



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Kavşaklarda trafik ışık optimizasyonu: Ankara ilinde bir uygulama

Traffic light optimization at intersections: A case study in Ankara city

Yazar(lar) (Author(s)): Tuğçe İNAĞ¹, Murat ARIKAN²

ORCID¹: 0000-0002-8800-6727

ORCID²: 0000-0003-1437-8939

To cite to this article: İnağ T. ve Arıkan M., “Kavşaklarda trafik ışık optimizasyonu: Ankara ilinde bir uygulama”, *Journal of Polytechnic*, 28(1): 45-58, (2025).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: İnağ T. ve Arıkan M., “Kavşaklarda trafik ışık optimizasyonu: Ankara ili’nde bir uygulama”, *Politeknik Dergisi*, 28(1): 45-58, (2025).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1369924

Kavşaklarda Trafik Işık Optimizasyonu: Ankara İlinde Bir Uygulama

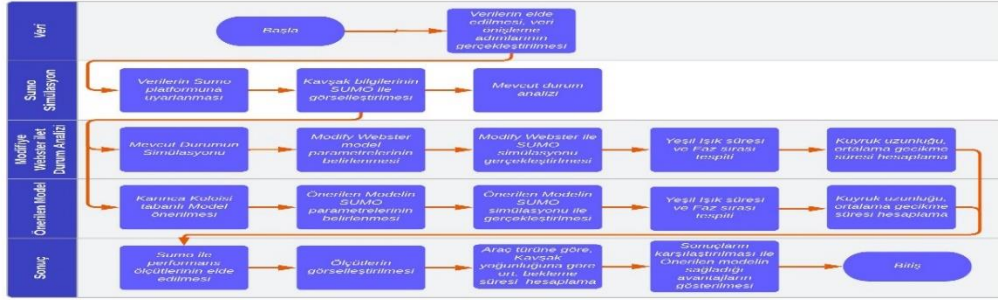
Traffic Light Optimization at Intersections: A Case Study in Ankara City

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Trafik sinyalizasyon yönetiminde, Karınca Kolonisi algoritması'nın etkinliğini vurgulamak. / To emphasize the effectiveness of the Ant Colony Algorithm in traffic signalization management.
- ❖ Trafik yönetiminde yapay zeka temelli yöntemlerin etkin bir şekilde kullanılabileceğini göstermek. / To demonstrate the effective utilization of artificial intelligence-based methods in traffic management.
- ❖ Gerçek verilerin ve önerilen modellerin SUMO simülasyonu ile geçerliliğini göstermiş olmak. / The validity of both real data and proposed models has been demonstrated through SUMO simulation.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Webster ve Modifiye Webster tabanlı Karınca Kolonisi algoritması uygulanarak araçların ortalama bekleme süreleri azaltılmıştır. / By applying the Webster and Modified Webster-based Ant Colony Algorithm, the average waiting times of vehicles have been reduced.



Şekil. Çalışmada izlenen metodoloji / Figure. Followed methodology in the study

Amaç (Aim)

Trafik sıkışıklığını hafifletmek ve ışık sürelerinin adaptif olarak ayarlanabilmesi amaçlanmıştır. / The aim was to alleviate traffic congestion and enable adaptive adjustment of signal durations.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Webster ve Modifiye Webster tabanlı Karınca Kolonisi algoritmasıyla, ışık süreleri belirlenmiştir. SUMO kullanılarak yöntemlerin performansları karşılaştırılmıştır. / Using the Webster and Modified Webster-based Ant Colony Algorithm, light durations were determined. The performance of the methods was compared using SUMO

Özgünlük (Originality)

Trafik yönetimi için Karınca Kolonisi algoritmasını kullanarak trafiği optimize etme yöntemlerine özgün bir katkı sunmaktadır. / The study provides a unique contribution to traffic management by utilizing the Ant Colony algorithm to optimize traffic.

Bulgular (Findings)

Önerilen yöntemlerle belirlenen yeşil ışık süreleri, trafik yönetimine daha dengeli ve verimli bir katkı sağlamıştır. / The green light durations determined by the proposed methods have contributed to a more balanced and efficient management of traffic.

Sonuç (Conclusion)

Önerilen yöntemlerin ortalama gecikme süresini mevcut duruma göre azalttığı sonucuna varılmıştır. / The applied methods have been found to reduce the average delay time compared to the current situation.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Kavşaklarda Trafik Işık Optimizasyonu: Ankara İli'nde Bir Uygulama

Araştırma Makalesi / Research Article

Tuğçe İNAĞ^{1*}, Murat ARIKAN¹

¹Mühendislik Fakültesi, Endüstri Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye
(Geliş/Received : 02.10.2023 ; Kabul/Accepted : 22.04.2024 ; Erken Görünüm/Early View : 16.05.2024)

