



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



ÇOKLU KAVŞAKLAR İÇİN
AYARLANABİLİR VE AĞIRLIK TABANLI
ADAPTİF TRAFİK SİNYAL KONTROLÜ

Zülal Hilal YILDIZ BUDAK

YÜKSEK LİSANS

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Haziran-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Zülal Hilal YILDIZ BUDAK tarafından hazırlanan ‘‘Çoklu Kavşaklar için Ayarlanabilir ve Ağırlık Tabanlı Adaptif Trafik Sinyal Kontrolü’’ adlı tez çalışması 24/06/2024 tarihinde aşğıdaki jüri tarafından oy birliğı ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğıtim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliğı Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri yeleri

İmza

Başkan

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

.....

Danışman

Doç. Dr. Akif DURDU
(Konya Teknik niversitesi)

.....

ye

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KORKMAZ
(Aksaray Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlt UYAN
Enstitü Müdürü

Dr. Öğr. Üyesi Seyit Alperen ÇELTEK bu tez çalışmasının ikinci danışmanıdır.

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.

Zülal Hilal YILDIZ BUDAK

Tarih: 24.06.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

ÇOKLU KAVŞAKLAR İÇİN AYARLANABİLİR VE AĞIRLIK TABANLI ADAPTİF TRAFİK SİNYAL KONTROLÜ

Zülal Hilal YILDIZ BUDAK

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

Danışman: Doç. Dr. Akif DURDU

2024, 62 Sayfa

Jüri

**Doç. Dr. Akif DURDU
Doç. Dr. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN
Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KORKMAZ**

21. yüzyılın en büyük sorunlarından biri olarak kabul edilen trafik sinyal yönetimi; çevre, ekonomi ve halk sağlığı üzerinde olumsuz etkileri nedeniyle önemli bir sorundur. Bu zorluğun üstesinden gelmek amacıyla kentsel alanlardaki izole ve koordineli kavşaklarda trafik sinyal kontrolü için hem deterministik tabanlı hem de yapay zekâ tabanlı birçok yöntem önerilmiştir. Deterministik sistemler, karmaşık trafik koşulları ve değişkenlerini hesaba katma konusunda sınırlıdır ve gerçek zamanlı olarak trafik koşullarına esnek cevap verme yetenekleri kısıtlıdır. Ayrıca, büyük ölçekli trafik ağlarını yönetmek için gereken manuel ayarlamalar zaman alıcı ve maliyetlidir. Yapay zekâ tabanlı sistemler ise modelin eğitim verilerine bağımlı olmaları ve bu verilerin eksik veya yanıltıcı olması durumunda performansları istenen başarıyı gösterememektedir. Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemi trafik akışını optimize ederek şehir içi trafiği daha akıcı getirmek için önerilen yöntemlerden biridir. Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemi yapay zekâ kullanarak ağdaki akışın maksimum olmasını sağlarken, aynı zamanda deterministik yaklaşımlar kullanılmaktadır. Ancak, Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemindeki karmaşıklık ve hesaplama maliyetleri, yöntemin pratik olarak uygulanabilirliğini azaltmaktadır. Bu tez çalışmasında Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yönteminin etkinliğini artırmak ve tekniği daha uygulanabilir kılmak için iki stratejiden oluşan yeni bir yaklaşım önerilmektedir. Önerilen ilk strateji, araçların belirli bir lokasyon aralığındaki anlık hızlarına göre kavşağa yaklaşma sürelerini hesaplayarak süreci basitleştirmektedir. Önerilen ikinci strateji, optimum araç bekleme katsayısını tanımlamak için regresyon kullanılmaktadır. Önerilen yaklaşımın trafik sinyal kontrolü üzerindeki etkinliği gerçek veriler kullanılarak izole ve koordineli kavşak sistemlerinde SUMO simülasyon ortamında test edilmektedir. Ayrıca önerilen Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemi Statik, Uyarmalı, Gecikme tabanlı, Webster, MaxPressure ve Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, önerilen yöntem izole ve koordineli kavşak sistemlerinde mevcut algoritmalarından daha iyi performans göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Adaptif Trafik Sinyal Kontrolü, Maksimum Ağırlıklı Akış Yöntemi, Gerçek Zamanlı Trafik Sinyal Kontrolü, Regresyon Yöntemleri.

ABSTRACT**MS THESIS****ADJUSTABLE AND WEIGHT-BASED ADAPTIVE TRAFFIC SIGNAL
CONTROL FOR MULTIPLE INTERSECTIONS****Zülal Hilal YILDIZ BUDAK****Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Electrical Electronics Engineering****Advisor: Assoc. Prof. Dr. Akif DURDU****2024, 62 Pages****Jury****Assoc. Prof. Dr. Akif DURDU
Assoc. Prof. Dr. Seyfettin Sinan GÜLTEKİN
Asst. Prof. Dr. Mehmet KORKMAZ**

Traffic signal management, which is considered one of the biggest problems of the 21st century; It is an important problem due to its negative effects on the environment, economy and public health. To overcome this challenge, many methods, both deterministic-based and artificial intelligence-based, have been proposed for traffic signal control at isolated and coordinated intersections in urban areas. Deterministic systems are limited in their ability to account for complex traffic conditions and variables and have limited ability to respond flexibly to traffic conditions in real time. Additionally, the manual adjustments required to manage large-scale traffic networks are time-consuming and costly. Artificial intelligence-based systems, on the other hand, cannot perform as desired if they are dependent on the training data of the model and if these data are incomplete or misleading. Maximum Weighted Flow method is one of the recommended methods to make urban traffic more fluid by optimizing traffic flow. While the Classical Maximum Weighted Flow method ensures that the flow in the network is maximum by using artificial intelligence, deterministic approaches are also used. However, the complexity and computational costs in the classical Maximum Weighted Flow method reduce the practical applicability of the method. In this thesis study, a new approach consisting of two strategies is proposed to increase the effectiveness of the classical Maximum Weighted Flow method and make the technique more applicable. The first proposed strategy simplifies the process by calculating the approach time of vehicles to the intersection according to their instantaneous speed in a certain location range. The second proposed strategy uses regression to identify the optimal vehicle waiting coefficient. The effectiveness of the proposed approach on traffic signal control is tested in the SUMO simulation environment in isolated and coordinated intersection systems using real data. Additionally, the proposed New Maximum Weighted Flow method was compared with Static, Excited, Delay-based, Webster, MaxPressure and Classical Maximum Weighted Flow methods. As a result, the proposed method outperforms existing algorithms in isolated and coordinated intersection systems.

Keywords: Adaptive Traffic Signal Control, Maximum Weighted Flow Method, Real-Time Traffic Signal Control, Regression Methods.

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince bilgi ve tecrübeleriyle bana daima yol gösteren, yardımlarını esirgemeyen, her zaman yapıcı eleştirileri ile beni teşvik eden çok değerli danışmanlarım Doç. Dr. Akif DURDU ve Dr. Öğr. Üyesi Seyit Alperen ÇELTEK'e,

Çalışmalarım sırasında hem bir iş arkadaşı hem de bir dost olarak daima desteğini hissettiren ve beni motive eden kıymetli dostum Arş. Gör. Tuğçe KILIÇ'a,

Hayatımda desteklerini hep yanımda hissettiğim, her zaman elinden gelen fedakarlıktan hep daha fazlasını yapan, hayallerim için yürüdüğüm yolda beni cesaretlendiren kıymetlilerim canım annem ve canım babama,

Her daim sevgilerini ve desteklerini yanımda hissettiğim canım kız kardeşim Büşra ve canım abim Ömer Yasin'e,

Sevgisini, ilgi ve özenini her zaman kalpten hissettiğim, her zaman yanımda olan ve daima beni cesaretlendiren sevgili yol arkadaşım, en büyük destekçim eşim Serkan'a,

Çok teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Zülal Hilal YILDIZ BUDAK
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	1
ABSTRACT.....	2
ÖNSÖZ	3
İÇİNDEKİLER.....	4
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	6
1. GİRİŞ.....	8
1.1. Genel Bakış.....	8
1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	9
1.3. Tezin Katkısı.....	11
1.4. Tezin Organizasyonu	12
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	13
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	17
3.1. Temel Trafik Sinyal Kavramları.....	17
3.2. Trafik Sinyal Kontrol Yöntemlerinde Performans Kriterleri	19
3.3. Trafik Sinyal Kontrol Yöntemleri.....	20
3.3.1. Sabit Zamanlı Trafik Sinyal Kontrolü	20
3.3.2. Uyarmalı Trafik Sinyal Kontrolü.....	20
3.3.3. Adaptif Trafik Sinyal Kontrolü.....	21
3.4. Simülasyon Programı.....	21
3.4.1. SUMO Simülasyon Programı	23
3.5. Performans Karşılaştırması için Kullanılan Trafik Sinyal Kontrol Yöntemleri ..	26
3.5.1. Statik Trafik Sinyal Kontrol Yöntemi	26
3.5.2. Uyarmalı Trafik Sinyal Kontrol Yöntemi.....	26
3.5.3. Gecikme Tabanlı Trafik Sinyal Kontrol Yöntemi	27
3.5.4. Webster Trafik Sinyal Kontrol Yöntemi	28
3.5.5. MaxPressure Trafik Sinyal Kontrol Yöntemi.....	29
3.5.6. Klasik Maksimum Ağırlıklı Trafik Sinyal Kontrol Yöntemi	30
3.6. Regresyon Analiz Yöntemi.....	32
3.7. Önerilen Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış Yöntemi	36
4. DENEYSEL ARAŞTIRMA VE SONUÇLAR	46
4.1. Gerçek Zamanlı Trafik Veri Seti	46
4.2. İzole kavşak için Trafik Sinyal Kontrol Uygulamaları.....	46
4.3. Koordineli kavşaklar için Trafik Sinyal Kontrol Uygulamaları	49
5. SONUÇLAR ve GELECEK ÇALIŞMALAR	54

5.1. Sonuçlar	54
5.2. Gelecek alıřmalar	55
KAYNAKLAR	57



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

l	: Karşıdan gelen şeritlerde trafik ışığının yeşil fazı ile ilişkili trafik şeridi
C_l	: l şeridindeki hareketli araçlar kümesi
$t(c)$	: $c \in C_l$ aracının kavşağa ulaşması için gereken tahmini süre
I	: Gösterge fonksiyonu
$\mu(c, l)$	: Araç bekleme katsayısı
$wait(c, l)$	: c aracının l şeridindeki bekleme süresi
C_0	: Optimal döngü süresi
Y	: Kritik faz akışlarının toplamı
y_i	: i . faz değeri kritik akış oranı
L_i	: i . Faz değeri için kayıp zaman
G_i	: Etkin yeşil süre
α	: Maksimum ağırlık gecikme katsayısı
τ_{min}	: Minimum yeşil faz süresi
t_p	: $p \in P$ trafik ışığının mevcut aktif fazının süresi
P	: Trafik ışığı fazlar kümesi
p	: faz
$L_{p,gelen}$	: Yeşil faz süresince gelen yol şeritlerinin kümesi
$L_{p,giden}$	: Gelen şeritlerden ayrılan giden yol şeritlerinin kümesi
V_l	: l şeridindeki araç sayısı
Y_i	: i . gerçek değer
X_i	: i . tahmin edilen değer
n	: toplam veri sayısı
$T_{yeşil}$	: Yeşil fazın aktif olduğu toplam süre
T_{min}	: Yeşil fazın minimum süresi

k	: Uzatma faktörü (kontrol parametresi)
N	: Birikmiş araç sayısı
N_T	: Belirlenen eşik değeri
T_L	: Anlık zaman kaybı
V	: Aracın mevcut hızı
V_{max}	: İzin verilen maksimum hız
w_t	: Bekleme süresi
p_a	: Faz akış değeri
v	: Hız
d	: Aracın trafik ışığına olan mesafesi
d_r	: Dedektör mesafesi

Kısaltmalar

ATSK	: Adaptif Trafik Sinyal Kontrolü
MP	: MaxPressure
STSK	: Sabit Trafik Sinyal Kontrolü
SUMO	: Kentsel Hareketlilik Simülatörü
TraCI	: Trafik Kontrol Arayüzü
TSK	: Trafik Sinyal Kontrolü
UTSK	: Uyarmalı Trafik Sinyal Kontrolü
YSA	: Yapay Sinir Ağları
TÖ	: Takviyeli Öğrenme

1. GİRİŞ

Bu bölümde, trafik sinyal kontrolünün zaman içindeki gelişimi genel bir bakış çerçevesinde sunulmakta, ardından tezin amacı, kapsamı ve katkıları hakkında bilgi verilmektedir. Son olarak, tezin organizasyonu açıklanmaktadır.

1.1. Genel Bakış

Ulaşım, tarih boyunca hayati bir öneme sahip olmuştur. Trafik sıkışıklığı olgusu, özellikle geçmiş yüzyılın sonlarında, araç sayısındaki ve ulaşım talebindeki hızlı artıştan kaynaklanan bir sorun olarak daha belirgin hale gelmiştir (Papageorgiou, 2004). Kentlerin hızlı gelişimi ve nüfus artışı, araç sayısının katlanarak artmasına yol açmakta ve bu da özellikle büyükşehirlerde trafik koşullarının kötüleşmesine neden olmaktadır (Hassija ve diğ., 2020). Bu durum, kavşaklarda uzun araç kuyrukları ve trafik sıkışıklıkları oluşturmaktadır. Özellikle trafiğin yoğun olduğu saatlerde uzayan yolculuk süreleri yolcuların günlük hayatını olumsuz etkilemektedir. Verimsiz trafik koşulları ve bunun doğal bir sonucu olarak çevre, sağlık ve ülke ekonomisi gibi birçok alanda olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Örneğin; sağlık açısından trafik sıkışıklığı sorunu aşırı yorgunluğa, stres-kaygı gibi duygularla psikolojik ve bedensel hastalıklara, solunum sistemi ve sinir sistemi gibi kardiyovasküler sistemlerle ilgili sağlık sorunlara neden olarak hayat standartlarının düşmesine yol açmaktadır (Samet, 2007; Khreis ve diğ., 2016). Öte yandan, araçların yoğun kullanımı, karbondioksit ve zararlı gaz salınımlarının artmasına yol açarak hava ve gürültü kirliliğine neden olmaktadır. Bu durum ekolojik dengenin bozulmasında temel etkenler arasında yer almaktadır (Qadri ve diğerleri, 2020).

Kentlerde ulaşım talebi ve trafik sıkışıklığı sorununa yönelik çözüm önerileri arasında mevcut altyapının operasyonel kapasitesinin artırılması yer almaktadır. Bu bağlamda, ek yol şeritleri eklemek veya yeni ulaşım koridorları inşa etmek mevcut altyapının iyileştirilmesi için bir seçenek olarak değerlendirilmekte, ancak bu önlemler genellikle yetersiz kalmaktadır. Ayrıca mevcut altyapıyı iyileştirmek kentsel alanlarda uygulanması çok zor, uzun süreli ve yüksek maliyetlidir (Miletić ve diğ., 2022).

Trafik sıkışıklığı sorununu çözmeye mevcut altyapıyı değiştirmenin zorlukları göz önüne alındığında, hızlı ve daha pratik çözümler zorunlu hale gelmektedir. Bu bağlamda, trafik sinyallerinin optimum kontrolü trafik sıkışıklığını azaltmada önemli bir role sahiptir (Abdoos, 2020).

Trafik sinyalizasyon sistemleri, sinyal zamanlama planlarının sistematik optimizasyonu açısından trafik yönetiminde önemli bir unsurdur. Kavşaklardaki trafik akışları, trafik sinyal kontrol (TSK) sistemleri tarafından yönetilmektedir. Bu, mevcut altyapıyı iyileştirmeye kıyasla daha etkili ve uygulanabilir bir çözümdür.

TSK yöntemleri; sabit trafik sinyal kontrolü (STSK), uyarmalı trafik sinyal kontrolü (UTSK) ve adaptif trafik sinyal kontrolü (ATSK) olarak üç sınıfta incelenmektedir (Miletić ve diğ., 2022). Kentsel nüfusun hızlı artışı, mevcut yol kapasitelerinin sınırlı olması ve şehir altyapı sistemlerinin dijitalleşmesi gibi faktörler, günümüzde sinyalizasyon problem çözümlerinin yetersiz kalmasına neden olmaktadır (Cui ve Lee, 2013; Çeltek, 2021). Mevcut trafik kontrol yöntemlerinin günümüz sorunlarına yeterli çözüm sunamaması, otonom araçların artan kullanımıyla birlikte gelecekteki trafik problemlerini çözebileceklerine dair umutları zayıflatmaktadır. Sürücüsüz araçların sayısının artmasıyla birlikte, yeni nesil trafik için daha modern ve esnek çözümler kaçınılmaz hale gelmektedir (Çeltek, 2021).

Günümüzde şehirlerdeki trafik akışını düzenlemek için izole ve koordineli kavşaklar kullanılmaktadır. İzole kavşak, genellikle birbirinden bağımsız olan ve trafiği düzenlemek için tek başına çalışan trafik sinyalizasyon sistemleriyle kontrol edilen kavşak sistemidir. Koordineli kavşaklar ise birbiriyle senkronize edilmiş birden fazla kavşağın oluşturduğu sistemlerdir. Bu sistemde, kavşaklar arasında trafik akışının daha verimli olması için iletişim ve senkronizasyon sağlanmaktadır.

İzole ve koordineli kavşak sistemlerine ek olarak geniş trafik ağına uygulanabilen adaptif trafik sinyal kontrol yöntemlerine olan ilgi artmaktadır. Bu yöntemler, trafiğin tüm değişkenlerini dikkate alabilen ve gerçek zamanlı olarak uygulanabilen, yenilikçi çözümler olmalıdır (Çeltek, 2021).

Bu tez çalışmasında, şehirlerdeki trafik sıkışıklığını azaltmak için izole ve koordineli kavşak sistemlerinde Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yönteminin etkinliğini artırmak ve tekniği daha uygulanabilir hale getirmek için yeni bir yaklaşım önerilmektedir. Yapılan trafik sinyal kontrol tasarımları ile trafikteki ortalama bekleme süresi ve kavşaklardaki kuyruk uzunluğu azaltılmış, ayrıca araçların ortalama seyahat süresi de azaltılmıştır.

