veya etkin yeşil zaman, hiçbir kayıp olmadığı ve yeşil sürenin araçlar tarafından etkin bir şekilde kullanıldığı zamandır.

- **Toplam kayıp zamanı**

Toplam kayıp zamanı, araçlar tarafından etkin bir şekilde kullanılmayan herhangi bir akıştaki kavşak için geçen sürelerin toplamıdır. Bu süre, yeşil sinyalin başlangıcında kuyrukta olan araçların hızlanmasından dolayı oluşan start-up kayıp süreleri ile araçların kavşaktan geçerken kullanmadığı sarı süresi ve tüm kırmızı sürelerini içeren zaman dilimi olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır.

- **Sarı süresi**

Sarı süresi, iki amaç için kullanılmaktadır: ilk olarak; sürücülere kırmızı sinyalin yanmak üzere olduğunu bildirmektedir. Kırmızı sinyal, sürücünün kavşakta durmasına veya güvenli bir şekilde geçmesine karar vermesi için kullanılmaktadır. İkinci olarak, kırmızı gösterge ile birlikte sarı gösterge açıldığında, sürücülerin hazırlıklı olmaları ve zaman kaybetmemeleri konusunda uyarmak için kullanılmaktadır.

- **Tüm kırmızı süresi**

Boşaltma süresi olarak da bilinen tüm kırmızı süresi, kavşaktaki tüm fazların aynı anda kırmızı ile gösterildiği çok kısa bir zaman aralığıdır. Bir kavşağa giren aracın, çakışma olmadan kavşaktan çıkmasına izin vermek için kullanılmaktadır. Yani kavşaktaki araçların temizlenmesi için kullanılmaktadır.

- **Faz sıralaması**

Bir faz sıralaması, çakışmayan trafik akışları kümesinin bir kavşağı geçmesine izin vermek için faz değiştirme sıralamasını tanımlamaktadır. Trafik akışları, araçların, yayaların veya araçlar ile yayaların bir kombinasyonu olabilmektedir.

- **Ofsetler**

Bir ofset, ana süreölçer (clock) ile döngü uzunluğu arasındaki bir zaman ilişkisidir (döngü uzunluğunun yüzdesi veya saniye olarak ölçülmektedir). Bu nedenle, sinyalizasyon edilmiş her kavşak, birbirine göre göreceli bir ofsete sahip olmalıdır. Yeşil dalga trafik sinyali oluşturmak amacıyla belirli bir arteriyelde koordinasyonu sağlamak için ofsetler verimli bir şekilde kullanılmaktadır.

3.1.2. Yol yapısı ve trafik hareketine dayalı terimler

Yollar, şeritler ve bağlantılar gibi yol yapısının unsurları, trafik altyapısının temel unsurlarıdır.

- **Yol**

Yol, bir kavşağın ana bileşeni olarak kabul edilen araçlar tarafından kullanılan bir tesistir. Herhangi bir kavşak iki tür yol içermektedir: araçların kavşağa girebilmek için kullandığı giriş yolları ve araçların kavşağı terk edebilmek için kullandığı gidiş yollarıdır.

- **Şerit**

Şerit, herhangi bir yolun en az bir veya birden çok şerit içerdiği bir yolun ana unsurudur. Şerit, giriş ve gidiş şeritleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

- **Bağlantı**

Bağlantı, iki kavşağı birbirine bağlayan bir yoldur.

- **İzole kavşak**

İzole kavşak, diğer komşu kavşakla hiçbir ilişkisi olmayan ve diğer trafik kontrol sinyallerinden bağımsız olarak çalışan bir kavşaktır.

- **Arteriyel**

Anayol olarak da bilinen arteriyel, ana yönde en yoğun trafik akışına ve yan yönde nispeten daha az yoğun trafik akışına sahip bir yoldur. Ana yöndeki trafik akışını güvenli ve etkin bir şekilde düzeltmeyi hedeflemektedir.

- **Yol ağı**

Yol ağı, şebeke şeklinde ikiden fazla bağlantılı kavşağı içeren bir kentsel alan trafik ağıdır. Yol ağında ana yöndeki trafik akışı, yan yöndeki ile aynı olabilmektedir.

- **Takım araçları (Platoon)**

Takım araçları, araçların grup halinde hareket etmesi olarak tanımlanmaktadır.

- **Doygunluk akışı**

Doygunluk akışı, birim zamanda (bir saat, 15 dakika, vb.) kuyruklanma olan bir kavşaktan geçebilen maksimum araç sayısıdır.

- **Kavşak kapasitesi**

Kavşak kapasitesi, belirli bir zaman birimi içinde bir kavşaktan geçebilen maksimum araç sayısıdır.

- **Yoğunluk**

Yoğunluk, herhangi zamanda belirli bir yol uzunluğunda bulunan araçların sayısıdır.

- **Yeşil dalga**

Yeşil dalga, araçların her kavşakta yeşil sinyalleri yakalaması için zaman-mesafe diyagramının sınırları içinde kalan alandır.

- **Bant genişliği**

Bant genişliği, araçların ana yol ağı içinde belirli bir hızla seyahat etmelerini sağlayan yeşil süre miktarı olarak tanımlanmaktadır.

3.1.3. Etkililik Ölçütlerine (Measures of Effectiveness) dayalı terimler

Performans ölçümü, trafik sinyali optimizasyon sürecinin önemli bir parçasıdır. Optimizasyon algoritmasının günün farklı saatlerinde ve farklı trafik akışlarında nasıl çalıştığını değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Bir veya daha fazla trafik etkinlik ölçütlerin hesaplanmasının amacı, optimizasyon algoritmasının trafiğe uygulama hedeflerinin başarısını ölçmektir. Bu bölümde, mevcut ve gelecekteki sistemlerin çoğunun trafik işlemleri performansını değerlendirmek için önemli olan bazı temel etkililik ölçütleri belirlenecektir. Bunlar;

- **Seyahat süresi**

Seyahat süresi, ilgili herhangi iki nokta arasındaki bir rotada seyahat ederken harcanan toplam geçen süredir. Aracın hareket modunda olduğu süreden ve aracın durma modunda olduğu süreden oluşmaktadır. Ortalama seyahat süresi, belirli bir bağlantı veya rotada harcanan sürenin ortalamasını temsil etmektedir. Trafik sinyal kontrolü optimizasyonunun ortak amacı, bir yol ağındaki araçların ortalama seyahat süresini en aza indirmektir.

- **Araç hızı**

Araç hızı, aracın birim zamanda yolculuk ettiği mesafe olarak tanımlanmaktadır. Tipik olarak seyahatin kalitesini ve yol ağının performansını kabul edilebilir trafik talebi altında ölçmek için kullanılmaktadır. Genellikle iki tür araç hızı mevcuttur: aracın nokta hızı ve aracın ortalama hızıdır. Aracın nokta hızı, yol üzerindeki belirli bir noktadan geçerken aracın bağımsız hızıdır. Aracın ortalama hızı ise, yol üzerinde belirli bir mesafe ile ayrılmış iki ilgili nokta arasındaki aracın koridor hızıdır.

- **Gecikme süresi**

Gecikme süresi, araçların bir kavşakta kırmızı sinyalde beklemesi sırasında harcadığı veya bir kavşak önünde hızın yavaşlaması nedeniyle oluşan zamandır. Genellikle gecikme saniye cinsinden ölçülmektedir. Araç başına ortalama gecikme saniyesinin yanı sıra kavşaktaki toplam gecikme de bulunabilmektedir.

- **Kuyruk uzunluğu**

Kuyruk uzunluğu, her kavşağın önündeki yollarda bekleyen toplam araç sayısıdır. Kuyruk uzunluğu, trafik sinyal kontrol algoritmalarının kalitesini belirlemek için trafik mühendisliğinde kullanılan önemli bir parametredir. Ayrıca araçların durma sayısı veya gecikmesi ile ilişkilidir ve genellikle bu performans ölçüleriyle birlikte uygulanmaktadır.

- **Durma sayısı**

Bir aracın durma sayısı, bir aracın yol ağındaki yolculuğu sırasında sinyalize bir kavşakta kırmızı ışıktaki durduğu toplam sayıdır.

- **Verimi (Throughput)**

Bir kavşağın verimi, belirli bir süre boyunca kavşağı geçen araçların sayısıdır. Bir yol ağının verimi ise, belirli bir süre boyunca yol ağında yolculuğunu tamamlayan araçların sayısıdır.

3.2. Webster Yöntemi

Sinyalize kavşaklarda araç gecikmesini tahmin etmek için birkaç model geliştirilmiştir. Webster tarafından 1958’de geliştirilen model, sinyalize kavşaklar için temel gecikme modeli haline gelen sabit zamanlı izole kavşak çalışmaları üzerine deney temelli yöntemdir. Webster yönteminde, araç gelişlerin rastgele ve kalkışta araçların arasındaki mesafesi tek tip olduğu varsayılmıştır (Akgungor ve Bullen, 1999; Cheng ve ark., 2003). Bu yöntem, sabit zamanlı trafik sinyal kontrolünün temel bir yöntemi olarak kabul edilmektedir. İzole bir kavşak için döngü uzunluğunu ve faz sürelerini hesaplamak için bu alanda yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.

Webster yönteminde, iki trafik sinyal zamanlama yöntem incelenmektedir. İlk yöntem, Denklem (3.1)’de gösterilen minimum gecikmeyi elde etmek için kullanılan optimal döngü uzunluğu formülüdür. Optimal döngü uzunluğu, belirli bir sürede gelen tüm araçların yaşadığı minimum ortalama kontrol gecikmesini veren döngü uzunluğudur. İkinci yöntem, sinyal faz süreleridir. Webster, hem teorik hem de deneysel olarak, toplam

kavşak gecikmesini en aza indirmek için sabit zamanlı sinyallerinin belirli bir döngü uzunluğu ve eşit doygunluk dereceleri için zamanlama ve kritik fazlara sahip olması gerektiğini kanıtlamıştır.

$$C_o = \frac{1.5 \times L + 5}{1 - \sum_{i=1}^n y_i} \quad (3.1)$$

burada C_o optimal döngü uzunluğunu, L döngü içindeki toplam kavşağın kayıp zamanlarını ve i 'nci yol kritik akışını y_i temsil etmektedir ($i = 1, 2, 3$ ve 4).

Trafik talepleri artması, kavşağın doygunluk derece değerinin artmasına sebep olmaktadır. Bu artış aynı zamanda Webster formülü tabanlı optimal döngü uzunluğunda yüksek değerlerin ortaya çıkmasına sebep olacaktır.

Bu dezavantajı telafi etmek için Webster'in formülünü geliştirmek amacıyla yapılan bazı çalışmalar mevcuttur. Bunlardan biri, Denklem (3.2) 'de gösterilen Zakariya ve Rabia tarafından önerilen formüldür.

$$C_o = \frac{1.978 \times L + 5.109}{1 - 0.9013 \times \sum_{i=1}^n y_i} \quad (3.2)$$

Minimum toplam gecikme durumu, uygun bir döngü uzunluğu ve yeşil süreleri seçilerek elde edilebilmektedir. Belirli bir döngü uzunluğu için, etkin yeşil fazlar, fazların kritik akış oranıyla orantılı olarak hesaplanabilmektedir. Etkin yeşil süreler G_i , faza ait şeritlerin kritik akışına orantılı olarak dağıtılmakta ve Denklem (3.3) kullanılarak belirlenmektedir.

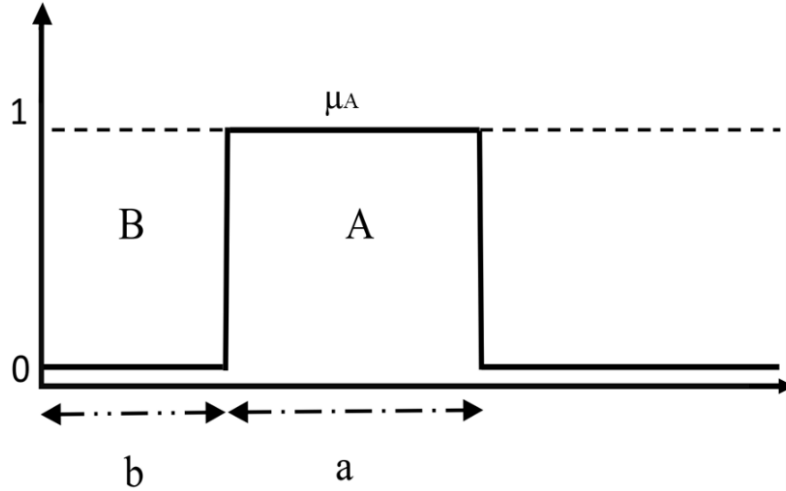
$$G_i = \frac{y_i}{\sum_{i=1}^n y_i} \times (C_o - L) \quad (3.3)$$

Optimal döngü uzunluğu, tüm etkin yeşil sürelerin toplamına kavşağın toplam kayıp süre toplamı eklendiğinde elde edilen değerdir. Bundan dolayı, toplam kayıp süresi optimal döngü uzunluğundan çıkarılmakta, ardından kalan döngü uzunluğu fazları arasında yeşil süre olarak dağıtılabilir.

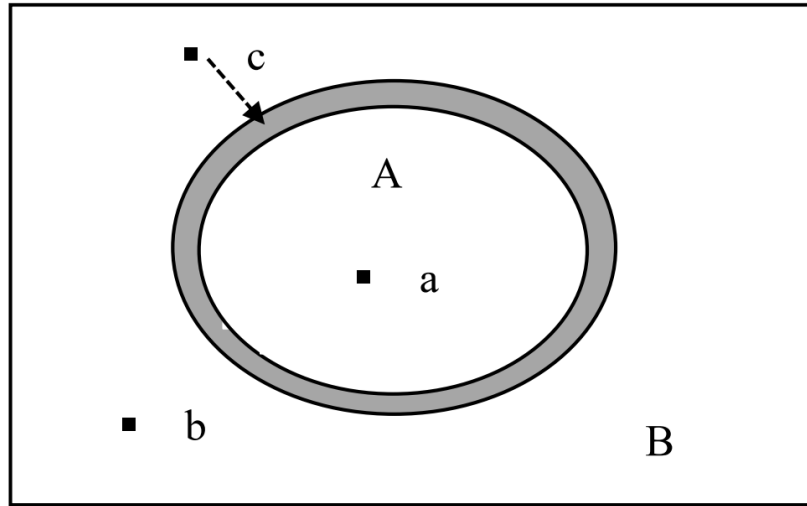
3.3. Bulanık Mantık

Bulanık küme teorisi, unsurlarının değişen derecelerde üyelik fonksiyona sahip olduğu klasik küme teorisinin (net küme teorisi) genelleştirilmiş bir versiyonudur. Diğer bir deyişle, üyelerinin değişik derecelerde üyelik fonksiyonlara sahip olmalarını sağlayan bir settir. Klasik küme teorisinde, herhangi bir eleman Şekil 3.1’te gösterildiği gibi tek bir kümeye ait olmalıdır. Örneğin, a noktasının tek A kümesine ait olduğu ve net bir şekilde B kümesinin bir üyesi olmadığı açıktır. Aynı şekilde, b noktası yalnızca B kümesine ait ve açık bir şekilde A kümesinin bir üyesi değildir. Çünkü iki küme arasındaki sınırlar keskindir. Buna karşılık, bulanık küme belirsiz özellikler ile tanımlanmakta; bu nedenle, sınırları Şekil 3.2’de gösterildiği gibi belirsiz bir şekilde belirtilmiştir. Bu şekil, bulanık kümenin girdi uzayı olan X söylem evrenindeki bulanık bir A kümesinin belirsizlik sınırını göstermektedir. Gölgeyi sınır, A kümesinin sınır bölgesini temsil etmektedir.

A’daki c noktası, A’nın merkez bölgesine yaklaştığında, üyelik fonksiyon değeri 1’e yaklaşmakta, aynı zamanda A’daki c noktasının A’nın merkez bölgesinden sınır bölgesine hareket ettikçe, üyelik fonksiyon değeri 0’a yaklaştığı açıktır. Şekil 3.3, Şekil 3.2’deki aynı durumunun farklı bir bakış açısıyla göstermektedir.

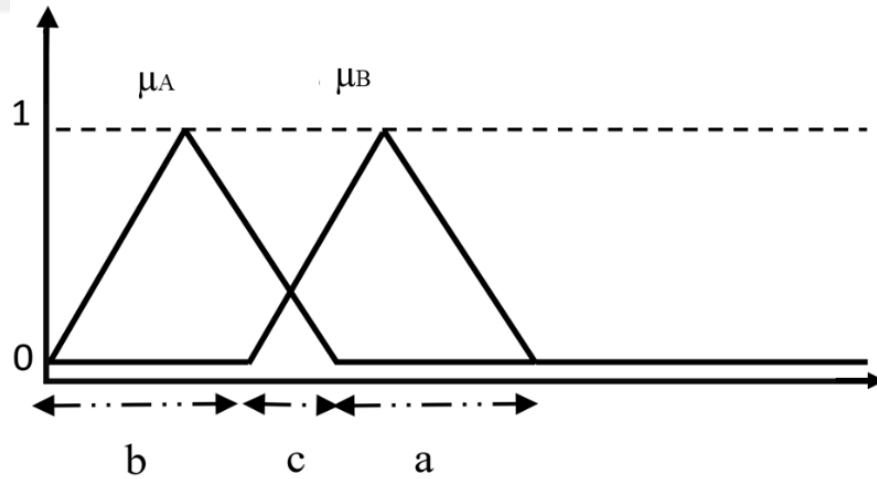


Şekil 3.1 Klasik kümesinin sınırının diyagramı



Şekil 3.2 Söylemin evreni (X) için bulanık bir kümenin belirsiz sınırının diyagramı

Bulanık mantık, bulanık kümeler kavramına dayanmaktadır. İnsanın mantıklı düşünmesini uygulamak için 0 ile 1 arasındaki tüm değer aralığı kullanılmaktadır. Bulanık mantık, klasik mantıkta olduğu gibi kesin olarak bir sonuç çıkarmak yerine yaklaşık mantıklı bulanık küme teorisinden bir çıktı türetme yoludur (Kandel ve Langholz, 1993).



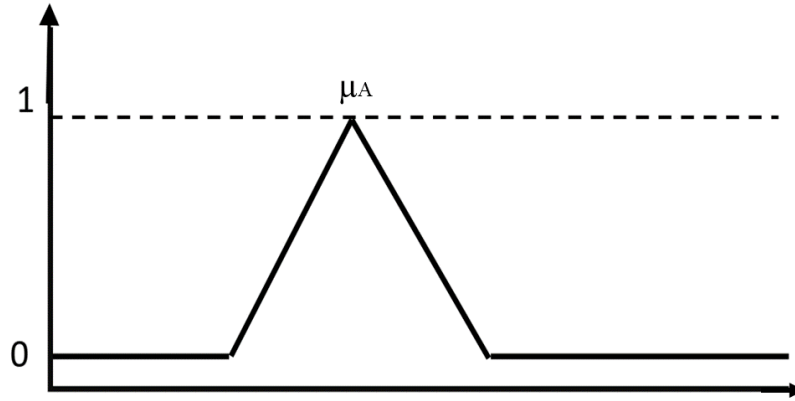
Şekil 3.3 Bulanık bir kümenin belirsiz sınırının üyelik fonksiyonu

Bulanık mantık, geleneksel yöntemlerle çözülmesi zor ve karmaşık olan problemlere, kolay ve kullanışlı çözüm sağladığı için geniş bir uygulama alanı bulmaktadır. Genel olarak, psikoloji gibi tıp alanında, akıllı sistemlerde, robotik ve ulaşım sistemlerinde bulanık mantık uygulanmaktadır (Phuong ve Kreinovich, 2001; Dimitriou ve ark., 2008; Kyriakarakos ve ark., 2012; Yager ve Zadeh, 2012; Collotta ve ark., 2015;

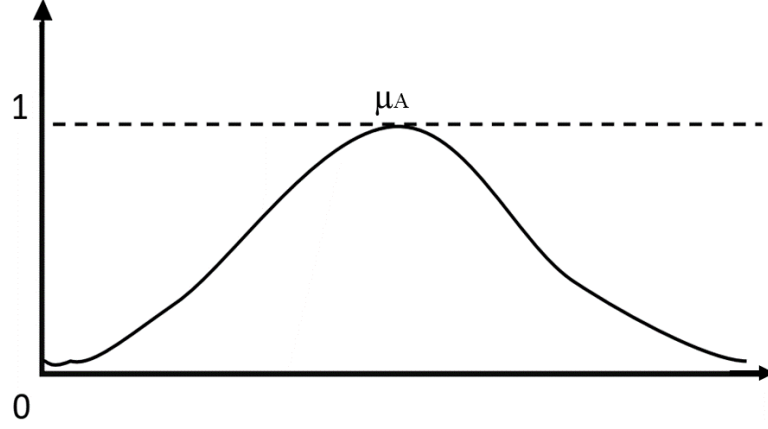
Dursun ve Durdu, 2016). Bulanık mantık ve uygulamaları hakkında daha ayrıntılı bilgi (Yen ve Langari, 1999; Ross, 2004; Hájek, 2013)'de verilmektedir.

Bulanık mantık, elde edilen değerleri dikkate alarak 0-1 arasında sonuçlar çıkarmaktadır ve küçük, büyük, hafif, orta, uzun, normal gibi sözel dil değişkenleri kullanılmaktadır. Bu dil değişkenleri, bulanık üyelik fonksiyon ile temsil edilmektedir. Lotfi Zadeh tarafından önerilen düşünceye göre, üyelik fonksiyonun belirsizliğe karar vermenin anahtarı olduğu öne sürülmüştür (Zadeh ve ark., 1996). Üyelik fonksiyonu $\mu_A(x)$, A giriş alanındaki her x değerinin üyelik derecesi olarak bilinen 0 ile 1 arasındaki bir üyelik değeriyle nasıl eşlendiğini açıklayan bir sınırdır.

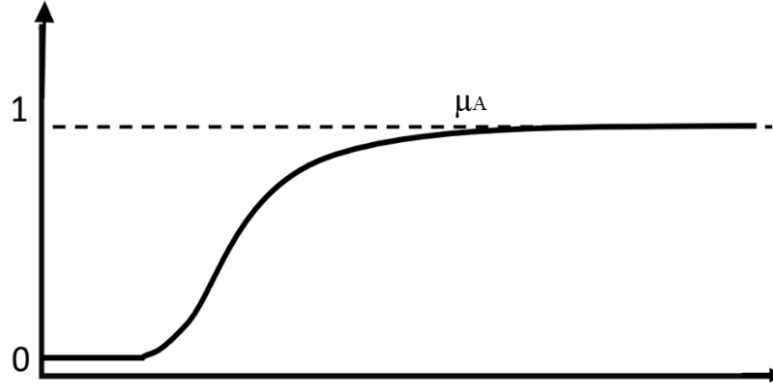
Üyelik fonksiyonu; parçalı doğrusal fonksiyonu, Gauss dağılım fonksiyonu ve sigmoid eğri fonksiyonu gibi birkaç temel fonksiyondan oluşmaktadır. En basit üyelik fonksiyonu, Şekil 3.4'te gösterildiği gibi üçgen üyelik fonksiyonu olarak bilinmektedir ve düz çizgiler kullanılarak oluşturulmaktadır. Basit bir Gauss üyelik fonksiyonu Şekil 3.5'teki gibi düzgünlük sağlayabilmekte, ancak bazı uygulamalarda önemli olan asimetrik üyelik fonksiyonlarını tanımlayamamaktadır. Bundan dolayı, Şekil 3.6'da gösterildiği gibi sigmoid üyelik fonksiyonları asimetrik durumu tanımlamak için kullanılmaktadır.



Şekil 3.4. Üçgen üyelik fonksiyonu



Şekil 3.5. Basit bir Gauss üyeliği fonksiyonu



Şekil 3.6. Sigmoidal üyelik fonksiyonu

Bulanık mantık; kural tabanı, bulanıklaştırma, çıkarım mekanizması ve durulaştırma gibi çeşitli bileşenlere sahiptir.

Kural tabanı; sistemin nasıl yanıt verdiğiyle ilgili bir dizi EĞER - O HALDE kuralıdır. EĞER - O HALDE kural ifadeleri, bulanık mantık içeren koşullu ifadeleri formüle etmek için uygulanmaktadır. Basit bir bulanık EĞER - O HALDE kuralı şu şekilde olmakta: EĞER x A ise, O HALDE y B 'dir, burada A ve B bulanık üyelik ile tanımlanan dilsel değerlerdir, x ve y dilsel değişkenleridir. Kuralın EĞER ifadesi (x A ise) öncül (antecedent) olarak adlandırılırken, kuralın O HALDE ifadesi (y B 'dir) sonuç (consequent) olarak adlandırılmaktadır.

Bulanıklaştırma; sayısal girdileri, çıkarım mekanizması tarafından kullanılabilen bulanık değerlere (bulanık kümeler ve üyelik fonksiyonu) dönüştürme işlemidir.

Çıkarım mekanizması, mevcut durumda hangi kuralların uygulanacağına karar vermek için girdiler olarak bulanıklaştırma aşamasının çıkışını kullanmakta ve bulanık çıkışının ne olması gerektiği hakkında sonuçlar vermektedir.

Durulama; çıkarım mekanizması tarafından elde edilen bulanık çıktıyı uygun bir sayısal değere dönüştürmektedir. Bulanıklaştırma, çıkarım mekanizması ve durulaştırma kombinasyonu, bulanık çıkarım sistemi olarak bilinmektedir.

Bulanık mantık sisteminde uygulanabilen iki tür bulanık çıkarım sistemi mevcuttur: Mamdani-bulanık çıkarım sistemi ve Sugeno-bulanık çıkarım sistemi. Bu iki tür çıkarım sistemi, çıktı belirleme biçiminde biraz farklılık göstermektedir.

Bulanık mantık şu şekilde özetlenebilir;

- Bulanık mantıkta, belirli değerler yerine yaklaşık değerler kullanılmaktadır.
- Bulanık mantık için bilgi, çok küçük, küçük, çok az, az, büyük gibi dilsel ifadelerle tanımlanmaktadır.
- Bulanık mantıkta, tüm değerler $[0-1]$ aralığında bir üyelik fonksiyonu ile temsil edilmektedir.
- Tüm mantıksal ifadeler bulanık ifadelere dönüştürülebilmektedir.
- Bulanık mantık, matematiksel modeli çok karmaşık ve zor olan sistemler için uygun bir yöntemdir.

3.4. Geri Basınç Algoritması

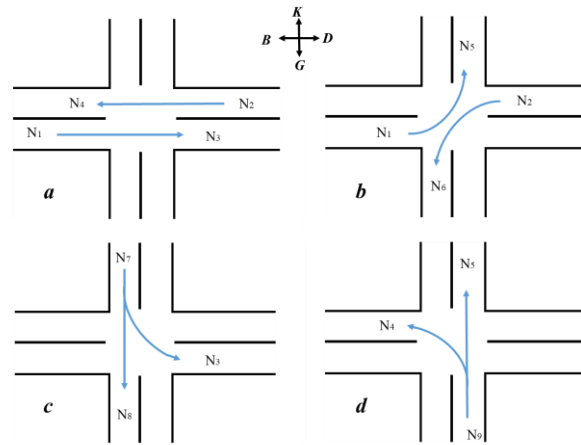
Geri basınç algoritması, ağ verimini en üst düzeye çıkarmak için orijinal olarak kablosuz iletişim ağına uygulanmıştır (Tassiulas ve Ephremides, 1990). Geri basınçla ilgili temel fikir, yerel kavşaktaki trafik kontrolünü belirlerken sonraki kavşağın üzerindeki basınçla değerlendirmektir. Bu bölümde, Varaiya'nın makalesinde (Varaiya, 2013) önerilen geri basınç algoritması, önerdiğimiz yöntemle karşılaştırmak amacıyla tartışılmaktadır. Yaygın olarak geri basınç algoritmasında, yol ağı, yönlendirilmiş bir grafik $G = (N, J)$ tarafından standart bir kuyruklu ağ olarak modellenmekte, burada $N = [N_1, N_2, N_3 \dots N_n]$, kuyruğa giren araçların bulunduğu yolları temsil eden bir düğüm kümesidir ve $J = [j_1, j_2, j_3 \dots j_m]$, ağdaki kavşakları temsil eden bir kavşak kümesidir.

Kavşak j_i 'de, N 'deki sıralı çifti bir eleman ile bire bir bağlantıda araçların düğümünden düğüme transferini sağlayan bağlantıların olduğu varsayılmaktadır. Sinyalize kavşak, kavşağın çakışan akışlarını yönetmek için yerel bir denetleyici olarak

modellenmiştir. Her kavşak j_i için, sırasıyla giriş ve çıkış düğümler kümesini gösteren $I(j_i)$ ve $O(j_i)$ mevcuttur. N_a girişinden N_b çıkış düğümlerine bağlantı sağlayan en az bir j_i bağlantısı olması gerekmektedir.

Her yerel denetleyici, her giriş /çıkış düğümü için içsel bir kuyruk ile ilgilenmekte ve denetleyici görevini yerine getirmek için, araçların kavşak girişinden çıkışına aktarılmasını sağlamaktadır. Her bir kavşak, tek bir fazda aynı anda farklı $I(j_i)$ kombinasyonlarına hizmet edebilmektedir. $P = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_k]$ bir j_i kavşağın tüm olası fazların kümesini temsil etmektedir. Ayrıca, bir kavşak içinde mümkün olan her hareketle (N_a, N_b) , araçların kavşaktan geçebileceği bir $X_{ab}(t)$ oranı olduğunu varsayılmaktadır. $X_{ab}(t)$, p_k fazı etkinleştirilirse, N_a düğümünden N_b 'ye hareket edebilen araçların sayısına eşittir; burada $p_k \in P$. $X_{ab}(t)$ ve R_{bc} 'nin simüle edilen trafik akışına göre bilindiği ve sabit olduğu varsayılmaktadır. Şekil 3.7, incelenen ana yol ağındaki dört yollu kavşakta kullanılan faz konfigürasyonunu göstermektedir.

Trafik ağlarında kavşağa iki tür araç gelişi mevcuttur. Araçlar her kavşağa ağın dışından ve/veya içinden gelebilmektedir. Bir araç, ağa terminal düğümlerinden dışsal olarak girer, daha sonra ağ içinde bir veya birden fazla yol boyunca içsel olarak seyahat edebilir ve ağı belirli bir yolda terk edebilir. Araç, kavşaktan sonraki kavşağa içsel olarak hareket etmektedir. Bu nedenle, kavşaktaki her araç için, ilişkili bir giriş ve çıkış düğüm çifti olması gerekmektedir. Araçların yönlendirilmesinden dolayı, N_a düğümünde birkaç kuyruk mevcut ve $Q_{ab}(t)$, N_a düğümündeki t zaman aralığında N_b düğümüne çıkmayı bekleyen araçların sayısını belirtmektedir. N_b 'deki kuyruk uzunluğu $\sum_b Q_{bc}(t)$ değerine eşittir.



Şekil 3.7. Geri basınç yönteminin faz konfigürasyonu (a) doğudan batıya ve batıdan doğuya doğru giden akışları, (b) doğudan güneye ve batıdan kuzeye sola dönüş akışları, (c) kuzeyden güneye doğru ve kuzeyden doğuya sola dönüş akışları, (d) güneyden kuzeye doğru ve güneyden batıya sola dönüş akışları.

Orijinal geri basınçta, N_a 'daki kuyrukta beklenen tüm araçlar p fazının basıncını oluşturmaktadır. (Varaiya, 2013)'de önerilen çalışmada, p fazının basıncı yalnızca N_b 'ye geçmeyi bekleyen N_a kuyruğunda olan araçlar tarafından üretilmektedir. Ayrıca, sonraki kavşaktaki N_b 'de bekleyen araçların ortalamasının kabul edilmesi açısından orijinal geri basınçtan farklıdır.

Kuyruk uzunluğu Q_{ab} , $N_a \in I(j_i)$ giriş düğümünde duran ve $N_b \in O(j_i)$ düğümüne hareket etmeyi bekleyen araç sayısı olarak hesaplamaktadır. Düğümdeki ortalama kuyruk uzunluğu, $\sum_{c \in C} R_{bc} \times Q_{bc}(t)$, olarak hesaplamaktadır, burada R_{bc} , N_b 'den ayrılan ve N_c 'ye giden aracın sayısının oranını temsil etmektedir.

Standart kuyruklanma ağ kontrolündeki gibi, zamanı aralıklara dilimlenmekte ve her zaman aralığının t başlangıcında kontrol kararı belirlenmektedir. Burada zaman aralığı t, döngü uzunluğu C'ye eşittir.