ÖZ

Giderek artan nüfus ve nüfusa bağlı artan araç sayısı trafik sıkışıklığını önemli bir sorun haline getirmektedir. Trafik sıkışıklığının en yaygın olduğu yerlerden biri kavşaklardır. Bu çalışmanın temel amacı, yüksek yoğunluklu trafiğin gözlemlendiği ve araç kuyruklarının olduğu Polatlı Refik Cesur kavşağındaki trafik ışık yönetimini iyileştirmektir. Hedeflere ulaşmak için, trafik ışığı döngüsünün en uygun değerini belirleyerek araçların ortalama gecikme süresini en aza indirmek amacıyla Webster ve Modifiye Webster tabanlı Karınca Kolonisi algoritması (KKA) ile birlikte simülasyon tabanlı bir çözüm yaklaşımı önerilmiştir. Uygulamada SUMO (Simulation of Urban Mobility) simülasyon platformu kullanılmıştır. SUMO ile mevcut durum ve önerilen modeller simüle edilerek gerçek bir karşılaştırma yapılmıştır. Önerilen modelleri geçerliliği gösterilmiştir. Kavşağa giren araç sayısı ve türüne göre önerilen model, yeşil ışık faz süresi ve sırasını belirlemektedir. Araç türlerinin farklı kalkış-kayıp sürelerine sebep olması, kavşağı terk etme sürelerinin farklı olması SUMO ile yazılım destekli uygulanmıştır. Hesaplama sonuçları, gecikme süresinin mevcut duruma göre, Webster tabanlı KKA ve Modifiye Webster tabanlı KKA yöntemleri ile ortalama bekleme süresi değerlerini sırasıyla %32 ve %42 oranlarında azalttığını göstermiştir. Sonuç olarak, devre süresinin ve yeşil ışık sürelerinin daha iyi yönetilmesi, trafik sıkışıklığını ve araç ortalama bekleme sürelerini azaltmakta ve trafik akışının düzelmesini sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Trafik ışık optimizasyonu, webster yöntemi, karınca kolonisi algoritması, modifiye webster yöntemi.

Traffic Light Optimization At Intersections: A Case Study In Ankara City

ABSTRACT

The increasing population and the growing number of vehicles due to the population have made traffic congestion a significant problem. One of the most common places for traffic congestion is intersections. The main aim of this study is to improve traffic light management at the Polatlı Refik Cesur intersection, where high-density traffic is observed and vehicle queues form. To achieve the objectives, a simulation-based solution approach is proposed, together with the Webster and Modified Webster-based Ant Colony Algorithm (ACA), to determine the most suitable value for the traffic light cycle and minimize the average delay time of vehicles. The SUMO (Simulation of Urban Mobility) simulation platform was used in the implementation. A real comparison has been made by simulating existing conditions and proposed models using SUMO. The validity of the proposed models has been demonstrated. The proposed model determines the green light phase duration and sequence based on the number and type of vehicles entering the intersection. Variations in departure times due to different acceleration and deceleration rates of vehicle types have been implemented through software-supported simulation using SUMO. The calculation results have shown that, compared to the current situation, the delay time decreased by approximately 32% and 42% with the Webster-based ACA and Modified Webster-based ACA methods, respectively. As a result, better management of cycle times and green light durations reduces traffic congestion, decreases the average waiting times for vehicles, and improves traffic flow.

Keywords: Solar air collector, conical spring, fuzzy logic, modeling, outlet temperature, thermal efficiency.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde dünya nüfusunun sürekli artış göstermesi ve buna bağlı olarak tüm dünyada ulaşımı sağlayan taşıt sayısındaki artış, birçok problemi de beraberinde getirmiştir [1]. Trafik tikanlıkları, egzoz emisyonundan dolayı çevre kirliliği, taşıtların sebep olduğu gürültü kirlilikleri, fazla yakıt tüketiminin kişi ve ülke bütçesine olan etkisi vb. gibi durumlar söz konusu problemlerden yalnızca birkaçıdır. Artan ulaşım ihtiyaçları, taşıt trafiği yoğunluğunu artırmaktadır. Sürekli artan trafik hacimleri gerek kentlerde, gerekse kentler arasında, yol ağlarının büyümesine ve yayılmasına yol açmaktadır. Yol ağlarının yayılması, farklı trafik akımlarının

kesişmelerini kaçınılmaz kılmaktadır. Bu kesişmeleri düzenlemek amacıyla kavşaklar yapılmaktadır [2]. Akıllı Ulaşım Sistemlerinin en önemli parçalarından birisi de bu kavşaklardır. Trafik sıkışıklığının olabileceği stratejik noktalara yerleştirilen bu sistemler araç kullanımının yoğun olduğu bölgelerde alternatif çözümler sunmaktadır. Akıllı Sinyalize Kavşak Yönetim Sistemleri sayesinde trafik akışı nispeten daha kolay kontrol altına alınmaktadır [4]. Bu Akıllı sinyalize kavşaklara sabit sinyalizasyon süreleri yerine yoğunluklara bağlı olarak dinamik süreler atanmakta ve bununla birlikte, araçların trafikte bekleme/gecikme süreleri, sürdürülebilirlik ölçütü olan egzoz emisyon

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : tugceduzce@gazi.edu.tr

miktarları, yakıt tüketimleri asgariye indirilerek verimlilik artışı sağlanmaktadır.

Trafik sinyallerinin optimizasyonu, sadece trafik verimliliğini arttırmakla kalmayıp gecikme ve duraklama gibi faktörlerin azaltılmasını sağlamaktadır. Fakat bu faktörler sürdürülebilirlik açısından önemli olmasına rağmen, yakıt tüketimi ve emisyonlar gibi diğer kritik ölçütlerle doğrudan ilişkili değildir. Bu nedenle, araştırmacılar, trafik modelleri, sinyal optimizasyon modelleri ve yakıt tüketimi ile emisyon modellerini entegre etmeye odaklanmaktadır. Kabul edilebilir seviyelerde gecikme, bekleme süresi gibi ölçütleri korurken sürdürülebilirlik ölçütlerini en aza indirmeye stratejileri geliştirmeye çalışmaktadırlar. Bu entegrasyon, trafik yönetimi alanında daha etkili ve kapsamlı çözümler sunarak şehirlerin ve toplulukların sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmalarına yardımcı olmaktadır. Alshayeb ve diğerleri, sürdürülebilir trafik sinyallerini optimize etme konusundaki çalışmalarını sınıflandırarak analiz etmişlerdir. Literatürdeki çalışmalar, optimizasyon yöntemleri ve amaç fonksiyonlarına göre ayrıntılı bir şekilde gruplandırılmıştır. Araç türünün sürdürülebilirlik metrikleri üzerindeki önemini vurgulamışlardır. Ancak, yapılan incelemede sadece çalışmaların %18'inde birden fazla araç türünün dikkate alındığı belirtilmiştir [3].