1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı

Trafik sinyal kontrolü, kentsel ulaşımın etkili yönetiminde en kritik parçadır. Trafik akışını iyileştirmek için mevcut alt yapıyı değiştirmek zor ve yüksek maliyetli bir

seçenek olması nedeniyle daha uygun maliyetli yaklaşımlar öne çıkmaktadır. Son yıllarda özellikle teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte araştırmacılar etkin ve uygulanabilir trafik sinyal kontrol yöntemlerine yönelmektedirler. Bu bölümde, önerilen yöntemin amacı, katkıları ve çalışmasının kapsamı sırasıyla sunulmaktadır. Bu çalışmanın amaçları şu şekilde özetlenmiştir:

- Trafik ağına adaptif olarak uygulanabilen verimli bir trafik kontrol sistemi geliştirilerek trafik akışını optimize etmek.
- Farklı kavşak sistemlerine (izole ve koordineli) adapte edilebilen gerçek zamanlı ve yenilikçi bir trafik sinyal kontrol denetleyicisi tasarlamak.
- Geliştirilen etkili trafik sinyal kontrol yöntemi ile araçların bekleme süresini, seyahat süresini ve duraklama sayısını azaltmak, araç hızlarını ve kavşak kapasitesini artırmak.
- Trafik sinyal ağında optimum kontrol için en uygun yöntemi tasarlamak ve farklı performans kriterlerine göre önerilen kontrol yöntemini analiz etmek.
- Karmaşık yöntemlere veya yapay zekâ tekniklerine ihtiyaç duymadan hızlı ve verimli trafik kontrol denetleyicisi tasarlamak.
- Literatürdeki çalışmalar ile önerilen trafik sinyal kontrol yöntemini karşılaştırmak.
- Trafikte ani değişiklikleri (kaza, yol çalışması, acil durum araçları, mevsimsel değişiklikler vb.) dikkate alan dinamik ve yenilikçi bir trafik kontrol sistemi oluşturmak.
- Trafik ağının etkin kontrolüyle seyahat ve bekleme sürelerini azaltmak, gaz emisyonu ve yakıt tüketimini düşürmek ve dolayısıyla çevre ve gürültü kirliliğini azaltmak.

Bu tez çalışması kapsamında, Kilis iline ait alınan gerçek trafik verileri 11 Nisan 2018 tarihinde toplanmıştır. Gerçek trafik verileri ve talepleri kullanılarak önerilen yenilikçi modeli tasarlamak ve test etmek amacıyla SUMO trafik simülatörü kullanılmıştır. Geliştirilen ve kullanılan algoritmalar Python/PyCharm programlama dilinde yazılmıştır. Sensörler (loop dedektörler, kamera v.b) kullanılarak araç ve kavşak bilgileri gerçek zamanlı ölçümlere dayanarak SUMO simülasyon ortamına aktarılmıştır. Önerilen modelde ortalama bekleme süresi, ortalama seyahat süresi ve alfa parametresi performans kriteri olarak dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında; Statik, Uyarmalı, Gecikme tabanlı, Webster, Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış ve önerilen Yeni

Maksimum Ağırlıklı Akış trafik sinyal denetleyicisi geliştirilmiştir. Önerilen Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemi ve alfa parametresinin etkin analizi için regresyon analiz yöntemi kontrol sistemine entegre edilerek yeni bir trafik denetleyici tasarlanmıştır.

1.3. Tezin Katkısı

Bu bölümde önerilen yöntemin katkısı sunulmaktadır. Bu çalışma, Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yönteminin verimliliğini artırmak ve onu daha uygulanabilir hale getirmek için yeni bir yaklaşım önermektedir. Önerilen yaklaşım iki stratejiden oluşmaktadır. Bunlardan ilki, yaklaşma süresi parametresinin (aracın kavşağa ulaşması için gereken süre) hesaplanmasını basitleştirir. Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemi, yapay zekâ yöntemlerine dayanarak bir aracın kavşağa ulaşması için ihtiyaç duyduğu süreyi tahmin etmektedir. Bu durum hesaplama süresini arttırmaktadır. Önerilen yeni strateji ile kavşaklara yerleştirilen dedektörler kullanılarak araçların konum ve ortalama hız bilgileri alınmakta ve kavşağa yaklaşma süreleri hesaplanabilmektedir. Önerilen strateji hesaplama yükünü azaltır ve gerçek zamanlı uygulanabilirliği artırır. Böylece önerilen yöntem trafik sinyal kontrolü için daha verimli ve pratik bir çözüm sunmaktadır. İkinci strateji, farklı ' α ' değerleri ile trafik performans kriterleri arasındaki ilişkiyi incelemek için regresyon analizi kullanmaktadır ve optimum ' α ' değerini belirlemeyi amaçlamaktadır. Literatürde ' α ' parametresi 0,01'lik sabit bir değer olarak belirlenmiştir. (Agafonov, 2022). Literatür çalışmalarından farklı olarak ilk kez performans kriterleri için ' α 'nın etkisi araştırılmıştır.

Bu çalışmada, önerilen yaklaşımın etkinliği farklı gerçek koordineli kavşak modelleri üzerinde ve gerçek zamanlı veriler kullanılarak kanıtlanmıştır. Performans değerlendirmesi için seçilen kavşaklar Türkiye'nin Kilis iline aittir. Bu çalışmanın literatüre katkısı şu şekilde özetlenmiştir:

- Literatürde ilk defa önerilen Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış algoritması gerçek trafik verileriyle SUMO simülasyon ortamında uygulanmıştır. Bu çalışma, gerçek trafik koşullarındaki performansını ölçmeyi ve böylece pratik ortamlardaki etkinliğinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.
- Önerilen yöntem, aracın kavşağa ulaşması için gerekli sürenin hesaplanmasını basitleştirmekte ve gerçek zamanlı uygulanabilirliğini arttırmaktadır.

- Önerilen Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış yönteminde kullanılan optimum araç bekleme katsayısının etkisi, literatürde ilk kez araştırılmıştır.
- Optimum araç bekleme katsayısını tespit etmek için literatürde ilk kez regresyon tabanlı modelden yararlanılmıştır.
- Etkin sinyal kontrolü için maksimum ağırlıklı trafik akışı yöntemine yeni ve basitleştirilmiş bir yaklaşım önerilmektedir. Böylece pratik, güncel, gerçek zamanlı ve karmaşık prosedürlere veya yapay zekâ yöntemlerine ihtiyaç duymadan gerçek hayatta uygulanmıştır.

1.4. Tezin Organizasyonu

Bu çalışma beş bölüm olarak düzenlenmiştir. Giriş bölümünde, tezin ana konusu, amacı ve kapsamı ile tezin katkısı açıklanmıştır. Bölüm 2'de, trafik sinyal kontrolü alanındaki literatüre genel bir bakış sunulmuştur. Bölüm 3'te, trafik sinyal kontrol yöntemleri, regresyon analiz yöntemi ve bu çalışmada performans karşılaştırması için kullanılan algoritmalar ile SUMO (Kentsel Hareketlilik Simülatörü) tanıtılmıştır. Bölüm 4, tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaları ve elde edilen sonuçları sunmaktadır. Son olarak, Bölüm 5'te, sonuçlar ve gelecekte yapılacak çalışmalar hakkında bilgiler sunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölüm, tez kapsamında gerçekleştirilen literatür araştırmalarının bir özetini sunmaktadır. İlk olarak, sinyalize kavşaklarda trafik yoğunluğunu azaltmak amacıyla kullanılabilecek TSK yöntemlerine yer verilmektedir. Daha sonra, günümüzde yaygın olarak kullanılan geleneksel trafik kontrol sistemleri olan STSK ve UTSK sistemlerine yönelik çalışmalar incelenmiştir. Son olarak, bu çalışmada kullanılan yöntem olan ATSK'yı içeren araştırmalara değinilmiştir.

STSK stratejileri, trafik akışının nispeten istikrarlı ve tutarlı olduğu yerlerde uygunluk göstermektedir. Bu stratejiler, daha önce gözlemlenmiş trafik verilerine dayanarak çevrim süresi ve sinyal ayarlarını önceden belirleyen çevrimdışı optimizasyon algoritmalarını kullanmaktadır. Bu yöntemin temel amacı, ortalama gecikmeyi en aza indirmek, trafik ağın kapasitesini arttırmak gibi genel bir hedefe ulaşmaktır. Webster (1958) ve Miller (1963) tarafından başlangıç modelleri geliştirilerek, sabit zamanlı trafik kontrol stratejilerinin temeli atılmıştır. Kentsel alanlarda trafik sistemi son derece dinamik olduğundan, trafik kazaları, yol çalışmaları vb. etkenler trafik hacmini aniden değiştirebilmekte ve önceden belirlenmiş STSK performansını yetersiz bırakabilmektedir.

Sabit zamanlı kontrol stratejilerinin aksine, uyarlanabilir kontrol stratejilerinin temel amacı TSK planını her fazın yeşil süresini trafik talep durumlarına göre optimize etmektedir. Trafik talebi sensörler (loop dedektör, kameralar v.b) ile belirlenmektedir. Sensör teknolojisinin gelişmesi uyarmalı trafik sinyal kontrol sistemlerine olan ilgiyi artırmıştır. UTSK stratejileri sensörleri kullanarak döngü uzunluğuna karar vermektedir. Trafik uyarmalı sinyal kontrolünde, döngü uzunluğu, faz bölünmeleri ve faz sıralaması gibi parametreler, trafik durumuna bağlı olarak döngü dedektörlerinden veya diğer trafik sensörlerinden elde edilen verilere dayanarak dinamik olarak ayarlanır. Ancak, bu ayarlamaların esnekliği önceden belirlenmiş sabit sınırlar içinde gerçekleşmektedir (Çeltek, 2021).

STSK ve UTSK yöntemleri, trafik yönetiminde kontrol kurallarını veya politikalarını geliştirmede sınırlıdır. Bu yöntemler, sabit bir süre veya önceden belirlenmiş değerlere göre çalışır ve anlık trafik değişkenliğini dikkate almazlar (Zhou ve ark., 2017; Wei ve ark., 2019; Çeltek, 2021).

ATSK, mevcut trafik şartlarında döngü uzunluğunu tahmin etmek ve dinamik trafik kontrolünü gerçekleştirmek için kullanılan önemli bir stratejidir (Qadri ve diğ., 2020). Bu sistemlerde, trafik koşulları sürekli olarak izlenir ve sensörlerden toplanan

veriler kullanılarak trafik kontrol politikası ve işlevleri güncellenir. Bu yaklaşım, trafik akışını optimize etmek ve trafik sıkışıklığını azaltmak için diğer klasik yöntemlere kıyasla daha esnek ve dinamik üstünlük sunar (Çeltek ve diğ., 2020; Çeltek, 2021). Bu yöntem dinamik trafik kontrolünü gerçekleştirmek için uyarmalı trafik kontrol sistemlerinin modifiye edilmiş halidir (Qadri ve diğ., 2020).

Yapay Sinir Ağları (YSA), 1980'lerden bu yana yapay zekanın en güncel konularından biridir. İnsan beyni sinir ağını bilgi işleme perspektifinden soyutlar, basit bir model kurar ve farklı bağlantılara göre farklı ağlar oluşturur (Dong ve Hu, 1997; Wu ve Feng, 2018). YSA, biyolojik sinir ağlarının rolünü kopyalayan doğrusal olmayan istatistiksel veri modelleri olarak adlandırılır (Jain ve diğ., 1996; Abiodun ve diğ., 2019). YSA, mühendislik ve akademik çalışmalarda sıklıkla sinir ağı olarak ifade edilmektedir. Sinir ağı, çok sayıda düğümün (nöronun) birbirine bağlandığı bir hesaplama modelidir. Her düğüm, aktivasyon fonksiyonu olarak adlandırılan belirli bir çıkış fonksiyonunu temsil eder. Her iki düğüm arasındaki bağlantı, yapay sinir ağının hafızasına eşdeğer olan ve ağırlık olarak adlandırılan bağlantıdan geçen sinyal için temsili bir ağırlık olarak ifade edilir. Sinir ağının çıkış ağına nasıl bağlandığına, ağırlık değerine bağlı olarak değişir. Bunlara ek olarak, sinir ağı genellikle mevcut bir algoritmaya, fonksiyona bir yaklaşım veya mantık stratejisinin ifade şeklidir (Bulsari, 1993; Jenkins ve Tanguay, 1995; Wu ve Feng, 2018).

YSA gelişmiş yapısına rağmen bazı olumsuz etkilere ve sınırlamalara sahiptir. İlk olarak, YSA'nın etkili bir şekilde çalışabilmesi için çok miktarda veri gerekir ve yeterli miktarda veri olmadan YSA'nın genel performansı sınırlı kalır. Ayrıca YSA, yüksek hesaplama gücü gerektirir ki bu da güçlü donanımlar ile mümkündür. YSA eğitimi, doğru parametrelerin (öğrenme hızı, katman sayısı, nöron sayısı vb.) seçilmesini gerektirir. Bu parametrelerin optimizasyonu zaman alıcı ve karmaşıktır. Bunlara ek olarak, YSA, eğitim verisine aşırı derecede uyum sağlarsa aşırı öğrenme durumu gerçekleşir ve bu modelin yeni verilerde sağlıklı genelleme yapma yeteneğini azaltır.

YSA performansının eğitim veri setine bağlı olması, araştırmacıları eğitilmesi için veri setine bağlı olmayan yöntemlere yönlendirmiştir. Araştırmacılar, birçok farklı sezgisel optimizasyon yöntemlerini adaptif trafik sinyal kontrolüne uygulamıştır (Garcia-Nieto ve diğ., 2013; Çeltek ve diğ., 2020; Shaikh ve diğ., 2020). Parçacık sürü optimizasyon (PSO) algoritması kullanılarak yapılan bir çalışma ile sezgisel tabanlı bir yöntemin klasik trafik kontrol sistemlerinden daha iyi bir kontrol performansına sahip

olduğu ortaya konmuştur (Zhang ve Ni, 2017). García-Nieto ve diğ., tarafından yapılan (2012) çalışmada, PSO tabanlı kontrol yöntemi Sevilla (İspanya) şehrine ait trafik verilerine uygulanmıştır. Çalışmada, PSO ile elde edilen optimum döngü sürelerinin, hedeflerine zamanında ulaşan araç sayısında ve toplam yolculuk süresinde önemli iyileştirmeler sağladığı ifade edilmiştir. (García-Nieto ve diğ., 2012). Bir başka çalışma olarak arı koloni algoritması, trafik sinyal kontrolüne uygulanmış ve sonuçlar gözlenmiştir (Jovanović ve diğ., 2017).

YSA ve sezgisel optimizasyon yöntemleri, trafik sinyal ağlarının performansını artırmada önemli gelişmeler sunsa da gerçek zamanlı uygulamalar için hala çözülmesi gereken zorluklar bulunmaktadır. Özellikle bir trafik ağının anlık verilerle optimize edilmesi gerekliliği, hesaplama süresinin kısıtlamalarıyla karşı karşıya kalmamıza neden olmaktadır (Zhang ve Zhou, 2018). YSA ve sezgisel yöntem hesaplamalarının zaman alıcı olması, bu zorluğu daha da artırmaktadır (Zhao ve diğ., 2012).

Yapay optimizasyon algoritmaları için önemli bir diğer konu, trafik durumunun gerçek zamanlı ve doğru bir şekilde modellenmesidir. Bu modelleme sürecinde yapılan varsayımlar, mevcut matematiksel modellerin optimizasyon çözümlerinin genel başarısını etkiler. Özellikle, birden fazla kavşağın koordineli bir biçimde çalışması, büyük ölçekli trafik sinyal ağlarının oluşturulmasını sağlar. Trafik ağındaki sinyal sayısının artması, dinamik trafik koşullarıyla başa çıkma ve trafik akışını etkin bir şekilde yönetme zorluğunu da beraberinde getirmektedir (Wang ve diğ., 2020).

Trafiğin anlık olarak modellenmesi ve dinamik trafik koşullarıyla başa çıkmadaki zorluklar, ayrıca sezgisel yöntemlerdeki zaman alıcı hesaplamalar, araştırmacıları popüler olan takviyeli öğrenme (TÖ) tabanlı kontrol modellerine yönlendirmiştir. Model tabanlı takviyeli öğrenme yöntemleri, trafik sinyal kontrolüne uygulanmış ve kavşaklardaki toplam bekleme süresini en aza indirmeyi hedeflemiştir (Wiering, 2000). Ancak, modelleme süreci araştırmacılar için hala önemli ölçüde zorlayıcıdır ve uygun olmayan modelleme, kontrol sisteminin verimliliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu nedenle, araştırmacılar, modelsiz TÖ tabanlı kontrol yöntemlerine yönelmişlerdir (Abdoos, 2020). Modelsiz TÖ tabanlı kontrol yöntemlerinin, dinamik trafik rejimine uyum sağlayarak başarılı bir şekilde adaptif kontrolün sağlandığı yapılan çalışmalarda gösterilmiştir (Ge ve diğ., 2019; Abdoos, 2020). Trafik ağı, sürekli değişen koşullar ve beklenmedik olaylarla dolu bir ortamdır. Bu durum, takviyeli öğrenme algoritmalarının trafik sinyal ağındaki doğruluğunu ve etkinliğini olumsuz yönde etkilemektedir.

MaxPressure (MP) kavramı Wunderlich ve diğ. (2007) tarafından ilk olarak izole bir kavşağa uygulanmıştır ancak Wongpiromsarn ve diğ. (2012) ve Varaiya (2013), sinyalizasyon kavşak ağları için ilk MP kontrollerini geliştirmiştir (Levin ve diğ., 2023). Levin ve diğ. (2020) tarafından orijinal MP kontrolü bir sinyal döngüsü kısıtlaması içerecek şekilde yenilenmiştir. MP kontrolü, her bir fazın döngü başına en az bir zaman adımında çalışmasını sağlayacak şekilde bir faz dizisini sıralı olarak harekete geçirir. Döngüsel MP, orijinal MP kontrolüne kıyasla biraz daha düşük performans sergiler ancak pratikte daha uygulanabilir olması nedeniyle avantajlıdır (Levin ve diğ., 2020). Agofonov ve diğ. (2019) tarafından yapılan çalışmada deterministik bir algoritma kullanılarak trafik verilerinin akışı ve toplu işlenmesi için lambda veri işleme mimarisini Apache Spark çerçevesinde değerlendirilmiştir. Sonuçlar, geliştirilen algoritmanın geniş trafik senaryolarında yüksek trafik hacmine sahip trafik yol ağında kayda değer bir etkinlik sergilediğini göstermiştir.

Agafonov (2022) yaptığı çalışmada yüksek performanslı akıllı bir trafik sinyal kontrol sistemini maksimum ağırlıklı akış prensibinde deterministik bir teknik kullanarak uygulamıştır. Trafik sinyal döngüsünde belirli bir aşamada kavşaktan beklenen ağırlıklı trafik akışını maksimuma çıkarmaya odaklanan bir algoritma sunmuştur. Yumaganov ve diğ. (2023) tarafından trafik durum bilgilerini içeren maksimum ağırlık tabanlı trafik akış kontrol tekniğinin modifikasyonu sunulmuştur. Yapılan çalışma, araçların yeniden yönlendirme stratejisi ile uyarlanabilir trafik kontrol sistemlerine entegre edilmiştir.

Bu tez çalışmasında etkili trafik sinyal kontrolü için Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemini geliştirmeye yönelik yenilikçi bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yöntem, aracın kavşağa ulaşması için gerekli sürenin hesaplanmasını basitleştirmekte ve gerçek zamanlı uygulanabilirliğini arttırmaktadır. Önerilen yeni yöntem ile optimum araç bekleme katsayısının etkisi, literatürde ilk kez araştırılmıştır. Ayrıca, optimum araç bekleme katsayısını tespit etmek için literatürde ilk kez regresyon tabanlı modelden yararlanılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde ilk olarak; temel trafik kavramları, TSK yöntemlerinde performans analizinde dikkate alınan performans kriterleri ve trafik sinyal kontrol yöntemleri hakkında bilgiler verilmektedir. Ardından regresyon analiz yöntemi, tez çalışmasında kullanılan algoritmalar ve SUMO (Kentsel Hareketlilik Simülatörü) hakkında bilgiler sunulmaktadır.