Her faz için her j_i kavşaktaki ağırlık $p_k \in P$ Denklem (3.4)'te olduğu gibi hesaplamaktadır. Bu ağırlık, N_a giriş düğümündeki kuyruk uzunluğu Q_{ab} ile çıkış düğümündeki N_b ortalama kuyruk uzunluğu $\sum_{c \in C} R_{bc} \times Q_{bc}(t)$ arasındaki farktır.

$$W_{ab}(t) = \frac{Q_{ab}(t)}{x_a} - \frac{\sum_{c \in C} R_{bc} \times Q_{bc}(t)}{x_b} \quad (3.4)$$

burada x_a ve x_b , sırasıyla N_a ve N_b düğümlerinin kapasitesidir.

$$Pr(p_k) = \sum_{a,b} W_{ab}(t) \times X_{ab}(p_k) \quad (3.5)$$

$X_{ab}(t)$ oranıyla ağırlıklandırılan kavşağın her bir yolundan geçen ağırlıkların toplamına eşittir. N_a ve N_b , p_k 'ye aitse, $X_{ab}(t)$ bir doygunluk oranı, aksi takdirde sıfır olarak kabul edilmektedir.

Döngüsel olmayan bir geri basınç algoritmasında, her faz $p_k \in P$ için, p_k akışlara ait toplam basınç Denklem (3.5) ile hesaplamaktadır. Her kavşak j_i 'de seçilen faz p_k^* , bu ağırlıklı toplamı maksimize eden ve Denklem (3.6)'da belirlenen p_k fazıdır.

$$p_k^* = \operatorname{argmax}(Pr(p_k)) \quad (3.6)$$

Seçilen faz bir sonraki t zaman aralığında yürütülmektedir. Döngüsel bir geri basınç algoritması için Denklem (3.5), Denklem (3.7)'deki gibi basıncın negatif değerini ortadan kaldırmak amacıyla biraz değiştirilmektedir.

$$Pr(p_k) = \max(0, \sum_{a,b} W_{ab}(t) \times X_{ab}(p_k)). \quad (3.7)$$

Optimizasyon ufku, aralıklara veya C sürelerinin döngülerine bölünmüştür. Her döngü içinde, kalan etkin yeşil uzunluğu $C_e(n)$, C_0 'dan toplam kayıp süresi çıkararak elde edilmektedir. Ekstra yeşil süreleri, Denklemler (3.8) ve (3.9)'da olduğu gibi her fazın basıncıyla orantılı olarak hesaplanan minimum yeşil zamana eklenmektedir.

$$F_{p_k} = \frac{P(p_k)}{\sum_{s \in p} P(p_s)}, \quad (3.8)$$

$$g_{p_k} = F_{p_k} \times C_e(n) \quad (3.9)$$

burada, F_{p_k} , p_k fazının bölüntüdür.

Faz p_k 'nin toplam yeşil süreleri Denklem (3.10)'da olduğu gibi hesaplamaktadır.

$$G_{p_k} = g_{p_k} + G_m \quad (3.10)$$

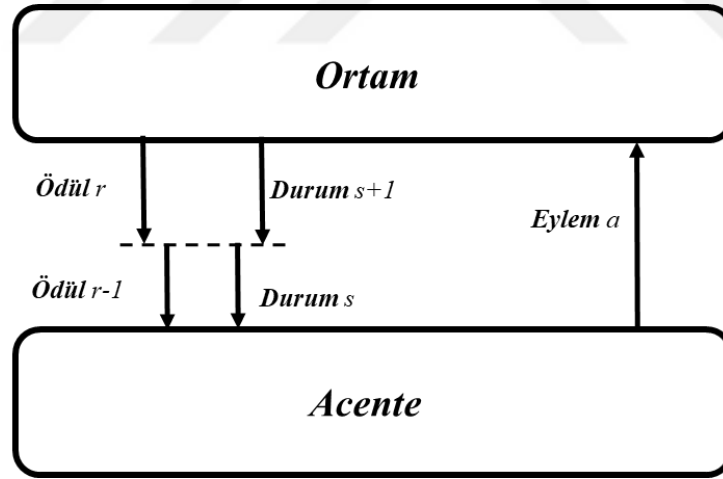
G_{p_k} , sonraki döngüde yürütülen p_k fazının etkin yeşil süresidir, k , kavşaktaki fazların sayısını temsil etmektedir.

3.5. Takviyeli Öğrenme

Takviyeli öğrenme, kontrol problemleri belirleyen bir makine öğrenme alanıdır. Trafik kontrolünde, denetleyicilerin, stokastik trafik ortamının önceden tanımlanmış bir modeline ve insan müdahalesine ihtiyaç duymadan çeşitli trafik koşullarını öğrenmesine ve esnek bir şekilde tepki vermesine olarak tanımlanmaktadır (Ozan ve ark., 2015; Mannion ve ark., 2016; McCluskey ve ark., 2016). TÖ, etiketli verilerden özetlemek veya tahmin vermek yerine, ortam ile etkileşim halindeyken örneklerin toplanması açısından diğer denetimli ve denetimsiz makine öğrenmelerinden farklıdır. TÖ, genellikle bir Markov

Karar Proses (MKP) olarak formüle edilen çoklu-adımlı bir karar verme proses aracılığıyla güvenilir bir kontrol stratejisi ile öğrenebilmektedir. Bu strateji, bir kural belirler ve zamanla bu kurallara bağlı olarak elde edilen ödülleri en üst düzeye çıkarmak için durumları eylemlerle eşleştirir.

MKP esas olarak beş unsur $[S, A, P, R, \gamma]$ içerdiği bilinmekte, S ve A sırasıyla durumlar ve eylemler uzayı, P olasılık geçiş fonksiyonu, R ödül fonksiyonu olarak bilinmekte ve $\gamma [0, 1]$ değer aralığında azaltma (discount) faktörüdür. TÖ yönteminde, bir acente ortamı gözlem ve t anında ortamın bir $s_t \in S$ durumunu algılamaktadır. Bundan sonra acente, $a_t \in A$ bir eylem seçmekte ve ortam $s_{t+1} \in S$ durumuna geçişine yol açmaktadır. Daha sonra acente, bir performans ölçüsü ile ilgili olarak acenteye ne kadar iyi olduğunu bildiren bir $r_{t+1} \in R$ ödülüne ulaşmaktadır. Acentenin, π kurala (policy) göre alınan eylemlerin bir sonucu olarak elde edilen birikmiş beklenen ödülü en üst düzeye çıkaran π kural (policy) öğrenmesini amaçlanmıştır. Burada uygulanan kural (policy), izlediği kritere bağlı olarak iyi veya kötü olabilmektedir. Belirli bir kriter altında en iyi kontrol performansını elde etmek için bir kuralın (policy) nasıl optimize edileceği, TÖ'deki temel sorundur. TÖ acentenin ortam ile etkileşimi Şekil 3.8'de gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Takviyeli öğrenmenin acente-ortam etkileşimi

En basit TÖ algoritması, Q-öğrenmedir. Q-öğrenme, durum uzayı ve eylem uzayı oldukça küçük olduğunda verimli bir şekilde optimal bir kural (policy) elde edebilmektedir. Ancak, pratikte karmaşık sistem modellerinde bulunan uzaylar genellikle büyüktür. Sonuç olarak, Q-öğrenme optimal kuralı bulamayabilmektedir. Q-öğrenmedeki Q değeri Denklem (3.11)'de olduğu gibi tanımlanmaktadır.

$$Q(s_t, a_t) = (1 - \alpha)Q(s_t, a_t) + \alpha (r_{t+1} + \gamma \max_a Q(s_{t+1}, a_t) - Q(s_t, a_t)) \quad (3.11)$$

burada α ve γ sırasıyla öğrenme oranı ve azaltma faktörüdür.

3.5.1 Derin Öğrenme

Derin öğrenme, literatürde farklı farklı tanımlanmaktadır. Hiyerarşik konsept açısından bilgisayarların deneyimlerden öğrenmesini ve ortamı anlamasını sağlayan bir makine öğrenimi yöntemi olarak tarif edilmektedir (Gu ve ark., 2016). Başka bir kaynakta; kontrollü veya kontrolsüz özellik çıkarma, dönüştürme, desen analizi ve sınıflandırma için birçok doğrusal olmayan gizli katmanı kullanan makine öğrenme tekniklerinin bir sınıfı olarak tanımlamıştır (Deng ve Yu, 2014). (Najafabadi ve ark., 2015)'de derin öğrenme, denetimsiz öğrenme yoluyla büyük miktarda veri kullanan bir makine öğrenmesi tekniği olarak anlatılmıştır.

Derin öğrenme, karmaşık problemler için insan beyninin gözleme, analiz etme, öğrenme ve karar verme gibi yeteneklerini taklit eden, denetimli veya denetimsiz olabilen, büyük miktarda veriyi kullanarak özellik çıkarma, dönüştürme ve sınıflandırma gibi işlemleri gerçekleştirebilen bir makine öğrenme tekniğidir. Endüstri, tıp, robotik, bilgisayarla görme, nesne algılama, konuşma işleme-tanıma, çeviri, gelecek tahmini, finans gibi farklı alanındaki problemleri çözmek ve akıllı çözümler üretmek için derin öğrenme yaklaşımları geliştirilmiştir.

3.5.2 Derin Takviyeli Öğrenme

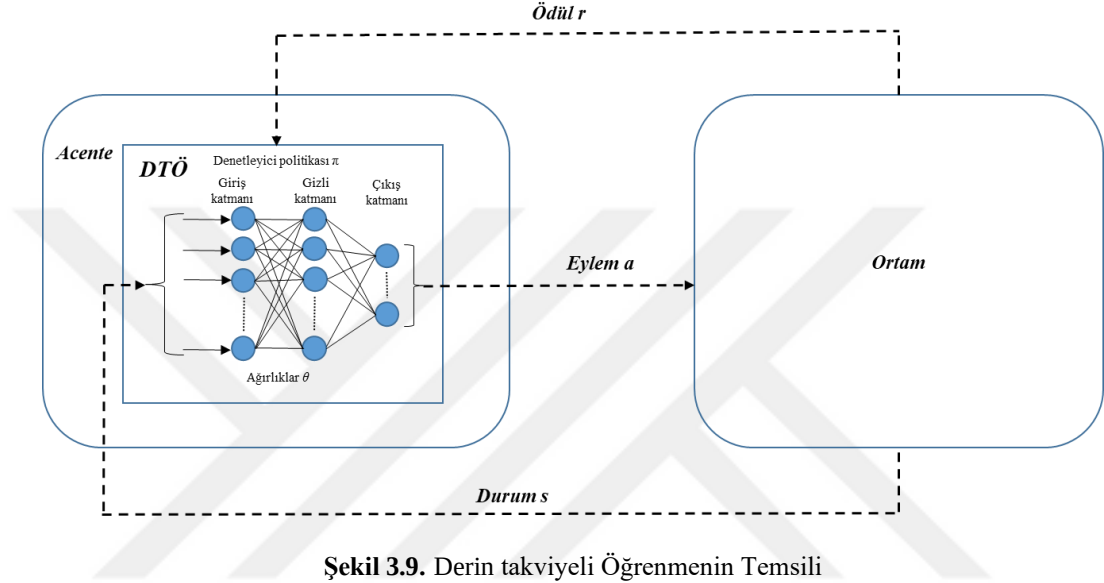
Derin Q-ağı (DQA) olarak bilinen DTÖ algoritması, tablo tabanlı Q-öğrenmenin sınırlandırmalarının üstesinden gelmek için yaygın olarak kullanılmıştır (Luong ve ark., 2019). DTÖ, iki yapay zekâ yaklaşımının (Derin sinir ağı ve Q-öğrenme) kombinasyonu olarak ortaya koyulmuştur (Rasheed ve ark., 2020). Belirli bir durum (s), ödül (r) ve $Q(s,a;\theta)$ çıktıları ile eylem değerleri vektörünün üretildiği çok katmanlı bir sinir ağına dayalı bir yöntemdir (Huang ve ark., 2018).

DTÖ çalışma prensibi Şekil 3.9'da gösterilmektedir. DTÖ algoritması, yaklaşık bir Q-değeri elde etmek için Q tablosu yerine bir derin ağ uygulamaktadır. Q değeri, Denklem 3.12'de tanımlanmaktadır. DTÖ, Q değerlerinde aşırı tahminle sonuçlanan bir

eylemi hem seçmek hem de değerlendirmek için aynı ağı kullanmaktadır. Algoritma 3.1, DTÖ 'nin nasıl uygulanacağını açıklamaktadır.

$$Q(s_t, a_t) = r_{t+1} + \gamma \cdot \max_a Q(s_{t+1}, a_t; \theta) \quad (3.12)$$

burada γ bir öğrenme faktörü ve θ yapay sınır ağının parametre vektörüdür.



Şekil 3.9. Derin takviyeli Öğrenmenin Temsili

Algoritma 3.1: Deneyim Tekrar Belleği ve ϵ -greedy kuralı ile DTÖ Algoritması.

- 1: Deneyim Tekrar Belleği DB'yi başlatın.
 - 2: Q-ağını rastgele ağırlıklarla θ başlatın.
 - 3: **for** bölüm=1 to T **do**
 - 4: Ortamı ve mevcut durumu s_t başlatın.
 - 5: **for** m =1 to M **do**
 - 6: ϵ olasılığıyla, rastgele bir eylem seçin, aksi takdirde $a_t = Q(s_t, a_t, \theta)$ değerini seçin.
 - 7: Ortamda eylemi gerçekleştirin ve ödül r_t 'yi ve sonraki durumu s_{t+1} 'i gözlemleyin.
 - 8: DB hafızasında geçişi olarak (s_t, a_t, r_t, s_{t+1}) saklayın.
 - 9: DB boyutu önceden tanımlanmış kapasiteden daha büyükse en eski örnekleri silin.
 - 10: **end for**
 - 11: DB hafızasından rasgele mini-batch geçişleri (s_t, a_t, r_t, s_{t+1}) örnekleyin.
 - 12: **for** epochs i =1 to k **do**
-

```

13:           $y_i = r_{t+1} + \gamma \cdot \max_a Q(s_{t+1}, a_i; \theta)$ 
14:           $\theta$  Ağ parametrelerine göre ( $y_j - Q(s_j, a_j; \theta)$ ) 2 üzerinde bir gradient descent gradyan
      iniş adımı gerçekleştirin.
15:          end for
16: end for

```

3.5.3 Düello DTÖ

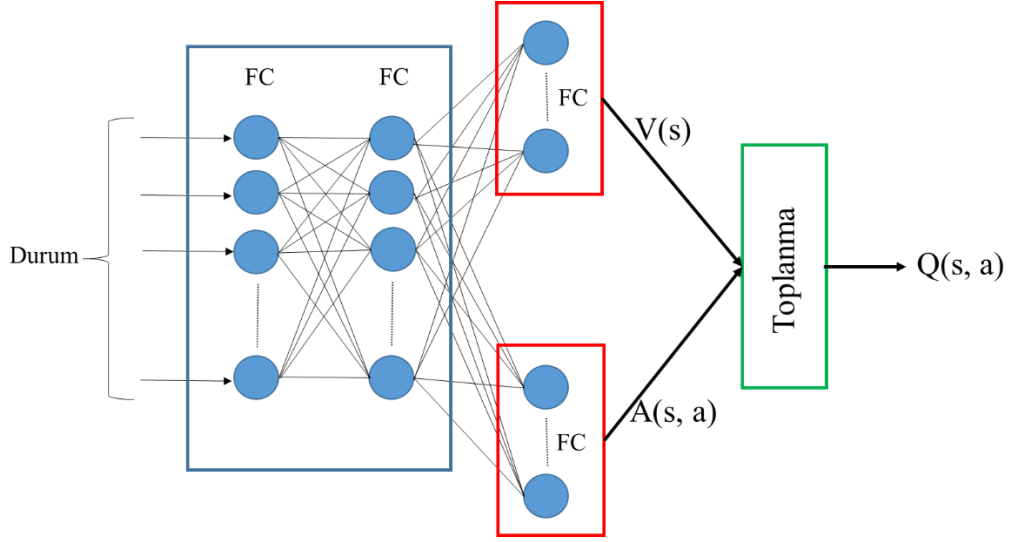
Düello DTÖ (DDTÖ)'de, Q değeri, mevcut durumdaki değer ve diğer eylemlere kıyasla her eylemin avantajı ile tahmin edilmektedir. $V(s; \theta)$ durumunun değeri, gelecekteki adımlarda olasılıklı eylemler gerçekleştirerek beklenen genel ödülleri temsil etmektedir. Avantaj, $A(s, a; \theta)$ olarak tanımlanan her eyleme karşılık gelmektedir. Q değeri, aşağıdaki Denklem (3.13) ile hesaplanan, V değeri ve A avantaj fonksiyonunun toplamıdır.

$$Q(s, a; \theta, \omega, \sigma) = V(s; \theta, \sigma) + (A(s, a; \theta, \omega) - \frac{1}{|A|} \sum_{a'} A(s, a'; \theta, \omega)) \quad (3.13)$$

burada A, avantaj değerini ifade etmektedir. θ , hem değer hem de avantaj ağı için tamamen bağlı ortak bir ağı parametre vektörünü temsil etmektedir. $\square$, avantaj ağının ve σ değerinin durum-değer fonksiyondaki parametre vektörünü temsil etmektedir.

$A(s, a; \theta)$ tüm eylemler arasında durum-değer fonksiyonu için eylemin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Bir eylemin A değeri pozitifse, eylemin tüm olası eylemlerin ortalama performansına kıyasla sayısal ödüllerde daha iyi bir performans gösterdiği anlamına gelmektedir; aksi takdirde, eylem değeri negatifse, eylemin olası ödülünün ortalamadan düşük olduğu ifade etmektedir.

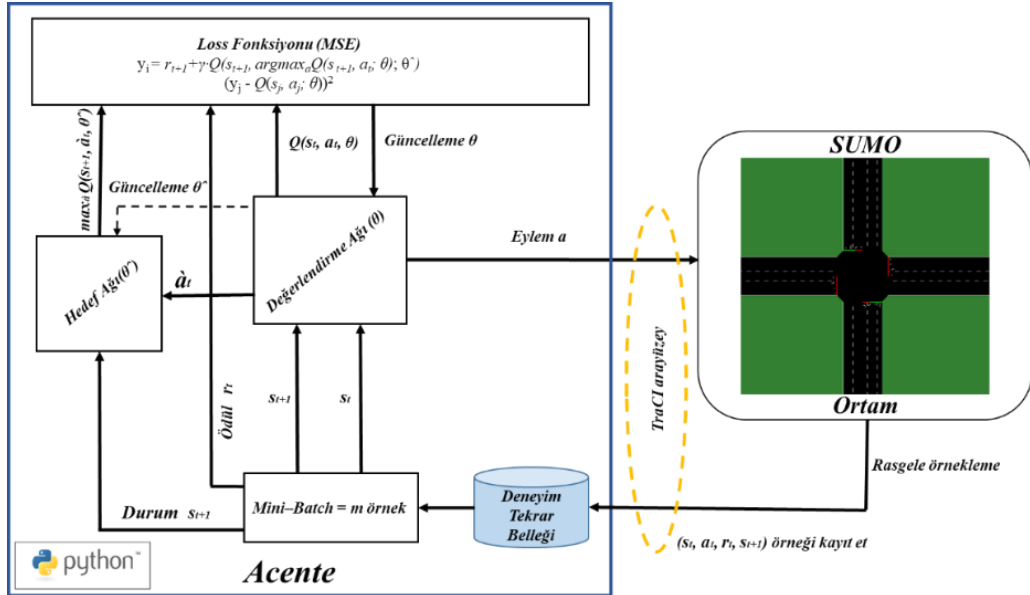
Tüm avantaj değerlerinin ortalamalarından çıkarılmasının (subtraction), avantaj değerini doğrudan kullanmaya kıyasla optimizasyonun kararlılığını artırabildiği gösterilmiştir. TÖ'deki performansı etkin bir şekilde arttıran Düello mimarisi, Şekil 3.10'da gösterilmektedir. DTÖ, Algoritma 3.1'i uygulayarak ve Denklem (3.12), Denklem (3.13) ile değiştirilerek kullanılabilir.



Şekil 3.10. Düello DTÖ ağının temsili

3.5.4 Çift Derin Takviyeli Öğrenme

ÇDTÖ algoritmaları, değerlendirme DTÖ'sine dayalı olarak eylemi seçerken hedef DTÖ'den bu eyleme karşılık gelen durum değerlerini kullanmayı amaçlamaktadır. ÇDTÖ, Q-değerlerinin aşırı tahmin edilmesini azaltmanın yanı sıra öğrenmenin istikrarını ve eğitim süreçlerinin hızını artırmayı hedeflemektedir (Van Hasselt ve ark., 2016).



Şekil 3.11. Çift Derin Takviyeli Öğrenme'in Temsili

DTÖ, bir fonksiyon tahmincisi olarak derin bir sinir ağını kullanmaktadır (Mnih ve ark., 2015). ÇDTÖ yöntemin çalışma prensibini Şekil 3.11'de gösterilmektedir.

ÇDTÖ, şekilde de gösterildiği gibi değerlendirme ve hedef ağlar olarak adlandırılan iki DTÖ içermektedir.

ÇDTÖ için Q değeri, Denklem (3.14)'te olduğu gibi hesaplanmaktadır. Algoritma 3.2, ÇDTÖ'nün nasıl uygulanabileceğini açıklamaktadır.

$$Q(s_t, a_t) = r_{t+1} + \gamma \cdot Q(s_{t+1}, \operatorname{argmax}_a Q(s_{t+1}, a_t; \theta); \theta^*) \quad (3.14)$$

Algoritma 3.2: Deneyim Tekrar Belleği ve ϵ -greedy kuralı ile ÇDTÖ Algoritması.

```

1: Deneyim Tekrar Belleği DB'yi başlatın.
2: Değerlendirme düello Q-ağını rastgele ağırlıklarla  $\theta$  başlatın.
3: Hedef düello Q-ağını rastgele ağırlıklarla  $\theta$  başlatın.
4: for episode=1 to T do
5:   Ortamı ve mevcut durumu  $s_t$  başlatın.
6:   for m =1 to M do
7:      $\epsilon$  olasılığıyla, rastgele bir eylem seçin, aksi takdirde  $a_t = Q(s_t, a_t, \theta)$  değerini seçin.
8:     Ortamda eylemi gerçekleştirin ve ödül  $r_t$ 'yi ve sonraki durumu  $s_{t+1}$ 'i gözlemleyin
9:     DB hafızasında geçişi olarak  $(s_t, a_t, r_t, s_{t+1})$  saklayın.
10:    DB boyutu önceden tanımlanmış kapasiteden daha büyükse en eski örnekleri silin.
11:  end for
12:  DB hafızasından rasgele mini-batch geçişleri  $(s_t, a_t, r_t, s_{t+1})$  örnekleyin
13:  for epochs i =1 to k do
14:     $y_i = r_{t+1} + \gamma \cdot Q(s_{t+1}, \operatorname{argmax}_a Q(s_{t+1}, a_t; \theta); \theta^*)$ 
15:     $\theta$  Ağ parametrelerine göre  $(y_j - Q(s_j, a_j; \theta))$  2 üzerinde bir gradient descent
    gradyan iniş adımı gerçekleştirin.
16:    if hedef ağ güncellemesi varsa?
17:       $\theta^* = \beta \theta^* + (1 - \beta) \theta$ 
18:    end if
19:  end for
20: end for

```

Hedef ağ parametreleri θ^* , Denklem (3.15)'de olduğu gibi güncellenmektedir.

$$\theta^* = \beta \cdot \theta^* + (1 - \beta) \cdot \theta \quad (3.15)$$

burada β , değerlendirme ağıının en son parametrelerinin hedef ağdaki parametreleri nasıl etkilediğini gösteren hedef güncelleme oranıdır. Hedef ağ, aşırı tahmin sorununu hafifletmeye yardımcı olabilmektedir.

3.5.5 Çift Düello Derin Takviyeli Öğrenme

Geleneksel DTÖ algoritmasında, takviyeli öğrenme probleminde eylem durumu değerinin aşırı tahmin edilmesi istenilmemektedir (Huang ve ark., 2018). Öğrenme aşamasında eylem durumu değerlerinin aşırı tahminlerini azaltmak için, ÇDTÖ ve Düello DTÖ ağı algoritmasının bir kombinasyonu bu çalışmada önerilmektedir. Aynı yapıya sahip iki düello ağı, değerlendirme ve hedef ağ olarak kullanılmaktadır. Bu tezde, ÇDDTÖ mimarisi (Liang ve ark., 2019; Liu ve ark., 2020), ana yol kavşakları için trafik sinyallerinin verimliliğini artırmak amacıyla kullanılmıştır.

Bu yöntemde, Webster yöntemi ile TÖ birleştirilmektedir. Böylece Webster'in optimal döngü formülünü kullanarak optimal döngü ve etkin yeşil süreleri hesaplanmaktadır. Adaptif Moment (Adam) Optimizasyon algoritmaları, derin sinir ağlarının parametrelerini güncellemek için kullanılmaktadır. Adam, AdaGrad ve RMSProp iki popüler yöntemin avantajlarını birleştirilmektedir (Kingma ve Ba, 2014). Adam, etkili ve hızlı bir şekilde iyi sonuçlar elde etme yeteneklerinden dolayı derin öğrenme alanında popüleritesini artırmaktadır. DTÖ ağı ile DDTÖ ağı değiştirerek Şekil 3.11'deki yapı ve Algoritma 3.2 kullanılarak ÇDDTÖ mimarisi uygulanır.

3.6 Simülatöre Genel Bakış

Günümüzde çeşitli trafik simülatörü yazılımları mevcuttur. Bu yazılımlardan bazıları ticari amaçlıdır, bazıları ise açık kaynaklıdır. Ticari trafik simülatörü yazılım paketleri arasında AIMSUN, VISSIM, ARCHISIM ve CORSIM bulunmaktadır. Açık kaynak trafik simülatörleri arasında MATSim, TRANSIMS, MITSIMLab ve SUMO (Saidallah ve ark., 2016) gibi simülatörler mevcuttur.

SUMO (Simulation of Urban Mobility), 2001 yılında Alman havacılık enstitüsü tarafından geliştirilen açık kaynaklı, mikroskobik tabanlı bir trafik simülasyon yazılımıdır. Dinamik bir zaman simülasyonu için güçlü bir simülasyon aracıdır. SUMO, araba takip etme teorisi (Barceló ve ark., 2005; Vilarinho ve ark., 2014) gibi araç davranışına ilişkin farklı teorilere dayalı olarak yol ağındaki araçların bireysel

davranışlarını simüle etme yeteneğine sahiptir. Trafiğin birçok ayrıntısını, büyük ölçekli ve gerçekçi bir şekilde temsil edebilmektedir (Thunig ve ark., 2019). Rota seçimi, dinamik navigasyon, araç iletişimi, trafik gözetim sistemlerinin değerlendirilmesi ve trafik sinyal algoritması geliştirme gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır (Krajzewicz ve ark., 2012). Mikroskobik model, araba takip etme ve şerit değiştirme teorilerinden elde edilen istatistiksel yasalara dayalı olarak, tek tek araçların hareketini simüle edilebilmektedir. Tipik olarak, araç geliş-gidişlerinin istatistiksel dağılımla bir ulaşım ağında değerlendirilmesine yardımcı olmaktadır.

Araçların nasıl hareket ettiğini, birbirleriyle ve altyapıyla nasıl etkileşime girdiğini açıklamak için hızlanma, hız adaptasyonu, şerit değiştirme ve onlara benzer alt modeller, mikroskobik model içerisinde değerlendirilmektedir.

SUMO simülatörü, trafik akışının bir bütün olarak dikkate alındığı makroskobik modellerin aksine, bireysel arabalarla ilgili analizlere izin vermesi sebebiyle mikroskobik simülatördür. Makroskobik modellerde, trafiğin akışının ve yoğunluğunun modellenmesi amacıyla kısmi diferansiyel denklemler kurulmaktadır (Ratrou ve Rahman, 2009).

Arteriyel ve yol ağındaki trafiği simüle etmek için uygun olan başka mikroskobik trafik simülasyon araçları da mevcuttur. Bununla birlikte, SUMO simülatörü, çevrimiçi bir destek sistemine sahip en gelişmiş ve en iyi belgelenmiş açık kaynaklı trafik simülatörlerinden biri olduğu için birçok araştırmacı tarafından tercih edilmektedir (Ratrou ve Rahman, 2009; Saidallah ve ark., 2016). SUMO, araçların kalkış zamanlarına göre ağdaki rotalarını tanımlayan trafik taleplerini oluşturmak için çok sayıda aygıt sunmaktadır. Aynı rotayı kullanan araçlar akış grubu altında tanımlanabilmektedir. Bu tezde, önerilen yöntemlerin sonuçlarını elde etmek için SUMO trafik simülatörü kullanılmaktadır.

SUMO trafik simülatöründe bir simülasyon senaryosu oluşturmak için ağ ve trafik talebi (rota) dosyaları gibi zorunlu dosyalar gereklidir. Aşağıda bu konular ile ilgili tanımlanmaktadır.

3.6.1 Ağ dosyası

Trafik ağı, kavşaklar aracılığıyla birden fazla yolların birbirine bağlanmasıdır. Bir ağ dosyası, bir haritanın trafik ile ilgili bölümünü tanımlayan SUMO simülasyonunda ana dosya olarak kabul edilmektedir. Yolları, kavşakları, bağlantıları ve trafik sinyal mantığı tanımını içermektedir. Yol, her bir şeridin konumu, şekli ve hız sınırıyla birlikte bir grup

şeridi kapsamaktadır. SUMO'da ağı kurmak için aşağıdaki verilere ihtiyaç duyulmaktadır:

- İncelenen alanın haritası.
- Her yol için şerit sayısının ayrıntıları.
- Her dönüş için izin verilen şeritler ile her kavşak için olası dönüş hareketi.

SUMO ağ dosyasını oluşturmanın birçok yolu mevcuttur. Bunların arasında, ağ dosyası, XML dosyası kullanılarak belirli bir ağ tanımlanarak oluşturulabilmektedir. Diğer ağ dosyası oluşturma yolu ise, OpenStreetMap gibi SUMO dışı ağları içe aktararak bir SUMO ağı oluşturmaktır. Ne yazık ki, böyle bir yöntemle oluşturulan ağın gerçek ağa uygun olması için modifikasyonlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüzden, SUMO'da ağları oluşturmak ve değiştirmek için NETEDIT adı verilen bir aygıt kullanılmaktadır.

3.6.2 Trafik talep dosyası

SUMO trafik simülatörü kullanılarak karayolu trafiğinin simülasyonunu gerçekleştirmek, trafik talebi açısından oldukça önemlidir. SUMO'da trafik taleplerini tanımlamak için aşağıdaki gibi birkaç yöntem mevcuttur.

1- *Gezi bilgileri kullanılarak talep oluşturma*

Gezi bilgileri kullanarak trafik talebini oluşturulabilmektedir. Bu gezi bilgileri, başlangıç-varış noktalarını ve araç veya yaya için kalkış zamanlarını içermelidir. Talep elle oluşturulduğunda veya komut dosyası özel verileri içe aktarmak için yazıldığında, bu yöntemi kullanmak yararlıdır. Tanımlanan gezinin rotalarını oluşturmak için DUAROUTER aygıtı kullanılmaktadır.

2- *Akış bilgileri kullanılarak talep oluşturma*

Bu yöntem genellikle gezi bilgilerinden talepleri oluşturma yöntemine benzemektedir, ancak bu yöntemde aynı başlangıç ve varış noktalarına sahip araçlar birleştirilmektedir. Gezi tanımında olduğu gibi rotaları oluşturmak için DUAROUTER aygıtı kullanılmaktadır.

3- *Rastgele talep oluşturma*

Herhangi bir ölçüme erişmeden trafik talebi oluşturmak için hızlı bir yöntemdir. Ancak üretilen talepler gerçekçi değildir. RandomTrips.py yöntemi, trafik talepleri oluşturmak için kullanılmaktadır.

4- *Orijin Hedef (OH) matrislerini kullanarak talep oluşturma*

OH matrisi, trafik yolu ağındaki araçların başlangıç ve varış noktalarını içermektedir ve genellikle trafik yetkilileri tarafından sunulmaktadır. Od2trips aygıtı, OD matrislerinin trafik talepleri oluşturmak için kullanılmaktadır.

5- *Akış ve dönüş oranlar bilgileri kullanarak talep oluşturma*

Bu yöntemde talep, akışların varış noktaları göz ardı edilerek sadece başlangıç noktaları ve kavşaklardaki dönüş oranları kullanılarak üretilmektedir. Jtrrouter aygıtı, tanımlanan akışın rotalarını oluşturmak için kullanılmaktadır.

6- *Gözlem noktaları (algılama cihazın verileri) kullanarak talep oluşturma*

Trafik sayımları, yaygın bir trafik verisi türüdür ve loop detektörü veya radar detektörleri gibi algılama cihazlarından temin edilebilmektedir. Bu veriler trafik talebi oluşturmak için kullanılabilir. Dfrouter aygıtı, tanımlanan verilerin rotalarını oluşturmak için kullanılmaktadır.

7- *El ile talep oluşturma*

Araç kalkış zamanını, araç türünü ve rotayı içeren XML dosyaları kullanılarak elle trafik talebi oluşturulabilmektedir.