En önemli Aktif Trafik Yönetimi (ATY) stratejilerinden biri Adaptif Trafik Sinyali Kontrolü (ATSK)'dür. ATSK, dinamik trafik talebine yanıt olarak sinyal zamanlamasını ayarlayarak sinyalle yolların hem trafik verimliliğini arttırmaya hem de sürdürülebilir hedeflere ulaşmasına yardımcı olmaktadır.

Yapılan araştırmalarda dinamik sinyal zamanlama teorilerinin ve yöntemlerinin hala bir takım eksikliklere sahip olduğu gözlemlenmektedir. Bunlardan ilki, hesaplama yönteminin karmaşıklığıdır. İkincisi ise, kavşak trafik akışının genel bilgisini elde etmek için bazı varsayımlar gerekmektedir. Varsayımların artışı kullanılan yöntemleri gerçeklikten uzaklaştırmaktadır.

Literatürde trafik sinyalizasyon yönetiminde, bulanık mantık, yapay sinir ağları, karınca kolonisi, pekiştirmeli öğrenme (reinforcement learning) ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) gibi bir çok yapay zeka tabanlı çalışmalar yapılmıştır [3-8]. Son yıllarda sürü zekası algoritmaları bu alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. İlgilenilen problem için geliştirilen sürü zekası algoritmaları arasında, karınca kolonisi [9-12], guguk kuşu arama [13], yapay arı kolonisi [14,15], parçacık sürü [16], tabu arama [15,17], genetik algoritma [18,19] gibi algoritmalar bulunmaktadır. Ayrıca sürü zekası algoritmaları çok amaçlı problemlere de uygulanmaktadır. Zhang vd., KKA, PSO, Genetik algoritma (GA) meta sezgisellerini Webster yöntemi ile karşılaştırmışlardır. Performans ölçütü olarak gecikme zamanı ve kavşak kullanım kapasitesi kullanılmıştır [20]. Balta ve Özçelik, Webster yöntemi ve KKA'nın etkinliğini karşılaştırmışlardır. Trafik sinyalizasyonunda KKA sezgiselinin farklı trafik yoğunluklarına göre

sunduğu ışık planının Webster yönteminden daha iyi olduğunu ve ortalama gecikme süresini büyük oranda azalttığını göstermişlerdir [21]. Elgarej vd., trafik sinyal planlaması için dağıtılmış KKA'yı kullanmışlardır [22]. Rida ve Hasbi, KKA'nın trafik simülatörü SUMO ile birleştirilmiş bir uygulamasını yapmışlardır. KKA ile faz sırası belirlenmiştir. Geliştirilen algoritmanın önceden geliştirilmiş dinamik denetleyicilere kıyasla daha iyi bir performans gösterdiği doğrulanmıştır [10]. Gabriela vd., trafik ışık optimizasyonu konusunda yapmış oldukları derleme çalışmalarında, trafik ışık yönetiminde yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birinin KKA olduğunu belirtmişlerdir [23]. Li vd, bulanık mantık ve geliştirilmiş KKA kullanarak trafik sinyal zamanlarını dinamik olarak belirlemişlerdir. Önerilen modelin etkinliği mevcut durum ve geleneksel yöntemlerle karşılaştırılmış ve daha iyi sonuç verdiği gösterilmiştir [24]. Srivastava ve Sahana, trafik sinyal kontrol planıyla araçların gecikme süresini azaltmayı ve yol ağı içindeki hareketliliği arttırmayı amaçlamışlardır. Bunun sonucunda, yeşil bir çevre elde etmeyi ve yakıt tüketimini azaltmayı hedeflemişlerdir. Bu plan KKA, GA, Petri ağları ve hibrit KKA/GA kullanılarak hazırlanmıştır. Performans kriteri olarak yakıt tüketimi ve ortalama gecikme süreleri dikkate alınmıştır. Simülasyon ortamında elde edilen sonuçlara göre hibrit modelin diğer yöntemlerden daha iyi sonuç verdiği ortaya konulmuştur [25].

Bu çalışmada, Ankara ili'nde bulunan Polatlı Refik Cesur kavşağında adaptif trafik ışık kontrol planlaması gerçekleştirilmiştir. Webster, Modifiye Webster ve önerilen Webster Gecikmeli KKA ile Modifiye Webster Gecikmeli KKA yöntemleri kullanılarak ışık süreleri belirlenmiş ve bu yöntemlerle ortalama gecikme süresinin eniyelenmesi hedeflenmiştir. Ortalama gecikme süresi optimizasyonu ile sinyalle kavşaklarda gecikme süresinin, ortalama yakıt tüketimi ve CO2 emisyonunun azaltılması amaçlanmıştır. Yakıt tüketimi ve emisyon etkisini değerlendirirken, beş farklı araç türü göz önünde bulundurulmuştur. Bu da önerilen yöntemlerle gecikmelerde sağlanan iyileştirmelerin yakıt tasarrufu ve emisyon üzerindeki etkisini daha derinlemesine ve özgün bir şekilde ele almamızı sağlamaktadır. Araştırmada, mevcut durum ve diğer yöntemlerin etkinliği SUMO simülasyon aracı kullanılarak gösterilmiştir.