3.1. Temel Trafik Sinyal Kavramları

Temel trafik kavramları amaçlarından biri, geçiş hakkını tahsis ederek insanların bir kavşak boyunca güvenli ve verimli bir şekilde hareketini sağlamaktır. Bu bölümde temel trafik sinyal kavramları ve kavşak türlerine ait kavramlar hakkında bilgi verilmektedir (Qadri ve diğ., 2020).

- ✓ **İzole Kavşak:** Trafik akışını bağımsız olarak düzenleyen ve diğer kavşaklarla koordinasyon içinde olmayan TSK sistemlerine sahip kavşaklardır. Bu kavşaklarda, her bir kavşak kendi yerel trafik koşullarını değerlendirir ve sinyal planlarını uygular. İzole kavşaklar genellikle düşük trafik yoğunluğuna veya küçük alanlara sahip bölgelerde tercih edilir.
- ✓ **Koordineli Kavşak:** Birden fazla kavşaktaki trafik sinyallerinin senkronize çalıştığı kavşaklardır. Koordineli kavşaklar genellikle kavşakların birbirini etkileyebileceği yoğun trafik bölgelerinde veya büyük şehirlerde tercih edilir.
- ✓ **Ana Yol Kavşağı:** Ana yoldaki trafik akışının düzenlendiği kavşaklardan her biridir.
- ✓ **Trafik Sinyal Ağı:** Kentsel alanlarda sık aralıklarla yerleştirilmiş ve trafik ışıkları ile kontrol edilen kavşaklar sistemidir.
- ✓ **Bağlantı Yolu:** İki kavşağı birbirine bağlayan ara yoldur.
- ✓ **Faz Süresi:** Ardışık iki yeşil ışık arasındaki zaman dilimidir.
- ✓ **Faz Sırası:** Sinyal döngüsü sırasında sinyal fazlarının sırasını ifade eder. Bir sinyal döngüsü genellikle birden fazla sinyal fazını içerir ve bu fazlar belirli bir sırayla aktive edilir.
- ✓ **Yeşil Süresi:** Yeşil süre, bir trafik sinyal fazının, belirli bir trafik hareketinin akış hızında ilerlediği süreyi ifade eder.

- ✓ **Etkin Yeşil Süresi:** Bir trafik sinyal fazı boyunca, belirli bir yönde çakışmayan trafik akışına verilen yeşil süreden, başlangıç ve bitişteki kayıplar çıkarıldığında kalan gerçek yeşil ışık süresidir.
- ✓ **Kırmızı Süresi:** Bir trafik sinyal fazında belirli bir yönde trafik akışının durdurulduğu süredir.
- ✓ **Etkin Kırmızı Süresi:** Araçların kırmızı ışıkta beklediği ve kuyruk oluşturduğu gerçek süredir. Bu süre, sarı ve kırmızı ışık sinyal sürelerinin toplamına eşittir.
- ✓ **Döngü Uzunluğu:** Bir trafik sinyal döngüsünün tamamlanması için gereken süreyi ifade eder. Bu süre, tüm sinyal fazlarının bir döngüyü tamamlaması için gereken toplam zamanı içerir.
- ✓ **Doymuş Trafik Rejimi:** Kavşaktaki trafik akışının maksimum kapasitesine ulaştığı ve tüm araçların optimal hızda hareket ettiği durumdur. Bu rejim altında, yol kapasitesi tamamen kullanılır ve ek araçların akışı mümkün olmaz, çünkü mevcut trafik yoğunluğu yolun taşıyabileceği en yüksek seviyededir.
- ✓ **Doymamış Trafik Rejimi:** Trafik akışının kavşak kapasitesinin altında olduğu, yani yolun mevcut kapasitesinin tam olarak kullanılmadığı ve araçların serbestçe hareket edebildiği trafik durumudur. Bu rejimde, trafik yoğunluğu düşük veya orta seviyededir.
- ✓ **Aşırı Doymuş Trafik Rejimi:** Trafik akışının kavşak kapasitesini aştığı ve ciddi trafik sıkışıklıklarının meydana geldiği durumdur. Bu rejimde, trafik yoğunluğu o kadar yüksektir ki, mevcut yol altyapısı trafiği etkin bir şekilde yönetemez, bu da sürekli dur-kalk hareketlerine, uzun kuyruklara ve büyük gecikmelere neden olur.
- ✓ **Ortalama Araç Bekleme Süresi:** Bir aracın tüm yolculuklar için ne kadar beklediğini ölçer. Araç hızının 0,5 m/s'nin altında olduğu süreyi ölçer.
- ✓ **Ortalama Araç Seyahat Süresi:** Bir aracın yolculuk süresini ölçen bir parametredir. Bu ölçüm, her bir aracın yolculuğunun başlangıç noktasından bitiş noktasına kadar olan süresini kapsar. Simülasyonda, her aracın seyahat süresi farklılık gösterebilir ve bu farklılıklar, genel trafik performansını değerlendirmek için ortalama bir değer olarak kullanılır.
- ✓ **Ortalama durma sayısı:** Bir aracın seyahati sırasında hızının 0 m/s'ye düştüğü ve tamamen durduğu toplam durma sayısıdır.

3.2. Trafik Sinyal Kontrol Yöntemlerinde Performans Kriterleri

Trafik sinyal kontrolünde performans kriterleri, trafik akışının verimliliğini ve yol kullanıcılarının memnuniyetini değerlendirmek için önemlidir. Ortalama araç bekleme süresi ve ortalama araç seyahat süresi, bu yöntemlerin etkinliğini ölçmek için yaygın olarak kullanılan iki ana kriterdir. Literatürde geniş yer bulan bu ölçütler, trafik sinyal kontrolü ve şehir planlaması alanında yapılan çalışmalarla sürekli olarak iyileştirilmektedir. Trafik yönetimi ve optimizasyon stratejileri, bu kriterlerin minimize edilmesine odaklanarak daha akıcı, verimli ve çevre dostu bir trafik akışı sağlamayı hedeflemektedir.

TSK sistem performansını değerlendirmek için sadece ortalama araç bekleme süresi ve ortalama araç seyahat süresi değil, birçok performans kriteri de kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları; kuyruk uzunluğu, emisyon salınımları ve çevresel etkileri, yol kapasitesi vb. bulunmaktadır.

Ortalama araç bekleme süresi, araçların trafik sinyalleri veya diğer nedenlerle durmak zorunda kaldıkları sürelerin ortalamasıdır. 1958 yılında Webster tarafından yapılan trafik sinyalizasyon çalışmaları, ortalama araç bekleme süresinin trafik akışının verimliliğini ve sürücü konforunu doğrudan etkilediğini göstermiştir. (Webster, 1958).

Kuyruk uzunluğu ise, bir kavşakta veya yol kesitinde trafikte bekleyen araçların oluşturduğu kuyrukta biriken araç sayısı veya kuyruk uzunluğu miktarıdır. Genellikle metre veya araç sayısı cinsinden ölçülür. Zhao ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada kuyruk uzunluğu tahmin yöntemlerini inceleyerek, bu ölçütün kavşak performansını değerlendirmedeki etkisini göstermiş ve kuyruk uzunluğunun trafik sinyal optimizasyonunda kritik bir parametre olduğunu vurgulamıştır. Bu parametre, kavşaktaki trafik sıkışıklığının ve kontrol sistemlerinin verimliliğinin bir göstergesidir.

Ortalama seyahat süresi, bir aracın bir noktadan başka bir noktaya ulaşmak için harcadığı ortalama zamanı ifade eder. Trafik yönetimi veya taşımacılık planlaması bağlamında, genellikle belirli bir rotadaki veya şehirdeki ortalama seyahat süresi hesaplanır ve bu süre, trafik akışının ve yol durumunun değerlendirilmesinde önemli bir ölçüttür.

Sonuç olarak, TSK sistemlerinin performansını değerlendirmek için çeşitli kritik ölçütler kullanılır ve bu ölçütlerin her biri, trafik akışının verimliliğini ve genel yol güvenliğini artırmada önemli bir rol oynar. Ek olarak trafik sıkışıklığının artması, trafikteki araçların daha fazla dur-kalk yapmasına neden olmaktadır. Böylece yakıt tüketimi ve zararlı gaz salınımı artar. Literatür çalışmaları, TSK sistemlerinin etkin

kontrolünün çevre kirliliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Barth ve Boriboonsomsin, 2008; Maadi ve ark., 2022).

3.3. Trafik Sinyal Kontrol Yöntemleri

Sinyalize kavşaklar, kentsel trafik ağının önemli bir bileşenidir ve trafik kontrolü ve yönetim stratejilerinde önemli bir rol oynar. Sinyal zamanlama ayarlarının temel amaçlarından biri insanları bir kavşakta güvenli ve verimli bir şekilde hareket ettirmektir. Bu hedefe ulaşmak için farklı kullanıcılara geçiş üstünlüğü veren bir trafik kontrol uygulaması gerekir. Trafik sinyal zaman planlamasını düzenlemek, kavşak sistemindeki trafik sıkışıklığını azaltmanın ve trafik akışını iyileştirmenin en hızlı ve en ekonomik yollarından biridir. Bu nedenle, mevcut kentsel trafik koşullarıyla başa çıkabilmek için TSK sisteminin zaman planlamasının güncellenmesi gerekmektedir (Akcelik, 1981; Qadri, 2020). TSK yöntemleri emisyon salınımı, ortalama bekleme ve seyahat süresi gibi çeşitli performans kriterlerine bağlı olarak iyileşme olanağı sunmaktadır (Eom ve Kim, 2020; Jamal, 2021).

TSK stratejileri genel olarak sabit zamanlı, uyarmalı ve adaptif kontrol stratejileri olarak sınıflandırılmıştır (Papageorgiou ve diğ., 2003; Zhao ve diğ., 2011; Ribeiro, 2016; Qadri ve diğ., 2020). Bu sınıflandırmanın temel nedeni, trafik sinyal planını optimize etmek için kullandıkları veri türü ve algoritmalarıdır.

3.3.1. Sabit Zamanlı Trafik Sinyal Kontrolü

Sabit zamanlı trafik sinyal kontrolü (STSK), temel olarak trafik akışının istikrarlı olduğu trafik sinyal sistemleri için uygundur. Gözlemlenen trafik verilerine dayanan bu stratejiler, TSK için çevrimdışı optimizasyon algoritmalarından yararlanır ve önceden belirlenmiş döngü uzunluğunu kullanır.

Günümüzde en yaygın trafik kontrol yöntemi STSK olmasına rağmen trafikte optimum bekleme süresi gereksinimini karşılayamaz. Ayrıca, trafik akışındaki ani değişikliklere uyum sağlayamaması nedeniyle trafik sıkışık problemini çözmede yetersiz kalmaktadır (Shinde, 2017).

3.3.2. Uyarmalı Trafik Sinyal Kontrolü

Sabit zamanlı kontrol yöntemlerinden farklı olarak uyarmalı trafik sinyal kontrolünde (UTSK) temel amaç sinyal planını her aşamadaki belirlenmiş trafik durumlarına göre optimize etmektir. Döngü uzunluğu, faz sıralaması gibi parametreler

trafik durumuna bağılı olarak döngü dedektörlerinden veya diğerk trafik sensörlerden gelen verilere dayanarak önceden belirlenmiş değerklere göre çalışır (Çeltek, 2021).

UTSK, belirli bir minimum ve maksimum yeşil süreye sahip olan temel bir sinyal programıyla çalışır. Bu sistem, mevcut faz için yeşil süreyi belirleyen basit bir kural setine dayanır, bu da faz taleplerine göre şekillenir. Faz talepleri, kavşağı yaklaşan araçlar tarafından oluşturulurken, çakışan fazlar için talepler diğerk kavşakta bekleyen araçlar tarafından belirlenir. Bu kontrol yönteminde, önceden belirlenmiş maksimum ve minimum süreler dikkate alınır. UTSK, STSK yöntemlerinden daha etkili olmasına rağmen, dinamik trafik akışındaki ani değışikliklere uyum sağlama konusunda sınırlıdır. Bu durum, araştırmacıların alternatif trafik kontrol yöntemlerine olan ilgisini artırmıştır.

3.3.3. Adaptif Trafik Sinyal Kontrolü

Geleneksel yöntemlerin dinamik trafik akışına uyum sağlama ve gerçek zamanlı sistemlere uyum sağlama konusundaki yetersizliğı, Adaptif Trafik Sinyal Kontrolü (ATSK) yöntemlerine olan ilgiyi artırmıştır. ATSK'nın temel özelliğı, belirlenmiş bir trafik amacı fonksiyonuna göre sinyal zamanlama stratejisini optimize edebilme yeteneğıdir. ATSK'nın işleyişı için kavşaklardaki trafik akışının, UTSK'ya benzer şekilde izlenmesi gerekmektedir. ATSK hem gerçek zamanlı trafik verilerini hem de trafik akışındaki olası değışikliklerin tahminini dikkate alır. Bunu yaparak, trafik akışındaki dalgalanmalarla daha verimli bir şekilde başa çıkabilmekte ve bir kavşağın veya bağlantılı kavşaklar ağıının operasyonel kapasitesini geliştirmektedir. (Miletić ve diğ., 2022).

3.4. Simülasyon Programı

Son yıllarda TSK ve ATSK için önerilen ve geliştirilen algoritmaların sayısında önemli bir artış yaşanmıştır. Analitik modeller genel sistem davranışını hakkında fikir vermesi açısından faydalı olsa da simülasyon araçları trafik sistemlerinin çeşitli koşullar altındaki tepkilerini analiz etmede önemli bir rol oynamaktadır.

Trafik simülatörleri, bir şehrin dijital versiyonunun modellenmesine, otoyollardaki gerçek harekete karşılık gelen çalışan bir trafik modelinin (ulaşım simülasyonu) oluşturulmasına olanak tanımaktadır. Trafik akışlarının modellenmesi, ortaya çıkan tüm sorunların izlenmesine ve bunları çözmek için kararlar alınmasına olanak tanıyan, yol üzerinde arabaların sanal hareketini sağlayan dinamik bir bilgisayar

sistemidir. Trafik simülatörleri, trafik akışının karmaşık dinamik davranışını analiz etmek için oldukça faydalıdır. Simülasyon, gerçek dünya sistemlerinin veya süreçlerinin taklit edilmesi yoluyla benzer trafik akış modelleri aracılığıyla uygun bir şekilde bilgi edinmek için kullanılır. Bu modeller, trafik akışının fiziksel yayılımının tanımlanmasına yardımcı olur. Ulaşım sistemleri daha da karmaşık hale geldikçe trafik simülasyonlarına talep giderek artmaktadır (Aleksander ve Paweł, 2020).

Trafik simülatörlerinin avantajları şu şekilde detaylandırılmıştır:

- ✓ Trafik simülatörü, trafik sıkışıklık düzeyini gerçekçi olarak analiz etme olanağı sunar.
- ✓ Bir simülasyon programı, araçların yolculuk süresinin ve maliyetinin gerçekçi olarak değerlendirilmesine olanak tanır. Özellikle trafiğin iyileştirilmesine ilişkin ekonomik değerlendirmenin belirlenmesinin gerekli olduğu durumlarda bu çok önemlidir (Guastella ve Bontempi, 2023).

Trafik simülatörleri genel olarak mikroskobik, makroskobik ve mezoskopik yaklaşım olarak üç sınıfta incelenir. Mikroskobik simülasyon yaklaşımı, trafik ağında sürücünün bireysel davranışını ve bununla birlikte diğer araçlarla veya yayalarla olan etkileşimini ayrıntılı olarak dikkate alır. Mikroskobik yaklaşım, ayrıntılı ve kesin olma eğilimindedir. Ancak bu teknik, her simülasyon adımı sırasında bir aracın davranışını tahmin etme ihtiyacından dolayı çok fazla hesaplama gücü gerektirir. Makroskopik yaklaşım ise trafik akışını bir bütün olarak dikkate alır. Yollarda meydana gelen olayları belirli bir olasılıkla ve bunların akışları nasıl etkelediğini tahmin etmeye çalışır. Çoğu zaman bu amaçla araştırmacılar, hareket eden araçların hızını yaklaşık olarak hesaplarlar (Aleksander ve Paweł, 2020). Trafik ağını daha genel değerlendirir ve küçük alanları dikkate almaz. Mezoskopik yaklaşım ise daha önce bahsedilen yaklaşımların bir karışımıdır. Bu yaklaşımda, orta düzeyde bir analiz hakimdir (Qadri ve diğ., 2020).

Günümüzde birçok trafik simülasyonu yazılımı bulunmaktadır. Bu yazılımlar ticari ve açık kaynaklı olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Ticari trafik simülasyon yazılım paketlerinden bazıları AIMSUN, VISSIM, ARCHISIM ve CORSIM'dir. Açık kaynaklı trafik simülatörleri arasında ise MATSim, TRANSIMS, MITSIMLab ve SUMO gibi yazılımlar bulunmaktadır (Saidallah ve diğ., 2016; Ali, 2021).

3.4.1. SUMO Simülasyon Programı

SUMO (Simulation of Urban Mobility), 2001 yılında Alman Havacılık ve Uzay Merkezi tarafından geliştirilen açık kaynaklı, mikroskobik tabanlı bir trafik simülasyon yazılımıdır (Lopez ve diğ., 2018). Bu yazılım, şehir içi ulaşım sistemlerinin detaylı modellemesini ve simülasyonunu sağlamak amacıyla tasarlanmıştır. SUMO, çeşitli ulaşım senaryolarının analiz edilmesi, trafik akışının optimize edilmesi ve ulaşım politikalarının etkilerinin değerlendirilmesi gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. SUMO, yüksek düzeyde özelleştirilebilir olması ve geniş bir kullanıcı topluluğuna sahip olması nedeniyle hem akademik araştırmalarda hem de pratik uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir.

SUMO, trafik ağlarının simülasyonunu gerçekleştirmek amacıyla tasarlanmış açık kaynaklı, taşınabilir, mikroskobik ve çok modlu bir trafik simülasyon paketidir. Bu özellikleri sayesinde, trafik simülasyonlarında en yaygın kullanılan platformlardan biri haline gelmiştir. SUMO, kullanıcıların simülasyon sürecini kontrol etmesini ve mevcut SUMO işlevselliğini genişletmesine olanak tanıyan Trafik Kontrol Arayüzü (TraCI) adı verilen bir API içerir (Jiang ve diğ., 2021).

SUMO'da emisyon hesaplamaları, park trafiği simülasyonu, demiryolu trafiği, trafik ışıklarının performansının değerlendirilmesi, trafik güvenliği ve risk analizi gibi birçok uygulama seçeneği bulunmaktadır (Kaur ve diğ., 2022).