8- *Nüfus istatistik bilgileri kullanarak talep oluşturma*

Bu yöntemde, trafik talepleri nüfus istatistiklerine göre oluşturulmaktadır. Activitygen aygıtı, nüfus istatistikleri verisinin tanımlanmasına bağlı olarak trafik taleplerini oluşturmak için kullanılmaktadır.

9- *Diğer kaynaklardan gelen verileri kullanarak talep oluşturma*

SUMO simülatörü, VISUM gibi diğer kaynaklardan gelen verileri kullanarak trafik talebi oluşturma imkânı sağlamaktadır.

Ağ ve trafik talep (rota) dosyasına ek olarak, trafik sinyali gibi ek dosya isteğine bağlı olarak detektörler kullanılabilir. Simülasyonu yürütmek için SUMO konfigürasyon dosyasında ayarlamalar yapılmalıdır.

SUMO, altyapı düzenleyicisi (NETEDIT) ve trafik kontrol arayüzü (TraCI) içeren bir yazılım paketi sağlamaktadır. Bu bileşenler, kullanıcının karayolu altyapısının özel konfigürasyon tasarlamasını, uygulamasını ve trafik simülasyonunun çalışma esnasında veri alışverişi yapmasını sağlamaktadır (Vidali ve ark., 2019). TraCI, simülasyon çalışma süresi (Wegener ve ark., 2008) sırasında araçların davranışını kontrol etmeyi sağlayan TCP protokolüne dayalı bir tekniktir.

3.7 Araştırma Metodolojisi

Gerçek alan kavşaklarında önerilen algoritmaların performansını ölçmenin zorluğundan dolayı, gerçek ve rastgele olarak üretilen trafik talepleri üzerinden algoritmaları simülasyon seçeneğini kullanarak test etmek tercih edilmektedir. Bu araştırmada izlenen metodoloji aşağıdaki gibidir:

- Önerilen algoritmalar hem izole edilmiş hem de ana yol ağı kavşaklarına uygulanmaktadır.
- Gerçek sahadan toplanan trafik verileri ve rastgele oluşturulmuş trafik talepleri kullanılmaktadır.
- Önerilen algoritmaları uygulamak için SUMO simülatörü ile birlikte python programlama dili kullanılmaktadır.

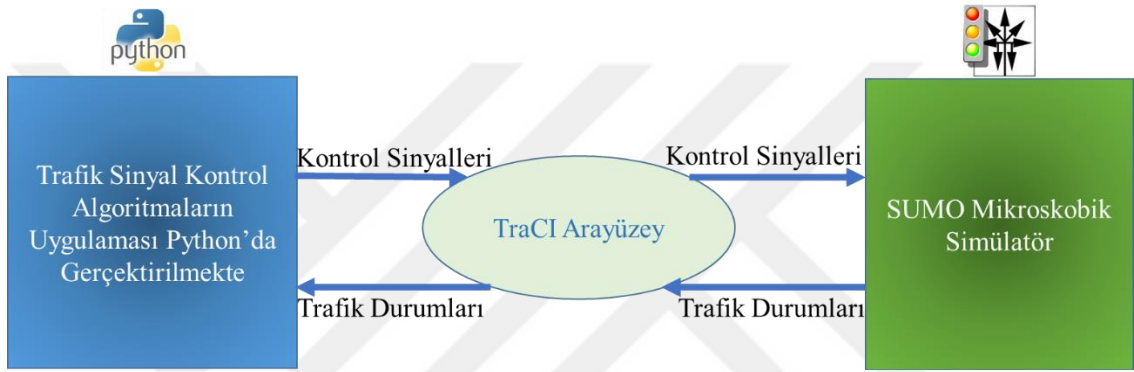
İzole kavşak için Kilis/Türkiye’de bulunan farklı mimarilere sahip üç kavşak seçilmiştir. Bu kavşaklar, gerçek alan trafik verilerinin olması nedeniyle seçilmiştir.

Sahadan toplanan gerçek trafik verileri, balıkgözü kamera aracılığıyla dijital görüntü işleme ile elde edilmiştir. Sabit sayıda araç temelinde üretilen rastgele oluşturulmuş trafik taleplerinin her biri, önceden tanımlanmış aralıkta rastgele bir kalkış süresine sahiptir.

Ana yol ağı için, her biri dört yol içeren iki bağlı kavşağa sahip arteriyel kullanılmaktadır. Ana yol ağı için yalnızca rastgele oluşturulmuş trafik talepleri kullanılmaktadır. Her biri farklı trafik rejimine (aşırı doygunluk, doygun ve doygunluğun altında) sahip üç saatlik talepleri ve farklı rastgele dağıtılan bir saatlik talepleri kapsamaktadır. Bir ana yol ağı için rastgele üretilen talep, Bölüm 5.2.2.1 ve 5.2.2.2’de verilmektedir.

Önerilen adaptif kontrol algoritması, ölçeklenebilir, yüksek performanslı mikroskobik simülasyon paketi SUMO kullanılarak test edilmekte ve değerlendirilmektedir. SUMO, çeşitli Akıllı Ulaşım Sistemi (AUS) stratejilerinin test edilmesi ve değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu tezde önerilen algoritmaları uygulamak için SUMO simülatörü ile birlikte python programlama dili kullanılmıştır. Python komut dosyası, SUMO'yu TraCI arayüzü aracılığıyla kontrol etmek için kullanılmaktadır. SUMO ve Python konfigürasyonu Şekil 3.12'de gösterilmektedir. SUMO simülatörü bir sunucu gibi davranırken, python komutu bir sunucu-istemci tarzında bir istemci olarak çalışmaktadır.



Şekil 3.12. TraCI aracılığıyla SUMO ve Python konfigürasyonu

Simülasyon modeli, SUMO kullanılarak seçilen kavşaklar için oluşturulmaktadır. Bu simülasyonda, endüktif loop dedektörleri, algoritmalar için durum geri bildirimi sağlamak için kullanılmaktadır.

Bu bölüm, bu tezde kullanılan trafik sinyal terminolojilerinin tanımını kapsamıştır. Ayrıca, Webster yöntemi, Bulanık mantık, geri basınç ve TÖ gibi kullanılan yöntemlerin temel ilkesine girişi de tartışılmıştır. Araştırmanın metodolojisi ve simülatöre genel bakış bölümünün sonunda tartışılmıştır.

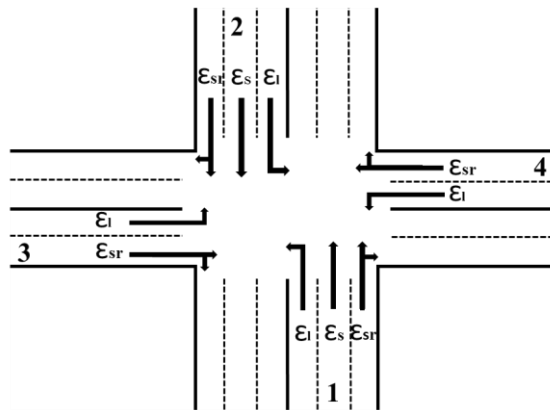
4. KOORDİNELİ ADAPTİF TRAFİK SİNYAL KONTROL UYGULAMASI

Bu araştırma tezinde akıllı şehir için ana yol ağının koordineli adaptif trafik sinyal kontrolü önerilmiştir. Üçüncü bölümde, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemler sunulmuştur. Önerilen yöntemler, Webster'in optimal döngü formülü ile bulanık mantık, geri basınç ve TÖ'ye dayanmaktadır. Webster'in optimal döngü formülü yöntemiyle önerilen bulanık mantık ilk önce izole edilmiş kavşaklara uygulanmış ve ardından arteriyel yol ağlarında genelleştirilmiş hali ile geliştirilmiştir. Bu bölümde, ilk olarak önerilen adaptif trafik sinyal kontrol sisteminin izole kavşakta uygulanması tartışılacaktır. Daha sonra bu sistemin koordineli şekli ele alınacaktır.

4.1 İzole Kavşak için Önerilen Adaptif Algoritma

İzole bir kavşak için önerilen adaptif trafik sinyal kontrol sisteminin çalışma prensipleri bu bölümde ayrıntılı olarak tartışılmaktadır. Yöntem, Webster ve modifiye edilmiş Webster formüllerini kullanan bulanık mantık ve optimal döngüye dayanmaktadır.

Şekil 4.1'de gösterilen izole kavşağı dikkate alarak, kuzey ve güney yollarının üç şeritli, doğu ve batı yollarının ise yalnızca iki şeritli olduğu dört yollu kavşağı temsil etmektedir. Şekil 4.1'e göre, ϵ_{sr} , ϵ_s ve ϵ_l doğru ve sağa dönüşü, doğru ve sola dönüş akışlarını temsil edilmektedir.



Şekil 4.1. Kullanılan dört yollu kavşağın konfigürasyonu

İki ve üç şerit yolu için kritik şerit akışı sırasıyla Denklem 4.1 ve 4.2’de hesaplanmaktadır.

$$y_i = \frac{\max(\mathcal{E}_s, \mathcal{E}_l, \mathcal{E}_{sr})}{S_i} \quad (4.1)$$

$$y_i = \frac{\max(\mathcal{E}_l, \mathcal{E}_{sr})}{S_i} \quad (4.2)$$

burada, y_i i’inci şerit akışı ve S_i duygunluk akışıdır.

4.1.1 Döngü uzunluğunun hesaplanması

Temel ilke, Webster için Denklem (3.1) ve Modifiye edilmiş Webster için Denklem (3.2) kullanılarak her döngünün sonunda optimal döngü süresinin hesaplanmasıdır. Bu yöntemde, döngü süresinin sonunda her kavşak yolundaki akış oranları ölçülmektedir.

Akış oranı, bir zaman birimi boyunca sabit bir noktadan geçen araçların sayısıdır. N_s , N_{sr} ve N_l ’nin Şekil 4.1’de gösterildiği gibi direkt, sağa dönüş ve sola dönüş şeritlerinden geçen araçlar olduğunu varsayılmaktadır. Araçların şeritten geçme süresi basitçe optimal döngüye (C_o) eşittir. Akış oranı Denklem (4.3)-(4.6) arasındaki denklemler kullanılarak saatlik akış oranlarına dönüştürülmektedir. Daha sonra kritik şerit akışları sırasıyla Denklem (4.1) ve (4.2) ile hesaplanmaktadır.

$$\mathcal{E}_s = \frac{N_s \cdot 3600}{C_o} \quad (4.3)$$

$$\mathcal{E}_l = \frac{N_l \cdot 3600}{C_o} \quad (4.5)$$

$$\mathcal{E}_{sr} = \frac{N_{sr} \cdot 3600}{C_o} \quad (4.6)$$

Son olarak, Webster ve modifiye edilmiş Webster yöntemleri için optimal döngü uzunluğu sırasıyla Denklem (3.1) ve (3.2) temel alınarak belirlenmektedir.

4.1.2 Etkin yeşil sürenin hesaplanması

Webster modeline göre, her kavşak yolunda faza ait şeritlerin kritik akışına bağlı olarak etkin yeşil sürenin hesaplanması yapılmaktadır. Bu çalışmada, her faz için önceden belirlenen minimum yeşil süresi belirlenmektedir. Sonuç olarak, sadece toplam etkin yeşil döngü süresi $C_e(n)$ 'nin kalan kısmı, Denklem (4.7)'de olduğu gibi döngü n 'deki m fazlarına dağıtılabilmektedir.

$$C_e(n) = C_o(n) - L - m \cdot g_j \quad (4.7)$$

burada g_j , j fazı için mevcut olan önceden belirlenmiş minimum yeşil süresidir ve m , fazların sayısıdır.

Döngü n içindeki faz i 'nin kritik akış oranı $\alpha_i(n)$ Denklem (4.8) kullanılarak hesaplanabilmektedir.

$$\alpha_i(n) = \frac{y_i}{\sum_{i=1}^m y_i} \quad (4.8)$$

Minimum yeşil süresine eklenen ekstra etkili yeşil süre, Denklem (4.9) temel alınarak hesaplanmaktadır.

$$g_i(n) = \alpha_i(n) \cdot C_e(n) \quad (4.9)$$

Denklem (4.10) temel alınarak gerçekleştirilen her faz için tahsis edilen toplam yeşil süresi hesaplanmaktadır.

$$G_i(n) = g_i(n) + g_m \quad (4.10)$$

Bu değerler, bir sonraki döngüde (döngü $n + 1$) yeşil süresinin izin verilen maksimum uzatma sınırını belirlemek için adaptif bir şekilde kullanılmaktadır.

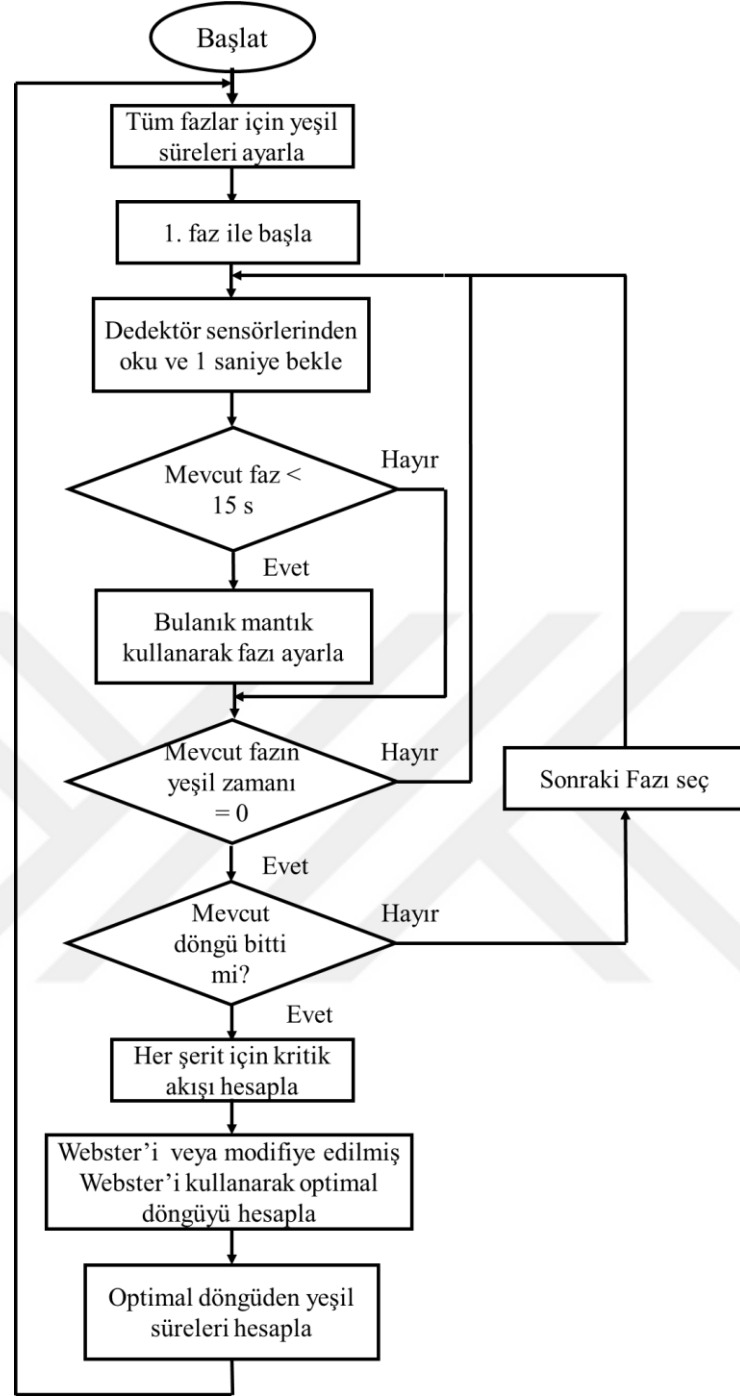
4.1.3 Yeşil süresinin ayarlanması

Yukarıda bahsedildiği gibi, optimal döngü, önceki döngü (döngü n) sırasında ölçülen akışa bağlı olarak hesaplamakta ve sonraki döngüde (döngü $n + 1$) kullanılmaktadır. Birbirini takip eden döngüler sırasında, trafik durumu biraz değişebilmektedir ve hesaplanan optimal döngü ile istenilen optimal döngü arasında uyumsuzluğa yol açabilmektedir. Bu uyumsuzluğun üstesinden gelmek için her döngüde bulanık mantık yöntemi sürekli olarak uygulanmaktadır. Şekil 4.2, önerilen algoritmanın akış şemasını göstermektedir. Mamdani bulanık mantık modeli ve ağırlık merkezi yöntemi, EĞER- O HALDE kurallarını kullanarak bulanık sistemin girdileri ve çıktıları arasında ilişkiler kurularak bulanık mantık sistem tasarımı gerçekleştirilmektedir.

Önerilen bulanık mantık yöntemi ile faz çalışma sırasında faz yeşil süresinin düzenlemesi amaçlanmaktadır. Uzun faz süresinin başlangıcından itibaren yürütülmekte olan yeşil fazın gözlenmesi, hesaplama açısından maliyetli olmaktadır. Bunun üstünden gelmek amacıyla önerilen bulanık mantık sistemi ile, yürütülen faz süresi 15 saniyenin altına düştüğünde gözlenmesi başlatılmaktadır. Bu durumda çalışmakta olan yeşil fazın kalan süresi, giriş değeri olarak kullanılmaktadır. Bu değer, iki ardışık döngü arasında ihtiyaç duyulan ayarlamaların, fazın yeşil süresinden nispeten daha kısa bir süre içinde gerçekleşmesi nedeniyle seçilmiştir. Önerilen bulanık mantık, Kalan Kuyruk Uzunluğu (KKU), Geçiş Oranı (GO), Çalışmakta olan Yeşil Fazın Kalan Süresi (ÇYF_KS) ve Uzatma, Değiştirmeme veya Azaltma (UDA) olarak belirtilen bir çıkış ve üç girişe sahiptir.

KKU, çalışmakta olan yeşil fazın şerit grubu için Kalan Kuyruk Uzunluğudur. Şekil 4.3'te gösterildiği gibi 0 ila 30 araç arasında değişen Sıfır, Kısa, Orta ve Uzun isimli dört üyelik fonksiyonu içermektedir.

GO, Şekil 4.4'te gösterildiği gibi yeşil fazın geçiş oranını gösteren bir giriştir. 0 ila 4 araç/saniye arasında değişen Sıfır, Düşük, Orta ve Yüksek olmak üzere dört üyelik fonksiyonu kapsamaktadır.



Şekil 4.2. Önerilen algoritmanın akış şeması

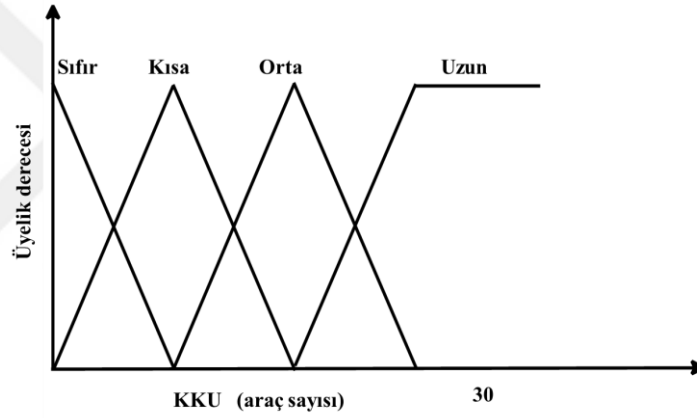
Üçüncü giriş ise, çalışmakta olan yeşil fazın kalan süresini göstermektedir. Şekil 4.5'te açıklandığı gibi 0 ila 15 saniye arasında değişen Kısa, Orta ve Uzun adlı üç üyelik fonksiyonu içermektedir.

Bulanık mantığın UDA çıkışı, çalışmakta olan yeşil fazın kalan süresini uzatmak, kısaltmak veya korumak için kullanılmaktadır. -3 ila +3 saniye arasında değişen Negatif

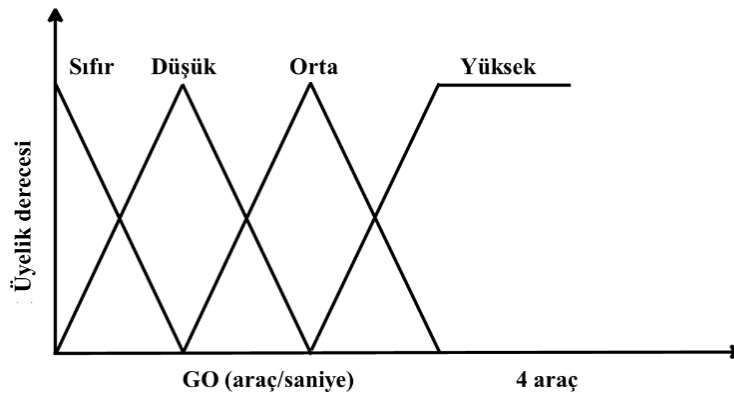
Orta (NO), Negatif Kısa (NK), Sıfır, Pozitif Kısa (PK) ve Pozitif Orta (PO) olarak adlandırılan beş üyelik fonksiyonunu kapsamaktadır.

Uzatma veya kısaltma için maksimum ve minimum uzunluk, çalışmakta olan yeşil fazın kalan süresi içinde yumuşak değişim sağlamak için seçilmektedir. Şekil 4.6, önerilen bulanık sistemin çıkışını göstermektedir.

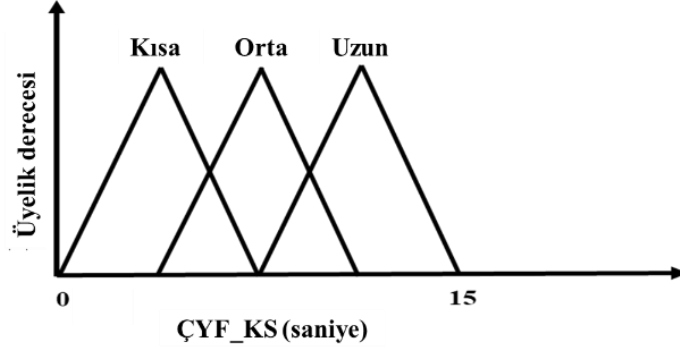
Bulanık sistem çalışmakta olan yeşil fazı çok uzun süre uzatırsa bazı yollarda gecikme riski ortaya çıkabilmektedir. Bu olguyu önlemek için, tahmini faz yeşil süresinin maksimum uzaması, fazın tahmini değerine bağlı olarak sabit bir oranla sınırlandırılır. Bu çalışmada koordineli durumdaki ana yollar için 1,4 oranı ve yan yollar için 1,2 oranı önerilmiştir. İzole edilmiş durum için, bu çalışmada maksimum uzatma, tahmini faz yeşil süresinin %130'una kadar sınırlandırılmıştır. Bu değer, ardışık döngüler arasındaki akış oranında mümkün olan maksimum sapmaya dayalı bir tahmin olabilmektedir.



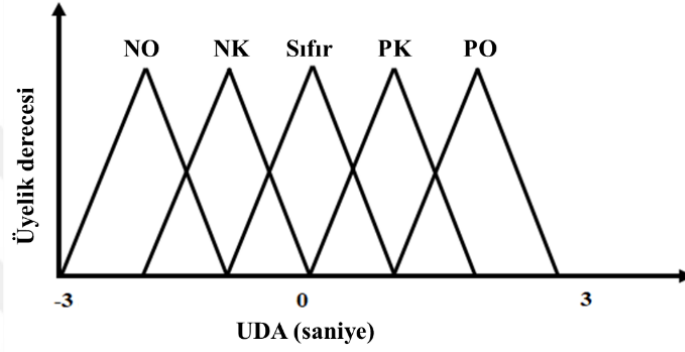
Şekil 4.3. Kalan kuyruk uzunluğunun giriş bulanık üyelikleri



Şekil 4.4. Geçiş oranının giriş bulanık üyelikleri



Şekil 4.5. Çalışmakta olan yeşil fazın kalan süresinin giriş bulanık üyelikleri



Şekil 4.6. Uzatma, Değiştirmeme veya Azaltma çıkışın bulanık üyelikleri.

Önerilen bulanık mantık sistemi, altmış beş bulanık kuraldan oluşmaktadır. Bu kurallardan bazıları aşağıdaki Çizelge 4.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Bazı bulanık mantık kuralları

Kural No	Kuralları
K1	EĞER KKU Sıfır ise ve ÇYF_KS Kısa ise ve GO Sıfır ise O HALDE, UDA NO’dur
K2	EĞER KKU Kısa ise ve ÇYF_KS Kısa ise ve GO Düşük ise O HALDE, UDA PK’dır
K3	EĞER KKU Orta ise ve ÇYF_KS Uzun ise ve GO Yüksek ise O HALDE, UDA Sıfır’dır
K4	EĞER KKU Orta ise ve ÇYF_KS Uzun ise ve GO Orta ise O HALDE, UDA NK’dır
K5	EĞER KKU Kısa ise ve ÇYF_KS Kısa ise ve GO Sıfır ise O HALDE, UDA NO’dur
K6	EĞER KKU Kısa ise ve ÇYF_KS Orta ise ve GO Düşük ise O HALDE, UDA NK’dır
K7	EĞER KKU Uzun ise ve ÇYF_KS Kısa ise ve GO Sıfır ise O HALDE, UDA PO’dur
K8	EĞER KKU Uzun ise ve ÇYF_KS Orta ise ve GO Sıfır ise O HALDE, UDA PK’dır

4.2 İzole Edilmiş Kavşaklar İçin Kullanılan Kıyaslama Kontrol Yöntemleri

İzole edilmiş kavşaklar için önerilen yöntemin performansını ölçmek amacıyla sabit zamanlı ve bulanık mantık tabanlı trafik sinyal kontrolü karşılaştırma yöntemleri olarak kullanılmaktadır.

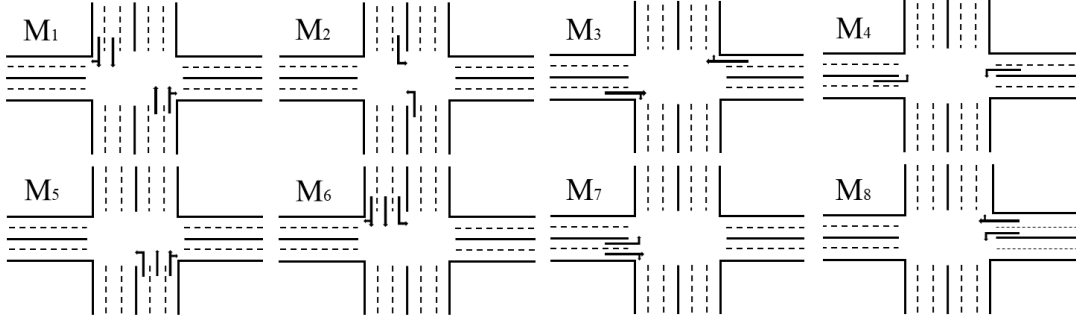
4.2.1 Sabit zamanlı trafik sinyal kontrolü

Genel olarak, Webster'in optimal döngü uzunluğu formülü (orijinal veya Modifiye edilmiş versiyonda) geçmiş verileri kullanarak sabit zamanlı trafik kontrol yöntemi için kullanılmaktadır (Webster, 1958; Gazis, 1964; Wolput ve ark., 2016). Webster ve Modifiye edilmiş Webster formüllerine dayalı sabit zamanlı trafik sinyal kontrolü, izole kavşaklar için karşılaştırma olarak kullanılmıştır. Optimal döngü uzunluğunu hesaplamak için Denklem (3.1) ve (3.2) kullanılmıştır. Etkin yeşil süre, Denklem (4.8)-(4.10) arasındaki denklemler kullanılarak belirlenmektedir. İzole kavşak için sabit zaman yönteminin döngü uzunluğunun ve etkin yeşil süresinin hesaplanmasının detayları bir sonraki bölümde verilmektedir.

4.2.2 Bulanık mantık tabanlı trafik sinyal kontrolü

Bu bölümde, (Dimitriou ve ark., 2008)'de önerilen ve karşılaştırma amacıyla kullanılan bulanık mantık tabanlı trafik sinyal kontrol yöntemini kısaca anlatılmaktadır. Bu yöntem, döngü sırasında herhangi bir faza atlamadan fazı döngüsel olarak değiştiren, önerilen yöntemimizle karşılaştırılabilen tipik bulanık mantık tabanlı yöntemlerden biri olduğu için seçilmiştir.

Yöntem, trafik durumu seviyesini ve faz sıralama seviyesini bulanık mantık girişi olarak kullanmaktadır. Faz sıralamaları, Şekil 4.7'de gösterilen olası akış senaryolarına göre belirlenmektedir.



Şekil 4.7. Dört yollu kavşağının yapılandırılabilir akışları

Fazların sıralaması belirlendikten sonra, fazlar saat yönünün tersine bir sırayla yürütülmektedir. MATLAB bulanık mantık aracı kullanılarak uygulanan bulanık mantık sistemi, sekiz giriş ve on altı çıkış içermektedir. Daha fazla ayrıntı için (Dimitriou ve ark., 2008) tarafından yapılan çalışmanın incelenmesi önerilmektedir.

4.3 Arteriyel Yol Ağı için Önerilen Koordineli Adaptif Yöntemler

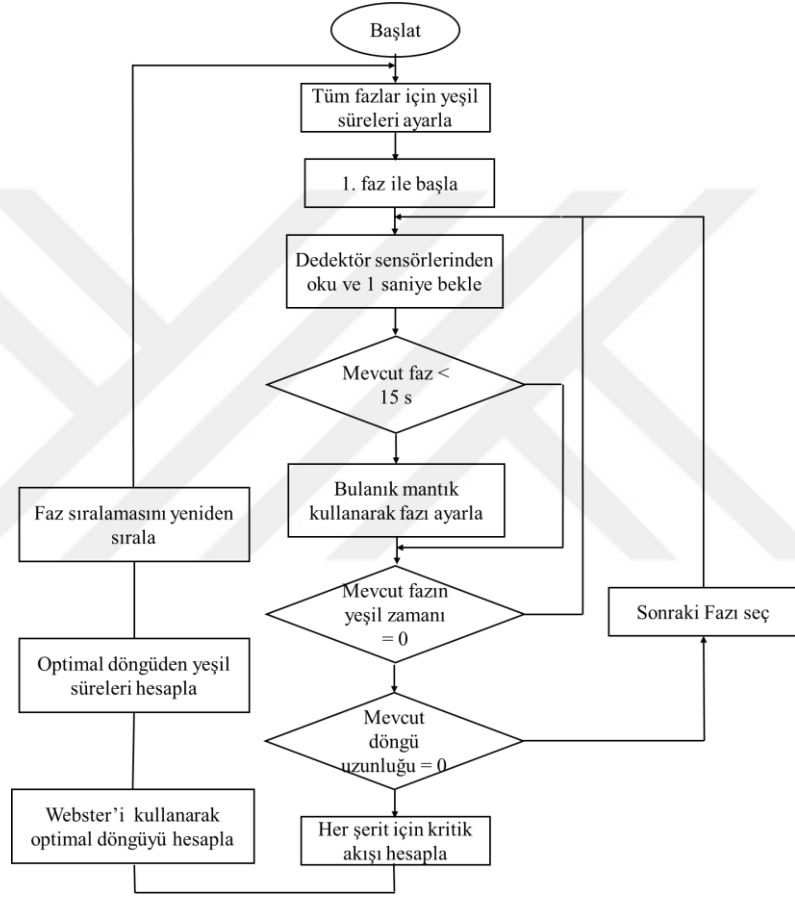
Koordineli ana yol ağı için, bulanık mantık ve Webster'in optimal döngü formülü, geri basınç, DTÖ, ÇDTÖ, DDTÖ ve ÇDDTÖ kullanılarak adaptif trafik sinyal kontrol yöntemleri önerilmektedir. Sonraki alt bölümlerde, önerilen yöntemlerin uygulanması ayrıntılı olarak tartışılacaktır.

4.3.1 Merkezi olmayan koordineli adaptif bulanık mantık ve Webster'in optimal döngü formülü (MKUBW)

Bu bölümde, önerilen merkezi olmayan koordineli adaptif bulanık mantığı ve Webster'in optimal döngü formülü tartışılmaktadır. Bu yöntemde döngü uzunluğu Webster formülü kullanılarak tahmin edilirken, yeşil süresi çevrimiçi bir şekilde ayarlama konusunda bir karar verme mekanizması olarak bulanık mantık uygulanmaktadır. Her döngü başında faz sırası yeniden sıralanmak suretiyle, dağıtılmış kavşaklar arasındaki koordinasyon sağlanmaktadır.

4.3.1.1 Optimal döngü uzunluğunun ve etkili yeşil süresinin belirlenmesi

Bu yöntemin temel ilkesi, izole edilmiş kavşağa uygulanan yönteme benzemektedir. Her döngü sonunda, bir sonraki döngü için optimal döngü uzunluğu Denklem (3.1) ve etkin yeşil süresi Denklem (4.8)-(4.10) arasındaki denklemler ile hesaplanmaktadır. Önerilen yöntemin gerçekleştirme adımları, Şekil 4.2'nin Modifiye edilmiş bir versiyonu olan Şekil 4.8'de gösterilmektedir.