2. TRAFİK IŞIK KONTROL SİSTEMLERİNDE TEMEL KAVRAMLAR (BASIC CONCEPTS IN TRAFFIC LIGHT CONTROL SYSTEMS)

Trafik ışık kontrol sistemlerinde optimizasyon işlemlerinin daha iyi anlaşılabilmesi için bazı trafik terimlerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu bölümde genel Trafik ışık kontrol sistemlerini oluşturan temel bileşenler açıklanmıştır [26-28]. İzole kavşak, diğer komşu kavşaklarla hiçbir ilişkisi olmayan ve diğer trafik kontrol sinyallerinden bağımsız olarak çalışan bir kavşaktır.

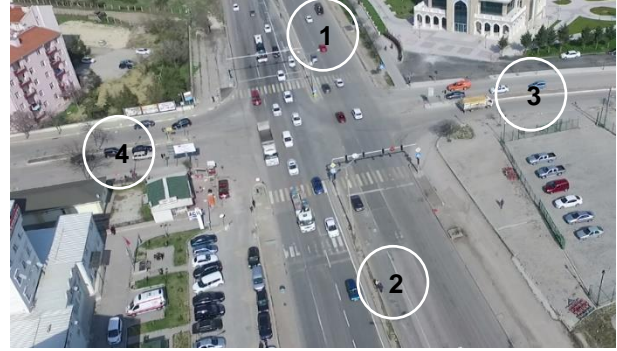
Faz, kavşakta birden fazla akıma geçiş hakkı verilen süreyi ifade etmektedir. Bir akımda ilk yeşil ışık yanmaya başladığı andan itibaren sonraki akımın yeşil

olmasına kadar geçen zamana faz denmektedir. Etkin Kırmızı süre, araçların kavşakta bekleme süresidir. Etkin Yeşil süre, araçların geçişine izin verilen süredir [26]. Devre süresi, aşamaların döngüsünü tamamlamak için gereken süredir. Gecikme süresi, bir aracın yolda sinyalizasyon, kavşak yapısı, kaza vb. durumlarından dolayı ne kadar zaman kaybettiğini ifade etmektedir. Trafik kontrol sistemlerinde performans değerlendirme kriterlerinden biridir [28]. Kuyruk uzunluğu, her kavşağın önündeki yollarda bekleyen toplam araç sayısıdır ve trafik sinyal kontrol algoritmalarının kalitesini belirlemek için trafik mühendisliğinde kullanılan önemli bir diğer parametredir. Kapasite, herhangi bir yol veya kavşaktan birim zamanda geçebilecek maksimum araç sayısıdır [27].

3. TRAFİK AKIŞ MODELİ VE VERİ SETİ (TRAFFIC FLOW MODEL AND DATASET)

Ankara ili sınırları içerisindeki trafik yoğunluğunun fazla olduğu Polatlı Refik Cesur kavşağının mevcut durumu ve önerilen modellerin uygulanması ile ulaşılan durumları incelenmiştir. Kavşağın genel yapısı Şekil 1’de gösterilmektedir. Biri yaya fazı olmak üzere beş fazlı çalışan, dört kolu ve on şeritten oluşan bir kavşaktır. Şekil 1’deki rakamlar yönleri temsil etmektedir. Kavşakta düz gidişlere, sağa ve sola dönüşlere izin verilmektedir.

Toplamda 8 adet trafik lambası bulunmaktadır. Sağa dönüşler farklı trafik lambaları ile kontrol edilmektedir.



Şekil 1. Polatlı Refik Cesur kavşağı (Polatlı Refik Cesur intersection)

Polatlı Refik Cesur kavşağı verileri Gazi Üniversitesi Kent İçi Ulaşım Teknolojileri Erişebilirlik Uygulama Ve Araştırma Merkezi (KUTEM) tarafından elde edilmiştir. Bu veri setinde 08:00 - 16:00 arasında saatlik gelen araçların sayıları, araç tipleri, hava durumu, araç rotası, mevcut faz bilgileri ve mevcut ışık planı yer almaktadır. Beş tip taşıt trafikte bulunmaktadır. Bunlar otomobil, otobüs, treyler, orta yüklü ticari taşıt (OYTT) ve kamyonlardır. Otomobil için veri seti örneği Çizelge 1’de gösterilmektedir. Çizelgede birer saat arayla kavşağa giren ve farklı yönlere giden otomobil sayıları verilmektedir.

Çizelge 1. Polatlı Refik Cesur kavşağı trafik akış örneği (Traffic flow example at Polatlı Refik Cesur intersection)

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

Çizelge 2’de Polatlı Refik Saydam kavşağında 08:00 – 16:00 saatleri arasında araç türüne göre geçen araç sayıları verilmiştir. Bu çizelgeye göre farklı saatlerde geçen aynı tip araç yoğunluğu değişimi hesaplanmıştır. Araçların farklı türde olması, kalkış kayıp süresi, ivmelenme, boyut gibi farklı özelliklerinden dolayı kavşaktan geçiş süreleri değişmektedir. Gün içerisinde

sayım saatine göre en az geçen araç sayısı ile en çok geçen araç sayısı arasındaki değişim oranları verilmiştir. Örneğin Çizelgede otomobil verisi için, 08 – 09 arası 1564 otomobil kavşaktan geçerken, 15- 16 arası 2356 otomobil geçmektedir. Bu da yaklaşık saat dilimleri arasında %50 değişim demektir. Farklı saat dilimlerinde otomobil geçiş sıklığı yaklaşık %50, O.Y.T.T %57,