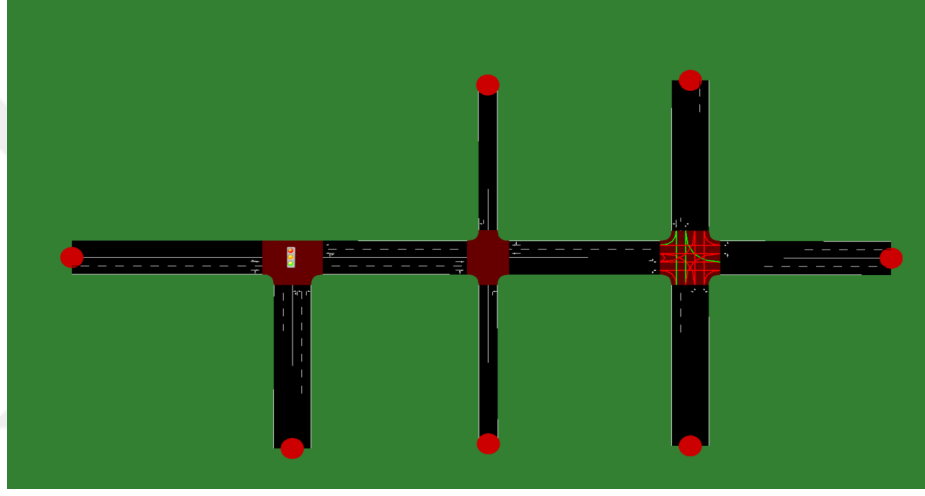
SUMO aracılığıyla oluşturulan bir simülasyon üç ana bileşenden oluşur. Bunlar; yol, rota ve konfigürasyon dosyalarıdır. Yol dosyası, yol ve şerit sayısı, trafik ışığı, yol koordinatları ve konumu gibi teknik özelliklerini kapsar ve esasen simüle edilen yolları temsil eder. Rota dosyası, simülasyonda kullanılacak araçların takip edeceği yol güzergahlarını içerir. Konfigürasyon dosyası, yol ve rota dosyalarındaki bilgilerin birleştirilerek simülasyon ortamında sunulmasını sağlar.

Trafik akışını manuel olarak oluşturmak, talep bilgisine göre hesaplamak veya tamamen rastgele üretmek mümkündür. Open Street Map ile dünya genelinde haritaları içe aktarmak ve gerçek senaryoları kullanarak simüle etmek mümkündür. TraCI, SUMO 'ya yeni işlevsellik eklenmesini veya başka yazılımlara bağlanmasını sağlar. Araç görselleştirmesini özelleştirmek için TraCI kullanılarak gerçek dünya yol ağları SUMO ile içe aktarılır (Guastella ve Bontempi, 2023).

Simülasyon görseli SUMO_GUI aracılığıyla sunulur. SUMO her simülasyon adımı için çeşitli ölçüm olanağı sunar. Araç hızı, araç bekleme süresi, araç seyahat süresi gürültü seviyesi, gaz emisyon miktarı ve yakıt tüketimi gibi parametreler SUMO'da

kullanılan ölçüm parametrelerinden bazılarıdır (Kotusevski ve Hawick, 2007; Çelteç ve diğ., 2020).

Trafik talep verileri ve bu verilerin simülasyon ortamına aktarılması yol, rota ve konfigürasyon dosyaları ile tanımlanır. SUMO, çalışma esnasında bu dosyaları kullanmaktadır. Rota dosyasında her aracın benzersiz ID kimliği, türü, kalkış zamanı, rengi ve aracın içinden geçtiği yolları bulunur. Bu tez çalışmasında izole ve koordineli kavşak sistemlerinde temel üç dosya da oluşturulmuştur. Tez çalışması kapsamında oluşturulan koordineli kavşak sistemine ait yol, rota ve konfigürasyon dosyaları Şekil 3.1, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te sırasıyla sunulmaktadır.



Şekil 3.1. Örnek bir yol dosyası

```

<trip id="Car2" type="Car" depart="74" departLane="best" departSpeed="max" color="125,85,144" from="8_0" to="7_1"/>
<trip id="Car4" type="Car" depart="96" departLane="best" departSpeed="max" color="145,34,174" from="1_0" to="4_1"/>
<trip id="Car8" type="Car" depart="98" departLane="best" departSpeed="max" color="225,116,134" from="1_0" to="3_1"/>
<trip id="Car6" type="Car" depart="99" departLane="best" departSpeed="max" color="225,30,244" from="5_0" to="9_1"/>
<trip id="Car9" type="Car" depart="118" departLane="best" departSpeed="max" color="200,203,113" from="6_0" to="7_1"/>
<trip id="Car7" type="Car" depart="125" departLane="best" departSpeed="max" color="197,206,254" from="5_0" to="3_1"/>
<trip id="Van10" type="Van" depart="284" departLane="best" departSpeed="max" color="67,227,121" from="1_0" to="8_1"/>
<trip id="Car3" type="Car" depart="299" departLane="best" departSpeed="max" color="82,119,198" from="8_0" to="7_1"/>
<trip id="Car20" type="Car" depart="309" departLane="best" departSpeed="max" color="137,237,207" from="5_0" to="3_1"/>
<trip id="Car18" type="Car" depart="337" departLane="best" departSpeed="max" color="52,234,5" from="1_0" to="7_1"/>
<trip id="Truck30" type="Truck" depart="354" departLane="best" departSpeed="max" color="176,187,170" from="1_0" to="8_1"/>
<trip id="Motorcycle16" type="Motorcycle" depart="355" departLane="best" departSpeed="max" color="205,13,149" from="9_0" to="3_1"/>
<trip id="Car21" type="Car" depart="357" departLane="best" departSpeed="max" color="99,228,9" from="5_0" to="3_1"/>
<trip id="Motorcycle13" type="Motorcycle" depart="363" departLane="best" departSpeed="max" color="163,119,243" from="8_0" to="7_1"/>
<trip id="Van25" type="Van" depart="397" departLane="best" departSpeed="max" color="101,213,69" from="1_0" to="8_1"/>
<trip id="Truck29" type="Truck" depart="433" departLane="best" departSpeed="max" color="122,119,94" from="1_0" to="7_1"/>
<trip id="Car23" type="Car" depart="452" departLane="best" departSpeed="max" color="180,122,175" from="9_0" to="3_1"/>
<trip id="Motorcycle14" type="Motorcycle" depart="453" departLane="best" departSpeed="max" color="88,20,101" from="8_0" to="7_1"/>
<trip id="Motorcycle12" type="Motorcycle" depart="455" departLane="best" departSpeed="max" color="183,97,138" from="1_0" to="7_1"/>
<trip id="Car22" type="Car" depart="476" departLane="best" departSpeed="max" color="118,18,115" from="5_0" to="3_1"/>
<trip id="Van28" type="Van" depart="480" departLane="best" departSpeed="max" color="90,154,221" from="2_0" to="3_1"/>
<trip id="Car19" type="Car" depart="486" departLane="best" departSpeed="max" color="114,241,41" from="1_0" to="4_1"/>
<trip id="Van26" type="Van" depart="494" departLane="best" departSpeed="max" color="35,233,222" from="1_0" to="7_1"/>
<trip id="Van27" type="Van" depart="510" departLane="best" departSpeed="max" color="90,71,79" from="1_0" to="7_1"/>
<trip id="Motorcycle15" type="Motorcycle" depart="547" departLane="best" departSpeed="max" color="60,4,222" from="9_0" to="3_1"/>
<trip id="Car24" type="Car" depart="562" departLane="best" departSpeed="max" color="201,89,156" from="6_0" to="7_1"/>
<trip id="Car17" type="Car" depart="574" departLane="best" departSpeed="max" color="237,215,239" from="1_0" to="7_1"/>
<trip id="Car36" type="Car" depart="616" departLane="best" departSpeed="max" color="225,23,164" from="2_0" to="7_1"/>
<trip id="Car42" type="Car" depart="639" departLane="best" departSpeed="max" color="102,68,167" from="5_0" to="3_1"/>
<trip id="Car38" type="Car" depart="678" departLane="best" departSpeed="max" color="38,24,67" from="1_0" to="4_1"/>
<trip id="Car34" type="Car" depart="678" departLane="best" departSpeed="max" color="85,5,107" from="1_0" to="7_1"/>
<trip id="Car39" type="Car" depart="691" departLane="best" departSpeed="max" color="99,18,118" from="5_0" to="3_1"/>
<trip id="Car45" type="Car" depart="700" departLane="best" departSpeed="max" color="234,175,127" from="1_0" to="3_1"/>
<trip id="Car33" type="Car" depart="700" departLane="best" departSpeed="max" color="45,120,59" from="1_0" to="7_1"/>
<trip id="Motorcycle32" type="Motorcycle" depart="708" departLane="best" departSpeed="max" color="211,47,209" from="2_0" to="3_1"/>
<trip id="Car37" type="Car" depart="717" departLane="best" departSpeed="max" color="177,224,185" from="1_0" to="7_1"/>
<trip id="Motorcycle31" type="Motorcycle" depart="743" departLane="best" departSpeed="max" color="91,58,28" from="9_0" to="2_1"/>
<trip id="Car44" type="Car" depart="785" departLane="best" departSpeed="max" color="72,160,20" from="1_0" to="3_1"/>
<trip id="Car43" type="Car" depart="791" departLane="best" departSpeed="max" color="103,188,210" from="1_0" to="3_1"/>
<trip id="Truck47" type="Truck" depart="817" departLane="best" departSpeed="max" color="222,142,17" from="1_0" to="7_1"/>
<trip id="Car40" type="Car" depart="825" departLane="best" departSpeed="max" color="120,254,49" from="5_0" to="3_1"/>
<trip id="Car35" type="Car" depart="825" departLane="best" departSpeed="max" color="7,127,230" from="1_0" to="7_1"/>
<trip id="Car41" type="Car" depart="853" departLane="best" departSpeed="max" color="132,151,210" from="5_0" to="3_1"/>
<trip id="Van46" type="Van" depart="891" departLane="best" departSpeed="max" color="165,205,121" from="8_0" to="7_1"/>
<trip id="Motorcycle48" type="Motorcycle" depart="912" departLane="best" departSpeed="max" color="87,139,5" from="8_0" to="7_1"/>

```

Şekil 3.2. Örnek bir rota dosyası

```

<configuration xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xsi:noNamespaceSchemaLocation="http://sumo.dlr.de/xsd/sumoConfiguration.xsd">
  <input>
    <net-file value="kilis.net.xml"/>
    <route-files value="Rota.rou.xml"/>
  </input>
  <time>
  </time>

  <processing>
    <ignore-route-errors value="true"/>
  </processing>
  <routing>
    <device.rerouting.adaptation-steps value="18"/>
    <device.rerouting.adaptation-interval value="10"/>
  </routing>

  <report>
    <verbose value="true"/>
    <no-step-log value="true"/>
  </report>
</configuration>

```

Şekil 3.3. Örnek bir konfigürasyon dosyası

3.5. Performans Karşılaştırması için Kullanılan Trafik Sinyal Kontrol Yöntemleri

Bu tez kapsamında kullanılan TSK algoritmaları olarak Statik, Uyarmalı, Gecikme tabanlı, Webster, MaxPressure ve Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemleri sunulmaktadır.

3.5.1. Statik Trafik Sinyal Kontrol Yöntemi

Statik TSK, her kavşakta trafik akışından bağımsız olarak önceden belirlenmiş döngü süreleri ve yeşil ışık süreleri kullanır. Bu yöntem genellikle trafik yoğunluğunun ve taleplerinin değişmediği durumlarda tercih edilir. STSK’da, trafik akışına dayalı karmaşık hesaplamalar gerektirmez ve kurulumu ve bakımı kolaydır. Önceden belirlenmiş döngü süreleri ve yeşil ışık süreleri genellikle daha düşük maliyetli bir seçenektir çünkü donanım ve yazılımı daha az karmaşık hale getirir. Trafik yoğunluğu değişken olduğunda, STSK verimliliği azaltabilir ve trafiği yeterince optimize etmeyebilir. Dinamik trafik koşullarına uyum sağlama konusunda sınırlıdır, bu nedenle değişen trafik modellerine ve ihtiyaçlarına yanıt verme yeteneği sınırlı olabilir (Köhler ve Strehler, 2019; Wei ve diğ., 2019). Şekil 3.4’te STSK’da gerçekleştirilen koordineli kavşağa ait faz verileri gösterilmiştir.

Phases						
	dur	state	next	name		
0	27.00	GGGGrrrrrrrrrrrrrrrr			+	×
1	3.00	yyyyrrrrrrrrrrrrrrrr			+	×
2	27.00	rrrrGGGGrrrrrrrrrrrr			+	×
3	3.00	rrrryyyyrrrrrrrrrrrr			+	×
4	27.00	rrrrrrrrGGGGrrrrrr			+	×
5	3.00	rrrrrrrryyyyrrrrrr			+	×
6	27.00	rrrrrrrrrrrrGGGGG			+	×
7	3.00	rrrrrrrrrrrrrrrrrrrr			+	×

Şekil 3.4. Statik zamanlı trafik sinyal kontrolü gerçekleştirilen koordineli kavşağa ait faz verileri

3.5.2. Uyarmalı Trafik Sinyal Kontrol Yöntemi

Uyarmalı TSK yönteminde, kavşaktaki her bir yeşil ışık fazı için belirli bir minimum ve maksimum yeşil süre vardır. Bu yöntem, kavşaktaki trafik akışını gerçek zamanlı olarak izleyen sensörler aracılığıyla toplanan verilere dayanmaktadır. Çevrimiçi veri toplamak için endüktif döngü dedektörü, manyetik dedektörler, basınca duyarlı dedektörler ve radar dedektörleri gibi farklı dedektörler kurulabilir. Bu sensörler trafik

araçlar temizlenene kadar uzatıldığı bir sistemdir. Etkin yeşil faz süresi boyunca, gelen araçların yol mesafesi sürekli olarak ölçülmektedir. Minimum ve maksimum yeşil faz süresi dikkate alınarak yeşil faz süresinin uzatılmasına veya sonlandırılmasına karar verilmektedir (Oertel ve Wagner, 2011). Araçların mevcut hızlarının maksimum hızlarına oranı kullanılarak anlık zaman kaybı hesaplanmaktadır. Bu metrik, trafik ışıklarının zamanlamasının dinamik olarak ayarlanmasına yardımcı olmaktadır (Oertel ve Wagner, 2011). Denklem 3.2’de anlık zaman kaybının hesaplanması ve kullanımı verilmiştir.

$$T_L = 1 - \frac{V}{V_{max}} \quad (3.2)$$

burada; T_L anlık zaman kaybı, V aracın mevcut hızı, V_{max} izin verilen maksimum hızı ifade etmektedir.

3.5.4. Webster Trafik Sinyal Kontrol Yöntemi

1958 yılında, Alexander P. Webster tarafından izole bir kavşaktaki TSK performansını artırmak amacıyla ortaya konulan bir yöntemdir. Webster yöntemi, teorik ve deneysel olarak desteklenmiştir. Teorik olarak, matematiksel modellemeler ve trafik akışı teorisi kullanılarak yöntemin etkinliği gösterilmiştir. Deneysel olarak, gerçek trafik koşullarında Webster’ın önerdiği yeşil ışık sürelerinin uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Webster yöntemi, trafik sinyalizasyonunda döngü sürelerini ve yeşil ışık sürelerini optimize etmek için kullanılır. Temel prensibi, bir döngü boyunca trafik akışının dengelenmesidir. Yani, belirli bir döngü süresi boyunca her bir sinyal durumu için optimum yeşil ışık sürelerini belirleyerek, trafiği mümkün olduğunca akıcı hale getirmeyi amaçlar (Webster, 1958).

Webster yöntemi, iki trafik sinyal zamanlama yaklaşımını incelemektedir. İlk yaklaşım, optimal döngü uzunluğunu elde etmek için kullanılan formülü içerir. Optimal döngü uzunluğu, belirli bir süre içindeki tüm araçların deneyimlediği minimum ortalama kontrol gecikmesini sağlayan döngü uzunluğudur. İkinci yaklaşım ise sinyal faz sürelerini içerir. Webster hem teorik hem de deneysel olarak, toplam kavşak gecikmesini en aza indirmek için sabit zamanlı sinyallerin belirli bir döngü uzunluğuna ve eşit doygunluk derecelerine sahip olması gerektiğini göstermiştir. Optimal döngü uzunluğu formülü Denklem 3.3’te verilmiştir. Döngü başına toplam kayıp zaman Denklem 3.4’te, kritik faz akış oranlarının toplamı Denklem 3.5’te verilmiştir.

$$C_0 = \frac{1,5xL + 5}{1 - Y} \quad (3.3)$$

$$L = \sum L_i \quad (3.4)$$

$$Y = \sum y_i \quad (3.5)$$

Burada; C_0 optimal döngü süresi, L döngü başına toplam kayıp zaman, L_i i. faz değeri için döngü kayıp zamanı, Y kritik faz akış oranlarının toplamı, y_i i. faz değeri için kritik akış oranını temsil etmektedir.

Minimum toplam gecikme durumu, uygun bir döngü uzunluğu ve yeşil sürelerin seçilmesiyle sağlanır. Belirli bir döngü uzunluğu için, etkin yeşil süreler kullanılarak fazların kritik akış oranına bağlı olarak hesaplanmaktadır. Etkin yeşil süreler (G_i), her faz değeri için kritik akışına orantılı olarak dağıtılır ve Denklem 3.6 kullanılarak belirlenmiştir.

$$G_i = \frac{y_i}{Y} x(C_0 - L) \quad (3.6)$$

Kavşağın toplam kayıp süresi toplamına tüm etkin yeşil sürelerin eklenmesiyle hesaplanan bir değer olan optimal döngü uzunluğu, trafik sinyalizasyonunda kritik bir parametredir. Bu nedenle, optimal döngü uzunluğu hesaplanırken, toplam kayıp süresi bu uzunluktan çıkarılır ve kalan döngü uzunluğu fazları arasında yeşil süre olarak dağıtılmaktadır. Bu yöntem, farklı fazlar arasında yeşil süreyi trafik talebi ve kayıp zamanları dikkate alarak dengelemekte ve kavşaktaki toplam gecikmeyi en aza indirmeyi amaçlamaktadır.

3.5.5. MaxPressure Trafik Sinyal Kontrol Yöntemi

MaxPressure (MP) yöntemi, merkezi olmayan sinyal kontrol yönteminin bir türüdür. MP ilk olarak iletişim ve güç sistemlerinin planlamasında önerilmiştir (Tassiulas ve Ephremides, 1990). MP denetleyicisinin trafik sinyal kontrolüne yönelik ilk uygulaması ise Wongpiromsarn ve diğ., (2012) tarafından kentsel trafik ağına uygulanmasıyla olmuştur. Varaiya (2013) TSK'da, trafik durumunu araç kuyruk uzunluklarına göre modellemiştir. Birçok literatür çalışması da Varaiya'nın (2013) araştırmasını desteklemiştir.

Trafik ağı kontrolü, merkezi ve merkezi olmayan/dağıtılmış kontrol olarak sınıflandırılabilir (Manolis ve diğerleri, 2018; Li ve diğerleri, 2021). MP, basit algoritması sayesinde karmaşık donanım konfigürasyonlarına olan ihtiyacı ortadan kaldırır.