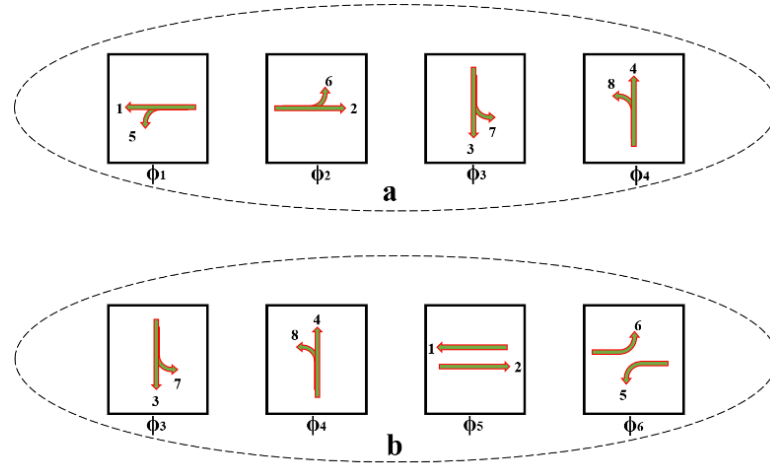
Şekil 4.8. Merkezi olmayan bulanık mantık ve Webster tabanlı adaptif yöntemin akış şeması

4.3.1.2 Kavşaklar arasında koordinasyonun sağlanması

Ardışık kavşaklar arasındaki koordinasyon, faz sıralaması problemlerinin ana vazifesi olarak kabul edilmiştir. Sinyal faz sırasının yeniden sıralanması, kombinasyonlu optimizasyon olarak sunulmuştur. Koordineli trafik kontrolü elde etmek için, bu çalışmada her döngü uzunluğu sonunda ofsetleri ayarlayarak trafik talebine dayalı esnek yeşil dalga elde edilmiştir.

Bu yöntemin temel prensibi, her döngü uzunluğunun başlangıcında faz sırasının yeniden düzenlenmesidir. Faz sırasının yeniden düzenlenmesi, araçların önceki kavşaktan çıkması için kalan süreye ve kavşaklar arasındaki ortalama seyahat süresine bağlıdır. Bu yöntem, kendi kendini organize eden bir yaklaşım olarak kategorize edilebilmektedir. Bu yaklaşım, çözümü daha verimli hale getirmek için karmaşık sistemin mantıksal olarak küçük problemlere ayrıştırma prensibine dayanmaktadır.

Önerilen yöntem, tekrarsız bir kombinasyon teorisine dayanmaktadır. Bu çalışmada, Şekil 4.9'da gösterildiği gibi, bir ana yol için iki faz konfigürasyon modu kullanılmıştır. Mod 2, trafik aynı anda bir kavşağa yaklaşan ana yolun iki zıt yönünden trafik akmaktaysa uygulamakta, aksi takdirde Mod 1 kullanılmaktadır. Mod 1, ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 ve ϕ_4 ile beraber $4! = 24$ olası kombinasyonu içermektedir. Mod 2 ise, aynı olası kombinasyonlarla ϕ_3 , ϕ_4 , ϕ_5 ve ϕ_6 'yı kapsamaktadır. İki modun toplam olası kombinasyonu 48'dir. ϕ_3 ve ϕ_4 'e karşılık gelen yan yolu koordine etmeye gerek olmadığı kabul edilmektedir. Sonuç olarak, arteryeli $\phi_1 \rightarrow \phi_2 \rightarrow \phi_3 \rightarrow \phi_4$ veya $\phi_1 \rightarrow \phi_2 \rightarrow \phi_4 \rightarrow \phi_3$ sıralaması arasında koordine etmenin bir farkı yoktur. Buna ek olarak, ϕ_5 ve ϕ_6 'nın birbirini takip etmesi için katı bir gereklilik mevcuttur. Buna göre olası kombinasyonlar 26'ya düşürülmüştür.



Şekil 4.9. Önerilen yöntemin faz konfigürasyonu (a) Mod 1 ve (b) Mod 2

Bir şehir içi trafik ağı düşünüldüğünde durum farklı olmaktadır ve bu olası kombinasyonlara ilave olarak dört yollu bir arteryel kavşak için mevcut bir faz düzenlemesi yapılmalıdır. Buradaki amaç, minimum bekleme süresini sağlayan ve aynı zamanda kavşakta araçların durma olasılığını azaltan uygun faz düzenlemesinin seçimine

dayalı olarak komşu kavşaklar arasında koordinasyonu sağlamaktır. Bu yöntemi uygulamak için birçok aşama yerine getirilmelidir.

İlk olarak, kavşakların yapısı sabit olduğundan mevcut fazların kombinasyonları da sabittir ve Denklem (4.11)'e göre önceden bu kombinasyonlar belirlenmektedir.

$$C_p = [c_1, c_2, c_3, \dots, c_k] \quad (4.11)$$

burada c_k , k'inci bireysel kombinasyondur (mevcut faz düzenlemesi).

İkinci olarak, koordineli faz süresinin başlangıcı ile aracın önceki kavşaktan yerel kavşağa gelmesi için kalan süresi kullanılarak, mevcut faz düzenlemelerinin kombinasyon kümesindeki minimum fark veren faz sıralama seti bulunmaya çalışılmaktadır. Faz sıralaması setini bulmak için Denklem (4.12) ve Denklem (4.13) kullanılmaktadır.

$$D = [d_1, d_2, d_3, \dots, d_k] \quad (4.12)$$

$$d_k = \sum_{i=1}^m |p_{r,i} - v_{r,i}| \quad (4.13)$$

burada m, $p_{r,i}$ ve $v_{r,i}$ sırasıyla, kavşaktaki faz sayısı, i'inci fazın kalan yeşile dönme süresi, ve komşu kavşaktan ayrılan baştaki aracın i'inci faza ait durma çizgisine ulaşma süresidir. $v_{r,i}$, komşu kavşakta kalan bekleme süresi ile iki ardışık kavşaklar arasındaki seyahat süre toplamından oluşmakta ve Denklem (4.14) ile hesaplanmaktadır.

$$v_{r,i} = rt_i + tt_i \quad (4.14)$$

burada rt_i , önceki kavşaktaki koordineli faza karşılık gelen fazın yeşil sinyale geçmesi için kalan süresini temsil etmekte ve tt_i , ardışık kavşaklar arasındaki seyahat süresidir. tt_i , araç hızının ve kavşaklar arasındaki mesafeye dayalı bir fonksiyondur.

$$tt_i = \frac{L}{S_a} \quad (4.15)$$

L mesafesi sabit olsa da, yoldaki aracın ortalama hızının değişkenliğinden dolayı trafik durumuna bağlı olarak değişen t_{ti} değeri, Denklem 4.15'teki gibi hesaplanmaktadır. S_a , ardışık kavşakları birbirine bağlayan yollar üzerindeki bir aracın değerlendirilmiş hızıdır.

4.3.1.3 Yeşil süresinin Ayarlanması

Optimal döngü ve etkin yeşil süresi, önceki döngü sırasında ölçülen verilere göre tahmin edilmektedir. Tahmini değerler ile çalışmakta olan döngü yürütülmektedir. Döngü yürütme esnasında, trafik durumu değişikliğine bağlı olarak hesaplanan ve istenilen optimal döngüler arasında bir fark meydana gelebilmektedir. Bu durumun üstesinden gelmek için her döngüde bulanık mantık sistemi sürekli olarak uygulanmaktadır. Etkin yeşil süresinin ayarlanması, Bölüm 4.1.3'te tartışılan izole kavşakla aynı şekilde gerçekleştirilmektedir.

4.3.2 Geri basınç tabanlı merkezi olmayan koordineli yöntem

Uygulanan trafik kontrol algoritmalarının çoğu, maksimum akışa sahip faza uzun yeşil süre vererek trafik akışını yönetmektedir. Bu yöntemler, trafik ağında önlenemez bir tıkanıklığa neden olabilmektedir çünkü trafik ağının dışından gelen yüksek akışı, sonraki kavşağın trafik yoğunluğunu dikkate almadan yönetmeye çalışmaktadır.

Bu tez çalışmasında, arteriyel yol ağı için koordineli geri basınç kontrol yöntemi önerilmektedir. Buradaki amaç, ardışık kavşaklarda geçen araçların tekrar durmadan ana yol boyunca yumuşak akışının sağlanmasıdır. Koordinasyonun istikrarını artırmak amacıyla komşu kavşakların trafik durumları birbirleri arasında paylaşılmaktadır.

Orijinal geri basınç algoritmasında, basıncın ağırlığını hesaplamak için yalnızca yerel ve ona komşu olan kavşaklardaki kuyruk uzunlukları bilgisi kullanılmaktadır. Kuyruk uzunlukları ve sinyal durumu dâhil olmak üzere yerel ve komşu kavşakların trafik bilgileri, koordineli kontrol yöntemi elde etmek amacıyla kullanılmıştır. Bu yöntemin ana fikri, yukarıda tartışılan MKUBW yöntemine benzemektedir. Aralarındaki fark sadece yeşil süreler hesaplama metodundadır. Bulanık mantık tabanlı yöntemdeki faz yeşil süreleri, kritik şerit akışına dayalı olarak hesaplanırken, geri basınç yönteminde, fazların geri basınç ağırlığına dayalı olarak hesaplanmaktadır. Bu stratejinin avantajı ise, döngü uzunluğunu fazlar arasında dağıtmasıdır. Yani küçük basınç ağırlığına sahip fazın

yeşil süresinin az olmasıdır veya bunun tersi de geçerlidir. Başka bir deyişle, faza ait sonraki kavşakların kuyruğunda çok sayıda aracın olması durumunda, küçük bir basınç ağırlığı ile sonuca ulaşılmaktadır ve faz yeşil süresi kısa olmaktadır. Optimal döngü uzunluğu Denklem (3.1) kullanılarak her beş dakikada bir güncellenmektedir.

Yöntemin dağıtılmış kavşaklar arasında koordinasyonu elde etmek için bazı bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır, bunlar:

- Yerel kavşağın kuyruk uzunlukları,
- Komşu kavşakların kuyruk uzunlukları,
- Komşu kavşakların kontrolsüz akışlar,
- Komşu kavşakların döngü uzunlukları, faz süreleri ve faz sıralamaları,
- Ardışık kavşaklar arasındaki seyahat süresi,
- Hem ön hem de arka kavşaklar için hesaplanan yeşil süreleri sırasında servis verilebilecek maksimum araç sayısı bilgileridir.

Optimizasyon, her biri C dönemleri içeren değişken uzunluktaki aralıklara veya döngülere bölünmüştür. Her döngü içinde, tüm fazlar için $C - L$ ile hesaplanan etkin yeşil döngü uzunluğu mevcuttur. Burada L , kavşaktaki toplam kayıp süresini temsil etmektedir. Bu yöntemde, her fazın basıncıyla orantılı olan yeşil süresi hesaplamak için her döngünün sonundaki geri basınç algoritması çalıştırılmaktadır.

Her bir kavşak için geri basınç ağırlığı; döngü uzunluğu, faz sıralaması ve koordineli faz için kalan etkin kırmızı süresi gibi komşu kavşaktaki trafik durumunu gösteren bilgiler dikkate alınarak hesaplamaktadır. Her bir kavşaktaki geri basınç ağırlıklarını elde etmek için aşağıdaki Denklem (4.16) kullanılmaktadır.

$$W_{ab}(t) = (Q_{ab}(t) + R_{ab} \cdot (\sum_{x \in X} \min(Q_{xa}, F_{xa}(E_{rab})) + \alpha_a - \beta_a) - (\sum_{c \in C} R_{bc} \cdot (Q_{bc}(t) - \min(Q_{bc}, F_{bc}(E_{rab})) + \alpha_b - \beta_b)) \quad (4.16)$$

burada, R_{ab} , N_x düğümünden N_a düğümüne gelen ve N_b 'ye gidecek araçların oranıdır. R_{bc} , N_b 'de bekleyen ve N_c 'ye geçecek araçların oranıdır. E_{rab} , N_a düğümünden N_b 'ye geçmeye izin veren p_k fazının etkin kırmızı süresidir. F_{xa} , etkin kırmızı E_{rab} süresi içinde N_x 'ten N_a 'ya hareket eden aracın sayısını veren bir fonksiyondur. F_{bc} , etkin kırmızı E_{rab} süresi içinde N_b 'den N_c 'ye hareket eden aracın sayısını veren bir fonksiyondur. β_a ve β_b , sırasıyla N_a ve N_b düğümlerinde ağdan ayrılan araçların sayısını temsil etmektedir.

$$\alpha_a = A_a + \sigma_a \quad (4.17)$$

$$\alpha_b = A_b + \sigma_b \quad (4.18)$$

Denklem (4.17) ve Denklem (4.18)'de bulunan A_a ve A_b , sırasıyla N_a ve N_b 'deki serbest akışı temsil etmektedir. σ_a ve σ_b , sırasıyla N_a ve N_b düğümlerinde kontrolsüz yan caddeden ağa giren araçların sayısını temsil etmektedir.

Kenar düğümündeki geliş akışını serbest bir akış olarak varsaymaktadır. Ayrıca σ_a , σ_b , β_a ve β_b değerleri, aracın sadece kenar düğümlerinde ağa girip çıkabileceği varsayımından dolayı sıfır olarak kabul edilmektedir.

Denklem (4.16) ile ağırlıkları elde ettikten sonra Denklem (3.7) ile basıncı hesaplamaktadır. Daha sonra faz süreleri Denklem (3.8)'deki gibi hesaplamaktadır. P_k fazının yeşil süre bölünmesi $G_{pk} = F_{pk}(C_o - L)$ olarak hesaplamakta, burada C_o , Denklem (3.1) ile hesaplanan optimal döngü uzunluğudur. L kavşaktaki toplam kayıp süresini temsil etmektedir.

Kavşaklar arasındaki koordinasyon, Bölüm 4.3.1.2'de tartışılan bulanık mantık temelli ile aynı şekilde elde edilmiştir. Her bir faz kombinasyonu için, basıncı son yeşil faz süresine göre hesaplamakta (etkin kırmızı süresini tahmin etmek amacıyla) ve ardından yeni yeşil süresi belirlenmektedir. Bu işlem, mevcut tüm faz kombinasyonu için tekrarlanmakta ve en küçük uyumluluk ile kombinasyon bir sonraki döngüde seçilmekte ve yürütülmektedir.

4.3.3 Takviye öğrenme tabanlı koordineli trafik sinyal kontrolü

Trafik akışını optimize etmek için trafik koşullarının bilgilerinden yararlanan makine öğrenme algoritmaları kullanılarak trafik sinyali iyileştirilebilmektedir. Bu makine öğrenme yöntemlerinden biri de takviyeli öğrenmedir. Son zamanlarda, popüler bir öğrenme tabanlı yöntemi olarak düşünülen DTÖ ile, verilen ortam hakkında önceden bilgi sahibi olmadan çevrimiçi optimizasyon yeteneği nedeniyle trafik sinyalleri kontrol edilmektedir. Bununla birlikte, akıllı denetleyicilerin DTÖ uygulamasında kullanmasında, acenteler arasında koordinasyon ihtiyacı ve boyutluluk gibi iki büyük zorluk vardır. Bunların üstesinden gelmek ve koordinasyonu sağlamak için, yerel bilgileri

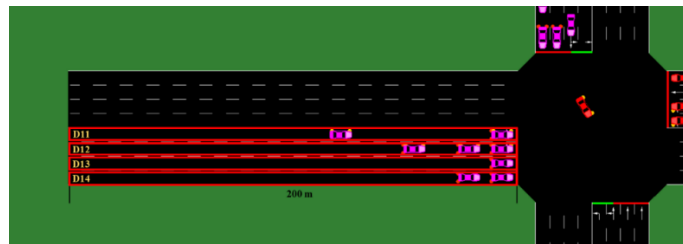
kullanan ve kısmi komşu bilgileri acenteler arasında paylaşan dağıtılmış bir yöntem önerilmektedir.

4.3.3.1 DTÖ, ÇDTÖ, DDTÖ ve ÇDDTÖ tabanlı koordineli trafik sinyal kontrol yöntemi

Bu bölümde tartışılan algoritmalar koordinelidir ve döngüsel bir şekilde çalışmaktadır, burada her döngü sırasında tüm sinyal fazlarının yürütüldüğü anlamına gelmektedir. Komşu kavşaklar arasındaki koordinasyon, her döngünün başında faz sırasını yeniden sıralaması yoluyla sağlamaktadır. Bu yöntemde Webster yöntemi ve takviyeli öğrenme birleştirilmektedir. Bölüm 4.1.1 ve 4.1.2’de tartışıldığı gibi optimal döngü uzunluğu ve faz yeşil süreleri hesaplanması, Webster optimal döngü formülü ile gerçekleştirilmektedir. DTÖ, ÇDTÖ, DDTÖ ve ÇDDTÖ stratejileri, farklı birer TÖ algoritması olarak kullanılmaktadır. Durum uzayı, ödül fonksiyonu ve eylem uzayı aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

4.3.3.1.1 Durum uzayı

Durmakta olan araç sayısı, yeşil faz süresi ve kalan varış süresi, t ayrık zamanlı $S_t = (Q_m, G_{pt}, C_o, R_{at}, P_c)$ durum uzayı olarak kullanılmaktadır. Q_m , kuyruk uzunluğu matrisidir, G_{pt} faz yeşil süreleridir, C_o optimal döngü uzunluğudur ve R_{at} , komşu kavşaktan gelen araçların kavşağa ulaşmak için kalan varış süresidir. Şekil 4.10, bir yol için şerit bazlı ölçülen kuyruk uzunluklarını göstermektedir. İlk yolun dört şeridinin kuyruk uzunluğu, Şekil 4.11’deki gibi matrisin ilk satırında temsil edilmektedir. Kavşak yollarının geri kalanı, kalan satırlarda düzenlenmektedir. Sonunda, iki boyutlu matris, faz yeşil sürelerini ve kalan varış sürelerini birleştirmek için tek boyutlu matrise dönüştürülmektedir.



Şekil 4.10. Bir kavşağın şerit tabanlı kuyruk uzunluğu

$$Q_m = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} \end{bmatrix}$$

Şekil 4.11. Kuyruk uzunluğu matrisi

D_{mn} , bu çalışmada ($1 \leq m \leq 4$, $1 \leq n \leq 4$) m yolunun n şeridindeki kuyruk uzunluğunu temsil etmektedir. Kalan varış süresi R_{at} , komşu kavşakta kalan bekleme süresi r_{wt} ile tt' iki kavşak arasındaki seyahat süre toplamından oluşmakta ve Denklem (4.19) 'da olduğu gibi hesaplanmaktadır.

$$R_{at} = r_{wt} + tt' \quad (4.19)$$

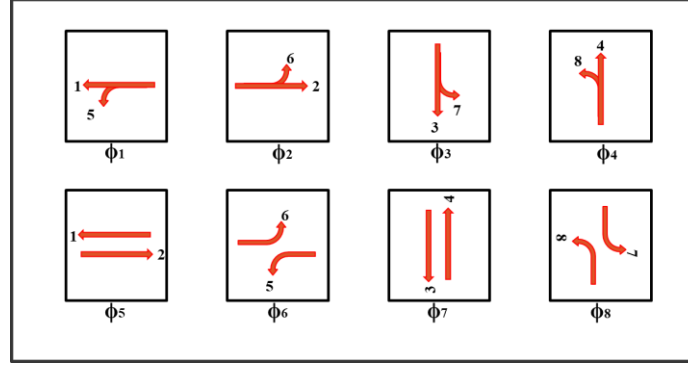
İki kavşak arasındaki mesafe her zaman sabit olsa da, yoldaki araç hızının değişkenliğinden dolayı tt' değişkendir ve Denklem (4.15) ile belirlenmektedir. P_c , Bölüm 4.3.3.2.2'deki gibi eylem uzayından seçilen komşu kavşağın mevcut faz kombinasyonudur. Önerilen DSA, düzeltilmiş doğrusal birim aktivasyon işlevine (ReLU) sahip bir derin sinir ağıdır. Sistem, Algoritma 3.1 ve 3.2'ye göre eğitilmiştir.

4.3.3.1.2 Eylem uzayı

Ortamin durumunu gözlemledikten sonra, tüm mevcut eylemler kümesinden bir eylemin acente tarafından seçilmesi gerekmektedir. TÖ modelinin verimli uygulamaları için eylem uzayı ayarlamak çok önemlidir. Her t adımında, bir acente stratejisi olarak A 'daki $a_t \in A$ bir eylem seçilmektedir. Kavşak, Şekil 4.16'da gösterildiği gibi sekiz faza sahip olacak şekilde yapılandırılmıştır. Bir faz, bir kavşakta çakışmayan akışlar için aynı anda bir şerit grubuna tahsis edilen yeşil sinyallerin birleşiminden oluşturulmaktadır.

Şekil 4.12'ye göre, ($\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$) ile gösterilen bir fazın kombinasyonu 24 ($4!$) olası kombinasyona eşittir. Ayrıca, birbirini takip etmek için (ϕ_5, ϕ_6) ve (ϕ_7, ϕ_8) kısıtlaması mevcuttur. Buna göre, olası kombinasyonlar 30 olmaktadır. Bu olası

kombinasyonlar, dört yollu bir kavşak için mevcut faz düzenlemeleridir ve aynı zamanda eylem uzayına karşılık gelmektedir.



Şekil 4.12. Önerilen yöntemin faz konfigürasyonu

4.3.3.1.3 Ödül fonksiyonu

Ödül fonksiyonu, TÖ'ye dayalı algoritmalarda önemli bir faktördür. Bu nedenle, gerçekleştirilen eylemin geri bildirimi olarak uygun bir ödül fonksiyonu seçilmelidir. Çünkü her bir acentenin vazifesi, eylem uzayından en uygun eylemi seçerek kavşaktaki tıkanıklığı en aza indirmektir. Her acentenin bir işlem yapma konusunda en mantıklı kararı alması ve aşamalı olarak öğrenmesine yardımcı olmak üzere, “toplam kuyruk uzunluğu” bir ödül olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada ödül fonksiyonu Denklem (4.20)'deki gibi seçilmiştir. Acente, adım t 'deki toplam D_{mn} kuyruklarının negatif toplamı olarak ödülü seçmektedir.

$$r_t = -\sum_{m,n} D_{mn} \quad (4.20)$$

burada n , tek bir yoldaki şerit sayısıdır, m , kavşaktaki yolların sayısıdır ve r_t ödül fonksiyonudur.

4.3.3.2 Döngüsel olmayan ÇDDTÖ tabanlı trafik sinyal kontrol yöntemi

Bu bölümde tartışılan yöntemler döngüsel olmayan yöntemlerdir, yani trafik durumuna bağlı olarak herhangi bir fazın birden fazla acente adım süresi boyunca atlanabileceği veya yürütülebileceği anlamına gelmektedir. Diğer bir deyişle, her

döngüde her faza ayrılmış yeşil süresi bulunmamaktadır. Trafik sinyal kontrolü için bir ÇDDTÖ algoritmasının tasarlanması durumunda, trafik ağının karmaşıklığına göre modeli değerlendirmek gerekmektedir. Ham trafik verilerinden üretilen büyük bir durum alanını işlemek için bir ÇDDTÖ kullanılmaktadır. ÇDDTÖ, olay verileri tarafından oluşturulan trafik durumu gibi yüksek boyutlu giriş verilerinin verimli özelliklerini otomatik olarak öğrenebilmektedir.

ÇDDTÖ, eylemlerle alakalı değerleri temsil etmekte olan Q değerleriyle ortamın durumunu eşlemek için oluşturulmaktadır. Derin sinir ağının girdisi, adım t 'deki ortamın durumunu temsil eden yollardaki araç konumunun ve ortalama hızının vektörüdür. Derin sinir ağının çıktıları ise, olası eylemin Q değerleridir. Durum uzayı, eylem uzayı ve ödül fonksiyonunun tanımlanması, TÖ tabanlı sistem tasarımında en kritik işlemdir. Bağımsız ÇDDTÖ (BÇDDTÖ) ve Paylaşılan Sinyal Durumları ÇDDTÖ (PSDÇDDTÖ)'ye dayalı ana yol için merkezi olmayan, çoklu-acenteli adaptif trafik sinyal kontrol yöntemi bu bölümde tartışılmaktadır.

Gerçek sahada ödülün ölçülmesinin zor olmasından dolayı, KATSK için uygulanan tüm DTÖ yöntemleri eğitilmekte ve son olarak trafik simülatöründe değerlendirilmektedir. Sonraki alt bölümlerde ÇDDTÖ için kullanılan durum uzayı, eylem uzayı ve ödül fonksiyonu ayrıntılı bir şekilde verilmektedir.

4.3.3.2.1 Durum uzayı

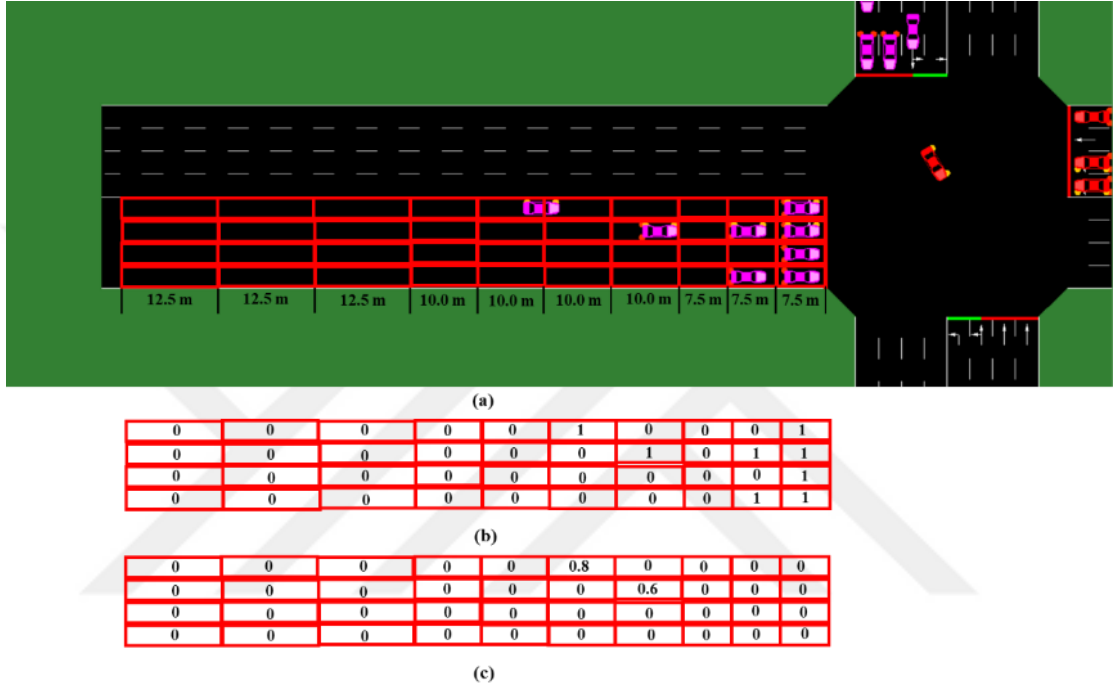
Acentedeki durum, belirli bir t adımındaki ortam koşullarını temsil etmektedir. Acentenin trafiği optimize etmeyi etkili bir şekilde öğrenmesi için, her bir kavşak yolundaki araçların dağılımı hakkında yeterli bilginin “durumlar” tarafından bilinmesi gerekir. Şekil 4.13 (a)'da gösterildiği gibi, her bir yol dört şeritten oluşmakta ve 100 metre uzunluğundaki her bir şerit on hücreye bölünmektedir. Bir araç bir hücreyi işgal ederse, hücrenin değeri 1'e ayarlamakta; aksi takdirde, Şekil 4.13 (b)'de olduğu gibi 0'a ayarlamaktadır. Ortalama hız matrisi Şekil 4.13 (c)'de olduğu gibi, aracın gerçek hızının yolun izin verilen maksimum hızına (hız limiti) bölünmesiyle elde edilmektedir.

Bu çalışmada farklı durum uzayları önerilmiştir. t zaman aralığında toplanan veriler aşağıdaki gibi 2-B matrisine biçimlendirilmiştir:

- 2-B matrisi, Şekil 4.14'teki gibi mevcut komşu faz durumunu ve kavşağa gelen yoldaki araçların sayısını giriş olarak belirleyen S durum uzayıdır,

- 2-B matrisi, Şekil 4.15'teki gibi mevcut komşu faz durumunu ile kavşağa gelen yoldaki araçların sayısını ve ortalama hız bilgisini giriş olarak belirleyen S durum uzayıdır.

ÇDDTÖ'nin girdisi olarak kullanılan tek boyutlu vektör, oluşturulan 2-B matristen elde edilmiştir. APV, AHV ve SDV sırasıyla, Araç Pozisyon Vektörü, Araç Hız Vektörü ve her kavşaktaki aktif fazı temsil edilen Sinyal Durumu Vektörüdür.



Şekil 4.13. Kavşak yollarının durum temsili. a) Hücrelerin uzunluğunu temsil edilmekte b) Araçların varlığını veya yokluğunu temsil edilmekte c) Araçların ortalama hızını temsil edilmektedir

APV yol 1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
APV yol 2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1
	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
APV yol 3	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
APV yol 4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1
SDV	0					1	0	0	0	0

SDV Kavşak 2 SDV Kavşak 1

Şekil 4.14. Durum uzayı gösterimi (ÇDDTÖ'nin 2-B matris girişi)

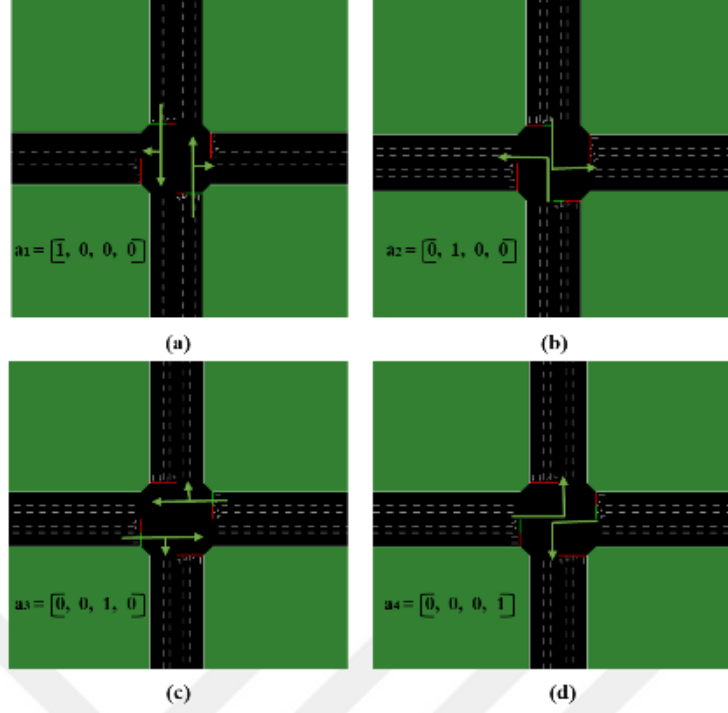
APV yol 1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
APV yol 2	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
APV yol 3	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
APV yol 4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
AHV yol 1	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0.4	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0	0
AHV yol 2	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0
	0	0	1.0	0	0	0	0	0.3	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AHV yol 3	0	0	0	0	0.9	0	0	0	0.5	0
	0	0	0	0	0	0	0	0.6	0	0
	0	0	1.0	0	0	0	0	0.5	0	0
AHV yol 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0
	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0
	0	1.0	0	0	0	0	0	0.5	0.4	0
SDV	1.0	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0
	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0

Şekil 4.15. Durum uzayı gösterimi (ÇDDTÖ'nin 2-B matris girişi)

Kullanılan durum uzayı, BÇDDTÖ ve PSDÇDDTÖ için sırasıyla (160, 320) ve (168, 328)'e eşittir. Eylem uzayı, Şekil 4.16'da gösterildiği gibi dört ayrı eylemden oluşmaktadır. Önerilen DSA, düzeltilmiş doğrusal birim aktivasyon işlevine (ReLU) sahip bir derin sinir ağıdır. Sistem, Algoritma 3.2'ye göre eğitilmiştir.

4.3.3.2.2 Eylem uzayı

Şekil 4.16'da gösterildiği gibi kavşak, çakışmayan yeşil fazların önceden tanımlanmış dört kombinasyonundan oluşturulmaktadır. Genel olarak trafik sinyalleri, araçların kavşaktan geçmesine izin veren yeşil sinyal, araçları yavaşlaması için uyarmakta olan sarı sinyal ve araçların kavşaktan geçmesini yasaklayan kırmızı sinyal olmak üzere üç farklı renkli faz ile gösterilmektedir. Eylem uzayı, sinyal durumunu komşu kavşaklar arasında paylaşmak için vektör ile temsil edilmektedir. Kural yinelemesinin her acente adımından sonra fazlardan biri etkinleştirilmektedir. İki fazın değiştirilmesi sırasında, önceden etkinleştirilen akışlara fazlardan 3 sn. sarı eklenmektedir.