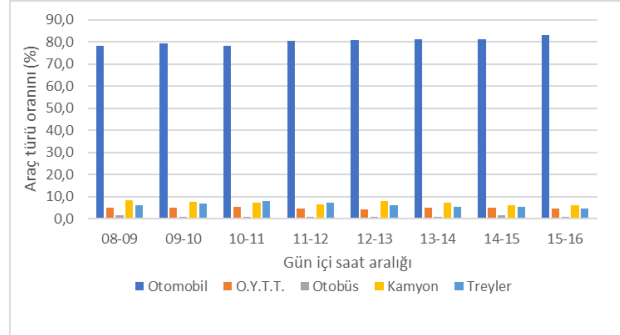
Çizelge 2. Polatlı Refik Cesur kavşağı araç türüne göre saatlik geçen araç sayısı
(Polatlı Refik Cesur intersection hourly vehicle count by vehicle type)

	Otomobil	O.Y.T.T	Otobüs	Kamyon	Treyler	Toplam
08-09	1564	100	35	171	127	1997
09-10	1498	97	19	143	129	1886
10-11	1557	107	20	148	160	1992
11-12	1552	87	21	126	145	1931
12-13	1693	87	16	169	132	2097

Çizelge 3. (devam) Polatlı Refik Cesur kavşağı araç türüne göre saatlik geçen araç sayısı
(Polatlı Refik Cesur intersection hourly vehicle count by vehicle type)

Arac Türü	13-14	14-15	15-16
Otomobil	1870	2120	2356
O.Y.T.T.	115	136	137
Otobüs	21	39	28
Kamyon	168	165	180
Treyler	126	142	131
Toplam	2300	2602	2832

Otobüs %100, Kamyon %43, Treyler %27 oranlarında farklılık göstermektedir. Şekil 2’de toplam araç sayısına göre araç türlerinin zaman bazında geçiş oranları gösterilmiştir



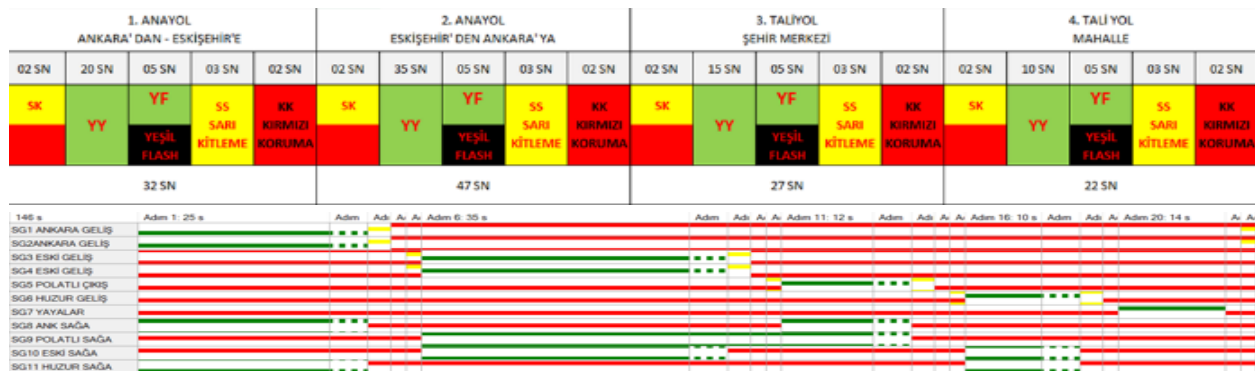
Şekil 2. Kavşaktan geçen araç türlerinin zaman bazında geçiş oranları (time-based passage rates of vehicle types at the intersection)

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

Kavşağın mevcut faz diyagramı Şekil 3’te gösterilmektedir. Satırlar düz gidiş, sağa ve sola dönüşlerin yapıldığı yönleri ifade etmektedir. Sütunlar ise ışık sürelerini göstermektedir. Her bir yön için gerekli olan ışık süreleri ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Örneğin Ankara-Eskişehir yönü için etkin yeşil süre 25 sn, sarı ışık süresi 3 saniye, kırmızı koruma süresi 2 sn’dir.

Çizelge 4. Polatlı Refik Cesur kavşağı araç türüne ve yönlere göre geçen araç sayısı (The number of vehicles passing through Polatlı Refik Cesur intersection by vehicle type and directions)

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



Şekil 3. Polatlı Refik cesur kavşağı mevcut durum faz diyagramı (Existing condition phase diagram for Polatlı Refik Cesur intersection)

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

Kavşakta mevcut duruma kıyasla ortalama gecikme zamanını azaltacak yeşil ışık sürelerinin belirlenmesi amacıyla Webster ve Modifiye Webster Tabanlı Karınca Kolonisi Algoritması kullanılmıştır.

4. KARINCA KOLONİSİ ALGORİTMASI (ANT COLONY ALGORITHM)

Karınca Kolonisi Algoritması (KKA), hesaplama açısından zor kombinatoriyal optimizasyon (KO) problemlerini çözmek için kullanılan meta-sezgisel bir yaklaşımdır. Başka bir deyişle, kabul edilebilir bir hesaplama süresinde yeterince iyi çözümler elde etmek için kullanılabilir bir algoritmadır. Karıncaların gerçek hayattaki davranışlarından esinlenen karınca kolonisi algoritması, her bir ajana yapay karınca adı verilen çok ajanlı bir sistemdir. Karıncaların yuvaları ile yiyecek arasındaki en kısa yolu seçerken sergiledikleri davranışların benzetimini yaparak en iyi ya da en iyiye yakın çözümleri bulmaya çalışmaktadır. Karıncalar yuvalarından yiyeceklere giderken ve tersi yönde hareket ederken geçtikleri yerlere feromon denilen kimyasal bir madde bırakmaktadır. Karar verme noktalarına gelen karıncalar feromon maddesini koklayarak hangi tarafa gideceklerini olasılıklı bir seçim ile karar vermektedir. Feromon kimyasal bir madde olduğu için buharlaşmaktadır. Fakat kısa yol ilerleyen aşamalarda daha fazla karınca tarafından kullanılacağı için feromon yoğunluğuna bağlı olarak seçim olasılığı artacaktır [24]. Sürü akıllı sistemlerinin en başarılı örneklerinden biridir ve klasik gezgin satıcı problemi, yol rotalama ve ağ rotalama gibi birçok farklı türde problemi çözmek için uygulanmıştır [29].