MP yaklaşımı, bir kavşağın her bir kolu içindeki basınç farkları değerlendirerek çalışmaktadır. Basınçtaki bu farklılıklar, yukarı ve aşağı yöndeki bağlantılar arasındaki kuyruk uzunlukları değerlendirilerek hesaplanmaktadır. Burada, takip eden aralıkta en yüksek basıncı sergileyen yol şeridine yeşil sinyal verilir. MP'nin formülü Denklem 3.7'te verilmiştir.

$$MP(p) = \sum_{l \in L_{p,gelen}} |V_l| - \sum_{l \in L_{p,giden}} |V_l| \quad (3.7)$$

burada; $L_{p,gelen}$ yeşil faz süresince gelen yol şeritlerinin kümesini, $L_{p,giden}$ gelen yol şeritlerden ayrılan giden şeritlerinin kümesi ve V_l ilgili şeritteki araç sayısını ifade etmektedir.

MP, merkezi olmayan kontrol sistemine dayanır ve yerel kavşaklardaki kalibrasyon ihtiyacından yoksun çok yönlü bir algoritma olarak hizmet etmektedir.

3.5.6. Klasik Maksimum Ağırlıklı Trafik Sinyal Kontrol Yöntemi

Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemi, trafik sinyalinin belirli bir aşamasında bir kavşak boyunca tahmin edilen trafik akışının tahminine ve maksimum ağırlık prensibine dayanan uyarlanabilir bir trafik sinyali kontrol yöntemidir. Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemi yapay zekâ kullanarak ağdaki akışın maksimum olmasını sağlamaktadır. Trafik ışığının çalışma döngüsü her faz süresince kavşaktan geçen trafik akışındaki tahmin sonuçlarına göre gerçekleşmektedir. Yönteme göre, öngörülen trafik akışının maksimum olduğu faz seçilir. Bu şekilde, trafik akışının yoğunluğu ve hareketliliği göz önünde bulundurularak en uygun trafik ışığı fazı belirlenmektedir. Bu yöntem, trafik akışını daha etkin bir şekilde yönetme ve kavşaklardaki trafiği optimize etmek amacıyla kullanılmaktadır (Agafonov ve diğ., 2022; Agafonov, 2022). Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yönteminin sözde kod algoritması Algoritma 1'de verilmiştir.

Algoritma 1. Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemi sözde kod algoritması

```

#  $\tau_{min}$ : minimum yeşil faz süresi
#  $t_p$ :  $p \in P$  trafik ışığının mevcut aktif fazının süresi
#  $P$ : trafik ışığı fazlar kümesi
#  $p$ : faz


---


giriş_verileri :  $\tau_{min}, t_p, P$ 
çıkış_verileri :  $p$ 
if  $t_p < \tau_{min}$  then
     $p = faz$ 
     $t_p = t_p + 1$ 
else
     $faz = \max(\{Maksimum Ağırlıklı Akış (Faz) her P fazında\})$ 
     $t_p = 0$ 
end if

```

Yöntemdeki temel adım, $p \in P$ ile temsil edilen belirli bir faz sırasında kavşaktaki maksimum ağırlıklı trafik akışını tahmin eden algoritmayı içerir. Bu tahmin Maksimum Ağırlıklı Akış (Faz) fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilir. Ağırlıklı trafik akışı tahmininin hesaplanması Denklem 3.8 ve Denklem 3.9'de verilen denklemler kullanılarak gerçekleştirilir.

$$Maksimum Ağırlıklı Akış(faz) = \sum_{l \in faz} \sum_{c \in C_l} \mu(c, l) I(t(c) < \tau_{min}) \quad (3.8)$$

c aracının l şeridindeki bekleme süresi için hesaplanacak $\mu(c, l)$ katsayısı aşağıdaki gibidir:

$$\mu(c, l) = 1 + \alpha \cdot wait(c, l) \quad (3.9)$$

burada; l karşıdan gelen şeritlerde trafik ışığının yeşil fazı ile ilişkili trafik şeridi, C_l l şeridindeki hareketli araçlar kümesi, $t(c)$ $c \in C_l$ aracının kavşağa ulaşması için gereken tahmini süre, I Gösterge fonksiyonu $I(val)$, $val = Doğru$ ise 1, aksi takdirde 0 döndüren bir göstergedir, $\mu(c, l)$, araç bekleme katsayısı, $wait(c, l)$ c aracının l şeridindeki bekleme süresi, α maksimum ağırlık gecikme katsayısıdır.

Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yönteminde, trafik sinyalinin çalışma döngüsü her faz süresince kavşaktan geçen trafik akışındaki tahmin sonuçlarına göre gerçekleşmektedir. Araçların kavşakta bekleme sürelerini $t(c)$ 'yi dikkate alan ağırlıklı bir akış tahmini oluşturulmaktadır. Ayrıca araç bekleme katsayısı $\mu(c, l)$ hesaplanırken ' α ' değeri geleneksel Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yönteminde ' α ' katsayısı 0,01 olarak belirlenmiştir. Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yönteminde yapay zekâ

kullanılarak trafik ağındaki akışın maksimum olması sağlanırken, aynı zamanda deterministik yaklaşımlar kullanılmıştır.

3.6. Regresyon Analiz Yöntemi

Regresyon, bir bağımlı değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkinin gücünü ve niteliğini belirleyen istatistiksel bir kavramdır (Kutner ve diğ., 1983; Dizmenler, 2023). Regresyon analizi, tahmin edici bağımsız değişkenlerin değerlerine dayalı olarak bir yanıt (bağımlı) değişkeninin sayısal değerlerini tahmin etmek için regresyon modelleri tasarlamayı amaçlar. Regresyon analizi, finans, yatırım, tahmin modeli oluşturma ve gelecekteki değerleri öngörme gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır. Eğer regresyonda iki değişken varsa, bağımsız değişken tahminin temelini oluşturur. Tahmini yapılacak olan değişken ise bağımlı değişken olarak adlandırılmaktadır. Regresyon analizi, doğrusal (lineer), doğrusal olmayan ve çoklu olmak üzere çeşitli türlere sahiptir (Yigit, 2022). En yaygın kullanılan regresyon türleri, basit doğrusal regresyon ve çoklu doğrusal regresyondur.

Doğrusal (lineer) regresyon, istatistik ve makine öğreniminde yaygın olarak kullanılan bir denetimli öğrenme algoritmasıdır. Bu yöntem, bağımsız değişkenler (özellikler) ile bağımlı değişken (hedef) arasındaki doğrusal ilişkiyi modellemek için kullanılır. Doğrusal regresyon, veri noktalarının oluşturduğu bir doğrusal eğriyi (en iyi uyan doğruyu) bulmayı amaçlar.

Doğrusal Regresyonun Temel Prensipleri:

1. Model Denklemi:

- Doğrusal regresyon modeli, bağımsız değişkenler ve bağımlı değişken arasındaki ilişkiyi aşağıdaki doğrusal Denklem 3.10'da ifade edilmektedir.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \epsilon \quad (3.10)$$

burada; y bağımlı değişken (tahmin edilen değer), $x_1, x_2, \dots, x_n$: bağımsız değişkenler (özellikler), β_0 kesme noktası, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ bağımsız değişkenlerin katsayısı, ϵ : Hata terimini ifade etmektedir.

2. Katsayıların (β) Tahmin Edilmesi:

En küçük kareler yöntemi genellikle katsayıları tahmin etmek için kullanılmaktadır. Bu yöntem, hata terimlerinin karelerinin toplamını (residual sum of squares, RSS) minimize etmeye çalışır. Denklem 3.11'de hata terimlerinin karelerinin toplamını verilmektedir.

$$RSS = \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.11)$$

burada y_i gerçek değerler, $\hat{y}_i$ tahmin edilen değerlerdir.

3.Modelin Uygulanması:

- Tahmin edilen katsayılar (β) kullanılarak yeni veri noktalarının tahmin edilmesi sağlanır.

Doğrusal Regresyonun Avantajları:

- Basitlik ve Yorumlanabilirlik: Modelin basit olması ve katsayıların bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisini göstermesi nedeniyle kolayca yorumlanır.
- Hızlı Hesaplama: Küçük ve orta büyüklükteki veri setleri için hızlı hesaplanır.
- İstatistiksel Özellikler: İstatistiksel anlamlılık testleri ve güven aralıkları gibi birçok istatistiksel araçla desteklenir.

Doğrusal Regresyonun Dezavantajları:

- Lineer Varsayım: Bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki ilişkinin doğrusal olması varsayımı gereklidir. Gerçek dünya verilerinde bu her zaman geçerli değildir.
- Duyarlılık: Aykırı değerler modele büyük ölçüde etki eder.
- Çoklu Doğrusal Bağlantı: Bağımsız değişkenler arasında yüksek derecede doğrusal ilişki varsa, katsayı tahminleri kararsız hale gelir.

Doğrusal regresyon, verilerdeki doğrusal ilişkileri modellemek için güçlü ve basit bir yöntemdir ve birçok farklı alan ve uygulamada kullanılmaktadır. Ancak, modelin geçerliliği ve doğruluğu, bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki ilişkinin gerçekten doğrusal olup olmamasına bağlıdır.

Polinom regresyon yöntemi, doğrusal regresyonun özel bir durumudur ve bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasındaki ilişkiyi modellemek için polinom terimler kullanır. Bu yöntem, veriler arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri yakalamak için doğrusal regresyon modelini genişletir.

Polinom Regresyonun Temel Prensipleri:

1.Model denklemi:

- Polinom regresyon modeli, bağımsız değişkenlerin polinom terimlerini içerir ve Denklem 3.12’de ifade edilir:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 \dots + \beta_n x^n + \epsilon \quad (3.12)$$

burada; y bağımlı değişken (tahmin edilen değer), x bağımsız değişkenler(özellikler), $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_n$ polinom katsayıları, n polinom derecesi, ϵ hata terimidir.

2.Katsayıların (β) Tahmin Edilmesi:

En küçük kareler yöntemi (Ordinary Least Squares, OLS) genellikle katsayıları tahmin etmek için kullanılır. Bu yöntem, hata terimlerinin karelerinin toplamını (residual sum of squares, RSS) Denklem 3.13'te minimize etmeye çalışır:

$$RSS = \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.13)$$

burada; y_i gerçek değerler, $\hat{y}_i$ tahmin edilen değerlerdir.

3.Modelin Uygulanması:

- Tahmin edilen katsayılar (β) kullanılarak yeni veri noktalarının tahmin edilmesi sağlanır.

Polinom Regresyonun Avantajları:

- Doğrusal Olmayan İlişkileri Modelleme: Veriler arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri yakalamak için esnek bir yapıya sahiptir.
- Basitlik: Modelin kurulumu ve yorumlanması, özellikle düşük dereceli polinomlar için, oldukça basittir.

Polinom Regresyonun Dezavantajları:

- Aşırı öğrenme: Polinom derecesi çok yüksek olduğunda, model veriye çok fazla uyum sağlar ve genelleme yeteneği azalır. Bu, özellikle veri seti küçükse büyük bir sorun olabilir.
- Hesaplama Maliyeti: Yüksek dereceli polinomlar, hesaplama maliyetini artırabilir.

K-En Yakın Komşu (K-Nearest Neighbors, KNN) regresyon yöntemi, denetimli öğrenme algoritmalarından biridir ve hem sınıflandırma hem de regresyon problemlerinde kullanılmaktadır. Bu yöntemde, bir veri noktası, özellik uzayında kendisine en yakın K tane komşunun hedef değeri dikkate alınarak tahmin edilmektedir.

KNN Regresyonunun Adımları:

1.Verit Kümesinin Hazırlanması:

- Her veri noktasının özellikleri ve hedef değeri (bağımlı değişken) belirlenir.

2.K Değerinin Seçilmesi:

- K değeri, komşu olarak kaç veri noktasının dikkate alınacağını belirler. Bu değer, problemde probleme değişebilir ve genellikle çapraz doğrulama yöntemiyle optimize edilir.

3.Öklidyen Mesafe Hesaplama:

- Test veri noktasının eğitim veri noktasına olan uzaklığı hesaplanır. En yaygın kullanılan mesafe metriği Öklidyen mesafedir, ancak Manhattan mesafesi, Minkowski mesafesi gibi diğer mesafe metrikleri de kullanılır.

Öklidyen mesafe formülü Denklem 3.14'te verilmiştir.

$$d(x,y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3.14)$$

burada, x ve y iki veri noktasıdır ve n özelliklerin sayısını temsil eder.

4. K En Yakın Komşunun Belirlenmesi:

- Test veri noktasına en yakın K tane eğitim veri noktası seçilir.

5.Tahminin Yapılması:

- K komşunun hedef değerlerinin ortalaması alınarak tahmin yapılır.

Regresyon için tahmin formülü Denklem 3.15 ile ifade edilir.

$$\hat{y} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K y_i \quad (3.15)$$

burada, y_i K tane en yakın komşunun hedef değeridir.

KNN Regresyonunun Avantajları:

- Basitlik: Algoritmanın anlaşılması ve uygulanması kolaydır.
- Parametrik Olmama: Verinin dağılımı hakkında herhangi bir varsayımda bulunmaz.

KNN Regresyonunun Dezavantajları:

- Hesaplama Maliyeti: Büyük veri setlerinde mesafe hesaplamaları zaman alıcıdır.
- Hafıza Maliyeti: Tüm eğitim verilerini saklamak gerektiğinden hafıza kullanımı yüksektir.
- Özellik Ölçeklendirme Gereksinimi: Özellikler farklı ölçeklerde olduğunda performans düşer ve bu nedenle ölçeklendirme veya normalizasyon gereklidir.

KNN regresyonu, özellikle veri setinin yapısı hakkında az bilgi olduğunda veya veri seti küçük olduğunda etkili bir yöntemdir. Ancak büyük veri setlerinde veya yüksek boyutlu veri seti kullanımında diğer yöntemlerle (örneğin, doğrusal regresyon, karar ağaçları vb.) karşılaştırılmalıdır.

Bu tez çalışmasında tahmin edilen ile gerçek değer arasındaki farkları bulmak, tahmin algoritmasının performansını ölçmek ve hata analizi yapmak için farklı yöntemler seçilmiştir. Bunlar; RMSE (Root Mean Square Error- Kök ortalama kare hatası), diğeri SSE (Sum of Squared Errors- Karesel Hata Toplamı)'dir.

Kök ortalama kare hatası Denklem 3.16 ve Karesel Hata Toplamı Denklem 3.17'de verilmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (3.16)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 \quad (3.17)$$

burada; y_i i. gerçek değer, x_i i. tahmin edilen değer, n toplam veri sayısıdır.

Regresyon yöntemleri, trafik akışını kontrol etmede çeşitli parametrelerin optimize edilerek hesaplanmasında kullanmak için uygundur. Bu nedenle bu tez çalışmasında önerilen yöntemde regresyon analiz yöntemi trafik sinyal kontrol sistemine entegre edilerek kullanılmıştır.

3.7. Önerilen Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış Yöntemi

Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yönteminde yapay zekâ kullanılarak trafik ağındaki akışın maksimum olması sağlanırken, aynı zamanda deterministik yaklaşımlar kullanılmıştır. Ağırlık tabanlı yönteminin verimliliğini artırmak ve onu daha uygulanabilir hale getirmek için önerilen yenilikçi yaklaşım ayrıntılarıyla bu bölümde anlatılmaktadır.

Önerilen yeni yaklaşım iki temel stratejiye dayanmaktadır. İlk strateji, araçların kavşağa ulaşması için gereken sürenin hesaplanmasını basitleştirmektedir. Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yönteminde yapay zekâ kullanılarak trafik ağındaki akışın maksimum olması sağlanırken, aynı zamanda deterministik yaklaşımlar kullanılmaktadır. Araçların kavşağa ulaşması için gereken süreyi tahmin etmek için öğrenmeye dayalı bir yöntem kullanarak hesaplama süresini artırır. Önerilen yeni

yöntem, kavşaklarda bulunan dedektörler aracılığıyla araçların konum ve ortalama hız bilgilerini toplayarak araçların kavşağa ulaşma süresini hesaplamaktadır. Bu yöntem hesaplama yükünü azaltır ve gerçek zamanlı uygulanabilirliği artırmaktadır. Sonuç olarak önerilen yöntem, trafik sinyal kontrolü için verimli ve pratik bir çözüm sunmaktadır. Önerilen Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış yönteminin ilk stratejisine yönelik sözde kod algoritması Algoritma 2’de sunulmaktadır. Burada, kavşağa yaklaşan araçların dedektör sınırını içinde olup olmadığı kontrol edilmektedir. Aracın trafik ışığına olan mesafesi dedektör sınırı içindeyse ve aracın hızı sıfırdan büyükse yani hareket halinde ise aracın kavşağa yaklaşma süresi hesaplanmaktadır. Aracın kavşağa yaklaşma süresi olan $t(c)$, τ_{min} minimum yeşil faz süresinden küçükse faz akış değeri p_a hesaplanmaktadır. Aracın trafik ışığına olan mesafesi dedektör sınırı içinde ve aracın hızı sıfırdan küçükse, aracın kavşağa varış süresi sıfırdır ve faz akış değeri listeye eklenmektedir. Ardından toplam faz akışı hesaplanmaktadır. Listesindeki en büyük ağırlık tabanlı akış değeri bulunmaktadır. Böylece en büyük ağırlıklı akış değerine sahip gelen kenarın indeksini döndürülmektedir.

Algoritma 2. Önerilen Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış sözde kod algoritması

```

#  $w_t$ : bekleme süresi
#  $t(c)$ : kavşağa yaklaşma süresi
#  $p_a$ : faz akış değeri
#  $v$ : hız
#  $d$ : aracın trafik ışığından uzaklığı
#  $\tau_{min}$ : minimum yeşil faz süresi
#  $d_r$ : dedektör mesafesi


---


giriş_verileri:  $w_t, t(c), v, d, d_r, \tau_{min}$ 
çıkış_verileri:  $p_a$ 
if  $d \leq d_r$  then
    if  $v \geq 0$  then
         $t(c) = d / v$ 
        if  $t(c) < \tau_{min}$ 
             $p_a = 1 + \alpha * w_t$ 
        end if
    else
         $t(c) = 0$ 
         $p_a.append(p_a)$ 
    end if
end if

```

İkinci strateji, trafik performans kriterleri ile farklı ' α ' değerleri arasındaki ilişkiyi incelemek ve optimum ' α ' değerini belirlemek için regresyon analiz yöntemlerini kullanılmaktadır. Bu strateji, trafik akışını optimize etmek ve araç bekleme sürelerini en aza indirmek için geliştirilmiştir. ' α ' adı verilen parametre maksimum ağırlık gecikme katsayısını tanımlar. Bu parametre, trafik sinyal kontrol sistemlerinde kavşaklarda araç bekleme sürelerini ve genel trafik performansını etkileyen önemli bir faktördür. ' α ' parametresi literatürde genel olarak 0,01 sabit değeri olarak kabul edilmiştir (Agafonov, 2022). Ancak bu sabit değer her zaman tüm trafik koşulları ve kavşak yapıları için en uygun sonuçları vermeyebilir.