Şekil 4.16 Tipik bir dört yollu kavşak konfigürasyonu (a) kuzey-güney direkt akışları için yeşil faz (b) kuzey-güney sola dönüş akışları için yeşil faz (c) doğu-batı direkt akışları için yeşil faz (d) doğu-batı sola dönüş akışları için yeşil faz

4.3.3.2.3 Ödül fonksiyonu

Ödül, TÖ ile diğer öğrenme algoritmaları arasındaki temel farklardan biridir (Chua ve Ismail, 2019). Acentenin doğru yönde hareket edip etmediğini bilmesini sağlayan geri bildirimdir. Çünkü asıl amaç, modelin trafik sinyal kontrol sisteminin verimliliğini artırıp artırmayacağını görmektir. Kuyruk uzunluğu, en iyi kavşak verimliliğini araçların durmadan geçmesiyle yansıtan ana parametredir. Bu nedenle, her acente adımı kavşak yollarındaki negatif toplam kuyruk uzunlukları, ödüller olarak tanımlanmıştır. Ödül, Denklem 4.20’de tanımlandığı gibi hesaplamaktadır.

Önerilen yöntemlerin uygulanması bu bölümde tartışılmıştır. Yöntemler, iki aşamaya ayrılmıştır. Birinci aşamada, optimal döngü formülüne dayalı olarak, bulanık mantık ve Webster hibrit yönteminin izole edilmiş bir kavşağa uygulanması sunulmuştur. İkinci aşamada, bir önceki aşamada önerilen yöntemin koordineli formu ile iki komşu kavşaktan oluşan bir arteriyel yol ağına uygulanan geri basınç ve TÖ’ye dayalı Webster optimal döngü formülünün uygulanması tanıtılmıştır.

5 SİMÜLASYON SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR

Bu bölümde önerilen yöntemlerin değerlendirilmeleri ve geçerlilikleri tartışılmıştır. Önerilen trafik sinyal kontrol algoritmalarının performansını ölçmek için simülasyon programı üzerinde, gerçek ve sentetik trafik senaryoları oluşturulmuştur. Kavşaklar türüne göre izole ve arteriyel kavşaklar olmak üzere iki ana bölüme ayrılmıştır. Bulanık mantık ve Webster tabanlı algoritma izole edilmiş kavşaklara uygulanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bulanık mantık ve Webster tabanlı, geri basınç ve TÖ tabanlı önerilen koordineli algoritmalar, iki komşu kavşağın ana yol ağına uygulanmaktadır.

5.1 İzole Edilmiş Kavşaklar İçin Elde Edilen Sonuçlar

Bu bölümde, izole edilmiş kavşaklar altında önerilen algoritmaların performansını değerlendirmek için simülasyon testleri yapılmaktadır. Trafik senaryoları ve elde edilen sonuçlar sonraki kısımlarda anlatılmaktadır.

5.1.1 Simülasyon ve oluşturulan senaryolar

İzole edilmiş kavşaklar altında önerilen yöntemin performansını değerlendirmek için, simülasyon testleri trafik mikro simülatörü SUMO 1.8.0 versiyonu kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Bir simülasyon ortamında önerilen algoritmanın performansını incelemek için farklı mimarilere sahip üç kavşak seçilmiştir. Şekil 5.1, 5.2 ve 5.3'te Kilis/Türkiye'de bulunan izole kavşaklar gösterilmektedir. Bu kavşaklar, gerçek trafik verilerinin kullanılabilirliği için seçilmiştir. Önerilen algoritmalar, sahadan toplanan gerçek veriler ve rastgele oluşturulan talepler kullanılarak test edilmiştir.

Sahadan toplanan gerçek trafik verileri, balıkgözü kamera aracılığıyla dijital görüntü işleme tekniği ile elde edilmiştir. Mosaş Grup şirketi tarafından geliştirilen sistem; nesneyi takip etme, girilen ve giden araçları sayma ve araçları boyutlarına göre sınıflandırma kabiliyetine sahiptir. Veriler, tarih ve saat, kavşağı geçen araçların yönleri sayısı, kalkış zamanı ve araç sınıfı (arabalar, otobüsler ve kamyonlar) gibi bilgileri içermektedir. Bu bilgiler trafik taleplerini oluşturmak için kullanılmaktadır. Trafik verilerinin toplanması her saniyede gerçekleştirilmektedir. Ancak, trafik verileri beş dakika aralıklarla kaydedilmektedir ve SQL veri tabanında tutulmaktadır. Bu gerçek

trafik veriler, kavşaklardan 11 Nisan 2018’de toplanmıştır. Bu çalışmada, üç yollu kavşak için 18 saat 25 dakikalık, dört yollu kavşak için 24 saatlik ve beş yollu kavşak için 10 saat 45 dakikalık trafik taleplerinden oluşan gerçek verilerden yararlanılmıştır. Dört yollu kavşaktan toplanan veriler, 24 saatlik bir veri olduğu için yoğun ve yoğun olmayan saatleri içermektedir. Hem arabalar hem de kamyonlar için sahadan toplanan gerçek trafik talep verilerinin bir örneği Şekil 5.4’de gösterilmektedir.

Yoğunluk durumunda önerilen algoritmanın değerlendirilmesi için (gerçek alandan toplanan veriler doygunluk durumunu içermediğinden), bir saatlik üç farklı rastgele trafik talebi oluşturulmuştur. Bu talepler bir sonraki alt kısımda ayrıntılı olarak verilmektedir. Basitlik açısından sadece dört yollu kavşak üzerinde durulmuştur.



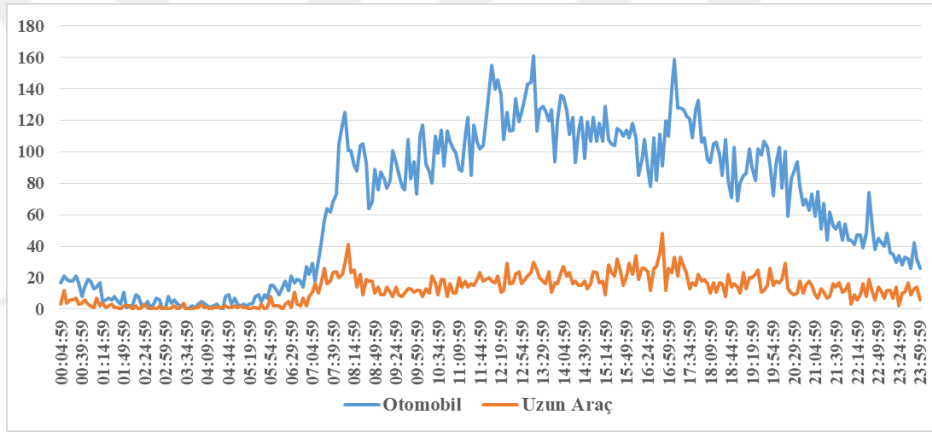
Şekil 5.1. İncelenen üç yollu izole edilmiş kavşağın yapısı



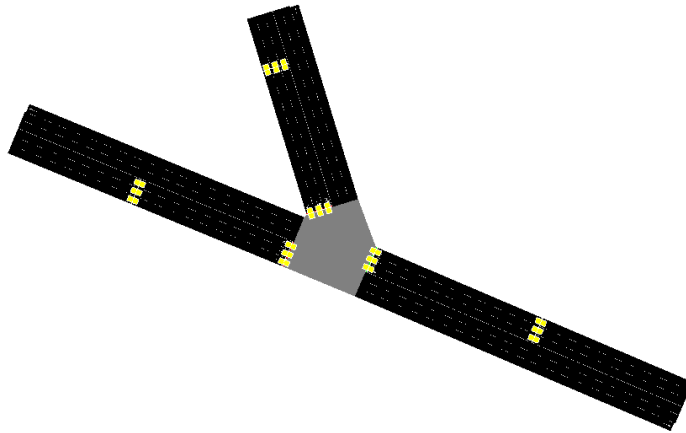
Şekil 5.2. İncelenen dört yollu izole edilmiş kavşağın yapısı



Şekil 5.3. İncelenen beş yollu izole edilmiş kavşağın yapısı

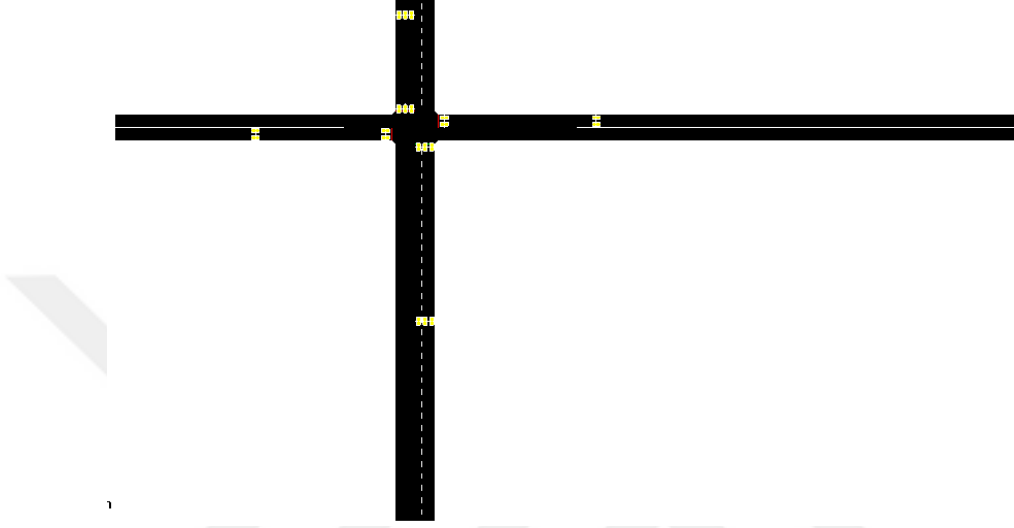


Şekil 5.4. 00:00:00 ile 23:59:59 arasındaki aralık için ölçülen trafik talepleri

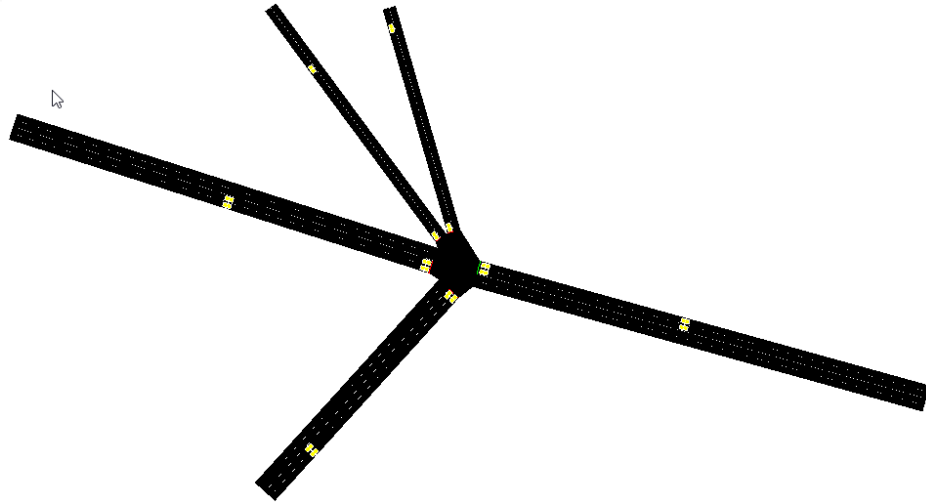


Şekil 5.5. İncelenen üç yollu izole edilmiş kavşağın simülasyon modeli

Simülasyon modeli, SUMO kullanılarak seçilen kavşaklar için oluşturulmuştur. Bu modeller, Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de gösterilmektedir. Sırasıyla Şekil 5.1’den 5.3’e kadar olan şekiller, SUMO GUI ağ dosyalarının açıklamasıdır. Bu simülasyonda, önerilen yöntemlere durum geri bildirimi sağlamak için endüktif loop dedektörleri kullanılmaktadır.



Şekil 5.6. İncelenen dört yollu izole edilmiş kavşağın simülasyon modeli



Şekil 5.7. İncelenen beş yollu izole edilmiş kavşağın simülasyon modeli

Hem sahadan toplanan gerçek veriler hem de rastgele üretilen trafik talepleri için simülasyon gerçekleştirilmektedir. Sabit sayıdaki araçlara bağlı ve rastgele üretilen taleplerin her biri, önceden tanımlanmış aralık içerisinde rastgele bir kalkış zamanına sahip olarak dağıtılmıştır. Simülasyonu gerçekleştirmek için atılan adımlar aşağıda açıklanmıştır.

Trafik verileri gerçek alanlardan toplanmış ve veri tabanında saklanmıştır. Sahadan toplanan gerçek veriler için, verilerin belirli çalışma alanındaki kavşaklara ait bölümleri SQL tablosundan seçilmiştir. Verilerden çıkarılan maksimum saatlik kritik şerit hacimleri sırasıyla üç, dört ve beş yollu kavşaklar için Çizelge 5.1, 5.2 ve 5.3'te sunulmaktadır. Üç yollu kavşak için gerçek sahadan toplanan verilerin saatlik maksimum kritik şerit hacmi Çizelge 5.1'de verilmiştir. Çizelge 5.2, gerçek alandan toplanan veriler dahil olmak üzere rastgele veri durumlarının kritik şerit hacimlerini temsil etmektedir.

Çizelge 5.1. Sahadan toplanan gerçek verilerin saatlik maksimum kritik şerit hacmi

Faz 1'in kritik şerit hacmi	Faz 2'in kritik şerit hacmi	Faz 3'in kritik şerit hacmi	Kritik şerit hacimlerinin toplamı
523	163	276	962

Dört yollu kavşak için rastgele üretilen taleplerin ve sahadan toplanan gerçek verilerin saatlik maksimum kritik şerit hacimleri Çizelge 5.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.2. Gerçek verilerin ve rastgele üretilen trafik taleplerinin kritik şerit hacimleri

Durum No	Faz 1'in kritik şerit hacmi	Faz 2'in kritik şerit hacmi	Faz 3'in kritik şerit hacmi	Faz 4'in kritik şerit hacmi	Kritik şerit hacimlerinin toplamı
Rastgele veriler 1	525	352	465	245	1587
Rastgele veriler 2	392	295	461	193	1341
Rastgele veriler 3	163	222	213	218	816
Birleşik durumlar	525	352	465	245	1587
Gerçek veriler	202	70	587	286	1145

Rastgele üretilen trafik talepleri için üç farklı durumda talepler üretilmiştir ve saatlik kritik şerit hacimleri belirlenmiştir. Burada kullanılan yöntem, yayaların talepleri dikkate alınmadan (Tang ve ark., 2019)'de kullanılan yönteme dayanmaktadır. Bu talepler yalnızca dört yollu trafik kavşağına uygulanmıştır. Birleşik durumlar için kritik şerit hacimleri maksimum duruma eşittir yani Rastgele veriler 1'deki kritik şerit hacmi maksimum olduğu için bu değer birleşik durumlar için kritik şerit hacmi değeri olarak alınmıştır.

Beş yollu kavşak için gerçek sahadan toplanan verilerin saatlik maksimum kritik şerit hacimleri Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Sahadan toplanan gerçek verilerin saatlik maksimum kritik şerit hacmi

Faz 1'in kritik şerit hacmi	Faz 2'in kritik şerit hacmi	Faz 3'in kritik şerit hacmi	Faz 4'in kritik şerit hacmi	Faz 5'in kritik şerit hacmi	Kritik şerit hacimlerinin toplamı
324	282	264	14	152	1036

Trafik talep verileri, xml SUMO rota dosyasını kullanılarak tanımlanmıştır. Şekil 5.8, rota dosyası örneğini göstermektedir. SUMO simülatörü, çalışma esnasında bu dosyayı kullanmaktadır. Rota dosyasında her aracın benzersiz ID kimliği, kalkış zamanı ve aracın içinden geçtiği yolları içermelidir. Bu dosyada her aracın rengi de isteğe bağlı olarak tanımlanabilmektedir.

```

26 <vehicle id="5.0" depart="7.91" color="red">
27   <route edges="1 33"/>
28 </vehicle>
29 <vehicle id="3.0" depart="9.74" color="red">
30   <route edges="1 22"/>
31 </vehicle>
32 <vehicle id="14.0" depart="10.31" color="magenta">
33   <route edges="3 11"/>
34 </vehicle>
35 <vehicle id="15.0" depart="12.79" color="red">
36   <route edges="3 22"/>
37 </vehicle>
38 <vehicle id="15.1" depart="18.01" color="red">
39   <route edges="3 22"/>
40 </vehicle>

```

Şekil 5.8. SUMO simülatörü tarafından kullanılabilen rota dosyası

Çizelge 5.4, Şekil 4.7’de gösterilen trafik akışına dayalı olarak dört yöllü kavşak için fazların belirlenmesini göstermektedir.

Çizelge 5.4. Fazın akışına göre belirlenmesi

Faz No	1	2	3	4
Akışlar	M_1	M_2	M_3	M_4

Verilen kritik şerit hacmini kullanarak hem Webster hem de modifiye edilmiş Webster için optimal döngü uzunluğu ve etkin faz yeşil süreleri hesaplanmaktadır. Rastgele üretilen talepler ve sahadan toplanan gerçek veriler altında dört yöllü kavşak için Webster’in optimal döngü formülünden hesaplanan optimal döngü uzunluğu ve etkin yeşil süreleri Çizelge 5.5’te verilmiştir.

Çizelge 5.5. Webster için optimal döngü uzunluğu ve etkin yeşil sürelerin dağıtımı

Durum No	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	C ₀	$\sum_{i=1}^4 y_i$
Rastgele veriler 1	60	41	53	28	194	0.881667
Rastgele veriler 2	23	17	27	11	90	0.745
Rastgele veriler 3	6	8	8	8	42	0.453333
Birleşik durumu	60	41	53	28	194	0.881667
Gerçek veriler	9	3	27	13	64	0.636111

Rastgele üretilen talepler ve sahadan toplanan gerçek veriler altında dört yollu kavşak için; modifiye edilmiş Webster optimal döngü formülünden hesaplanan optimal döngü uzunluğu ve etkin yeşil süreleri Çizelge 5.6’te verilmiştir.

Çizelge 5.6. Modifiye edilmiş Webster için optimal döngü uzunluğu ve etkin yeşil sürelerin dağıtımı

Durum No	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	C ₀	$\sum_{i=1}^4 y_i$
Rastgele veriler 1	42	28	38	20	140	0.881667
Rastgele veriler 2	22	17	26	11	88	0.745
Rastgele veriler 3	7	10	10	10	49	0.453333
Birleşik durumu	42	28	38	20	140	0.881667
Gerçek veriler	10	3	29	14	68	0.636111

Webster’in ve modifiye edilmiş Webster’in optimal döngü formülünden hesaplanan üç yollu kavşak için optimal döngü uzunluğu ve etkin yeşil süreleri Çizelge 5.7’de verilmiştir.

Çizelge 5.7. Webster ve modifiye edilmiş Webster için optimal döngü uzunluğu ve etkin yeşil sürelerin dağıtımı

Yöntem	G ₁	G ₂	G ₃	C ₀	$\sum_{i=1}^3 y_i$
Webster’in optimal döngü formülü	17	5	9	40	0.53444
Modifiye edilmiş Webster’in optimal döngü formülü	20	6	10	45	0.53444

Webster’in ve modifiye edilmiş Webster’in optimal döngü formülünden hesaplanan beş yollu kavşak için optimal döngü uzunluğu ve etkin yeşil süreleri Çizelge 5.8’de verilmiştir.

Çizelge 5.8. Webster ve modifiye edilmiş Webster optimal döngü uzunluğu ve etkin yeşil sürelerin dağıtımı

Yöntem	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅	C ₀	$\sum_{i=1}^5 y_i$
Webster'in optimal döngü formülü	15	13	12	3	7	65	0.575556
Modifiye edilmiş Webster'in optimal döngü formülü	18	15	14	3	8	73	0.575556

Bu kavşakların simülasyonunu gerçekleştirmek için dikkate alınan varsayımlar şunlardır:

- Döngü uzunluğunun aşırı düşük değerler tahmin edilmesini önlemek için sırasıyla üç yollu, dört yollu ve beş yollu kavşaklar için önceden tanımlanmış minimum 24sn, 32sn ve 40sn değerleri kullanılmıştır.
- Tüm kavşaklar için maksimum 100 sn. döngü uzunluğu kullanılmaktadır. Maksimum değeri kullanmanın amacı; aşırı doymuş bir akış meydana gelmesi durumunda döngü uzunluğunun aşırı tahminini ortadan kaldırmaktır.
- Tüm fazlar eşit zaman kaybına sahiptir.
- 1800 araç/şerit/saatlik doyumluk akışı olarak kabul edilir ((Shao ve ark., 2011; Wolput ve ark., 2016; Tang ve ark., 2019)'te dikkate alınan değerdir).
- Yollardaki trafik akışını ölçmek için endüktif loop dedektörleri kullanılmıştır.
- SUMO'nun varsayılan araç takip modeli olan modifiye edilmiş Krauß modeli kullanılmaktadır.
- 2,5 m.'lik minimum araçlar arası boşluklar kullanılmaktadır.
- SUMO varsayılan şerit değiştirme modeli kullanılmaktadır.
- Arabalar için maksimum 50 km/sa, kamyonlar için ise 30 km/sa kullanılmaktadır.
- Toplam kayıp zamanı, üç yollu kavşak için 9 saniye, dört yollu kavşak için 12 saniye ve beş yollu kavşak için 15 saniye olarak ayarlanmıştır. Sarı sinyal ile temsil edilen faz kaybı zamanı olarak her faz geçişi için 3 saniye verilmektedir.

5.1.2 Elde edilen sonuçlar ve tartışmalar

Trafik verilerine ve Bölüm 5.1.1'de sunulan adımlara dayalı olarak simülasyon gerçekleştirilmiştir. Webster formülü ile bulanık mantık ve modifiye edilmiş Webster formülü ile bulanık mantık olmak üzere iki adaptif trafik sinyal kontrol tekniği önerilmiştir. Önerilen yöntemler, sabit zamanlı Webster, sabit zamanlı modifiye edilmiş Webster formülü ve adaptif bulanık mantık tabanlı trafik kontrolü ile karşılaştırılmıştır.

Aynı koşullar altında tüm yöntemlere simülasyon uygulanmıştır. Ortalama bekleme süresi, ortalama seyahat süresi ve ortalama hız, kavşaktaki performans indeksleri olarak kullanılmaktadır. Elde edilen simülasyon sonuçları üç bölüme ayrılmıştır: dört yollu kavşak için rastgele olarak üretilen ve sahadan toplanan gerçek trafik verilerinden elde edilen sonuçlar, ayrıca üç ve beş yollu kavşaklar için gerçek sahadan toplanan verilerden elde edilen sonuçlardır.

5.1.2.1 Dört yollu kavşak için rastgele üretilen taleplerden elde edilen sonuçlar

Dört farklı rastgele trafik verisi durumu için ortalama bekleme süresi, Çizelge 5.9’da gösterilmektedir. En sıkışık durumda (Rastgele veriler 1), Webster’in optimal döngü formülü tabanlı adaptif algoritması ile önerilen adaptif bulanık mantık daha iyi performans gösterirken, Modifiye edilmiş Webster tabanlı sabit zamanlı trafik kontrolünden elde edilen en kötü performansı göstermektedir.

Rastgele dağıtılmış verilerin orta ve düşük yoğunluklu durumlarında (Rastgele veriler 2 ve Rastgele veriler 3), biraz yüksek ortalama bekleme süresi veren adaptif bulanık mantık tabanlı yöntem dışında tüm yöntemler, yaklaşık olarak aynı performansı ortaya çıkarmaktadır. Bu tür koşullarda sonuçlar, trafik hacminin sabit olması ve dolayısıyla tüm yöntemlerle hesaplanan optimal döngünün aynı etkiye sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Rastgele dağıtılmış verilerin birleşik durumunda (Rastgele veriler 1, Rastgele veriler 2 ve Rastgele veriler 3’ten birleştirilmiş), gerçek hayatta meydana gelen trafik hacimlerindeki değişimi taklit edilmektedir. Bu durumda trafik hacmi sabit olmadığından, adaptif bulanık mantık tabanlı dahil olmak üzere adaptif yöntemler, sabit zamanlı Webster ve modifiye edilmiş Webster yöntemlerine göre üstün performans göstermektedir.

Adaptif yöntemler arasında, Webster’in optimal döngü formül yöntemi ile önerilen adaptif bulanık mantık, diğer yöntemlerin üzerinde iyi performans göstermektedir.

Çizelge 5.9. Adaptif ve diğer yöntemlerin rastgele veriler için ortalama bekleme süresi açısından karşılaştırılması

Kontrol metodu Durumlar	Webster formülü	Modifiye edilmiş Webster formülü	Webster formülü ile adaptif bulanık mantık	Modifiye edilmiş Webster formülü ile adaptif bulanık mantık	Adaptif bulanık mantık tabanlı
Rastgele veriler 1	76.49 s	87.74 s	59.04 s	54.88 s	61.45s
Rastgele veriler 2	42.90 s	42.06 s	45.29 s	44.41 s	44.57 s
Rastgele veriler 3	18.18 s	18.04 s	18.20 s	19.06 s	24.51 s
Birleşik durum	80.77 s	66.78 s	40.83 s	44.39 s	46.96 s

Çizelge 5.10 ve 5.11, ortalama seyahat süresi ve ortalama hız için elde edilen sonuçları göstermektedir. Bu sonuçlar, ortalama bekleme süresinden elde edilen sonuçlarda olduğu gibi yöntemlerin benzer performansını yansıtmaktadır.

Çizelge 5.10. Adaptif ve diğer yöntemlerin rastgele veriler için ortalama seyahat süresi açısından karşılaştırılması

Kontrol metodu Durumlar	Webster formülü	Modifiye edilmiş Webster formülü	Webster formülü ile adaptif bulanık mantık	Modifiye edilmiş Webster formülü ile adaptif bulanık mantık	Adaptif bulanık mantık tabanlı
Rastgele veriler 1	113.86 s	129.03 s	91.34 s	96.27 s	100.26 s
Rastgele veriler 2	78.13 s	77.23 s	79.92 s	80.99 s	81.00 s
Rastgele veriler 3	52.35 s	51.89 s	53.50 s	52.46 s	58.53 s
Birleşik durum	118.48 s	104.02 s	76.44 s	80.34 s	83.79 s

Çizelge 5.11. Adaptif ve diğer yöntemlerin rastgele veriler için ortalama hız açısından karşılaştırılması

Kontrol metodu Durumlar	Webster formülü	Modifiye edilmiş Webster formülü	Webster formülü ile adaptif bulanık mantık	Modifiye edilmiş Webster formülü ile adaptif bulanık mantık	Adaptif bulanık mantık tabanlı
Rastgele veriler 1	17.26 km/sa	14.86 km/sa	16.84 km/sa	16.47 km/sa	14.97 km/sa
Rastgele veriler 2	19.62 km/sa	19.81 km/sa	18.96 km/sa	19.08 km/sa	17.96 km/sa
Rastgele veriler 3	24.89 km/sa	25.19 km/sa	24.63 km/sa	25.04 km/sa	23.43 km/sa
Birleşik durum	17.19 km/sa	17.31 km/sa	19.65 km/sa	19.33 km/sa	18.15 km/sa

5.1.2.2 Dört yollu kavşak için sahadan toplanan gerçek verilerden elde edilen sonuçlar

Çizelge 5.12, 5.13 ve 5.14 sırasıyla ortalama bekleme süresini, ortalama seyahat süresini ve ortalama hızı göstermektedir. Dört yollu kavşaktan elde edilen bu sonuçlar ve önerilen yöntemler arasındaki karşılaştırma, sabit zamanlı Webster ve modifiye edilmiş Webster'in formül tabanlı yöntemleri ve adaptif bulanık mantık yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu durumda, önerilen Webster'in optimal döngü formülü ve bulanık mantık tabanlı adaptif yöntem, diğer yöntemlerden daha iyi performans göstermektedir. Bu sonuçlar, rastgele olarak üretilen taleplerden elde edilen sonuçlarda olduğu gibi yöntemlerin benzer performansını yansıtmaktadır. Sabit zamanlı modifiye edilmiş Webster'in formül tabanlı yöntemi, en kötü sonucu ortaya çıkarmaktadır.

Çizelge 5.12. Gerçek saha verileri için ortalama bekleme süresi açısından adaptif ve diğer yöntemlerin karşılaştırılması

Kontrol metodu	Webster formülü	Modifiye edilmiş Webster formülü	Webster formülü ile adaptif bulanık mantık	Modifiye edilmiş Webster formülü ile adaptif bulanık mantık	Adaptif bulanık mantık tabanlı
Gerçek saha verileri	30.66sn	41.84sn	17.88sn	19.76sn	29.82sn

Çizelge 5.13. Gerçek saha verileri için ortalama seyahat süresi açısından adaptif ve diğer yöntemlerin karşılaştırılması

Kontrol metodu	Webster formülü	Modifiye edilmiş Webster formülü	Webster formülü ile adaptif bulanık mantık	Modifiye edilmiş Webster formülü ile adaptif bulanık mantık	Adaptif bulanık mantık tabanlı
Gerçek saha verileri	66.05sn	78.06sn	53.46sn	55.96sn	65.85sn

Çizelge 5.14. Gerçek saha verileri için ortalama hız açısından adaptif ve diğer yöntemlerin karşılaştırılması

Kontrol metodu	Webster formülü	Modifiye edilmiş Webster formülü	Webster formülü ile adaptif bulanık mantık	Modifiye edilmiş Webster formülü ile adaptif bulanık mantık	Adaptif bulanık mantık tabanlı
Gerçek saha verileri	24.96 km/sa	24.91 km/sa	25.55 km/sa	24.57 km/sa	22.47 km/sa

5.1.2.3 Üç ve beş yollu kavşakları için sahadan toplanan gerçek verilerden elde edilen sonuçlar

Önerilen yöntemler, sabit zamanlı Webster'in ve modifiye edilmiş Webster'in optimal döngü formül tabanlı trafik kontrol yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara dayanarak, modifiye edilmiş Webster'in optimal döngü formülüne dayalı adaptif yöntemine sahip bulanık mantık, Çizelge 5.15 ve 5.16'daki gibi ortalama bekleme süresi ve ortalama seyahat süresi açısından diğer yöntemlerden daha iyi performans göstermektedir.

Hem Webster'in hem de modifiye edilmiş Webster'in optimal döngü formülü tabanlı adaptif yöntemleri, Çizelge 5.17'de gösterildiği gibi beş ve üç yollu kavşaklar için ortalama hız açısından düşük performans sunmaktadır. Bu sonuçlar, faz sayısının artması ve önerilen yöntemlerin sabit zamanlı yöntemlere göre nispeten kısa sürelerde fazlar arasında geçiş yapmaya çalışmasından yani araçların kavşağı geçmeden tekrar durmasından ve kavşaktaki ortalama hızdan kaynaklanmaktadır.

Çizelge 5.15. Gerçek saha verileri için ortalama bekleme süresi açısından adaptif ve sabit sürenin karşılaştırılması

Kontrol metodu Durumlar	Webster formülü	Modifiye edilmiş Webster formülü	Webster formülü ile adaptif bulanık mantık	Modifiye edilmiş Webster formülü ile adaptif bulanık mantık
Üç yollu kavşak	10.65 s	10.98 s	8.60 s	7.02 s
Beş yollu kavşak	33.02 s	30.56 s	38.45 s	28.42 s

Çizelge 5.16. Gerçek saha verileri için ortalama seyahat süresi açısından adaptif ve sabit zamanın karşılaştırılması

Kontrol metodu Durumlar	Webster formülü	Modifiye edilmiş Webster formülü	Webster formülü ile adaptif bulanık mantık	Modifiye edilmiş Webster formülü ile adaptif bulanık mantık
Üç yollu kavşak	32.39 s	32.62 s	31.81 s	29.15 s
Beş yollu kavşak	64.61 s	61.22 s	73.60 s	61.16 s

Çizelge 5.17. Gerçek saha verileri için ortalama hız açısından adaptif ve sabit zaman karşılaştırması

Kontrol metodu Durumlar	Webster formülü	Modifiye edilmiş Webster formülü	Webster formülü ile adaptif bulanık mantık	Modifiye edilmiş Webster formülü ile adaptif bulanık mantık
Üç yollu kavşak	31.55 km/sa	31.46 km/sa	29.43 km/sa	31.91 km/sa
Beş yollu kavşak	29.99 km/sa	30.47 km/sa	23.56 km/sa	27.33 km/sa

5.2 Arteriyel Yol Ağı İçin Elde Edilen Sonuçlar

Bölüm 5.1’de, önerilen adaptif trafik sinyal kontrol yöntemi izole edilmiş kavşaklarda incelemiştir. Yöntemin performansı, iki karşılaştırmalı trafik kontrol sabit zamanlı (Webster ve modifiye edilmiş Webster’e dayalı) kontrol ve adaptif bulanık mantık kontrolü yöntemiyle karşılaştırılmıştır. İzole kavşak için simülasyon sonucunu yürütmek için gerçek sahadan toplanan trafik verileri kullanılmıştır. İzole kavşaklarda gerçek trafik talebini toplamanın kullanılabilirliği ve basitliği nedeniyle gerçek alan trafik verilerini kullanılmıştır.