KKA'nın ana adımları şu şekilde özetlenebilir:

- Her düğümdeki feromon değerlerine sabit bir değer verilmesi
- Her bir karınca bir başlangıç düğümüne atanır ve feromon değerine göre komşu düğüme hareket eder. Geçiş olasılıklarını seçmenin birçok farklı yolu vardır. Ancak, günümüzde KKA literatüründe hala en sık olarak Eş. 1'de verilen formül kullanılmaktadır. Bu formülle karıncaların i düğümünden j düğüme hareket etme olasılıkları hesaplanır.

$$p_{ij} = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \eta_{ij}^{\beta}}{\sum_{j \in N_i} \tau_{ij}^{\alpha} \eta_{ij}^{\beta}}, & \text{if } j \in N_i \\ 0, & \text{if } j \notin N_i \end{cases} \quad (1)$$

Burada N_i , i 'nin komşu düğümleri kümesini, \mathcal{T}_{ij} , i ve j düğümleri arasındaki feromon değerlerini, η_{ij} ise sezgisel değerleri temsil etmektedir. α ve β değerleri genellikle uygulamaya bağlıdır, sırasıyla feromon ve sezgisel değerlerin önemini ifade ederler. Algoritma, Eş. 2 kullanılarak her yoldaki feromonu günceller.

$$\mathcal{T}_{ij}(n+1) = (1 - \rho)\mathcal{T}_{ij}(n) \quad (2)$$

n , iterasyon indeksidir. $\rho \in (0,1]$, buharlaşma oranıdır. Yollardaki feromonlar daha sonra Eş. 3'e göre güncellenir.

$$\mathcal{T}_{ij}(n+1) = \mathcal{T}_{ij}(n) + \Delta\mathcal{T}_{ij} \quad (3)$$

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

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

KKA'da kullanılan karınca sayısı önemli bir parametredir. Karınca sayısının fazla olması, her iterasyonda daha fazla keşif yapılmasını ve daha fazla feromon salınımı yapılmasını sağlamaktadır. Bu durum daha iyi çözümlere yönelme şansını artırmaktadır. Az karınca kullanmak algoritmanın tüm avantajlarından yararlanamamıza sebep olabilirken karınca sayısını çoğaltmak da hesaplama yükünü arttırmaktadır. Diğer KKA algoritmalarına kıyasla Sıra Tabanlı Karınca Sistemi genellikle daha az karınca gerektirmektedir. Bu da hesaplama açısından ve uyarlanabilir trafik ışık kontrolü gibi gerçek zamanlı uygulamalar için daha uygundur. Sıra Tabanlı Karınca Sisteminin genel çalışma prensibine göre, hızlı çözüm üretmek için karıncaların çözüm maliyetleri sıralanır ve en yüksek maliyetli olan çözüm uzayından atılır. İyi çözümler bulunduğu, feromonlar daha hızlı birikmektedir ve bu sebeple en iyi çözümlere daha fazla ağırlık verilmektedir. Trafik ışık optimizasyonu alanında yapılan çalışmalarda da ortalama gecikme süresini ve algoritma karmaşıklık maliyetini en aza indiren Sıra Tabanlı Karınca Sistem Algoritması olduğu gösterilmiştir [29-31]. Bu sebeple bu çalışmada

feromon güncellenmesi bu algoritma ile gerçekleştirilmiştir.

Sıra Tabanlı Karınca Sistemi algoritmasında, feromon depolanmadan önce karıncaların çözümleri kalitesine göre sıralanır. Yalnızca $(w-1)$ en iyi çözüme sahip karıncanın ve şimdiye kadarki en iyi karıncanın feromon bırakmasına izin verilir. Şimdiye kadarki en iyi çözüm w ile r , en iyi karınca $\max\{w-r, 0\}$ ile ağırlıklandırılır. Feromon güncelleme kuralı Eş. 4'te gösterildiği gibidir [32,33].

$$T_{ij}(n+1) = T_{ij}(n) + \sum_{r=1}^{w-1} (w-r) \Delta\tau_{ij}^r + w\Delta\tau_{ij}^{bs} \quad (4)$$

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

Burada, Eş. 5 ve 6 ile karıncaların bırakacağı feromon izleri hesaplanmaktadır. Böylece, daha iyi çözümlere sahip karıncaların daha güçlü feromon izleri bırakması ve diğer karıncalar tarafından bu yolların takip edilmesi sağlanır [33].

$$\Delta\tau_{ij}^r = \frac{1}{f(s_r)} \quad (5)$$

$$\Delta\tau_{ij}^{bs} = \frac{1}{f(s_{gb})} \quad (6)$$

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

$q^i(t)$, t anında trafikte i hareket yönündeki kuyruk uzunluğunu göstermektedir. i , hareket yönlerini ifade etmektedir. Literatürde kuyruk uzunluğunu hesaplayan formüller aşağıdaki gibidir [34].