Bu çalışmada farklı ' α ' değerlerinin trafik performans kriterleri üzerindeki etkisini araştırmak için regresyon yöntemleri kullanılmıştır. Regresyon analizleri, bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki ilişkiyi belirli bir veri seti üzerinde modelleyerek en uygun parametrelerin belirlenmesine yardımcı olur. Bu bağlamda farklı ' α ' değerleri ile bu değerlere karşılık gelen trafik performans kriterleri (α değerleri, araç bekleme süreleri ve ortalama seyahat süresi) arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

Çalışmada belirli bir trafik ağı ve kavşak yapısı üzerinde farklı ' α ' değerleri test edilmiştir. Her bir ' α ' değeri için trafik simülasyonları gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar trafik performans kriterleri (ortalama bekleme süresi ve ortalama seyahat süresi) kaydedilmiştir.

Elde edilen veriler üzerinde regresyon analizi yapılarak trafik performansını maksimuma çıkaran optimum ' α ' değeri belirlenmiştir. Bu analiz, ' α ' değerinin trafik performansı üzerindeki etkilerini detaylandırarak belirli trafik koşulları için hangi ' α ' değerinin en uygun olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak sabit bir ' α ' değeri yerine dinamik olarak belirlenen ve trafik koşullarına göre ayarlanan bir ' α ' değeri kullanılarak trafik sinyal kontrol sistemlerinin verimliliği artırılmıştır.

Bu çalışmada kullanılan regresyon yöntemi tabanlı yazılım Python dilinde yazılmıştır. JetBrains tarafından geliştirilen bir Python IDE (Entegre Geliştirme Ortamı) olan PyCharm üzerinde çalıştırılmıştır. Çalışma kapsamındaki tüm simülasyonlar Windows 10 işletim sistemli, I7 7500U Intel 2.7 GHz işlemcili, 16 GB RAM donanım özelliklerine sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Regresyon analizini gerçekleştirmek için izole kavşakta 102 ve koordineli kavşakta 102 veri kullanılmıştır. Bu çalışmada izole kavşakta kullanılan veriler Çizelge 3.1, koordineli kavşakta kullanılan veriler Çizelge 3.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Regresyon analizi için izole kavşakta kullanılan veriler

Alfa(α)	Ortalama seyahat süresi (s)	Ortalama bekleme süresi (s)
0,005	122,69	3,09
0,0025	122,69	3,09
0,00125	122,69	3,09
0,01	123,25	3,21
0,02	122,82	3,13
0,03	122,84	3,12
0,04	122,83	3,09
0,05	122,85	3,00
0,06	122,85	3,00
0,07	122,88	3,02
0,08	123,08	3,15
0,09	123,17	3,23
0,10	123,11	3,12
0,11	123,03	3,21
0,12	122,99	3,13
0,13	123,09	3,18
0,14	122,99	3,12
0,15	123,03	3,12
0,16	123,03	3,12
0,17	123,15	3,21
0,18	123,15	3,21
0,19	123,03	3,12
0,20	122,96	3,07
0,21	123,25	3,21
0,22	123,25	3,21
0,23	123,11	3,21
0,24	123,11	3,21
0,25	123,11	3,21
0,26	123,06	3,12
0,27	123,06	3,12
0,28	123,06	3,12
0,29	123,33	3,31
0,30	123,33	3,31
0,31	123,33	3,31
0,32	123,33	3,31
0,33	123,33	3,31
0,34	123,33	3,31
0,35	123,29	3,29
0,36	123,29	3,29
0,37	123,29	3,29
0,38	123,29	3,29
0,39	123,29	3,29
0,40	123,52	3,48
0,41	123,83	3,65
0,42	123,78	3,63
0,43	123,78	3,63
0,44	123,83	3,65
0,45	123,83	3,65
0,46	123,83	3,65
0,47	123,91	3,73
0,48	123,83	3,65
0,49	123,83	3,65
0,50	123,87	3,71
0,51	123,78	3,64
0,52	123,78	3,64

0,53	123,78	3,64
0,54	123,78	3,64
0,55	123,78	3,64
0,56	123,78	3,64
0,57	123,78	3,64
0,58	123,78	3,64
0,59	123,78	3,64
0,60	123,78	3,64
0,61	123,78	3,64
0,62	123,78	3,64
0,63	123,78	3,64
0,64	123,78	3,64
0,65	123,78	3,64
0,66	123,78	3,64
0,67	123,78	3,64
0,68	123,78	3,64
0,69	123,78	3,64
0,70	123,78	3,64
0,71	123,78	3,64
0,72	123,78	3,64
0,73	123,78	3,64
0,74	123,78	3,64
0,75	123,78	3,64
0,76	123,78	3,64
0,77	123,78	3,64
0,78	123,78	3,64
0,79	123,78	3,64
0,80	123,78	3,64
0,81	123,78	3,64
0,82	123,78	3,64
0,83	123,78	3,64
0,84	123,78	3,64
0,85	123,78	3,64
0,86	123,78	3,64
0,87	123,78	3,64
0,88	123,78	3,64
0,89	123,78	3,64
0,90	123,78	3,64
0,91	123,78	3,64
0,92	123,78	3,64
0,93	123,78	3,64
0,94	123,78	3,64
0,95	123,78	3,64
0,96	123,78	3,64
0,97	123,78	3,64
0,98	123,78	3,64
0,99	123,78	3,64

Çizelge 3.2. Regresyon analizi için koordineli kavşakta kullanılan veriler

Alfa(α)	Ortalama seyahat süresi (s)	Ortalama bekleme süresi (s)
0,005	47,05	4,41
0,0025	47,05	4,41
0,00125	47,05	4,41
0,01	47,19	4,28
0,02	46,88	4,29
0,03	46,87	4,27

0,04	46,44	3,87
0,05	46,44	3,87
0,06	46,80	4,18
0,07	46,80	4,18
0,08	46,35	3,84
0,09	46,30	3,77
0,10	46,37	3,80
0,11	45,95	3, 53
0,12	46,71	4, 07
0,13	46,81	4,12
0,14	46,77	4,14
0,15	46, 67	4,00
0,16	46,55	3,97
0,17	46,98	4,20
0,18	46,98	4,20
0,19	46,98	4,20
0,20	46,62	3,96
0,21	46,70	4,06
0,22	46,70	4,06
0,23	46,70	4,06
0,24	46,70	4,06
0,25	46,33	3,74
0,26	47,05	4,24
0,27	47,05	4,24
0,28	47,05	4,24
0,29	47,05	4,24
0,30	47,05	4,24
0,31	47,05	4,24
0,32	47,05	4,24
0,33	47,05	4,24
0,34	46,97	4,17
0,35	46,97	4,17
0,36	46,97	4,17
0,37	46,97	4,17
0,38	46,97	4,17
0,39	46,97	4,17
0,40	46,97	4,17
0,41	46,97	4,17
0,42	46,97	4,17
0,43	46,97	4,17
0,44	46,97	4,17
0,45	46,97	4,17
0,46	46,97	4,17
0,47	46,97	4,17
0,48	46,97	4,17
0,49	46,97	4,17
0,50	46,69	3,95
0,51	47,15	4,26
0,52	47,15	4,26
0,53	47,15	4,26
0,54	47,15	4,26
0,55	47,15	4,26
0,56	47,15	4,26
0,57	47,15	4,26
0,58	47,15	4,26
0,59	47,15	4,26
0,60	47,19	4,28
0,61	47,19	4,28

0,62	47,19	4,28
0,63	47,19	4,28
0,64	47,19	4,28
0,65	47,19	4,28
0,66	47,19	4,28
0,67	47,02	4,17
0,68	47,02	4,17
0,69	47,02	4,17
0,70	47,02	4,17
0,71	47,02	4,17
0,72	47,02	4,17
0,73	47,02	4,17
0,74	47,02	4,17
0,75	47,02	4,17
0,76	47,02	4,17
0,77	47,02	4,17
0,78	47,02	4,17
0,79	47,02	4,17
0,80	47,02	4,17
0,81	47,02	4,17
0,82	47,02	4,17
0,83	47,02	4,17
0,84	47,02	4,17
0,85	47,02	4,17
0,86	47,02	4,17
0,87	47,02	4,17
0,88	47,02	4,17
0,89	47,02	4,17
0,90	47,02	4,17
0,91	47,02	4,17
0,92	47,02	4,17
0,93	47,02	4,17
0,94	47,02	4,17
0,95	47,02	4,17
0,96	47,02	4,17
0,97	47,02	4,17
0,98	47,02	4,17
0,99	47,02	4,17

Bu bölümde öncelikle önerilen yöntemin regresyon analizi açıklanmakta ve daha sonra doğrulamayla birlikte sonuçlar sunulmaktadır. Bu çalışmada regresyon yöntemleri kullanılarak farklı ' α ' değerlerinin trafik performans kriterleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. İzole ve koordineli kavşak sistemi üzerinde toplam 204 farklı ' α ' değeri gerçekleştirilmiş ve regresyon analizi için trafik performans kriterleri kaydedilmiştir. Verilerin yüzde sekseni eğitim, yüzde yirmisi test için kullanıldı. İzole ve koordineli kesişimler için regresyon analizi sonuçları sırasıyla Çizelge 3.3 ve Çizelge 3.4'te özetlenmiştir.

Bu çalışmada regresyon için doğrusal regresyon ve polinom regresyon yöntemleri kullanılmış olup, regresyon yöntemlerinin geçerliliğini doğrulamak için

KNN (K-En Yakın Komşu) kullanılmıştır. İzole kavşak için regresyon analizinin sonuçları Çizelge 3.3'te özetlenmiştir.

Çizelge 3.3. İzole kavşak için regresyon analizi

Yöntemler	RMSE Eğitim	RMSE Test	SSE Eğitim	SSE Test	Toplam Hata Eğitim	Toplam Hata Test	Hesaplama Süresi
Doğrusal Regresyon	0,041	0,050	0,136	0,053	2,125	0,668	0,063
Polinom Regresyon	0,023	0,030	0,045	0,018	1,269	0,426	0,092
KNN	0,026	0,028	0,056	0,017	1,012	0,338	0,074

Polinom regresyon yöntemine ait eğitim ve test hataları (RMSE) sırasıyla 0,023 ve 0,030 olarak hesaplanmıştır. Polinom regresyon yöntemi ile SSE değerleri eğitim için 0,045 ve test için 0,018'dir. Polinom regresyon yönteminde toplam eğitim hatası 1,269 ve toplam test hatası 0,426 olup hesaplama süresi 0,092 saniyedir. Polinom regresyon sonuçlarına göre test hata değeri düşüktür, bu da modelin test verileri üzerinde iyi performans gösterdiği anlamına gelir. Ancak hesaplama süresi diğer yöntemlere göre biraz daha uzundur.

Doğrusal regresyon yöntemi kullanılarak izole kavşak sisteminde eğitim ve test hataları (RMSE) sırasıyla 0,041 ve 0,050 olarak hesaplanmıştır. SSE değerleri eğitim için 0,136 ve test için 0,053'tür. Toplam hata eğitim için 2,125 ve test için 0,668'dir. Hesaplama süresi 0,063 saniyedir. Doğrusal regresyonun eğitim ve test hataları açısından diğer yöntemlere göre daha yüksek değerlere sahip olması modelin performansının daha düşük olduğunu göstermektedir. Ancak hesaplama süresi en kısa olan yöntemdir.

Doğrulama amacıyla KNN yöntemi kullanılmıştır. KNN yöntemiyle eğitim ve test hatalarını (RMSE) sırasıyla 0,026 ve 0,028 olarak hesaplanmıştır. SSE değerleri eğitim için 0,056 ve test için 0,017'dir. Toplam hata eğitim için 1,012 ve toplam hata test için 0,338 olup hesaplama süresi 0,074 saniyedir. KNN yöntemi, test hatası (RMSE) açısından polinom regresyona yakın bir performans göstermektedir. Elde edilen KNN sonuçları polinom regresyonunun doğruluğunu kanıtlamaktadır. Genel olarak polinom regresyonu izole kavşak sistemlerine yönelik analizlerde daha iyi performans

göstermiştir. Doğrusal regresyon yöntemi en kısa hesaplama süresine sahip olmasına rağmen hata oranları daha yüksek olduğundan performansı düşüktür.

Koordineli kavşak sistemleri için regresyon analizinin sonuçları Çizelge 3.4'te özetlenmiştir.

Çizelge 3.4. Koordineli kavşak için regresyon analizi

Yöntemler	RMSE Eğitim	RMSE Test	SSE Eğitim	SSE Test	Toplam Hata Eğitim	Toplam Hata Test	Hesaplama Süresi
Doğrusal Regresyon	0,040	0,039	0,157	0,037	3,518	0,866	0,068
Polinom Regresyon	0,016	0,020	0,025	0,009	1,135	0,334	0,133
KNN	0,020	0,056	0,039	0,076	0,720	0,336	0,079

Doğrusal regresyon yöntemi ile eğitim ve test hatalarını (RMSE) sırasıyla 0,040 ve 0,039 olarak hesaplanmıştır. SSE değerleri eğitim için 0,157 ve test için 0,037'dir. Toplam hata eğitim için 3,518 ve test için 0,866 olup hesaplama süresi 0,068 saniyedir. Doğrusal regresyon, test hatası açısından makul değerlere sahiptir ve hesaplama süresi nispeten kısadır. Ancak toplam hata değerlerinin diğer yöntemlere göre daha yüksek olması, performansının düşük olduğunu göstermektedir.

Polinom regresyon yöntemi ile eğitim ve test hatalarını (RMSE) sırasıyla 0,016 ve 0,020 olarak hesaplanmıştır. SSE değerleri eğitim için 0,025 ve test için 0,009'dur. Toplam hata eğitim için 1,135 ve test için 0,334 olup hesaplama süresi 0,133 saniyedir. Polinom regresyonun hem eğitim hem de test hataları açısından en düşük değerlere sahip olması modelin performansının oldukça iyi olduğunu göstermektedir. Ancak hesaplama süresi diğer yöntemlere göre daha uzundur.

KNN yöntemi ile eğitim ve test hataları (RMSE) sırasıyla 0,020 ve 0,056 olarak hesaplanmıştır. SSE değerleri eğitim için 0,039 ve test için 0,076'dır. Toplam hata eğitim için 0,720 ve test için 0,336 olup hesaplama süresi 0,079 saniyedir. KNN yöntemi, eğitim RMSE değeri açısından polinom regresyonuna yakın performans gösterir ancak test RMSE değeri daha yüksektir. KNN'nin polinom regresyon ile benzer eğitim (RMSE) değerlerine sahip olması her iki yönteminde eğitim verilerinde benzer doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir. Polinom regresyon yöntemi genel olarak koordineli kavşaklara yönelik analizlerde en iyi performansı göstermiştir. Doğrusal

regresyon yöntemi hesaplama süresi açısından avantajlı olsa da hata oranları daha yüksek olduğundan performansı düşüktür.

Bu bölümde, Önerilen Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış Yöntemi ve optimum alfa değerinin tespit edilmesinde kullanılan regresyon analiz yöntemleri açıklanmıştır. İzole ve koordineli kavşak sistemlerinde optimum alfa değeri için regresyon analizlerinin sonuçları değerlendirilmiştir.



4. DENEYSEL ARAŞTIRMA VE SONUÇLAR

Bu bölümde öncelikle bu çalışmada kullanılan trafik verileri hakkında ayrıntılı bilgi verilmektedir. Daha sonra deneysel çalışmayı tanıtmak için önerilen yöntemin ve simülasyonun sonuçları sunulmaktadır.

4.1. Gerçek Zamanlı Trafik Veri Seti

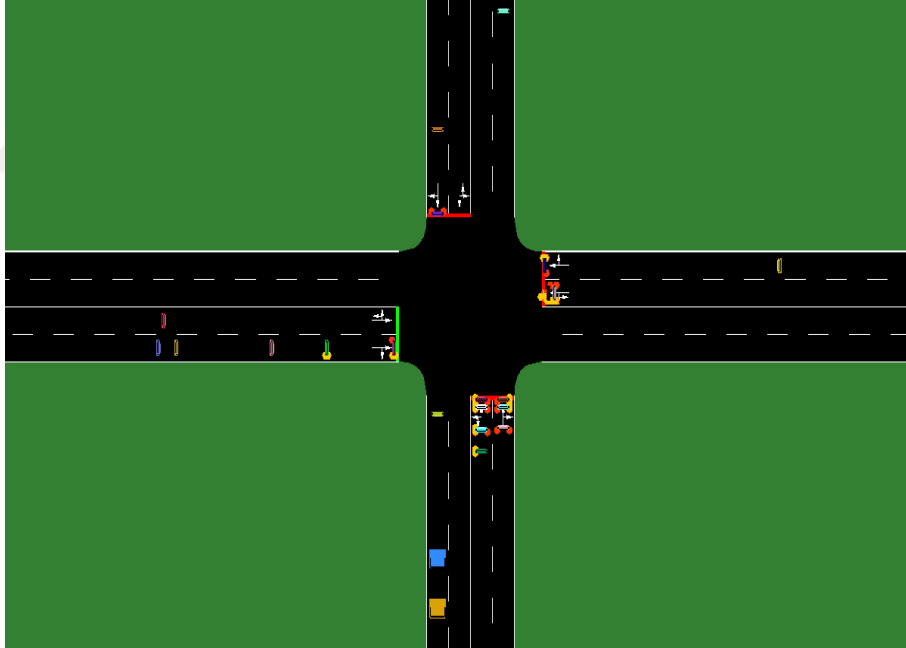
Deneysel çalışma, Kilis/Türkiye'de gerçek izole bir kavşak ve iki trafik ışığına sahip üç koordineli kavşaktan oluşan bir ana yol ağı üzerinde gerçek zamanlı veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kilis ili, yoğun nüfusu ve farklı kavşak yapılarına sahip olması nedeniyle bu tez çalışmasında tercih edilmiştir. Hem izole kavşak hem de çoklu kavşak trafik modellemesi, trafik yoğunluğunun fazla olduğu sabah 8'den 10'a kadar olan dönemde gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ortamına aktarılan gerçek veriler her bir yöntem için 7200 saniye boyunca test edilmiş olup, koordineli kavşaklardan geçen toplam araç sayısı ortalama 1078, izole kavşaktan geçen toplam araç sayısı ise ortalama 717 adettir. Önerilen yöntemin etkinliğini diğer trafik sinyal kontrol algoritmalarıyla karşılaştırmalı olarak değerlendirmek için kullanılan ana performans ölçütleri ortalama seyahat süresi ve ortalama bekleme süresidir. Bu kriterler trafik akışının ne kadar verimli yönetildiğini ve kavşaklardaki trafik sıkışıklığının ne ölçüde azaltıldığını gösterir. Bu tez çalışmasında farklı kavşak tipleri (izole ve koordineli) için trafik ağında gerçek zamanlı trafik verileri kullanılarak TSK uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Tüm senaryolar gerçek saha verilerinden elde edilmiş olup, MOSAŞ Akıllı Ulaşım Teknolojileri şirketinden temin edilmiştir.