Diğer taraftan, gerçek bir ana yol ağını simüle etmeye çalışmamanın nedeni, pratik sınırlamalarla ilgili bir arteriyel içindeki münferit araçların rota ve varış noktası bilgileri gibi gerçek alan trafik verilerin mevcut olmamasıdır. Ana yollarda önerilen yöntemlerin performansını göstermek için, yalnızca rastgele olarak üretilen trafik talepleri kullanılmaktadır. Bu bölümde, simülasyon senaryosu kurulumu ve arteriyel yol ağı için

elde edilen simülasyon sonuçları tartışılmaktadır. MKUBW, koordineli geri basınç tabanlı, döngüsel olmayan ve döngüsel TÖ tabanlı yöntemlerin performansını değerlendirmek amacıyla simülasyon incelemeleri yapılmıştır. Bu yöntemler, Bölüm 3.4’te tartışılan bir döngüsel geri basınç algoritması ile karşılaştırılmıştır.

5.2.1 Simülasyon ve oluşturulan senaryolar

Bir ana yol ağında önerilen yöntemlerin performansını değerlendirmek için, simülasyon testleri trafik mikro simülatörü SUMO 1.8.0 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tipik bir arteriyel yol ağı, trafik sinyalleri tarafından kontrol edilen iki kavşaktan oluşmaktadır. Ana yol, Şekil 5.9’da gösterildiği gibi birbirine bağlı iki kavşak için benimsenmiştir. Tüm yollar çift yönlüdür ve her yönde dört şerit mevcuttur. Ana yollardaki şeritler şu şekilde atanmıştır; en soldaki şerit sola dönüşe ayrılmıştır, sağdaki iki şerit direkt akışa ayrılmıştır ve üçüncü şerit sola dönüş ve direkt akışa arasında paylaşılmıştır. Basitlik açısından, yol ağındaki tüm sağa dönüş trafik hareketleri sıfıra eşit kabul edilmektedir.

Simülasyonu elde etmek için dikkate alınan bazı varsayımlar mevcuttur:

- Araçlar, ana yol ağına yalnızca ağı kenar düğümlerinde girip çıkmaktadır;
- Tüm kavşaklar, fazlar arasında geçiş sırasında boş zamanlardan dolayı aynı L kayıp süresine sahiptir.
- Tüm kavşaklar dört fazlıdır.
- Yaya hareketleri yok sayılmaktadır, çünkü pratikte yaya hareketleri genellikle ayrı bir yaya fazına ayrılmadan araç akışıyla eşzamanlı olarak sunulmaktadır.

Tüm araçların maksimum hızı, şerit maksimum hızına göre belirlenmektedir. Tüm şeritlerin maksimum hızı 50 km/saat olarak ayarlanmıştır. İki faz arasındaki transfer süresi (kayıp zamanı) 3 saniyeye ayarlanmakta ve her kavşaktaki tüm fazlar için sarı sinyal ile temsil edilmektedir. 1 km/saat’in altında hıza sahip araç, beklemekte olan araç veya kuyrukta bekleyen araç olarak kabul edilmektedir. t_{ti} , iki kavşak arasındaki 400 m mesafeye ve 50 km/saat hıza karşılık gelen yolculuk süresi 32 sn. olarak kabul edilmektedir.

Döngüsel geri basınç yöntemi için döngü uzunluğu 100 saniyeye ayarlanmıştır ve dönüş oranı Çizelge 5.20’de verilen trafik akışına göre hesaplanmıştır. Simülasyonu gerçekleştirmek için kullanılan TÖ tabanlı yöntemlerin hiper-parametreleri, döngüsel TÖ

tabanlı için Çizelge 5.18’de ve döngüsel olmayan TÖ tabanlı için Çizelge 5.19’da temsil edilmektedir. Simülasyonlar yukarıdaki duruma göre yapılmaktadır ve sonuçlar elde edilmektedir.

Çizelge 5.18. Döngüsel TÖ tabanlı hiper-parametre ayarı

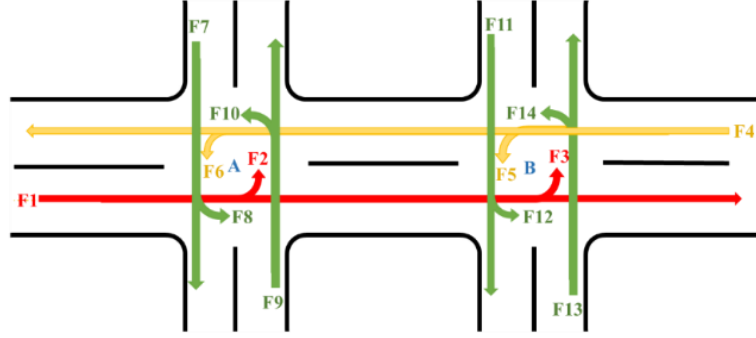
Parametre	Değeri	Açıklama
Bölüm (Episode) başına simülasyon adımı	12000sn	Çevre gözlem süresine eşdeğer
Deneyim Tekrar Belleğin kapasitesi	50000	TÖ acenteleri eğitmek için mevcut durumları, sonraki durumları, eylemleri ve ödülleri kaydetmek için ayrılan maksimum bellek alanı.
Batch boyutu	100	Acenteyi eğitmek için her dönem için rastgele seçilen batch boyutudur
Episode	200	Ortam gözlemi süresinin tekrarlama sayısı (simülasyon süresi)
Acente adımı	C_0 sn	Ajan adımı değişkendir, değerlendirilen optimal döngü uzunluğuna bağlıdır
Epoch	800	YSA parametrelerini eğitmek ve güncellemek için adımların sayısı
Optimizer	Adam	Kayıp fonksiyonunu en aza indirerek YSA parametrelerini eğitmek ve güncellemek için kullanılan optimizasyon yöntemi.
Ödül azaltma faktörü γ	0.95	TÖ acentesinin şimdiki ve gelecekteki adımlarda elde edilen ödülleri ne kadar ilgilendiğini belirlemek için kullanılan 0 ile 1 arasında gerçek bir değerdir.
Öğrenme hızı α	0.001	Öğrenme oranı, bir algoritmanın kayıp gradyanına göre YSA parametrelerinin değerlerini öğrendiği hızı kontrol etmek için kullanılan sayısal bir miktardır.
Hedef ağ güncelleme hızı τ	0.6	Hedef ağın değerlendirme ağı ile ilgili yumuşak güncellemesinin parametresidir.
Hedef ağ güncelleme sıklığı	20	Hedef ağın güncellendiği aralık sayısını temsil etmektedir
Minimum faz yeşil süresi	5 sn.	Her faz için ayrılan minimum yeşil süresini temsil etmektedir
Sarı süre	3 sn.	Bölüm 3.1’de tanımlandığı gibi faz değişikliği meydana geldiğinde kullanılan süredir.
Minimum döngü uzunluğu	32 sn.	Her kavşak için izin verilen minimum döngü uzunluğunu temsil edilmektedir
Maksimum döngü uzunluğu	120 sn.	Her kavşak için izin verilen maksimum döngü uzunluğunu temsil edilmektedir
Döngü uzunluğu güncelleme sıklığı	200 sn.	Yapılan simülasyon adımı sayısının döngü uzunluğunun nasıl güncellendiğini temsil etmektedir

Çizelge 5.19. Döngüsel olmayan TÖ tabanlı hiper-parametre ayarı

Parametre	Değeri	Açıklama
Bölüm (Episode) başına simülasyon adımı	12000 sn.	Çevre gözlem süresine eşdeğer
Deneyim Tekrar Belleğin kapasitesi	50000	TÖ acenteleri eğitmek için mevcut durumları, sonraki durumları, eylemleri ve ödülleri kaydetmek için ayrılan maksimum bellek alanı.
Batch boyutu	100	Acenteyi eğitmek için her dönem için rastgele seçilen batch boyutudur
Episode	200	Ortam gözlemi süresinin tekrarlama sayısı (simülasyon süresi)
Acente adımı	10 sn.	Ajan adımı değişkendir, değerlendirilen optimal döngü uzunluğuna bağlıdır
Epoch	800	YSA parametrelerini eğitmek ve güncellemek için adımların sayısı
Optimizer	Adam	Kayıp fonksiyonunu en aza indirerek YSA parametrelerini eğitmek ve güncellemek için kullanılan optimizasyon yöntemi.
Öğrenme hızı α	0.001	Öğrenme oranı, bir algoritmanın kayıp gradyanına göre YSA parametrelerinin değerlerini öğrendiği hızı kontrol etmek için kullanılan sayısal bir miktardır.
Ödül azaltma faktörü γ	0.95	TÖ acentesinin şimdiki ve gelecekteki adımlarda elde edilen ödülleri ne kadar ilgilendiğini belirlemek için kullanılan 0 ile 1 arasında gerçek bir değerdir.
Hedef ağ güncelleme hızı τ	0.6	Hedef ağın değerlendirme ağı ile ilgili yumuşak güncellemesinin parametresidir.
Hedef ağ güncelleme sıklığı	20	Hedef ağın güncellendiği aralık sayısını temsil etmektedir
Minimum faz yeşil süresi	5 sn.	Her faz için ayrılan minimum yeşil süresini temsil etmektedir
Sarı süre	3 sn.	Bölüm 3.1’de tanımlandığı gibi faz değişikliği meydana geldiğinde kullanılan süredir.

5.2.1.1 Farklı trafik rejimleri

Yöntemlerimize farklı trafik talepleri altında simülasyon testi yapmak için Çizelge 5.20’de gösterildiği gibi üç farklı trafik akışı oluşturulmuştur. F1, F4, F7, F9, F11 ve F13, ana yol ağı için giriş akışlarını temsil etmektedir. F2, F3, F5, F6, F8, F10, F12 ve F14 sola dönüş akışlarını temsil etmektedir. Örneğin birinci satır ana yolun batıdan doğuya (F1) bandındaki akışı 2100 araç/saat ve doğudan batıya (F4) bandındaki akış 2000 araç/saat’tir. Bu değerler arteriyel boyunca sabit kalmaktadır, çünkü $F2 = F8$, $F3 = F12$, $F5 = F14$ ve $F6 = F10$ olarak alınmıştır.



Şekil 5.9. İncelenen ana yol ağı yapısı

Çizelge 5.20. İncelenen ana yola uygulanan akışlar

Akışlar	F1/ F2/F3	F4/ F5/ F6	F7/ F8	F9/ F10	F11/ F12	F13/ F14
1. saat	2100/400/400	2000/420/420	600/400	630/420	600/400	630/420
2. saat	1050/200/200	1000/210/210	300/200	315/210	300/200	315/210
3. saat	1575/300/300	1500/315/315	450/300	473/315	450/300	473/315

Ana yol ağı için simüle edilen araçların sayısı Çizelge 5.20'ye göre oluşturulmuş ve simülasyon 10800 saniye (3 saatlik) bir sürede gerçekleştirilmiştir. Bu aralıkta 14761 araç arteriyel 'den geçirilmiştir.

5.2.1.2 Rastgele dağıtılmış akışlar

Trafik talebi doğal olarak rastgele olduğu için, trafik sinyal kontrol yöntemlerinin performans ölçümü sırasında trafik taleplerinin rastgeleliğinin etkisi dikkate alınmalıdır. Bunu başarmak için, Çizelge 5.21'de tanımlanan trafik akışını farklı tohum (seed) kullanarak eşit şekilde dağıtılmaktadır.

Çizelge 5.21. İncelenen ana yola uygulanan rastgele dağıtılmış akışlar

Akışlar	F1 / F2 / F3	F4 / F5 / F6	F7 / F8	F9 / F10	F11/ F12	F13/ F14
Bir saatlik	1400/250/250	1350/270/270	380/130	405/135	380/130	405/135

3600 saniye (bir saat) içinde rastgele dağıtılan araç sayısı 4310 araçtır.

5.2.2 Elde edilen sonuçlar ve tartışmalar

Bu bölüm, önerilen yöntemlerin performansını ölçmeye ayrılmıştır. Bu yöntemler MKUBW, geri basınç tabanlı merkezi olmayan koordineli yöntem, döngüsel olmayan ve döngüsel TÖ tabanlıdır. Önerilen yöntemler, (Varaiya, 2013)'de önerilen döngüsel geri basınç yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Simülasyon, trafik verilerine ve Bölüm 5.2.1'de sunulan adımlara dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Aynı koşullar altında simüle edilmiştir. Önerilen yöntemlerin performansı, toplam ve ortalama durma sayısı, toplam ve ortalama bekleme süresi, toplam ve ortalama seyahat süresi ve ortalama hız açısından değerlendirilmektedir. Elde edilen simülasyon sonuçları iki kısma ayrılmıştır: farklı trafik rejiminden elde edilen sonuçlar ve rastgele dağıtılmış akışlardan elde edilen sonuçlardır.

5.2.2.1 Farklı trafik rejimlerinden elde edilen sonuçlar

Farklı rejim durumundaki simülasyon sonuçları, Çizelge 5.22 ila 5.25 arasındaki çizelgelerde gösterilmektedir. Çizelge 5.22, toplam ve ortalama durma sayısını temsil etmektedir ve Çizelge 5.23, 5.24 ve 5.25, sırasıyla Standart Sapmaları (SS) ile ortalama bekleme süresini, ortalama seyahat süresini ve ortalama hızı göstermektedir. Bulanık mantık tabanlı MKUBW, döngüsel olmayan TÖ tabanlı (BÇDDTÖ-160, BÇDDTÖ-320, PSDÇDDTÖ-168 ve PSDÇDDTÖ-328), döngüsel TÖ tabanlı (Koordineli DTÖ, Koordineli ÇDTÖ, Koordineli DDTÖ Koordineli ÇDDTÖ) ve geri basınca dayalı (Koordineli geri basınç ve döngüsel geri basınç) yöntemler uygulanmıştır. Test edilen yöntemlerin toplam kuyruk uzunlukları Şekil 5.10'dan 5.20'ye kadar olan şekillerde verilmiştir.

Çizelge 5.22 ila Çizelge 5.25 arasındaki çizelgelerde ve aynı zamanda Şekil 5.21 ila Şekil 5.24 arasındaki şekillerde verilen sonuçlara dayanarak, MKUBW yönteminin diğer yöntemleri ortalama durma sayısı, ortalama bekleme süresi, ortalama seyahat süresi ve ortalama seyahat hızı açısından üstün performansa sahip olduğu açıktır. Yeşil sürelerin ayarlanması bulanık mantık sistemi aracılığıyla saniye bazında sağlanmakta olduğu için, bu yöntem daha iyi performans göstermektedir. Saniye bazındaki ayarlama, yeşil fazda hiçbir araç geçmediğinde kullanılmayan yeşil süreyi azaltmayı amaçlanmaktadır. Şekil 5.21 ve Şekil 5.22'de gösterildiği gibi, döngüsel olmayan TÖ tabanlı yöntemler en fazla durma sayısını vermesine rağmen, ortalama bekleme sürelerindeki performansları döngüsel TÖ'den elde edilenlerden daha iyidir. Çünkü döngüsel olmayan TÖ tabanlı

yöntemlerde karar verme aralıkları, döngüsel TÖ tabanlı ile karşılaştırıldığında daha kısadır. Karar verme aralıklarının kısa olması, çok faz geçişine sebep olmakta ve kuyruktaki araçların ilerlerken birden fazla durmasına neden olabilmektedir.

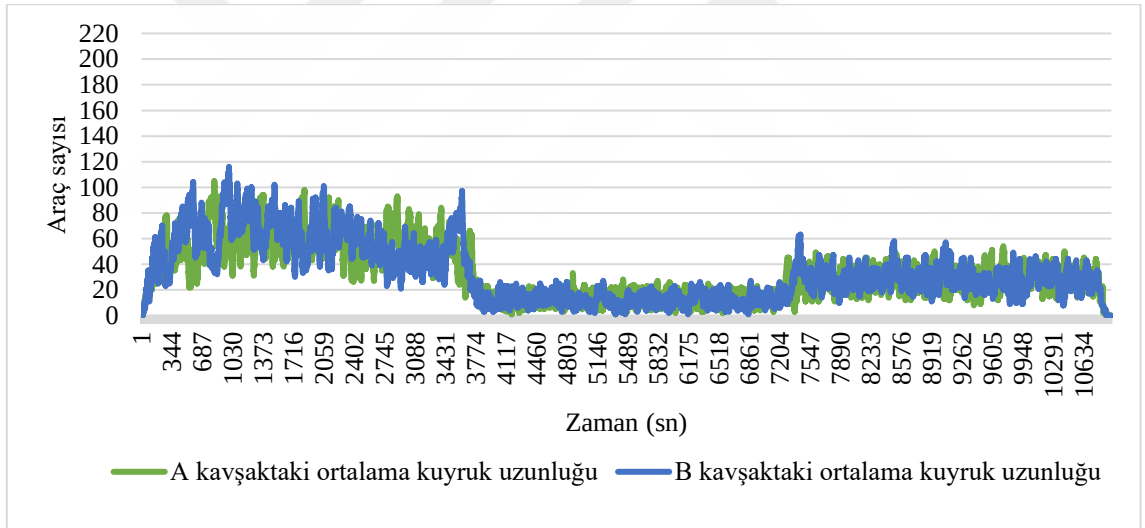
Geri basınç temelli yöntemlerde, döngüsel geri basınç yöntemi, Şekil 5.22 ile Şekil 5.24'teki gibi, ortalama bekleme süresi, ortalama seyahat süresi ve ortalama seyahat hızı açısından koordineli geri basınçtan daha iyi performans göstermektedir. Bununla birlikte, koordineli geri basınç, Şekil 5.21'de gösterildiği gibi toplam ve ortalama durma sayısı açısından döngüsel geri basınçtan biraz daha iyi performans göstermektedir. Bu, koordineli geri basınç yönteminin ana yol ağında yer alan kavşaklar arasında koordinasyon sağlayabilmesini ifade etmektedir. Şekil 5.22 ve Şekil 5.24'te gösterildiği gibi, ortalama bekleme süresi ve ortalama seyahat hızı performans açısından, karşılaştırmalı (döngüsel geri basınç) yöntemini geride bırakan BÇDDTÖ-320 yöntemi dışında iyi sonuçlar vermiştir. Karşılaştırmalı yöntem, toplam ve ortalama durma sayısı, ortalama bekleme süresi, ortalama seyahat süresi ve ortalama seyahat hızı açısından döngüsel ve döngüsel olmayan TÖ tabanlı yöntemlerden daha iyi performans göstermektedir.

Çizelge 5.22 ile 5.25'te gösterildiği gibi, döngüsel olmayan TÖ tabanlından elde edilen sonuçlara dayanarak, BÇDDTÖ-320 yönteminin, Şekil 5.21 ile Şekil 5.23'te tasvir edildiği gibi diğer döngüsel olmayan RL tabanlı yöntemlere göre daha iyi performans gösterdiği açıktır. BÇDDTÖ-160 ve PSDÇDDTÖ-168 yöntemleri yaklaşık olarak benzer sonuçlar sunmaktadır, bu da komşu kavşağın sinyal durumlarının yalnızca araç konumlarıyla paylaşılmasının performansı artırmayabileceği anlamına gelmektedir. PSDÇDDTÖ-328 yöntemi, döngüsel olmayan TÖ tabanlı yöntemler arasında en kötüsü olarak kabul edilmektedir. Bu, trafik sinyali durumlarının paylaşımının, durum olarak araç konumları ve hızları ile olumsuz yönde etkilendiği ifade etmektedir.

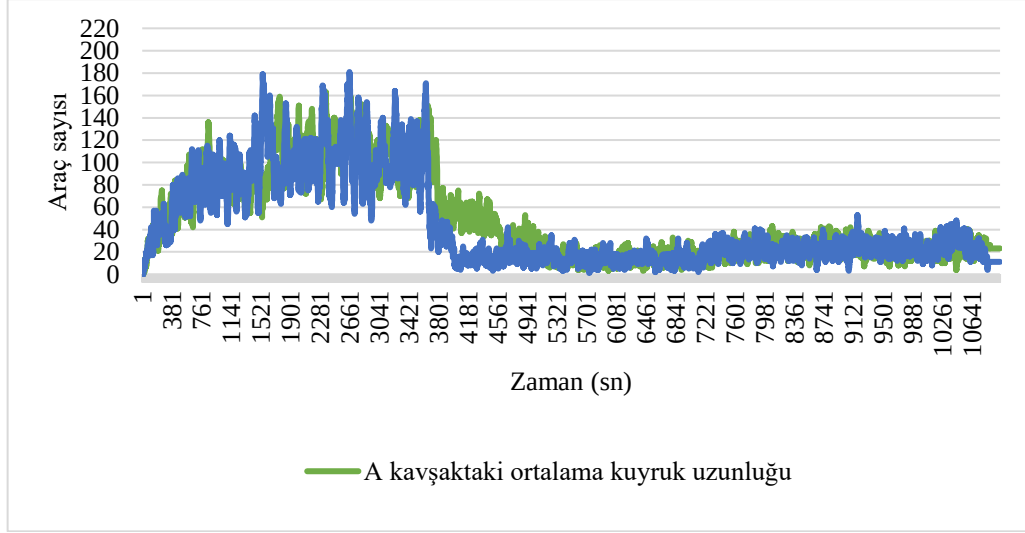
Diğer yandan, döngüsel TÖ tabanlı yöntemler arasından koordineli ÇDDTÖ yöntem, diğer döngüsel TÖ tabanlı yöntemlerinden Şekil 5.22 ile Şekil 5.23'te gösterildiği gibi ortalama bekleme süresi, ortalama seyahat süresi ve ortalama seyahat hızı açısından performansa arttığını fark edilebilmektedir. Daha sonra, beklenildiği gibi ÇDDTÖ ile elde edilen en iyi sonuç, ÇDDTÖ 'nin modelin eğitimini geliştirdiği ve sonucu etkili bir şekilde iyileştirdiği anlamına gelmektedir. DTÖ, ÇDTÖ ve DDTÖ yöntemleri yaklaşık olarak benzer performans sonuçları sunmaktadır. Yöntemlerin test edilmesi sırasında ölçülen kuyruk uzunlukları, Şekil 5.10 ile Şekil 5.20'de sunulmuştur. Diğer performans endekslerinde olduğu gibi, MKUBW yöntemi, Şekil 5.10'da

gösterildiği gibi, üç farklı rejimde daha az varyasyonla ve kuyruk uzunlukları açısından diğer yöntemlerden üstün başarımlar göstermektedir.

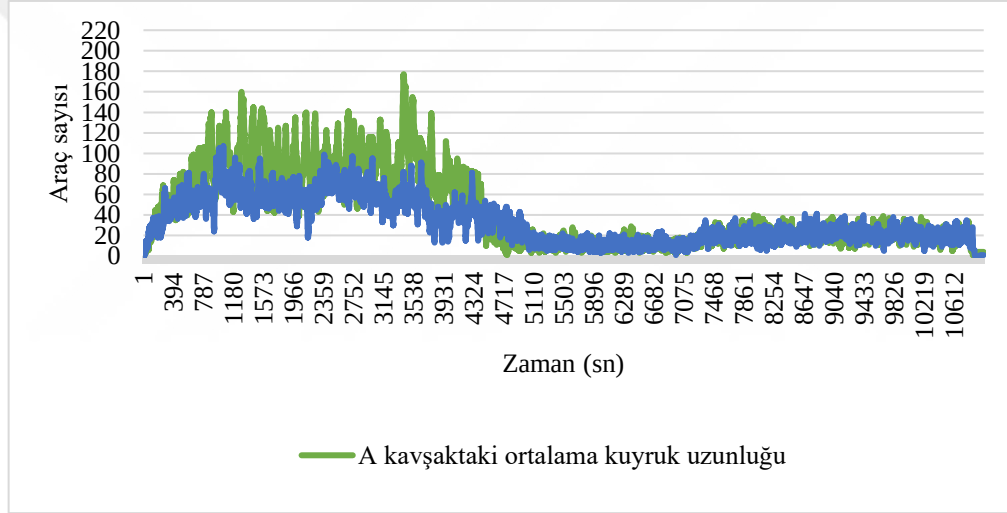
Döngüsel geri basınç yöntemi için toplam kuyruk uzunluğu değişimi, aşırı doymuş rejim durumunda MKUBW 'den elde edilen varyasyondan daha az olsa da, Şekil 5.10 ve Şekil 5.20'de gösterildiği gibi daha uzun toplam kuyruk uzunluğuna sahip olduğu fark edilmektedir. Hem döngüsel hem de döngüsel olmayan TÖ tabanlı sunulan toplam kuyruk uzunlukları, Şekil 5.11'den Şekil 5.18'e kadar gösterildiği gibi yüksek varyasyonla daha uzundur. Koordineli geri basınç yönteminden elde edilen toplam kuyruk uzunlukları, döngüsel ve döngüsel olmayan TÖ tabanlı yöntemlerinden elde edilenden daha iyi kabul edilmektedir. Genel olarak, önerilen MKUBW yöntemi, farklı trafik rejimleri için toplam ve ortalama durma sayısı, ortalama bekleme süresi, ortalama seyahat süresi, ortalama seyahat hızı ve toplam kuyruk uzunlukları açısından diğer yöntemlerden daha iyi performans göstermektedir.



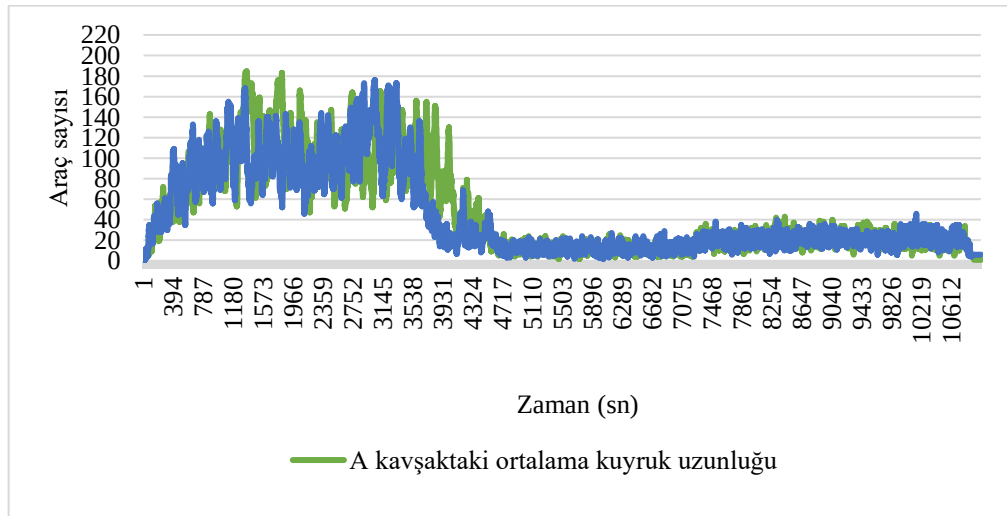
Şekil 5.10. MKUBW kontrol yönteminin toplam kuyruk uzunlukları



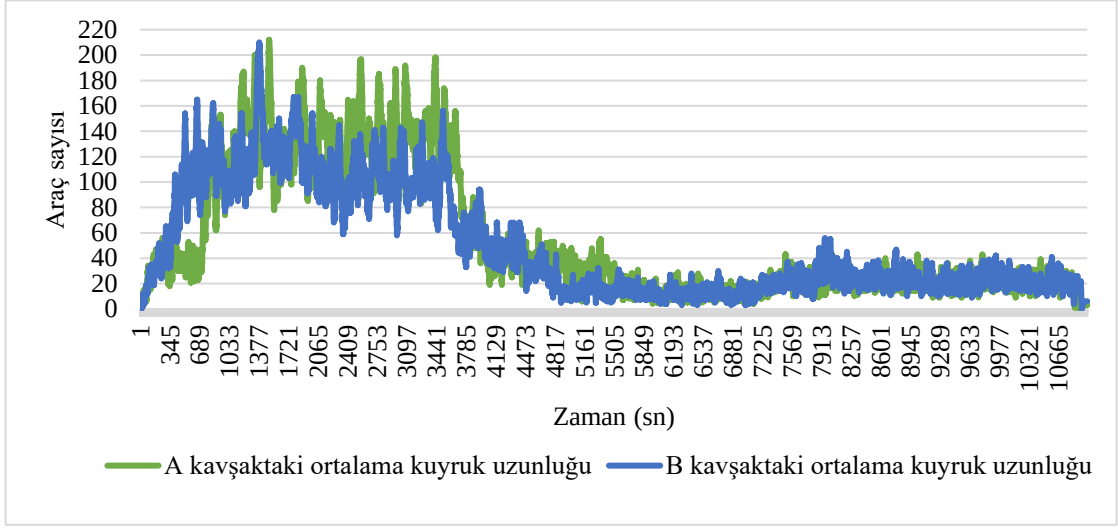
Şekil 5.11. BÇDDTÖ-160 kontrol yönteminin toplam kuyruk uzunlukları



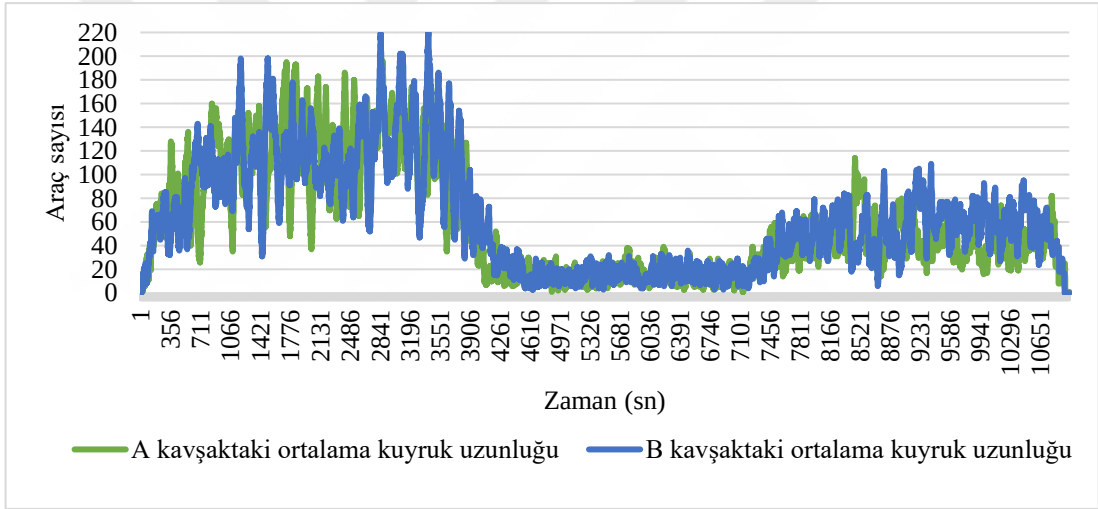
Şekil 5.12. PSDÇDDTÖ-168 kontrol yönteminin toplam kuyruk uzunlukları



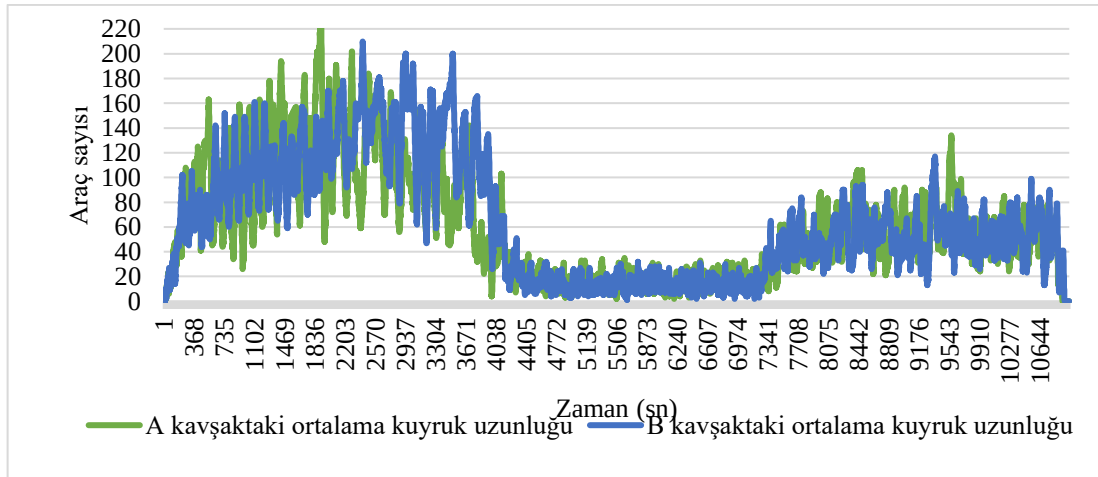
Şekil 5.13. BÇDDTÖ-320 kontrol yönteminin toplam kuyruk uzunlukları