$$q(t) = q^i(t) \quad i = 1,2,3,4 \quad (7)$$

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

$$q_{out}^{(i)}(t_1, t_2) = \min \left[q^i(t_1), 1 + \text{int} \left(\frac{t_2 - t_1}{h_w} \right) \right] \quad (8)$$

h_w , kavşaktan ayrılan araçlar arasındaki süreyi ifade etmektedir. $u(t_1, t_2)$, (t_1, t_2) zaman aralığındaki ışık

durumudur. “ $\text{int}(\cdot)$ ” tamsayıya çevirme fonksiyonudur. $u(t_1, t_2)$ = kırmızı ise, $q_{out}^{(i)}(t_1, t_2)=0$ 'dir. (t_1, t_2) zaman aralığında gelen araçların sayısı $q_{in}^i(t_1, t_2)$ 'dir. Gelişler arası süre bilinmediği için, sistemin simülasyonu için gerçek dağılımın iyi bir tahmini olan Eş. 9'da verilen poisson dağılımı kullanılmıştır.

$$P(n) = \frac{(\lambda\Delta t)^n e^{-\lambda\Delta t}}{n!} \quad (9)$$

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

$$q(t) = q(t-1) + q_{in}^i(t) - q_{out}^{(i)}(t) \quad (10)$$

Ortalama gecikme sürelerinin hesabında sabit zamanlı trafik sinyali kontrolü için, yaygın olarak kullanılan Webster eşitliği (Eş. 11- Eş. 13) ile Zakariya ve Rabia'nın önerdiği Kanada Kapasite Kılavuzu ve Karayolu Kapasitesi Kılavuzunda (HCM) kullanılan zamana bağlı gecikme formülü (Eş. 14- Eş. 16) kullanılmıştır [21,35,36]. Bazı durumlarda Webster yöntemi, yüksek akım oranlarında aşırı tahminler yaparak, faza gereğinden fazla yeşil ışık süresi verebilmektedir. Modifiye Webster yöntemi ise, yüksek akım oranlarında daha dengeli yeşil ışık süresi tahsis ederek sinyal optimizasyonunu daha iyi gerçekleştirebilmektedir. Sonuç olarak, Webster ve modifiye Webster yöntemleri arasındaki temel fark, Webster yönteminin yoğunluğa oransal bağlı, modifiye webster yönteminin ise lineer bağımlı olmasıdır.

$$\lambda = \frac{G}{C} \quad (11)$$

$$x = \frac{q}{\lambda s} \quad (12)$$

$$D = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0,65 \left(\frac{C}{q^2} \right)^{1/3} x^{2+5\lambda} \quad (13)$$

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

$$D = k_f d_1 + d_2 \quad (14)$$

k_f , ilerleme düzeltme faktörüdür ve izole kavşaklar için 1 alınmaktadır [37]. d_1 , ortalama sürekli gecikme, d_2 , ortalama yüksek trafik akış gecikmesini tanımlamaktadır.

$$d_1 = \frac{C(1 - \frac{g_e}{C})^2}{2(1 - \min(x, 1) \frac{g_e}{C})} \quad (15)$$

$$d_2 = 15t_e \left[x - 1 + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{240x}{cap t_e}} \right] \quad (16)$$

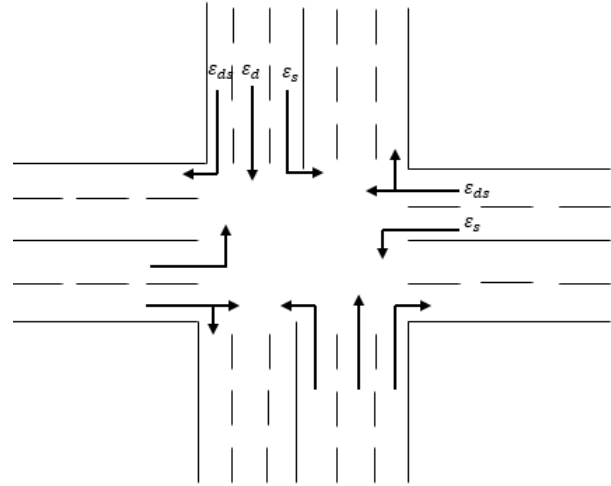
x , gerçek trafik akımının, doymuş akım değerine bölünmesiyle elde edilen doyma derecesidir. cap , gerçek kavşak kapasitesini, C devre süresini, t_e , dikkate alınan değerlendirme süresini (8 saat), g_e , hiçbir kayıp zamanın olmadığı ve yeşil sürenin araçlar tarafından etkili bir şekilde kullanıldığı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

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

5. SABİT ZAMANLI TRAFİK KONTROL YÖNTEMLERİ (FIXED-TIME TRAFFIC CONTROL METHODS)

Webster'in, 1958 yılında önermiş olduğu minimum gecikme için optimal devre süresi formülü yayınlandığı günden beri izole kavşaklarda sabit zamanlı trafik kontrolü alanında yaygın olarak kullanılmaktadır [38]. Webster'in minimum gecikme formülü için optimal devre süresi formülünün modifiye edilmiş pek çok hali bulunmaktadır. Çalışmada Zakariya ve Rabia tarafından önerilen Webster'in optimal devre süresi formülünün geliştirilmiş bir versiyonu olan Modifiye Webster yöntemi de kullanılmıştır. Bu iki yöntem de modern sistemler için optimal devre sürelerinin hesaplanmasında ve etkin yeşil ışık sürelerinin belirlenmesinde hala yaygın olarak kullanılmaktadır [39].