4.2. İzole kavşak için Trafik Sinyal Kontrol Uygulamaları

Bu tez çalışmasında oluşturulan ilk trafik senaryosu Kilis/Türkiye'ye ait izole kavşakta gerçek zamanlı trafik verileri ile oluşturulmuştur. Sahadan alınan yol ve araç güzergahı bilgileri simülasyon ortamına aktarılmıştır. Çalışmada kullanılan izole kavşak 4 yollu olup gelen ve giden her yol kolu 2 şeritlidir. Şekil 4.1'de incelenen izole kavşak sistemi gösterilmektedir. Kullanılan algoritmalar, sahadan toplanan gerçek veriler ve talepler kullanılarak test edilmiştir. Şekil 4.2'de uygulama yapılan izole kavşağın simülasyon modeli gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Kilis ili gerçek zamanlı incelenen izole kavşağın yapısı



Şekil 4.2. Uygulama yapılan kavşağın simülasyon görseli

Kilis iline ait izole kavşak için gerçek zamanlı trafik verileri kullanılarak izole kavşaktaki toplam gecikme süresini minimize etmek ve trafik sıkışıklığını azaltmak amacıyla uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Model analizinde Statik, Uyarmalı, Gecikme tabanlı, Webster, MaxPressure ve Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemi ve önerilen Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemleri kullanılmaktadır.

Her bir modelin ortalama seyahat süresi ve ortalama bekleme süresi değerleri dikkate alınarak yapılan karşılaştırmalar, trafik akışının etkin yönetimi için önemli bulgular sağlamaktadır. Kilis ilindeki izole kavşak için model performans karşılaştırması Çizelge 4.1’de sunulmaktadır.

Çizelge 4.1. Kilis ili izole kavşak için model performanslarının karşılaştırması

Model	Ortalama seyahat süresi (s)	Ortalama bekleme süresi (s)
Statik	142,21	22,99
Uyarmalı	133,58	11,59
Gecikme tabanlı	128,51	7,29
Webster	140,32	17,24
MaxPressure	123,69	4,00
Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış	123,25	3,21
Önerilen Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış	122,69	3,09

Çizelge 4.1’deki sonuçlara göre, izole kavşaklarda TSK yöntemlerinin performansı incelendiğinde; Statik yöntemde, ortalama seyahat süresi 142,21 saniye ve ortalama bekleme süresi 22,99 saniyedir. Uyarmalı yöntem, 133,58 saniye ortalama seyahat süresi ile Statik yöntemin performansını geride bırakmaktadır. Ayrıca ortalama bekleme süresi 11,59 saniye olup Statik yöntemde göre ortalama bekleme süresi bakımından da daha iyi sonuç vermiştir. Gecikme tabanlı yöntemde ortalama seyahat süresi 128,51 saniye, ortalama bekleme süresi ise 7,29 saniyedir. Webster yöntemi, trafik sinyal kontrolüne yoğunluk odaklı bir yaklaşım sunar. Ancak ortalama seyahat süresi 140,32 saniye, ortalama bekleme süresi ise 17,24 saniyedir. MaxPressure yöntemi, kavşaklarda maksimum sayıda aracın geçmesi için tasarlanmıştır. MaxPressure yöntemi ile ortalama seyahat süresi 123,69 saniye ve ortalama bekleme süresi 4,00 saniyedir.

Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemi kullanılarak izole kavşak sisteminde ortalama seyahat süresi 123,25 saniye, ortalama bekleme süresi ise 3,21 saniye olarak tespit edilmiştir. Önerilen Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış tabanlı yaklaşım ise Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yönteminden farklı olarak iki strateji sunarak trafik akışını optimize etmektedir. Önerilen Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemi, gerçek zamanlı izole kavşak sistemi için ortalama seyahat süresi 122,69 saniye ve ortalama bekleme süresi 3,09 saniye olarak tespit edilmiştir. Böylece hem ortalama seyahat süresi hem de ortalama bekleme süresi açısından önerilen yöntem en düşük değerlere sahiptir. Bu sonuçlar, önerilen yöntemin diğer geleneksel çözümlere göre daha iyi performans

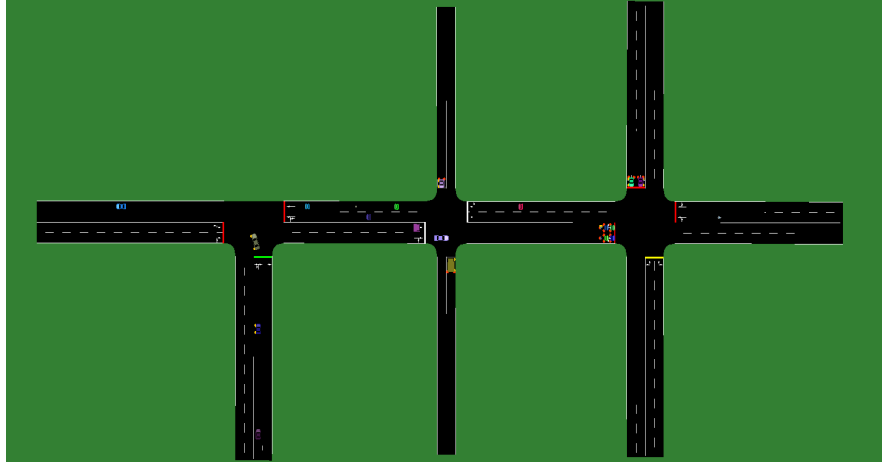
gösterdiğini ve izole kavşaktaki trafik akışının daha etkin bir şekilde kontrol edildiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, izole kavşaklarda trafik performansını iyileştirmek için önerilen yaklaşımın potansiyelini vurgulamaktadır.

4.3. Koordineli kavşaklar için Trafik Sinyal Kontrol Uygulamaları

Bu tez çalışmasında koordineli kavşakların optimizasyonunu sağlayan sistemin değerlendirilmesi için Şekil 4.3'te görseli verilen trafik kavşakları koordineli olarak kullanılmıştır. Deneysel çalışma, Kilis/Türkiye' de iki trafik ışığına sahip üç koordineli kavşaktan oluşan bir ana yol ağı üzerinde gerçek zamanlı veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 1. ve 3. kavşağa gelen her bir kol 2 şeritli ve ortadaki 2. kavşağa gelen her bir kol 1 şeritlidir. Şekil 4.4'te gerçek zamanlı olarak koordineli kavşağın simülasyon modeli gösterilmiş ve her şeritte araçların takip edebileceği olası yönler tanımlanmıştır; en sağdaki şerit ve en soldaki şerit araçların sırasıyla sağa ve sola dönmesini veya düz gitmesini temsil eder.



Şekil 4.3 Kilis ili gerçek zamanlı incelenen koordineli kavşak yapısı



Şekil 4.4. Uygulama yapılan koordineli kavşağın simülasyon görseli

Bu bölümde, Kilis iline ait koordineli kavşak sistemi için gerçek zamanlı trafik verileri kullanılarak bekleme süresi ve seyahat süresini minimize etmek ve trafik sıkışıklığını azaltmak amacıyla kontrol modelleri tasarlanmıştır. Model analizinde Statik, Uyarmalı, Gecikme tabanlı, Webster, MaxPressure ve Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemi ve önerilen Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemleri kullanılmaktadır.

Çizelge 4.2. Kilis ili koordineli kavşak sistemi için model performans karşılaştırması.

Model	Ortalama seyahat süresi (s)	Ortalama bekleme süresi (s)
Statik	75,30	30,15
Uyarmalı	62,75	18,13
Gecikme tabanlı	61,22	16,91
Webster	48,10	5,18
MaxPressure	47,40	5,02
Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış	47,19	4,28
Önerilen Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış	45,95	3,53

Çizelge 4.2’de, Kilis ili koordineli kavşak sistemi için model performans karşılaştırması sunulmaktadır. Her bir yöntem ortalama seyahat süresi ve ortalama bekleme süresi performans kriterlerine göre değerlendirilmiştir. Statik yöntemde ortalama seyahat süresi 75,30 saniye ve ortalama bekleme süresi 30,15 saniyedir. Bu yöntem diğer modellere göre en düşük performansı gösterir. Uyarmalı trafik sinyal kontrolü, 62,75 saniyelik ortalama seyahat süresi ve 18,13 saniyelik ortalama bekleme süresiyle Statik yöntemini geride bırakmaktadır. Gecikme tabanlı yöntem, 61,22 saniye

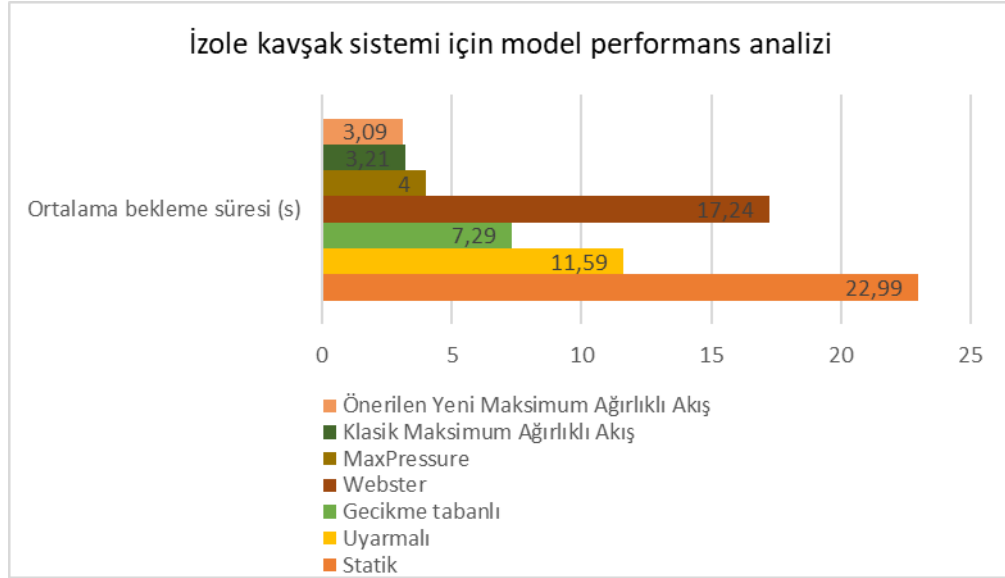
ortalama seyahat süresi ve 16,91 saniye ortalama bekleme süresiyle, Uyarmalı yöntemle göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

Webster yöntemine göre ortalama seyahat süresi 48,10 saniye ve ortalama bekleme süresi ise 5,18 saniyedir. Bu yöntem Gecikme tabanlı trafik sinyal kontrol yönteminden daha iyi performans gösterir. MaxPressure yönteminde, ortalama seyahat süresi 47,40 saniye ve ortalama bekleme süresi 5,02 saniyedir. MaxPressure yöntemi, Webster yöntemine yakın sonuçlar vermektedir. Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemi, 47,19 saniye ortalama seyahat süresi ve 4,28 saniye ortalama bekleme süresiyle MaxPressure yönteminden biraz daha iyi performans göstermektedir.

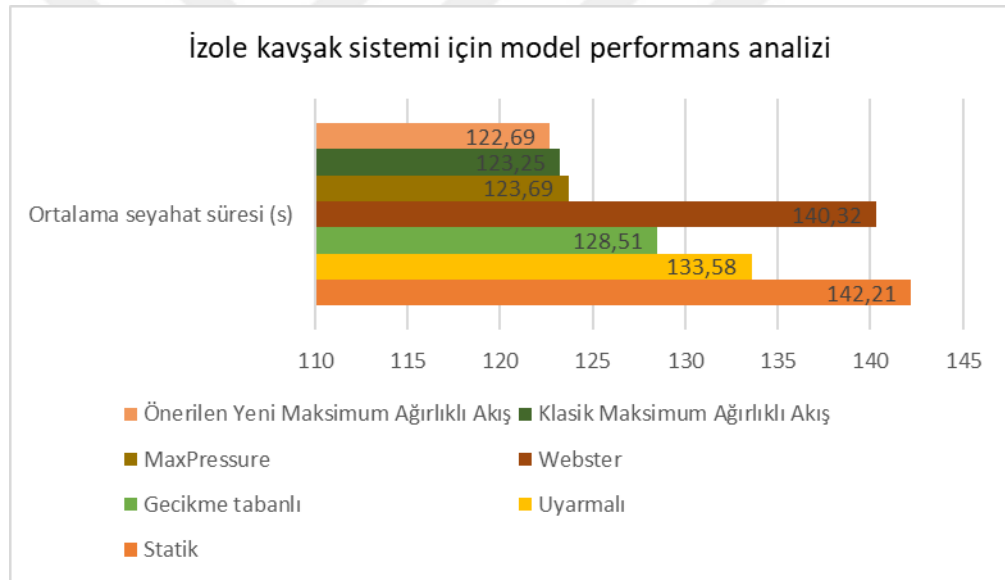
Önerilen Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemi 45,95 saniye ortalama seyahat süresi ve 3,53 saniye ortalama bekleme süresine sahiptir. Önerilen Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemi kıyaslanan diğer tüm yöntemlerden daha düşük ortalama seyahat süresi ve ortalama bekleme süresine sahiptir. Elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin geleneksel çözümlerden daha iyi performans gösterdiğini ve koordineli kavşak sistemini etkili bir şekilde yönettiğini göstermektedir. Diğer yöntemlerin performansı göz önüne alındığında, Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış tabanlı önerilen yaklaşımın izole ve koordineli kavşak sistemleri için en etkin seçenek olduğu açıktır.

Önerilen Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemi ile geleneksel Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemi arasındaki en önemli fark, önerilen yaklaşımda optimum alfa değerinin regresyon analizi ile belirlenmesidir. Alfa değeri optimize edildikçe ortalama seyahat süresi ve ortalama bekleme süresi azalma eğilimindedir. Çizelge 4.1 izole kavşak sistemi ve Çizelge 4.2 koordineli kavşak sistemi için model performans karşılaştırması sonuçlarına göre önerilen yöntemin TSK sisteminin performansını arttırdığını göstermektedir. Sonuçlar, alfa değerinin optimize edilmesine bağlı olarak kavşak sisteminin daha verimli çalışmasını ve trafiğin daha hızlı ve düzenli akmasını sağladığını göstermektedir.

Önerilen Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış yönteminin performans analizi kapsamında, izole kavşak sistemi için ortalama bekleme süresi bakımından diğer kontrol modelleriyle karşılaştırılması grafik görseli olarak Şekil 4.5'te sunulmuştur. Önerdiğimiz kontrol yöntemi, ortalama bekleme süresini en aza indirerek en üstün performansı sergilemektedir. Ayrıca, önerilen yöntemin izole kavşak sistemi için ortalama seyahat süresi kriteri bakımından da diğer yöntemlerden daha iyi sonuç verdiği Şekil 4.6'da grafik görseli olarak gösterilmektedir.

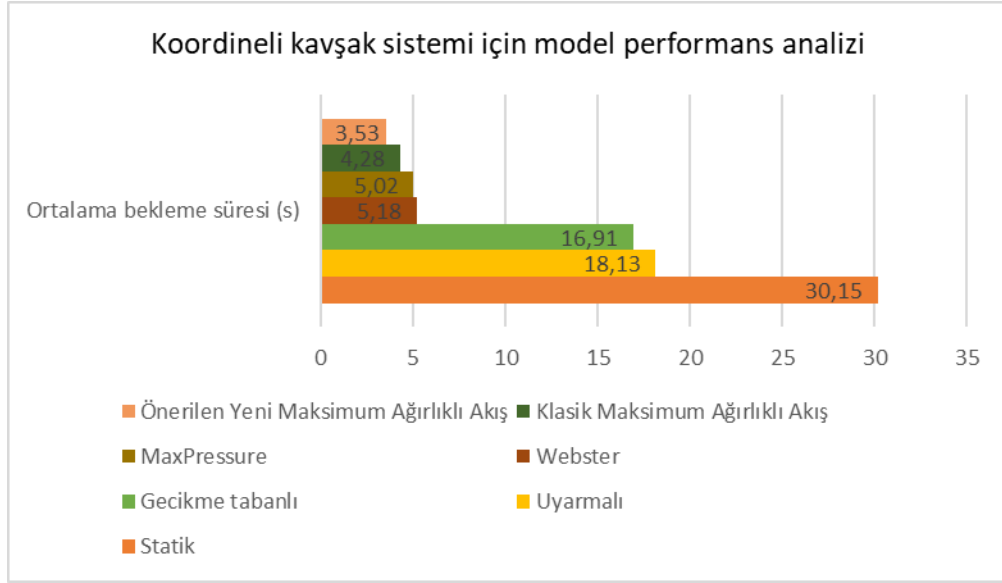


Şekil 4.5. Test edilen yöntemlerin ortalama bekleme süresi

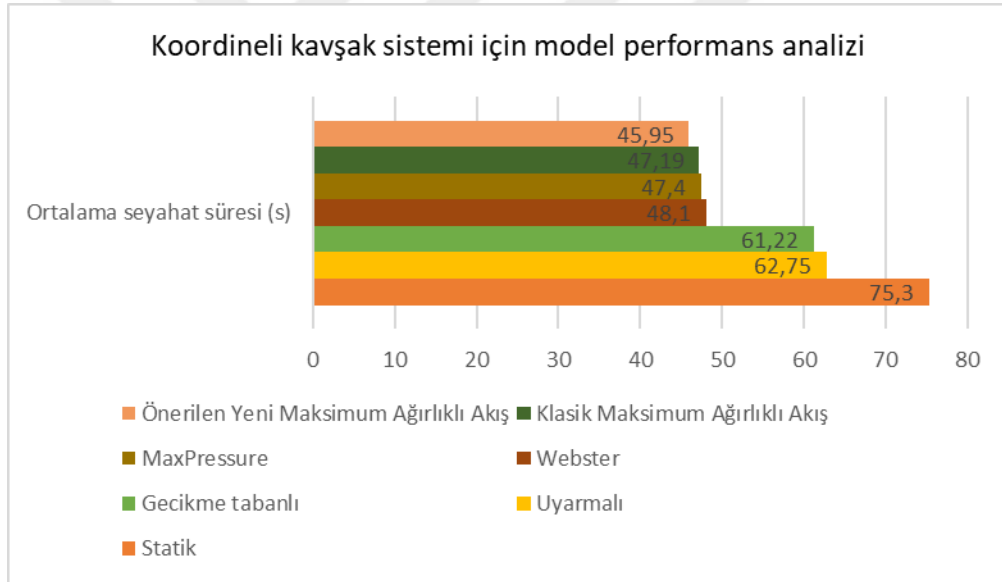


Şekil 4.6. Test edilen yöntemlerin ortalama seyahat süresi

Önerilen Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış yönteminin performans analizi kapsamında, koordineli kavşak sisteminde ortalama bekleme süresinin diğer kontrol modelleriyle karşılaştırma incelemesi grafik görseli olarak Şekil 4.7’de sunulmaktadır. Ayrıca, önerilen yöntemin koordineli kavşak sisteminde ortalama seyahat süresi bakımından da diğer yöntemlere kıyasla en düşük ortalama seyahat süresine sahip olduğu Şekil 4.8’de gösterilmektedir.