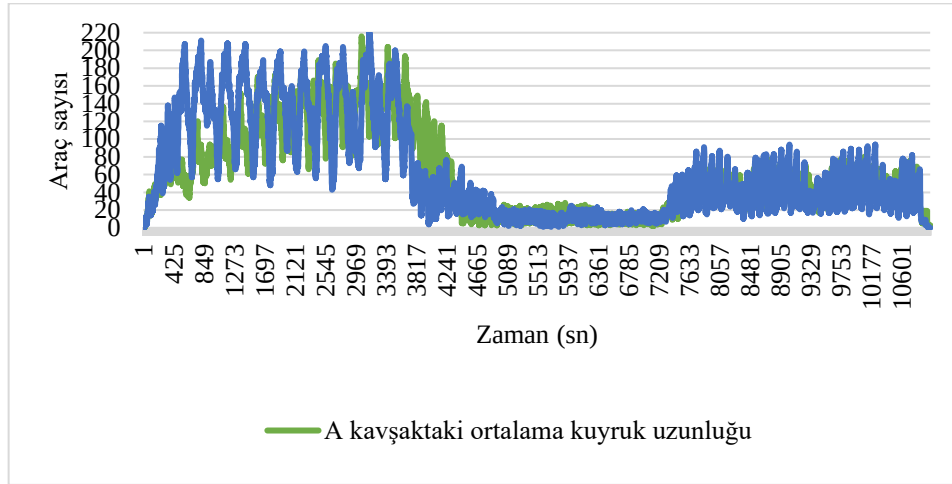
Şekil 5.14. PSDÇDDTÖ-328 kontrol yönteminin toplam kuyruk uzunlukları



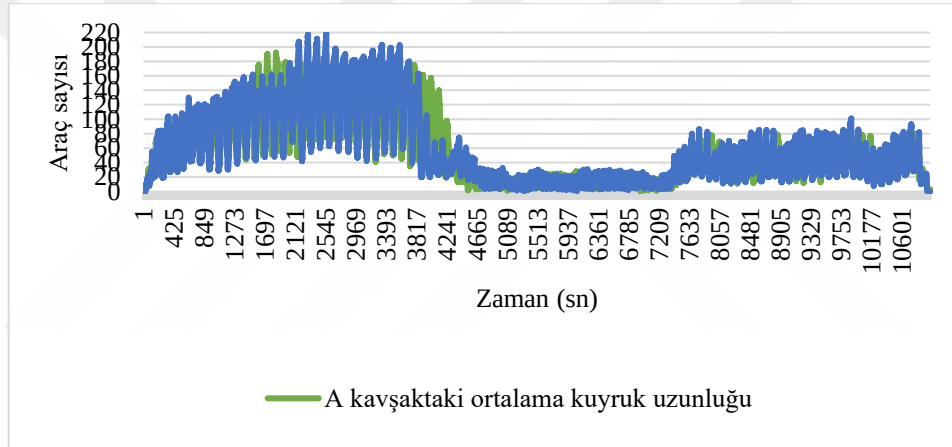
Şekil 5.15. Koordineli DTÖ kontrol yönteminin toplam kuyruk uzunlukları



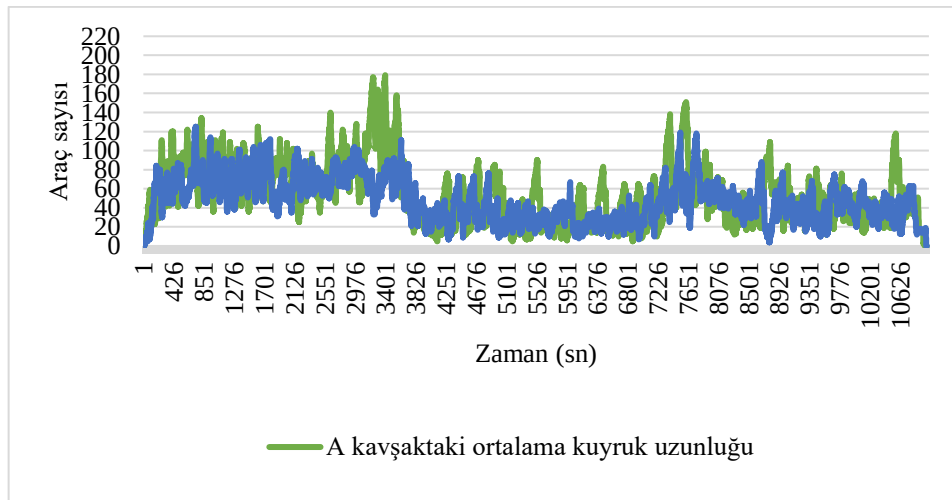
Şekil 5.16. Koordineli ÇDTÖ kontrol yönteminin toplam kuyruk uzunlukları



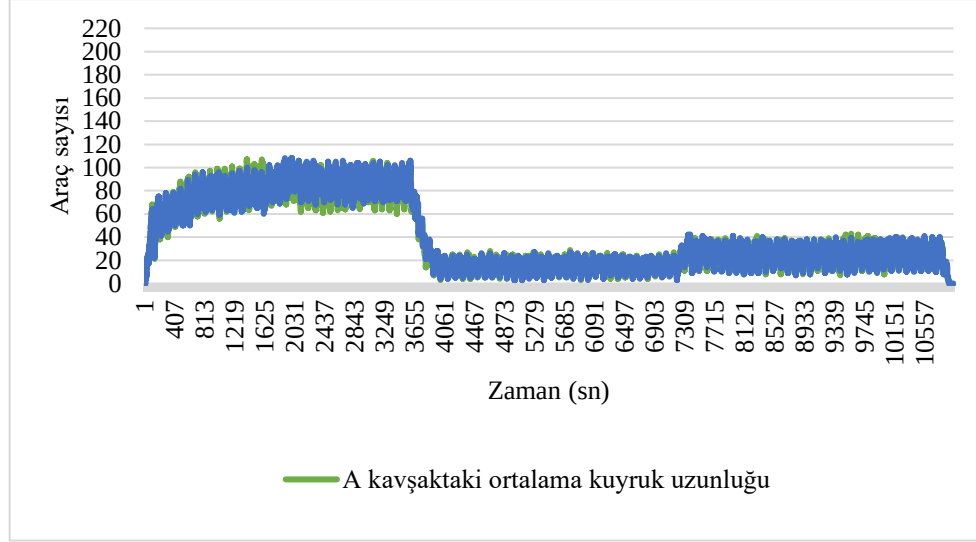
Şekil 5.17. Koordineli DDTÖ kontrol yönteminin toplam kuyruk uzunlukları



Şekil 5.18. Koordineli ÇDDTÖ kontrol yönteminin toplam kuyruk uzunlukları



Şekil 5.19. Koordineli geri basınç kontrol yönteminin toplam kuyruk uzunlukları



Şekil 5.20. Döngüsel geri basınç kontrol yönteminin toplam kuyruk uzunlukları

Çizelge 5.22. Arteriyel yol ağının toplam ve ortalama durma sayısı

Kontrol Yöntemi	Toplam arteriyel yol ağından geçen araç sayısı	Toplam durma sayısı	Ortalama durma sayısı
MKUBW	14761	21663	1.47
BÇDDTÖ-160	14727	37375	2.54
PSDÇDDTÖ-168	14754	38382	2.60
BÇDDTÖ-320	14756	29970	2.03
PSDÇDDTÖ-328	14752	41791	2.83
Koordineli DTÖ	14761	26999	1.83
Koordineli ÇDTÖ	14761	27403	1.86
Koordineli DDTÖ	14761	27346	1.85
Koordineli ÇDDTÖ	14761	27310	1.85
Koordineli geri basınç	14761	25128	1.70
Döngüsel geri basınç	14761	25496	1.73

Çizelge 5.23. Arteriyel yol ağının ortalama bekleme süresi ve ortalama bekleme süresin SS'si

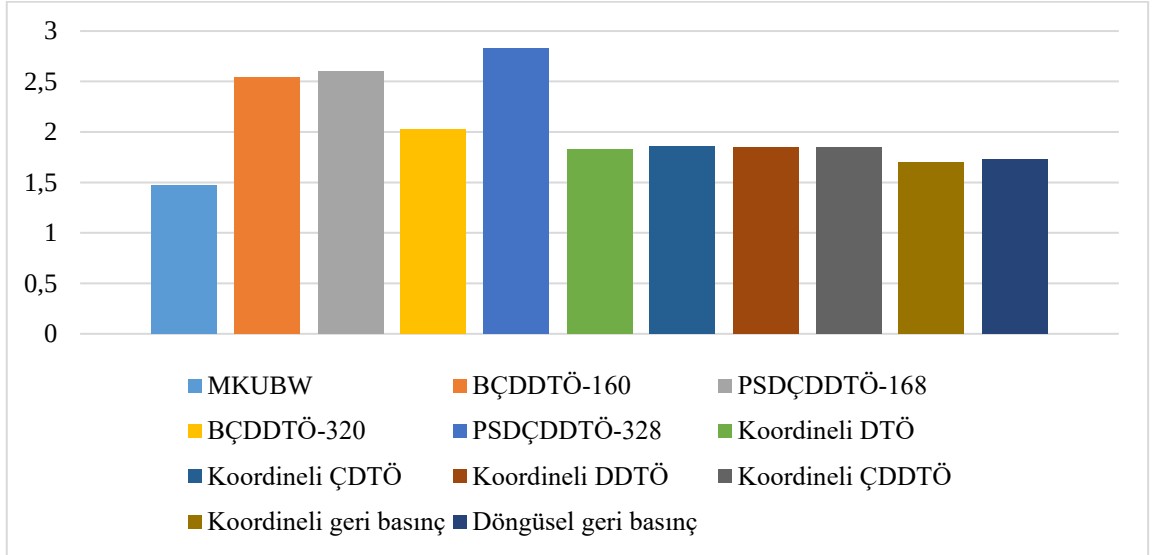
Kontrol Yöntemi	Ortalama bekleme süresi (saniye)	Ortalama bekleme süresin SS'si
MKUBW	46.90	37.59
BÇDDTÖ-160	66.59	91.60
PSDÇDDTÖ-168	66.45	88.47
BÇDDTÖ-320	55.49	70.71
PSDÇDDTÖ-328	75.74	102.69
Koordineli DTÖ	88.40	70.84
Koordineli ÇDTÖ	90.55	71.78
Koordineli DDTÖ	90.99	78.07
Koordineli ÇDDTÖ	83.45	71.28
Koordineli geri basınç	75.43	54.07
Döngüsel geri basınç	57.76	48.29

Çizelge 5.24. Arteriyel yol ağının ortalama seyahat süresi ve ortalama seyahat süresin SS'si

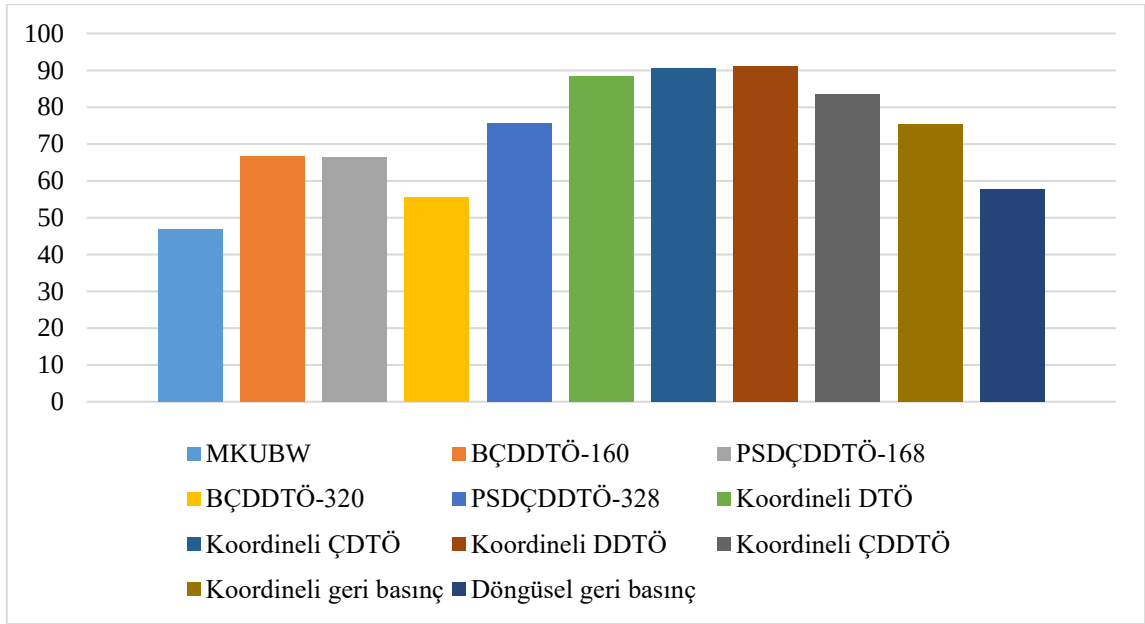
Kontrol Yöntemi	Ortalama seyahat süresi (saniye)	Ortalama seyahat süresin SS'si
MKUBW	116.39	49.59
BÇDDTÖ-160	150.19	129.34
PSDÇDDTÖ-168	150.29	129.91
BÇDDTÖ-320	132.45	90.82
PSDÇDDTÖ-328	161.64	137.35
Koordineli DTÖ	164.04	91.78
Koordineli ÇDTÖ	166.35	91.62
Koordineli DDTÖ	166.79	98.80
Koordineli ÇDDTÖ	158.83	92.84
Koordineli geri basınç	147.66	71.13
Döngüsel geri basınç	128.01	55.67

Çizelge 5.25. Arteriyel yol ağının ortalama seyahat hızı ve ortalama seyahat hızının SS'si

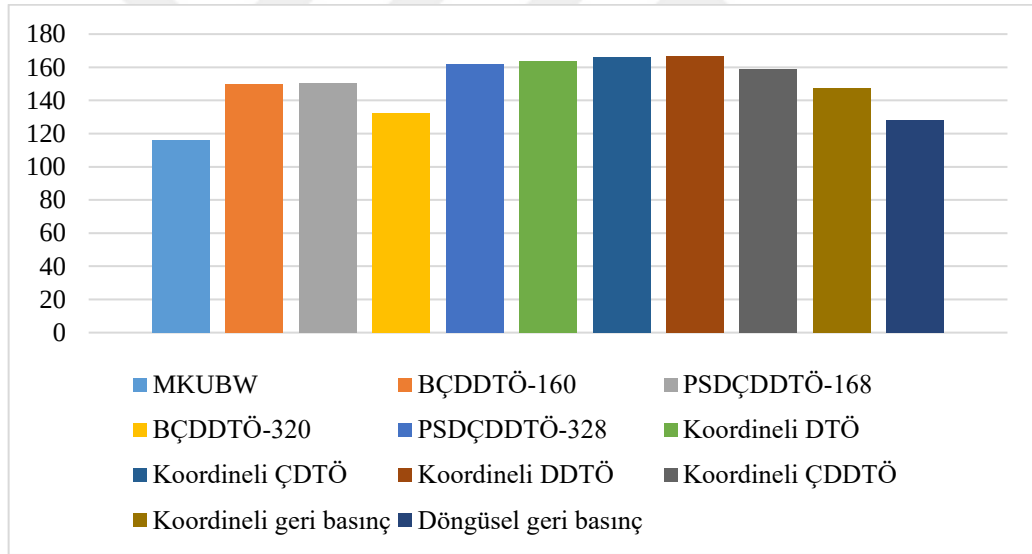
Kontrol Yöntemi	Ortalama seyahat hızı (km/sa)	Ortalama seyahat hızının SS'si
MKUBW	23.69	8.68
BÇDDTÖ-160	22.39	9.94
PSDÇDDTÖ-168	22.50	9.76
BÇDDTÖ-320	23.47	9.61
PSDÇDDTÖ-328	21.64	10.04
Koordineli DTÖ	18.83	9.14
Koordineli ÇDTÖ	18.58	9.11
Koordineli DDTÖ	19.01	9.50
Koordineli ÇDDTÖ	19.55	9.22
Koordineli geri basınç	19.69	8.46
Döngüsel geri basınç	22.25	10.04



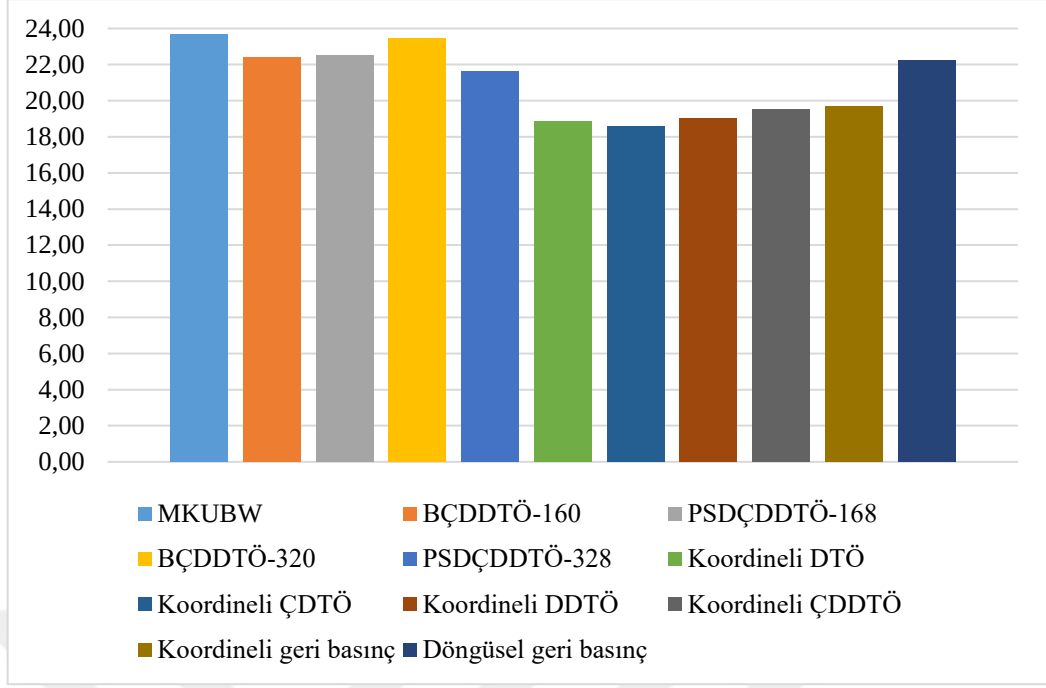
Şekil 5.21. Test edilen yöntemlerin ortalama durma sayısı



Şekil 5.22. Test edilen yöntemlerin ortalama bekleme süresi



Şekil 5.23. Test edilen yöntemlerin ortalama seyahat süresi



Şekil 5.24. Test edilen yöntemlerin ortalama seyahat hızı

5.2.2.2 Rastgele dağıtılmış akışlardan elde edilen sonuçlar

Trafik taleplerinin rastgeleliğinin etkisi altında önerilen yöntemlerin etkililiğini değerlendirmek ve incelemek amacıyla, MKUBW ve koordineli ÇDDTÖ yöntemlerinin performansını test etmek için rastgele dağıtılmış akışları kullanmaktadır. Rastgele dağıtılmış talepler durumunda simülasyon sonuçları, Çizelge 5.26 ile Çizelge 5.29'da gösterilmektedir. Bu çizelgeler, sırasıyla toplam ve ortalama durma sayısını, standart sapmaları ile ortalama bekleme süresini, ortalama seyahat süresini ve ortalama hızını temsil etmektedir. Bu sonuçlar, farklı rastgele tohum (seed) çalıştırdığı 10 simülasyonun ortalama değerlerinin hesaplanmasıyla elde edilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, MKUBW, farklı trafik rejimlerinde olduğu gibi koordineli ÇDDTÖ yönteminden daha iyi performans göstermektedir. Rastgele talep altında test edilen yöntemlerin toplam kuyruk uzunlukları Şekil 5.25 ve 5.26'da gösterilmektedir.

Bu sonuçlara göre, MKUBW yönteminin, Şekil 5.27 ile Şekil 5.30'da gösterildiği gibi, ortalama durma sayısı, ortalama bekleme süresi, ortalama seyahat süresi ve ortalama seyahat hızı açısından koordineli ÇDDTÖ yönteminden üstünlük gösterdiği açıktır. Rastgele dağıtılmış akışlar altındaki koordineli ÇDDTÖ, Bölüm 5.2.2.1'de tartışılan farklı trafik rejimlerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında daha iyi performans göstermektedir.

Ortalama 10 simülasyon çalışmasından elde edilen toplam kuyruk uzunlukları, Şekil 5.25 ve Şekil 5.26’da gösterildiği gibi, MKUBW yönteminin daha az varyasyon ve kısa kuyruk uzunluğu ile toplam kuyruk uzunlukları açısından koordineli ÇDDTÖ yöntemini kıyasladığında daha iyi performans sağladığını göstermektedir.

Çizelge 5.26. Ana yol ağının toplam ve ortalama durma sayısı

Kontrol Yöntemi	Toplam arteryel yol ağından geçen araç sayısı	Toplam durma sayısı	Ortalama durma sayısı
MKUBW	4310	5862	1.36
Koordineli ÇDDTÖ	4310	6250	1.45

Çizelge 5.27. Ana yol ağının ortalama bekleme süresi ve ortalama bekleme süresinin SS’si

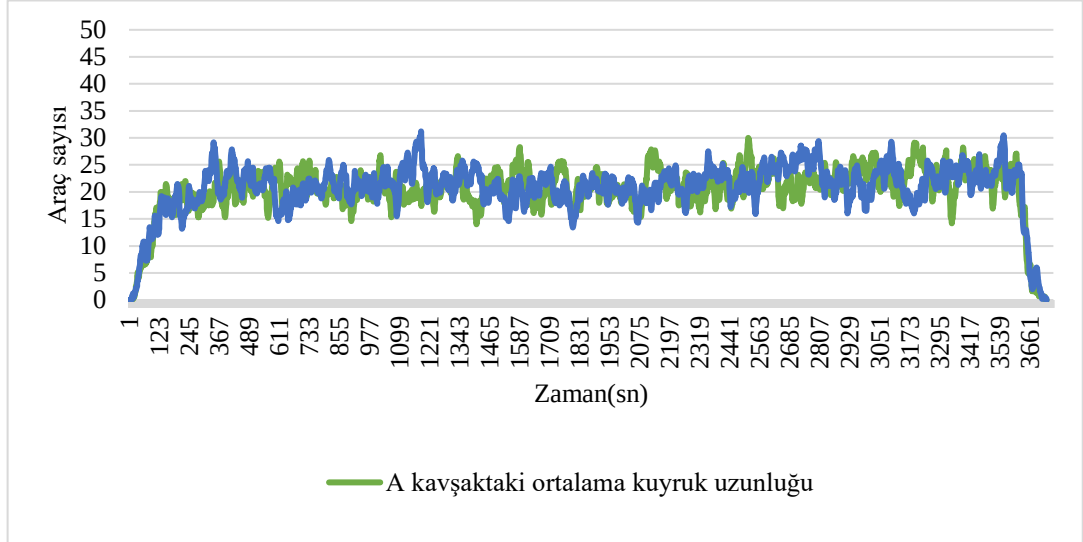
Kontrol Yöntemi	Ortalama bekleme süresi (saniye)	Ortalama bekleme süresin SS’si
MKUBW	35.43	28.74
Koordineli ÇDDTÖ	44.93	33.19

Çizelge 5.28. Ana yol ağının ortalama seyahat süresi ve ortalama seyahat süresinin SS’si

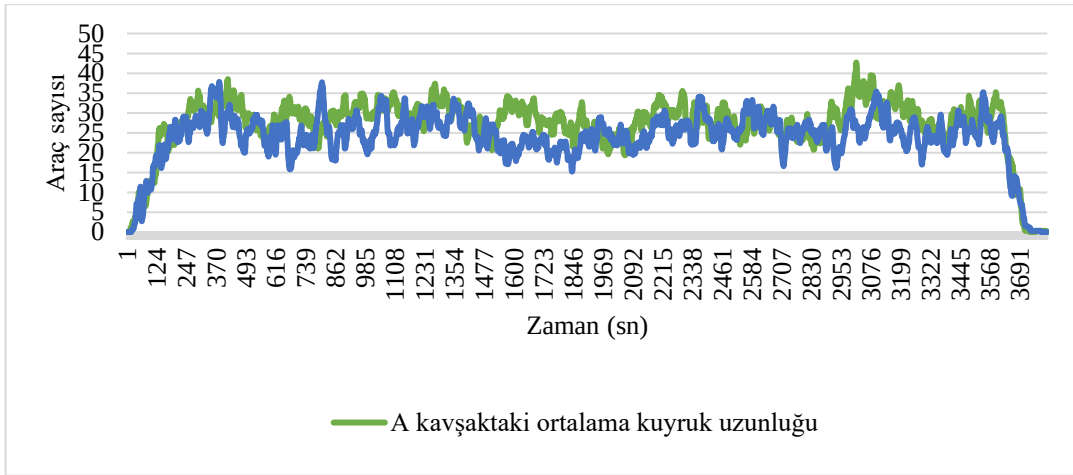
Kontrol Yöntemi	Ortalama seyahat süresi (saniye)	Ortalama seyahat süresin SS’si
MKUBW	99.99	41.50
Koordineli ÇDDTÖ	112.05	47.90

Çizelge 5.29. Ana yol ağının ortalama seyahat hızı ve ortalama seyahat hızının SS’si

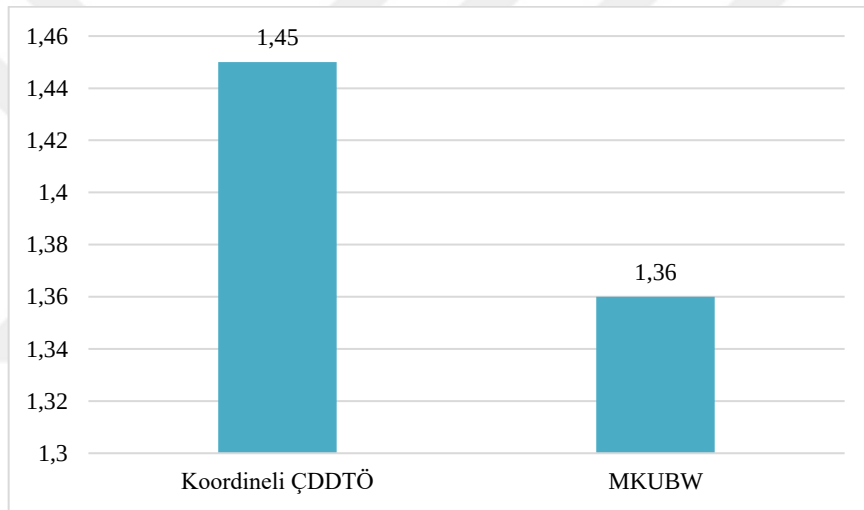
Kontrol Yöntemi	Ortalama seyahat hızı (km/sa)	Ortalama seyahat hızının SS’si
MKUBW	27.36	9.29
Koordineli ÇDDTÖ	24.80	8.96



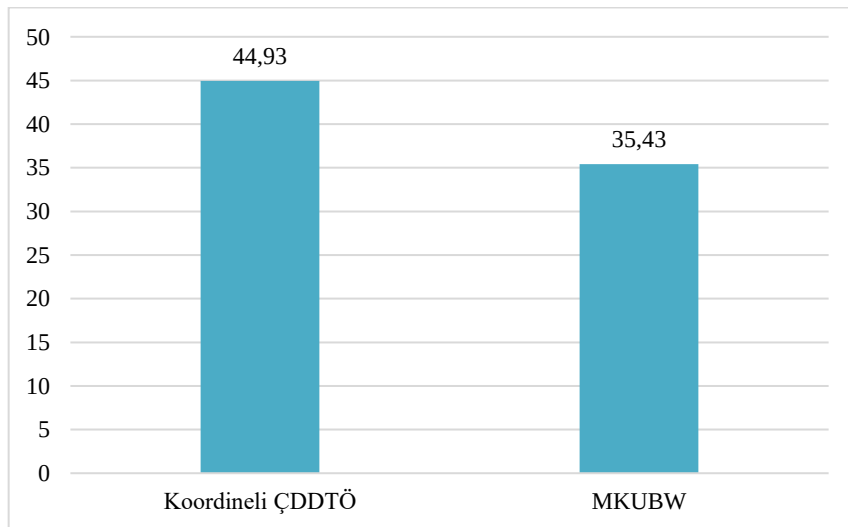
Şekil 5.25. Rastgele talep altında MKUBW ‘nin toplam kuyruk uzunlukları



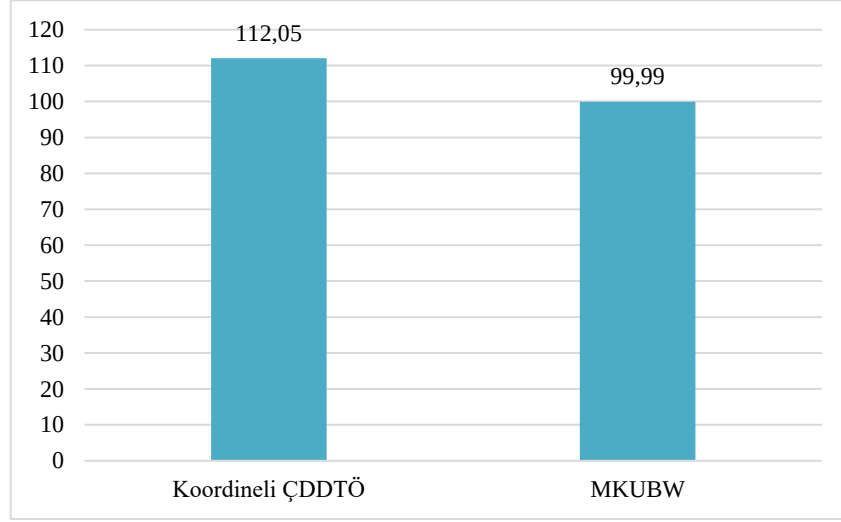
Şekil 5.26. Rastgele talep altında ÇDDTÖ'nin toplam kuyruk uzunlukları



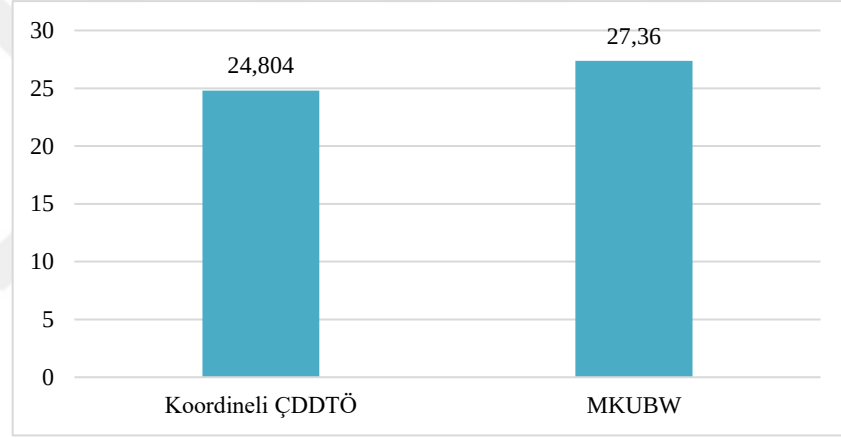
Şekil 5.27. Rastgele talep altında ortalama durma sayısı



Şekil 5.28. Rastgele talep altında ortalama araç bekleme süresi



Şekil 5.29. Rastgele talep altında ortalama araç seyahat süresi



Şekil 5.30. Rastgele talep altında ortalama araç seyahat hızı

Önerilen yöntemlerin başarı değerlendirmesine bu bölümde yer verilmiştir. Hem izole edilmiş hem de arteriyel kavşak tipleri için elde edilen simülasyon sonuçları ve tartışmalar ele alınmıştır. İzole kavşaklar için gerçek saha trafik verileri ve rastgele oluşturulmuş trafik talepleri kullanılmıştır. Ana yol ağı için ise sadece rastgele oluşturulmuş trafik talepleri kullanılmıştır. Önerilen adaptif trafik sinyal kontrol yönteminin performansı, iki karşılaştırmalı (sabit zamanlı trafik kontrolü ve adaptif bulanık mantık trafik kontrolü) trafik kontrol yöntemi ile karşılaştırılarak izole edilmiş bir kavşak üzerinde incelenmiştir. Bir ana yol ağı için önerilen yöntemler şunları içermektedir: MKUBW, koordineli geri basınç tabanlı, döngüsel ve döngüsel olmayan TÖ tabanlı yöntemlerdir. Bu yöntemlerin performansını değerlendirmek için simülasyon testleri yapılmıştır ve kıyaslama olarak bir döngüsel geri basınç algoritması kullanılmıştır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölümde araştırmanın sonucu ve gelecek önerileri sunulmaktadır. Gerçek kavşaklarda trafik sinyal kontrol algoritmalarının performansını ölçmenin zorluğundan dolayı önerilen yöntemler, gerçek ve rastgele olarak üretilen trafik talepleri ile SUMO trafik simülatörü kullanılarak test edilmiştir.