Şekil 4.7. Test edilen yöntemlerin ortalama bekleme süresi



Şekil 4.8. Test edilen yöntemlerin ortalama seyahat süresi

5. SONUÇLAR ve GELECEK ÇALIŞMALAR

Günümüzde büyük şehirlerde en sık karşılaşılan sorunlarından biri, trafik ağlarının verimli bir şekilde kontrol edilememesidir. Bu alandaki araştırma ve yatırım faaliyetlerinin sayısı her gün artmaktadır. Ancak, bu artışa rağmen, sorunlar hala devam etmekte ve en uygun TSK yöntemlerinin arayışı sürmektedir. Trafik akışında kontrol edilmek istenilen kavşak sayısının artması ile kavşaklar arası koordinasyonda yaşanan zorluklar da artmaktadır

Bu tez çalışmasında, gerçek zamanlı ATSK yöntemlerinde gelişme sağlanarak etkili bir TSK yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntem tasarlanırken düşük maliyet, basit kurulum ve pratik uygulanabilirlik gibi faktörler göz önünde bulundurulmuştur. Çalışma kapsamında önerilen yaklaşımlarda, performans kriteri olarak ortalama araç seyahat süresi ve ortalama araç bekleme süresi dikkate alınmıştır. Bu tez çalışmasında, trafik sıkışıklığı problemine yenilikçi, uygulanabilir ve etkili bir çözüm yöntemi önerilmiştir.

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, trafik sinyal kontrolü için Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemini geliştirmeye yönelik yenilikçi bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen Yeni maksimum ağırlıklı yaklaşım iki ana stratejiden oluşmaktadır. Bunlar, yaklaşma süresi parametresinin hesaplanmasının basitleştirilmesi ve regresyon yöntemleri kullanılarak alfa değerinin optimize edilmesidir. İlk strateji, hesaplama yükünü azaltarak gerçek zamanlı uygulanabilirliği artırmaktadır. İkinci strateji, trafik akışı verimliliğini artırmak için optimum alfa değerinin belirlenmesidir.

Simülasyon çalışmalarına göre önerilen yöntemin izole ve koordineli kavşak sistemlerinde trafik performansını önemli derecede iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Özellikle alfa değerinin regresyon analiz yöntemiyle optimize edilmesi, kavşak sistemlerinin daha verimli çalışmasını, trafiğin daha hızlı ve düzenli akışını sağlamaktadır. Optimum alfa değeri belirlenerek hem ortalama seyahat süreleri hem de ortalama bekleme süreleri kriterlerinde iyileştirmeler sağlanmıştır.

Önerilen yöntem, izole ve koordineli kavşak sistemlerinde gerçek zamanlı trafik verileri ile test edilmiştir. İzole kavşak sisteminde elde edilen deneysel sonuçlara göre önerilen yöntem, Statik yönteme kıyasla %15,92 daha kısa seyahat süresi ve %643,69 daha kısa bekleme süresi ile önemli ölçüde daha iyi performans göstermiştir. Ayrıca, ortalama seyahat süresi kriterine göre önerilen yöntem, MaxPressure yöntemine kıyasla %0,82 ve Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemine kıyasla ise %0,46 daha iyi

performans sergilemiştir. Ortalama bekleme süresi kriteri dikkate alındığında önerilen yöntem MaxPressure yöntemine kıyasla %29,45 ve Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemine kıyasla ise %3,88 daha iyi sonuç vermiştir.

Koordineli kavşak sisteminde elde edilen deneysel sonuçlara göre önerilen yöntem, Statik yönteme kıyasla %63,85 daha kısa seyahat süresi ve %754,82 daha kısa bekleme süresi ile önemli ölçüde daha iyi performans göstermiştir. Ayrıca, önerilen yöntem ortalama seyahat süresi açısından MaxPressure yöntemine kıyasla %3,16 ve Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemine kıyasla ise %2,70 daha iyi performans sergilemiştir. Ortalama bekleme süresi kriteri bakımından ise, MaxPressure yöntemine kıyasla %42,21 ve Klasik Maksimum Ağırlıklı Akış yöntemine kıyasla ise %21,25 daha iyi sonuç vermiştir.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde önerilen yöntem, adaptif trafik sinyal kontrolünde önemli ölçüde iyileşme sağlamıştır. Önerilen yeni yöntemin diğer tüm yöntemlere kıyasla hem ortalama seyahat süresi hem de ortalama bekleme süresi performans kriterleri açısından üstün olduğu kanıtlanmıştır.

5.2. Gelecek Çalışmalar

Bu tez çalışması, trafik sıkışıklığı sorununa bir çözüm olarak izole ve koordineli kavşak sistemlerine gerçek zamanlı trafik sinyal denetleyicisi olarak Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış yaklaşımı önermektedir.

Gelecek çalışmalarda, önerilen Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış algoritmasının gerçek dünya trafik koşullarındaki performansını doğrulamak amacıyla, daha fazla gerçek veri kullanarak ve çeşitli kentsel alanlarda saha deneyleri gerçekleştirerek bu yaklaşımın uygulanabilirliğini test etmeyi amaçlanmaktadır. Bu deneyler, yöntemin farklı trafik koşulları altındaki performansı hakkında değerli bilgiler sağlayacak ve algoritmanın gerçek dünyadaki geri bildirimlere dayalı olarak geliştirilmesine yardımcı olacaktır. Ayrıca, parametreleri gerçek zamanlı ve dinamik olarak ayarlamak amacıyla makine öğrenimi tekniklerini entegre edilerek önerilen algoritma daha da geliştirilecektir. Bu uyarlanabilir öğrenme mekanizmalarının entegrasyonu, sistemin trafik düzenlerindeki ani değişikliklere daha etkili bir şekilde yanıt vermesini ve genel verimliliğin artmasını sağlayacaktır. Ayrıca, önerilen Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış algoritmasının otonom araçlar ve trafik yönetim sistemleri gibi akıllı şehir altyapısıyla entegrasyonu incelenecektir. Önerilen yeni yöntemin faydalarını en üst düzeye çıkarmak amacıyla şerit konfigürasyonları ve sinyal zamanlamaları gibi kavşak tasarım

parametrelerini optimize etmeye odaklanılacaktır. Bu optimizasyon süreci, optimum tasarım konfigürasyonlarını belirlemek amacıyla simülasyon çalışmaları ve saha denemelerini içerecek ve Yeni Maksimum Ağırlıklı Akış algoritmasının sera gazı emisyonları gibi çevresel etkileri de incelenecektir.



KAYNAKLAR

- Abdoos, M. (2020). Fuzzy graph and collective multiagent reinforcement learning for traffic signals control. *IEEE Intelligent Systems*, 36(4), 48-55.
- Abiodun, O. I., Jantan, A., Omolara, A. E., Dada, K. V., Umar, A. M., Linus, O. U., ... & Kiru, M. U. (2019). Comprehensive review of artificial neural network applications to pattern recognition. *IEEE access*, 7, 158820-158846.
- Agafonov, A., Myasnikov, V., & Borodinov, A. (2019, September). Anticipatory vehicle routing in stochastic networks using multi-agent system. In 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP) (pp. 91-95). IEEE.
- Agafonov, A. (2022, November). Adaptive Traffic Light Control Using a Distributed Processing Approach. In 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON) (pp. 186-189). IEEE.
- Agafonov, A., Yumaganov, A., & Myasnikov, V. (2022, May). Adaptive traffic signal control based on maximum weighted traffic flow. In 2022 VIII International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT) (pp. 1-6). IEEE.
- Akelik, R. (1981). *Traffic signals: capacity and timing analysis*.
- Aleksander, R., & Paweł, C. (2020). Recent advances in traffic optimisation: systematic literature review of modern models, methods and algorithms. *IET Intelligent Transport Systems*, 14(13), 1740-1758.
- Barth, M., & Boriboonsomsin, K. (2008). Real-world carbon dioxide impacts of traffic congestion. *Transportation research record*, 2058(1), 163-171.
- Boukerche, A., Zhong, D., & Sun, P. (2021). A novel reinforcement learning-based cooperative traffic signal system through max-pressure control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(2), 1187-1198.
- Bulsari, A. (1993). Some analytical solutions to the general approximation problem for feedforward neural networks. *Neural networks*, 6(7), 991-996.
- Cui, C. Y., & Lee, H. H. (2013). Distributed traffic signal control using PSO based on probability model for traffic jam. In *Intelligent Autonomous Systems 12: Volume 1 Proceedings of the 12th International Conference IAS-12, held June 26-29, 2012, Jeju Island, Korea* (pp. 629-639). Springer Berlin Heidelberg.
- Çeltek, S. A., Durdu, A., & Alı, M. E. M. (2020). Real-time traffic signal control with swarm optimization methods. *Measurement*, 166, 108206.

- Çeltek, S. A. (2021),” Şehir içi trafik sinyal ağının takviyeli öğrenme algoritmaları ve nesnelerin interneti tabanlı kontrolü”, Doktora, *Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya.
- Dizmenler, A. (2023), Üretim tesisindeki günlük elektrik enerjisi tüketiminin regresyon analizi ve yapay sinir ağları ile tahmin edilmesi ve karşılaştırılması, Yüksek lisans, *Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, İzmir, 13-17.
- Dong, J., & Hu, S. X. (1997). The progress and prospects of neural network research. *Information and Control*, 26(5), 360-368.
- Eom, M., & Kim, B. I. (2020). The traffic signal control problem for intersections: a review. *European transport research review*, 12, 1-20.
- Faqir, N., Loqman, C., & Boumhidi, J. (2023). Combined extreme learning machine and max pressure algorithms for traffic signal control. *Intelligent Systems with Applications*, 19, 200255.
- Galton, F. (1877). Typical laws of heredity. Royal Institution of Great Britain.
- García-Nieto, J., Alba, E. ve Olivera, A. C., 2012, Swarm intelligence for traffic light scheduling: Application to real urban areas, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25 (2), 274-283.
- 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.
- 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.
- Guastella, D. A., & Bontempi, G. (2023). Traffic Modeling with SUMO: a Tutorial. *arXiv preprint arXiv:2304.05982*.
- Hassija, V., Gupta, V., Garg, S., & Chamola, V. (2020). Traffic jam probability estimation based on blockchain and deep neural networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(7), 3919-3928.
- Hope, T. M. (2020). Linear regression. In *Machine Learning* (pp. 67-81). Academic Press.
- Jain, A. K., Mao, J., & Mohiuddin, K. M. (1996). Artificial neural networks: A tutorial. *Computer*, 29(3), 31-44.
- Jamal, A., Al-Ahmadi, H. M., Butt, F. M., Iqbal, M., Almoshaogeh, M., & Ali, S. (2021). *Metaheuristics for traffic control and optimization: Current challenges and prospects*. IntechOpen.
- Jenkins, B. K., & Tanguay, A. R. (1995). Handbook of neural computing and neural networks.

- Jiang, R., Liu, Z., & Li, H. (2021). Evolution towards optimal driving strategies for large-scale autonomous vehicles. *IET Intelligent Transport Systems*, 15(8), 1018-1027.
- Jovanović, A., Nikolić, M. ve Teodorović, D., 2017, Area-wide urban traffic control: A Bee Colony Optimization approach, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 77, 329-350.
- Kaur, R., Singh, E. G., Kumar, A., & Kour, S. (2022, December). A Review Study of Vanet, Mobility Models and Traffic Generator Tools. In *2022 5th International Conference on Contemporary Computing and Informatics (IC3I)* (pp. 1055-1060). IEEE.
- Khreis, H., Warsow, K. M., Verlinghieri, E., Guzman, A., Pellecuer, L., Ferreira, A., ... & Nieuwenhuijsen, M. (2016). The health impacts of traffic-related exposures in urban areas: Understanding real effects, underlying driving forces and co-producing future directions. *Journal of Transport & Health*, 3(3), 249-267.
- Kotusevski, G., & Hawick, K. A. (2009). A review of traffic simulation software.
- Köhler, E., & Strehler, M. (2019). Traffic signal optimization: combining static and dynamic models. *Transportation science*, 53(1), 21-41.
- Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., & Neter, J. (1983). *Applied linear regression models*.
- Levin, M. W., Hu, J., & Odell, M. (2020). Max-pressure signal control with cyclical phase structure. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 120, 102828.
- Levin, M. W. (2023). Max-pressure traffic signal timing: A summary of methodological and experimental results. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 149(4), 03123001.
- Li, L., Okoth, V., & Jabari, S. E. (2021). Backpressure control with estimated queue lengths for urban network traffic. *IET Intelligent Transport Systems*, 15(2), 320-330.
- Lopez, P. A., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y. P., Hilbrich, R., ... & Wießner, E. (2018, November). Microscopic traffic simulation using sumo. In *2018 21st international conference on intelligent transportation systems (ITSC)* (pp. 2575-2582). IEEE.
- Maadi, S., Stein, S., Hong, J., & Murray-Smith, R. (2022). Real-time adaptive traffic signal control in a connected and automated vehicle environment: optimisation of signal planning with reinforcement learning under vehicle speed guidance. *Sensors*, 22(19), 7501.
- Manolis, D., Pappa, T., Diakaki, C., Papamichail, I., & Papageorgiou, M. (2018). Centralised versus decentralised signal control of large-scale urban road networks

- in real time: a simulation study. *IET Intelligent Transport Systems*, 12(8), 891-900.
- Manual, H. C. (2000). Highway capacity manual. *Washington, DC*, 2(1).
- Miletić, M., Ivanjko, E., Gregurić, M., & Kušić, K. (2022). A review of reinforcement learning applications in adaptive traffic signal control. *IET Intelligent Transport Systems*, 16(10), 1269-1285.
- Miller, A. J. (1963). Settings for fixed-cycle traffic signals. *Journal of the Operational Research Society*, 14(4), 373-386.
- Oertel, R., & Wagner, P. (2011, January). Delay-time actuated traffic signal control for an isolated intersection. In *Proceedings 90th Annual Meeting Transportation Research Board (TRB)*.
- Papageorgiou, M. (2004). Overview of road traffic control strategies. *IFAC Proceedings Volumes*, 37(19), 29-40.
- Papageorgiou, M., Diakaki, C., Dinopoulou, V., Kotsialos, A., & Wang, Y. (2003). Review of road traffic control strategies. *Proceedings of the IEEE*, 91(12), 2043-2067.
- Ribeiro, I. M., & Simões, M. D. L. D. O. (2016). The fully actuated traffic control problem solved by global optimization and complementarity. *Engineering Optimization*, 48(2), 199-212.
- Saidallah, M., El Fergougui, A., & Elalaoui, A. E. (2016). A comparative study of urban road traffic simulators. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 81, p. 05002). EDP Sciences.
- Samet, J. M. (2007). Traffic, air pollution, and health. *Inhalation Toxicology*, 19(12), 1021-1027.
- Shaikh, P. W., El-Abd, M., Khanafer, M. ve Gao, K., 2020, A Review on Swarm Intelligence and Evolutionary Algorithms for Solving the Traffic Signal Control Problem, *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*.
- Shinde, S. M. (2017, October). Adaptive traffic light control system. In *2017 1st international conference on intelligent systems and information management (ICISIM)* (pp.300-306).IEEE.
- Nie, C., Wei, H., Shi, J., & Zhang, M. (2021). Optimizing actuated traffic signal control using license plate recognition data: Methods for modeling and algorithm development. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 9, 100319.
- Varaiya, P. (2013). Max pressure control of a network of signalized intersections. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 36, 177-195.

- Varaiya, P. (2013). The max-pressure controller for arbitrary networks of signalized intersections. In *Advances in dynamic network modeling in complex transportation systems* (pp. 27-66). New York, NY: Springer New York.
- Yiğit, V. (2011). Genetik algoritma ile Türkiye net elektrik enerjisi tüketiminin 2020 yılına kadar tahmini. *International Journal of Engineering Research and Development*, 3(2), 37-41.
- Yumaganov, A., Agafonov, A., & Myasnikov, V. (2023, April). Cooperative Application of Vehicular Traffic Rerouting Method and Adaptive Traffic Signal Control Method. In 2023 IX International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT) (pp. 1-5). IEEE.
- Zhang, Y. ve Ni, Q., 2017, A coordinated traffic control on urban expressways with modified.
- Zhang, Y. ve Zhou, Y., 2018, Distributed coordination control of traffic network flow using adaptive genetic algorithm based on cloud computing, *Journal of Network and Computer Applications*, 119, 110-120.
- Zhao, D., Dai, Y., & Zhang, Z. (2011). Computational intelligence in urban traffic signal control: A survey. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 42(4), 485-494.
- Zhao, Y., Zheng, J., Wong, W., Wang, X., Meng, Y., & Liu, H. X. (2019). Various methods for queue length and traffic volume estimation using probe vehicle trajectories. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 107, 70-91.
- Zheng, X., Recker, W., & Chu, L. (2010). Optimization of control parameters for adaptive traffic-actuated signal control. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 14(2), 95-108.
- Zhou, P., Fang, Z., Dong, H., Liu, J., & Pan, S. (2017, June). Data analysis with multi-objective optimization algorithm: A study in smart traffic signal system. In *2017 IEEE 15th international conference on software engineering research, management and applications (SERA)* (pp. 307-310). IEEE.
- Wang, X., Ke, L., Qiao, Z. ve Chai, X., 2020, Large-scale traffic signal control using a novel multiagent reinforcement learning, *IEEE transactions on cybernetics*.
- Webster, F. V. (1958). *Traffic signal settings* (No. 39).
- Wei, H., Zheng, G., Yao, H. ve Li, Z., 2018, Intellilight: A reinforcement learning approach for intelligent traffic light control, *Proceedings of the 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, 2496-2505.
- Wei, H., Zheng, G., Gayah, V., & Li, Z. (2019). A survey on traffic signal control methods. arXiv preprint arXiv:1904.08117.

- Wiering, M. A., 2000, Multi-agent reinforcement learning for traffic light control, *Machine Learning: Proceedings of the Seventeenth International Conference (ICML'2000)*, 1151-1158. Wiering, M. A., 2000, Multi-agent reinforcement learning for traffic light control, *Machine Learning: Proceedings of the Seventeenth International Conference (ICML'2000)*, 1151-1158.
- Wongpiromsarn, T., Uthaicharoenpong, T., Wang, Y., Frazzoli, E., & Wang, D. (2012, September). Distributed traffic signal control for maximum network throughput. In *2012 15th international IEEE conference on intelligent transportation systems* (pp. 588-595). IEEE.
- Wu, Y. C., & Feng, J. W. (2018). Development and application of artificial neural network. *Wireless Personal Communications*, 102, 1645-1656.
- Wunderlich, R., Elhanany, I., & Urbanik, T. (2007, December). A stable longest queue first signal scheduling algorithm for an isolated intersection. In *2007 IEEE international conference on vehicular electronics and safety* (pp. 1-6). IEEE.
- Qadri, S. S. S. M., Gökçe, M. A., & Öner, E. (2020). State-of-art review of traffic signal control methods: challenges and opportunities. *European transport research review*, 12, 1-23.