6.1 Sonuçlar

Büyük ve kalabalık şehirlerde akıllı trafik sinyal kontrol sistemlerinin uygulanmasının gerekliliği, tıkanıklık fenomeni nedeniyle her geçen gün artmaktadır. Bu tezde gerçekleştirilen araştırma, adaptif trafik sinyal kontrolü alanlarında önemli bir katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada, akıllı şehirlerin ihtiyacını karşılayan arteriyelin ana yolları ve yan yolları dikkate alarak bir kentsel alan arteriyel yol ağı için merkezi olmayan yeni bir yaklaşım olarak hibrid KATSK önerilmektedir. Bu yöntemde, bulanık mantığa ve Webster'in optimal döngü formülüne dayanan adaptif trafik sinyal kontrolü, bir koordinasyon mekanizması olmadan izole edilmiş kavşaklara uygulanmıştır.

İzole kavşaklar için, Webster ile bulanık mantık ve modifiye edilmiş Webster optimal döngü formülü ile bulanık mantık adı verilen iki önerilen adaptif trafik sinyal kontrol algoritmasının simülasyonu, üç farklı yapıya sahip kavşaklara uygulanmıştır. Adaptif bulanık mantık ve sabit zamanlı Webster ve modifiye edilmiş Webster'in formüle dayalı trafik sinyal kontrolü kıyaslama yöntemleri olarak kullanılmıştır.

Simülasyonlar, rastgele olarak üretilen talepler ve sahadan toplanan gerçek verilere dayalı olarak gerçekleştirilmiştir. Dört yaklaşımlı kavşak durumunda, önerilen iki adaptif trafik sinyal kontrol algoritması, diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında ortalama bekleme süresi, ortalama seyahat süresi ve ortalama hız açısından bir performans artışı göstermiştir. Ancak önerilen yöntemlerimizin, beş fazlı kavşağın faz değiştirme maliyeti nedeniyle beş yollu kavşak durumunda ortalama hız açısından dezavantajlı olduğu görülmüştür.

Elde edilen sonuçlara göre, önerilen yöntemler, zamanla büyük ölçüde değişen trafik talepleri durumunda daha iyi performans göstermiştir. Webster formülü ile önerilen adaptif bulanık mantık, modifiye edilmiş Webster formülü tabanlı yöntemine kıyasla üstünlüğü nedeniyle önerilmektedir. Son olarak, yöntemlerimiz, trafik verilerinin daha

fazla kalibrasyonu dikkate alınarak daha karmaşık senaryolara genişletilerek kavşak performansını iyileştirmek için gerçek izole kavşaklara uygulanabilmektedir.

Ana yol ağı için, merkezi bir yöntemde koordineli adaptif trafik sinyal kontrolünün ana zorluğu, ağ boyutu büyüdükçe keşfedilecek ortak eylem sayısının katlanarak artmasıdır. Dolayısıyla önerilen trafik sinyal kontrol yöntemleri merkezi olmayan yöntemlerdir, sadece komşu kavşakları dikkate alarak boyutluluk etkisi olmadan koordinasyon sağlamaktadır.

Kavşaklar arasındaki koordinasyonu sağlamak amacıyla araçların sonraki kavşağa ulaşmak için kalan süresine bağlı olarak her döngü süresinin başında fazların yeniden sıralaması yapılmaktadır. Önerilen koordineli yöntemler arasında bulunan, MKUBW, koordineli geri basınç, döngüsel TÖ ve döngüsel olmayan TÖ tabanlı yöntemler iki komşu kavşağın ana yol ağına uygulanmıştır. Önerilen yöntemlerimizin ana yollarda performansını göstermek için rastgele olarak oluşturulan trafik talepleri kullanılmıştır.

MKUBW stratejisinde, trafik talepleri ve koordineli fazların kalan süresi gibi bilgiler, birbirine bağlı olan kavşaklar arasındaki koordinasyonu sağlamak için yerel ve komşu kavşaklar arasında paylaşılmaktadır. Bu yöntemde kullanılan algoritma sayesinde, iki kavşak arasındaki ofsetin ayarlanması ve faz sırasının yeniden sıralanması ile koordinasyonun sağlanmaktadır. Bunu gerçekleştirmek için, koordineli fazın kalan süresi ve seyahat süresi kullanılmaktadır. Elde edilen sonuçlar, yöntemin diğer yöntemlere göre daha iyi performans gösterdiğini ve gerçek alanda uygulanabileceğini göstermektedir.

Döngüsel TÖ tabanlı stratejide, mevcut faz sırası, faz yeşil süreleri, optimal döngü uzunluğu ve koordineli fazların kalan süresi gibi bilgiler, ardışık kavşaklar arasındaki koordinasyonu sağlamak için yerel ve komşu kavşaklar arasında paylaşılmaktadır. Bu yöntemde, ajan, iki kavşak arasındaki ofseti ayarlamak için faz sırasını yeniden sıralayan eylem uzayından en iyi eylemi seçerek koordinasyonu gerçekleştirmektedir.

Döngüsel olmayan TÖ tabanlı stratejide, sadece mevcut faz bilgileri, ardışık kavşaklar arasındaki koordinasyonu sağlamak için yerel ve komşu kavşaklar arasında bilgi alışverişi yapılmaktadır. Bu yöntemde, ajan, iki kavşak arasındaki ofseti ayarlamak için eylem uzayından ödül fonksiyonu maksime eden eylemi seçerek koordinasyonu gerçekleştirmeye çalışmaktadır. Elde edilen sonuçlardan, döngüsel olmayan TÖ tabanlı stratejinin döngüsel TÖ tabanlı stratejiden daha iyi performans gösterdiği açıktır. Bunun iki nedeni vardır: döngüsel stratejide, (1) kavşaktaki tüm tanımlanan fazları her döngüde atlanmadan yürütülmektedir, (2) her faz için yaya kullanımlarına karşılık gelen minimum yeşil zaman ayrılmıştır.

Koordineli geri basınç stratejisinde, trafik talepleri, koordineli kalan süre ve kuyruk uzunlukları gibi bilgiler, birbirini bağılı olan kavşaklar arasındaki koordinasyonu sağlamak için yerel ve komşu kavşaklar arasında paylaşmaktadır. Bu yöntemde, algoritma, fazın basıncına göre döngü uzunluğunu fazlar arasında dağıtmakta ve iki kavşak arasındaki ofseti ayarlamak için faz sırasını yeniden sıralayarak koordinasyonu gerçekleştirmeye çalışmaktadır. Mevcut geri basınç yöntemi bir zaman aralığında, sadece kuyrukta beklenen araçların kavşağa geçmesine izin verirken, aksine önerilen yöntem sadece kuyrukta beklenen araçlar değil aynı zamanda sürü şeklinde hareket eden araçların kavşağa geçmesine izin vermektedir.

Bu yöntemler, durma sayısı, bekleme süresi, seyahat süresi, seyahat hızı ve egzoz emisyonu gibi trafik sinyal kontrol problemlerini çözmek için kullanılmaktadır. Simülasyon sonuçları, ÇDDTÖ algoritmasının DTÖ algoritmasına göre performansını iyileştirdiğini göstermektedir. Ana yollar için önerilen adaptif trafik sinyal kontrol sistemleri simüle edilmiş ve eğitilmiştir. Önerilen adaptif kontrol algoritmaları, arteriyel trafik verimliliğini optimize etmeyi amaçlamaktadır. Farklı faz sıralarının seçimine dayalı sinyal koordinasyon optimizasyon modelleri oluşturulmuş ve modeller, optimizasyon hedefine dayalı olarak sistemi eğitmek için kullanılmış ve optimum eğitilmiş sistemler test edilmiştir.

Ana yollar için adaptif bir sinyal kontrol sistemi bir SUMO trafik simülatörü kullanılarak simüle edilmiş ve eğitilmiştir. Arteriyel trafik akışının verimliliğini optimize etmek için DTÖ'ye dayalı adaptif bir kontrol algoritması önerilmiştir. Önerilen algoritma, ana yollardaki trafik akışının, kontrol stratejisi altında birbirini izleyen kavşaklardan etkin bir şekilde geçebileceğini belirlemek için kullanılmıştır. Bu çalışmada, bir DTÖ aracısının eğitim ve değerlendirmesinin yapıldığı bir ortam sağlamak için gerçekçi ve doğrulanmış bir trafik simülatörü kullanılmıştır. Ajanın iki farklı durumu araştırılmıştır.

6.2 Öneriler

Sunulan tüm yöntemlerde, yayaların kavşağı geçmesi için yeterli aralığı sağlamak üzere minimum yeşil zamanları tahsis edilerek yayaların varlığı dolaylı olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, yaya geçidinin etkisini değerlendirmek için simülasyon sırasında yayaların doğrudan dikkate alınması önerilmiştir. Yayaların dikkate alınması, araçlar ve yayalar arasında etkileşimli ortamın oluşturulması yoluyla gerçek dünyadaki durumu daha iyi temsil etmektedir. İyi sonuçlar elde etmek ve MKUBW yönteminin

performansını artırmak için, sabit seyahat süresi yerine yolun mevcut yoğunluğuna göre araçların hızının hesaplanmasına yönelik matematiksel modelin kullanılmasını tavsiye edilmektedir. Ayrıca, bulanık mantık üyeliklerinin ayarlanmasını gerçekleştirmek için bir sinir ağı veya genetik algoritmanın kullanılması tavsiyesinde de bulunmaktadır.

Koordineli TÖ tabanlı yöntem için, daha iyi sonuçlar elde etmek amacıyla yeşil süreleri izlemeli ve kısa bir aralıkta ayarlama mekanizması uygulanmalıdır. Bu, yürütülen fazı sonlandırmak veya uzatmak için başka bir karar seviyesi kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Çok büyük bir durum girdisine sahip olan TÖ tabanlı yöntemlerin eğitim sürecini geliştirmek için, yalnızca tamamen bağlı derin sınır ağları kullanan algoritma durumunun DDTÖ'sini oluşturmak için evrişimli sinir ağı (convolutional neural network) kullanılmalıdır. Ayrıca, koordinasyonun etkisini temsil etmek için önerilen yöntemin daha fazla kavşak ile gerçek alan arteriyel yol ağına uygulanmasını tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

- Akgungor, A. P. ve Bullen, A. G. R., 1999, Analytical delay models for signalized intersections, *69th ITE Annual Meeting, Nevada, USA*.
- Alam, J. ve Pandey, M. K., 2015, Design and analysis of a two stage traffic light system using fuzzy logic, *J. Inf. Technol. Softw. Eng*, 5 (03).
- Albino, V., Berardi, U. ve Dangelico, R. M., 2015, Smart cities: Definitions, dimensions, performance, and initiatives, *Journal of urban technology*, 22 (1), 3-21.
- Ali, M. E. M., Durdu, A., Celtek, S. A. ve Gultekin, S. S., 2020, Fuzzy Logic and Webster's Optimal Cycle Based Decentralized Coordinated Adaptive Traffic Control Method, *Elektronika ir Elektrotechnika*, 26 (4), 57-64.
- Aljaafreh, A., Al-Oudat, N. ve Saleh, M., 2014, Adaptive traffic-signal control using discrete event simulation model, *International Journal of Computer Applications*, 101 (12), 7-12.
- Arulkumaran, K., Deisenroth, M. P., Brundage, M. ve Bharath, A. A., 2017, Deep reinforcement learning: A brief survey, *IEEE Signal Processing Magazine*, 34 (6), 26-38.
- Balaji, P. ve Srinivasan, D., 2011, Type-2 fuzzy logic based urban traffic management, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 24 (1), 12-22.
- Barceló, J., Codina, E., Casas, J., Ferrer, J. L. ve García, D., 2005, Microscopic traffic simulation: A tool for the design, analysis and evaluation of intelligent transport systems, *Journal of intelligent and robotic systems*, 41 (2), 173-203.
- Belletti, F., Haziza, D., Gomes, G. ve Bayen, A. M., 2017, Expert level control of ramp metering based on multi-task deep reinforcement learning, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19 (4), 1198-1207.
- Chang, E., Lei, J. ve Messer, C. J., 1988, Arterial signal timing optimization using passer ii-87: microcomputer user's guide.
- Chedjou, J. C. ve Kyamakya, K., 2018, A review of traffic light control systems and introduction of a control concept based on coupled nonlinear oscillators, *Recent Advances in Nonlinear Dynamics and Synchronization*, 113-149.
- Chen, C., Wei, H., Xu, N., Zheng, G., Yang, M., Xiong, Y., Xu, K. ve Li, Z., 2020, Toward A thousand lights: Decentralized deep reinforcement learning for large-scale traffic signal control, *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 3414-3421.
- Chen, P., Zhu, Z. ve Lu, G., 2019, An Adaptive Control Method for Arterial Signal Coordination Based on Deep Reinforcement Learning, *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 3553-3558.
- Chen, S. ve Sun, D. J., 2016, An improved adaptive signal control method for isolated signalized intersection based on dynamic programming, *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 8 (4), 4-14.
- Cheng, D., Messer, C. J., Tian, Z. Z. ve Liu, J., 2003, Modification of Webster's minimum delay cycle length equation based on HCM 2000, *Paper Submitted to the Transportation Research Board for Presentation and Publication at the 2003 Annual Meeting in Washington. DC*.
- Chua, B. ve Ismail, K., 2019, TRAFFIC LIGHT DISPERSION CONTROL BASED ON DEEP REINFORCEMENT LEARNING, *Journal of Transport System Engineering*, 6 (1).

- Collotta, M., Bello, L. L. ve Pau, G., 2015, A novel approach for dynamic traffic lights management based on Wireless Sensor Networks and multiple fuzzy logic controllers, *Expert Systems with Applications*, 42 (13), 5403-5415.
- Çeltek, S. A., Durdu, A. ve Alı, M. E. M., 2020, Real-time traffic signal control with swarm optimization methods, *Measurement*, 166, 108206.
- Deng, L. ve Yu, D., 2014, Deep learning: methods and applications, *Foundations and trends in signal processing*, 7 (3-4), 197-387.
- Diaz, K. A., Dailisan, D., Sharaf, U., Santos, C., Gan, Q., Uy, F. A., Lim, M. T. ve Bayen, A. M., 2020, Adaptive Coordination Offsets for Signalized Arterial Intersections using Deep Reinforcement Learning, *arXiv preprint arXiv:2008.02691*.
- Dimitriou, L., Tsekeris, T. ve Stathopoulos, A., 2008, Adaptive hybrid fuzzy rule-based system approach for modeling and predicting urban traffic flow, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 16 (5), 554-573.
- Dresner, K. ve Stone, P., 2005, Multiagent traffic management: Opportunities for multiagent learning, *International Workshop on Learning and Adaption in Multi-Agent Systems*, 129-138.
- Dursun, E. H. ve Durdu, A., 2016, Position control by using PD type fuzzy logic: Experimental study on rotary servo system, *2016 8th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, 1-6.
- Eberhart, R. ve Kennedy, J., 1995, A new optimizer using particle swarm theory, *MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, 39-43.
- El-Tantawy, S. ve Abdulhai, B., 2012, Neighborhood-Coordinated Multiagent Reinforcement Learning for Networked Adaptive Traffic Signal Control.
- El-Tantawy, S., Abdulhai, B. ve Abdelgawad, H., 2013, Multiagent reinforcement learning for integrated network of adaptive traffic signal controllers (MARLIN-ATSC): methodology and large-scale application on downtown Toronto, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14 (3), 1140-1150.
- Elmahalawy, A. M., Shouman, A. ve El-Sayed, A., 2020, Applying Hierarchal Clusters on Deep Reinforcement Learning Controlled Traffic Network, *Menoufia Journal of Electronic Engineering Research*.
- Eom, M. ve Kim, B.-I., 2020, The traffic signal control problem for intersections: a review, *European transport research review*, 12 (1), 1-20.
- Fang, S., Chen, F. ve Liu, H., 2019, Dueling Double Deep Q-Network for Adaptive Traffic Signal Control with Low Exhaust Emissions in A Single Intersection, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 052039.
- Garcia-Nieto, J., Olivera, A. C. ve Alba, E., 2013, Optimal cycle program of traffic lights with particle swarm optimization, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 17 (6), 823-839.
- Garg, H. ve Kaushal, E. G., 2017, Traffic lights control system for Indian cities using WSN and Fuzzy control, *Traffic*, 4 (07), 56-65.
- Gartner, N., 1983, A Demand Responsive Strategy for Traffic Signal Control, *Transportation*.
- Gartner, N. H., Pooran, F. J. ve Andrews, C. M., 2001, Implementation of the OPAC adaptive control strategy in a traffic signal network, *ITSC 2001. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems. Proceedings (Cat. No. 01TH8585)*, 195-200.
- Gazis, D. C., 1964, Optimum control of a system of oversaturated intersections, *Operations Research*, 12 (6), 815-831.

- Ge, H., Song, Y., Wu, C., Ren, J. ve Tan, G., 2019, Cooperative deep Q-learning with Q-value transfer for multi-intersection signal control, *IEEE Access*, 7, 40797-40809.
- Genders, W. ve Razavi, S., 2018, Evaluating reinforcement learning state representations for adaptive traffic signal control, *Procedia Computer Science*, 130, 26-33.
- Gong, Y., Abdel-Aty, M., Cai, Q. ve Rahman, M. S., 2019, A decentralized network level adaptive signal control algorithm by deep reinforcement learning, *Transportation Research Board 98th Annual Meeting*.
- Gregoire, J., Qian, X., Frazzoli, E., De La Fortelle, A. ve Wongpiromsarn, T., 2014, Capacity-aware backpressure traffic signal control, *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2 (2), 164-173.
- Gu, J., Fang, Y., Sheng, Z. ve Wen, P., 2020, Double deep Q-Network with a dual-agent for traffic signal control, *Applied Sciences*, 10 (5), 1622.
- Gu, X., Zhang, H., Zhang, D. ve Kim, S., 2016, Deep API learning, *Proceedings of the 2016 24th ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering*, 631-642.
- Guo, J., 2020, Decentralized Deep Reinforcement Learning for Network Level Traffic Signal Control, *arXiv preprint arXiv:2007.03433*.
- Guo, M., Wang, P., Chan, C.-Y. ve Askary, S., 2019, A reinforcement learning approach for intelligent traffic signal control at urban intersections, *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 4242-4247.
- Hájek, P., 2013, *Metamathematics of fuzzy logic*, Springer Science & Business Media, p.
- Hao, S., Yang, L., Ding, L. ve Guo, Y., 2019, Distributed cooperative backpressure-based traffic light control method, *Journal of Advanced Transportation*, 2019.
- Hu, W., Wang, H., Yan, L. ve Du, B., 2016, A swarm intelligent method for traffic light scheduling: application to real urban traffic networks, *Applied Intelligence*, 44 (1), 208-231.
- Huang, Y., Wei, G. ve Wang, Y., 2018, Vd d3qn: the variant of double deep q-learning network with dueling architecture, *2018 37th Chinese Control Conference (CCC)*, 9130-9135.
- Hunt, P., Robertson, D., Bretherton, R. ve Royle, M. C., 1982, The SCOOT on-line traffic signal optimisation technique, *Traffic Engineering & Control*, 23 (4).
- Jiao, P., Wang, H. ve Sun, T., 2014, Real-time arterial coordination control based on dynamic intersection turning fractions estimation using genetic algorithm, *Mathematical Problems in Engineering*, 2014.
- Kandel, A. ve Langholz, G., 1993, *Fuzzy control systems*, Crc press, p.
- Kelsey, R. L. ve Bisset, K. R., 1993, Simulation of traffic flow and control using fuzzy and conventional methods, *Fuzzy logic and control*.
- Kingma, D. P. ve Ba, J., 2014, Adam: A method for stochastic optimization, *arXiv preprint arXiv:1412.6980*.
- Kong, X., Shen, G., Xia, F. ve Lin, C., 2011, Urban arterial traffic two-direction green wave intelligent coordination control technique and its application, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 9 (1), 60-68.
- Koonce, P. ve Rodegerdts, L., 2008, *Traffic signal timing manual*, United States. *Federal Highway Administration*.
- Krajzewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, M. ve Bieker, L., 2012, Recent development and applications of SUMO-Simulation of Urban MObility, *International journal on advances in systems and measurements*, 5 (3&4).

- Kyriakarakos, G., Dounis, A. I., Arvanitis, K. G. ve Papadakis, G., 2012, A fuzzy logic energy management system for polygeneration microgrids, *Renewable Energy*, 41, 315-327.
- Lee, J.-H. ve Lee-Kwang, H., 1999, Distributed and cooperative fuzzy controllers for traffic intersections group, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 29 (2), 263-271.
- Li, L., Okoth, V. ve Jabari, S. E., 2021, Backpressure control with estimated queue lengths for urban network traffic, *IET Intelligent Transport Systems*, 15 (2), 320-330.
- Liang, X., Du, X., Wang, G. ve Han, Z., 2019, A deep reinforcement learning network for traffic light cycle control, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68 (2), 1243-1253.
- Lin, F.-B., 1991, Knowledge base on semi-actuated traffic-signal control, *Journal of transportation engineering*, 117 (4), 398-417.
- Lin, Y., Dai, X., Li, L. ve Wang, F.-Y., 2018, An efficient deep reinforcement learning model for urban traffic control, *arXiv preprint arXiv:1808.01876*.
- Little, J. D., Kelson, M. D. ve Gartner, N. H., 1981, MAXBAND: A versatile program for setting signals on arteries and triangular networks.
- Liu, Y. ve Chang, G.-L., 2011, An arterial signal optimization model for intersections experiencing queue spillback and lane blockage, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19 (1), 130-144.
- Liu, Y., Wang, H., Peng, M., Guan, J. ve Wang, Y., 2020, An Incentive Mechanism for Privacy-Preserving Crowdsensing via Deep Reinforcement Learning, *IEEE Internet of Things Journal*.
- Lo, H. K., Chang, E. ve Chan, Y. C., 2001, Dynamic network traffic control, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 35 (8), 721-744.
- Luong, N. C., Hoang, D. T., Gong, S., Niyato, D., Wang, P., Liang, Y.-C. ve Kim, D. I., 2019, Applications of deep reinforcement learning in communications and networking: A survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21 (4), 3133-3174.
- Ma, D., Xiao, J. ve Ma, X., 2020, A decentralized model predictive traffic signal control method with fixed phase sequence for urban networks, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 1-14.
- MacGowan, J. ve IJ, F., 1979, Development and testing of advanced control strategies in the urban traffic control system.
- Mannion, P., Duggan, J. ve Howley, E., 2016, An experimental review of reinforcement learning algorithms for adaptive traffic signal control, *Autonomic road transport support systems*, 47-66.
- McCluskey, T. L., Kotsialos, A., Müller, J. P., Klügl, F., Rana, O. ve Schumann, R., 2016, *Autonomic road transport support systems*, Springer, p.
- Michalopoulos, P. G. ve Stephanopoulos, G., 1977, Oversaturated signal systems with queue length constraints—I: Single intersection, *Transportation Research*, 11 (6), 413-421.
- Mirchandani, P. ve Head, L., 2001, A real-time traffic signal control system: architecture, algorithms, and analysis, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 9 (6), 415-432.
- Mirchandani, P. ve Wang, F.-Y., 2005, RHODES to intelligent transportation systems, *IEEE Intelligent Systems*, 20 (1), 10-15.

- Najafabadi, M. M., Villanustre, F., Khoshgoftaar, T. M., Seliya, N., Wald, R. ve Muharemagic, E., 2015, Deep learning applications and challenges in big data analytics, *Journal of big data*, 2 (1), 1-21.
- Ozan, C., Baskan, O., Haldenbilen, S. ve Ceylan, H., 2015, A modified reinforcement learning algorithm for solving coordinated signalized networks, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 54, 40-55.
- Pálos, P. ve Huszák, Á., 2020, Comparison of Q-Learning based Traffic Light Control Methods and Objective Functions, *2020 International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, 1-6.
- Pappis, C. P. ve Mamdani, E. H., 1977, A fuzzy logic controller for a trafjc junction, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 7 (10), 707-717.
- Phuong, N. H. ve Kreinovich, V., 2001, Fuzzy logic and its applications in medicine, *International journal of medical informatics*, 62 (2-3), 165-173.
- Prashanth, L. ve Bhatnagar, S., 2010, Reinforcement learning with function approximation for traffic signal control, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12 (2), 412-421.
- Rasheed, F., Yau, K.-L. A., Noor, R. M., Wu, C. ve Low, Y.-C., 2020, Deep Reinforcement Learning for Traffic Signal Control: A Review, *IEEE Access*.
- Ratrout, N. T. ve Rahman, S. M., 2009, A comparative analysis of currently used microscopic and macroscopic traffic simulation software, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 34 (1B), 121-133.
- Rida, N., Ouadoud, M. ve Hasbi, A., 2020, Coordinated Signal Control System in Urban Road Network.
- Robertson, D. I., 1969, TRANSYT: a traffic network study tool.
- Ross, T. J., 2004, Fuzzy logic with engineering applications, Wiley Online Library, p.
- Royani, T., Haddadnia, J. ve Alipoor, M., 2010, Traffic signal control for isolated intersections based on fuzzy neural network and genetic algorithm, *Proceedings of the 10th WSEAS international conference on signal processing, computational geometry and artificial vision*, 87-91.
- Saidallah, M., El Fergougui, A. ve Elalaoui, A. E., 2016, A comparative study of urban road traffic simulators, *MATEC Web of Conferences*, 05002.
- Sen, S. ve Head, K. L., 1997, Controlled optimization of phases at an intersection, *Transportation science*, 31 (1), 5-17.
- Shabestary, S. M. A. ve Abdulhai, B., 2018, Deep learning vs. discrete reinforcement learning for adaptive traffic signal control, *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 286-293.
- Shao, C.-q., Rong, J. ve Liu, X.-m., 2011, Study on the saturation flow rate and its influence factors at signalized intersections in China, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 16, 504-514.
- Shen, G.-j. ve Yang, Y.-y., 2016, A dynamic signal coordination control method for urban arterial roads and its application, *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 17 (9), 907-918.
- Shen, G. ve Kong, X., 2009, Study on road network traffic coordination control technique with bus priority, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 39 (3), 343-351.
- Shiri, M. S. ve Maleki, H. R., 2017, Maximum green time settings for traffic-actuated signal control at isolated intersections using fuzzy logic, *International Journal of Fuzzy Systems*, 19 (1), 247-256.
- Smith, M., 1979, Traffic control and route-choice; a simple example, *Transportation Research Part B: Methodological*, 13 (4), 289-294.

- Soh, A. C., Rhung, L. G. ve Sarkan, H. M., 2010, MATLAB simulation of fuzzy traffic controller for multilane isolated intersection, *International Journal on Computer Science and Engineering*, 2 (4), 924-933.
- Tan, T., Bao, F., Deng, Y., Jin, A., Dai, Q. ve Wang, J., 2019, Cooperative deep reinforcement learning for large-scale traffic grid signal control, *IEEE transactions on cybernetics*, 50 (6), 2687-2700.
- Tang, K., Boltze, M., Nakamura, H. ve Tian, Z., 2019, Global Practices on Road Traffic Signal Control: Fixed-time Control at Isolated Intersections, Elsevier, p.
- Tassiulas, L. ve Ephremides, A., 1990, Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximum throughput in multihop radio networks, *29th IEEE Conference on Decision and Control*, 2130-2132.
- Thunig, T., Scheffler, R., Strehler, M. ve Nagel, K., 2019, Optimization and simulation of fixed-time traffic signal control in real-world applications, *Procedia Computer Science*, 151, 826-833.
- Tian, Z., Ohene, F. ve Hu, P., 2011, Arterial performance evaluation on an adaptive traffic signal control system, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 16, 230-239.
- Udofia, K. M., Emagbetere, J. O. ve Edeko, F. O., 2014, Dynamic traffic signal phase sequencing for an isolated intersection using ANFIS, *Automation, Control and Intelligent Systems*, 2 (2), 21-26.
- Van Hasselt, H., Guez, A. ve Silver, D., 2016, Deep reinforcement learning with double q-learning, *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*.
- Varaiya, P., 2013, Max pressure control of a network of signalized intersections, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 36, 177-195.
- Vidali, A., Crociani, L., Vizzari, G. ve Bandini, S., 2019, A Deep Reinforcement Learning Approach to Adaptive Traffic Lights Management, *WOA*, 42-50.
- Vilarinho, C., Soares, G., Macedo, J., Tavares, J. P. ve Rossetti, R. J., 2014, Capability-enhanced aimsun with real-time signal timing control, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 111, 262-271.
- Vincent, R. ve Young, C., 1986, Self-optimising traffic signal control using microprocessors. The TRRL MOVA strategy for isolated intersections, *Traffic Engineering & Control*, 27 (7-8), 385-387.
- Wales, N. S., 2006, Australia," Sydney Coordinated Adaptive Traffic System (SCATS),".
- Wan, C.-H. ve Hwang, M.-C., 2019, Adaptive traffic signal control methods based on deep reinforcement learning, In: *Intelligent Transport Systems for Everyone's Mobility*, Eds: Springer, p. 195-209.
- Wang, S., Xu, J., Yang, G. ve Chen, C., 2012, A green wave band model considering variable queue clearance time, *Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 3025-3030.
- Webster, F. V., 1958, Traffic signal settings.
- Wegener, A., Piórkowski, M., Raya, M., Hellbrück, H., Fischer, S. ve Hubaux, J.-P., 2008, TraCI: an interface for coupling road traffic and network simulators, *Proceedings of the 11th communications and networking simulation symposium*, 155-163.
- Wei, H., Chen, C., Wu, K., Zheng, G., Yu, Z., Gayah, V. ve Li, Z., 2019a, Deep reinforcement learning for traffic signal control along arterials.
- Wei, H., Zheng, G., Gayah, V. ve Li, Z., 2019b, A survey on traffic signal control methods, *arXiv preprint arXiv:1904.08117*.

- Wolput, B., Christofa, E. ve Tampère, C. M., 2016, Optimal cycle-length formulas for intersections with or without transit signal priority, *Transportation Research Record*, 2558 (1), 78-91.
- Wu, T., Zhou, P., Liu, K., Yuan, Y., Wang, X., Huang, H. ve Wu, D. O., 2020, Multi-agent deep reinforcement learning for urban traffic light control in vehicular networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69 (8), 8243-8256.
- Xu, M., Wu, J., Huang, L., Zhou, R., Wang, T. ve Hu, D., 2020, Network-wide traffic signal control based on the discovery of critical nodes and deep reinforcement learning, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 24 (1), 1-10.
- Yager, R. R. ve Zadeh, L. A., 2012, An introduction to fuzzy logic applications in intelligent systems, Springer Science & Business Media, p.
- Yen, J. ve Langari, R., 1999, Fuzzy logic: intelligence, control, and information, Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, p.
- Yue, R., Yang, G., Lin, D., Wang, A. ve Tian, Z., 2021, Traffic Signal Retiming to Improve Corridor Performance, *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 147 (1), 05020009.
- Zadeh, L. A., Klir, G. J. ve Yuan, B., 1996, Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems: selected papers, World Scientific, p.
- Zaied, A. N. H. ve Al Othman, W., 2011, Development of a fuzzy logic traffic system for isolated signalized intersections in the State of Kuwait, *Expert Systems with Applications*, 38 (8), 9434-9441.
- Zakariya, A. Y. ve 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.
- Zheng, X. ve Recker, W., 2013, An adaptive control algorithm for traffic-actuated signals, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 30, 93-115.

YAYINLAR

SCI-expanded Kapsamındaki Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. **M. E. M. Ali, A. Durdu, S. A. Celtek, and S. S. Gultekin**, "Fuzzy Logic and Webster's Optimal Cycle Based Decentralized Coordinated Adaptive Traffic Control Method," *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 26, no. 4, pp. 57-64, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5755/j01.eie.26.4.25959> (*Doktora tezinden yapılmıştır*).
2. **S. Alperen Celtek, A. Durdu, M. Eltejani Mohammed Ali**, " Real-time Traffic Signal Control with Swarm Optimization Methods ", *Measurement*, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108206> (*Doktora tezinden yapılmıştır*).
3. **M. E. M. Ali, A. Durdu, S. Alperen Celtek, ALPER YILMAZ**, " An Adaptive Method for Traffic Signal Control Based on Fuzzy Logic with Webster and Modified Webster Formula Using SUMO Traffic Simulator", in *IEEE Access*, 2021 , doi: 10.1109/ACCESS.2021.3094270 (*Doktora tezinden yapılmıştır*).

Diğer Uluslararası İndekslere Giren Hakemli Dergilerdeki Araştırma Makaleleri:

1. **T. Mahmood, M. E. M. Ali, and A. Durdu**, "A two stage fuzzy logic adaptive traffic signal control for an isolated intersection based on real data using SUMO simulator," *Electron. Commun. Eng*, vol. 3, pp. 656-659, 2019 (*Doktora tezinden yapılmıştır*).
2. **M. E. M. Ali and O. A. R. Sharif**, "Temperature compensation in pH meter-a survey," *Journal of Engineering and Computer Science (JECS)*, vol. 16, no. 2, pp. 1-9, 2014 (*Yüksek Lisans tezinden yapılmıştır*).