Şekil 4'te görüldüğü gibi doğu batı yönünde 2 şeritli, kuzey güney yönünde ise 3 şeritli yollar bulunmaktadır. Her yoldan düz, sağ ve sol yönlerinde gidişe izin verilmektedir. ϵ_{ds} , ϵ_d , ϵ_s , sırasıyla, sağ dönüş yapan, düz giden, sola dönüş yapan araç sayılarını ifade etmektedir. 2 şeritli yollarda ise ϵ_{ds} , ϵ_s , sırasıyla, sağ dönüş yapan/düz giden ve sola dönüş yapan araç sayılarıdır. S_i , her bir faz için doymuş akım değerini göstermektedir.



Şekil 4. Polatlı Refik Cesur kavşak yapısı (Polatlı Refik Cesur intersection structure)

İki ve üç şeritli yollarda kritik şerit akım oranları, sırasıyla, Eş. 17 ve Eş. 18 ile hesaplanmaktadır [39]. Kritik şerit, her bir faz için maksimum akışın olduğu şeridi ifade etmektedir. Kritik akım oranı, kritik şerit akım değerinin, doymuş akım değerine bölünmesiyle bulunmaktadır.

$$y_i = \frac{\max(\epsilon_s, \epsilon_d, \epsilon_{ds})}{S_i} \quad (17)$$

$$y_i = \frac{\max(\epsilon_s, \epsilon_{ds})}{S_i} \quad (18)$$

Optimal devre süresi (C_0), Webster (Eş. 19) ve Modifiye Webster (Eş. 20) yöntemleri kullanılarak hesaplanmıştır [40].

$$C_0 = \frac{1.5L + 5}{1 - \sum_{i=1}^n y_i} \quad (19)$$

$$C_0 = \frac{1.978L + 5.109}{1.978 - 0.9013 \sum_{i=1}^n y_i} \quad (20)$$

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

Etkin yeşil süreler (G_i) fazlara ait şeritlerin kritik akım değeriyle orantılı olarak Eş. 21 kullanılarak hesaplanmaktadır. Optimal devre süresi de efektif yeşil sürelerle toplam kayıp sürelerin toplamıdır. Dolayısıyla, toplam kayıp zamanı devre süresinden çıkartılır ve kalan süre, fazlara yeşil süre olarak dağıtılır[39].

$$G_i = \frac{y_i}{\sum_{i=1}^n y_i} (C_0 - L) \quad (21)$$

6. TRAFİK SİMÜLATÖRLERİ VE SUMO YAZILIMI (TRAFFIC SIMULATORS AND SUMO SOFTWARE)

Son yıllarda trafik sinyal kontrol sistemleri üzerine yapılan çalışmaların sayısı oldukça artmıştır. Önerilen ve geliştirilen yöntemleri gerçek hayatta uygulayıp sonuçlarını almak oldukça pahalı, zaman alıcı ve zahmetlidir. Bu yüzden simülasyonlar genel araştırmaların vazgeçilmez bir parçası olmaktadır. Önerilen yöntemin etkinliğini göstermek, çeşitli test senaryolarını simüle etmek için farklı simülasyon platformları kullanılmaktadır [41].

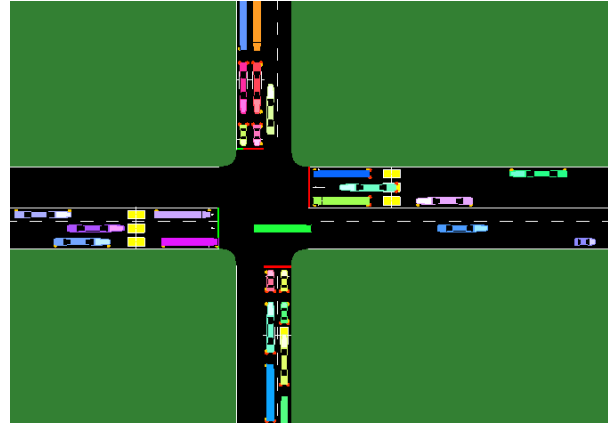
Trafik simülatörleri mikroskobik, mezoskopik ve makroskobik olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadır. Makroskobik simülatörler, gerçek trafik ağını oluşturan küçük bileşenlerden (cadde, tali ve ana yollar vb.) ve araçların bireysel detaylarından bağımsız olarak trafiği bir bütün olarak ele alır. Mikroskobik simülatörler, araçların bireysel davranışlarını daha ayrıntılı olarak dikkate alır. Her bir aracın yol veya komşu araçlarla etkileşimini dikkate alan hesaplamalar yapılır. Mezoskopik simülatörlerde araçların bireysel davranışları değil, genel etkileşim dikkate alınır. Mezoskopik simülatörler orta düzeyde ayrıntıya sahiptir [26].

Literatürde kullanılan simülasyon platformlarından bazıları ticari, bazıları açık kaynak trafik simülatörleridir. Ticari trafik simülatörü yazılım paketleri arasında AIMSUN, VISSIM, ARCHISIM, 3RD VIRTUAL, MATLAB/Simulink ve CORSIM bulunmaktadır. Açık kaynak trafik simülatörleri arasında, MATSim TRANSIMS, CITY FLOW, VEINS, ANYLOGIC ve SUMO sayılabilir [42-49].

SUMO, açık kaynaklı python tabanlı bir simülasyon aracıdır. SUMO, gerçek zamanlı trafik simülasyonu gerçekleştirme, yol ağı modelleme, araç modellerinin etkisini inceleme, trafik akışı ve kontrolünü sağlama, veri toplama ve analiz etme gibi özelliklere sahiptir. Açık kaynak olması, trafikteki araçların bireysel davranışlarını, bunun yanında sürekli olayları simüle edebilme özelliğine sahip olması, SUMO simülasyon platformunun son dönemde oldukça yaygın olarak tercih edilmesine neden olmuştur. Belirtilen sebeplerden kaynaklı bu çalışmada SUMO tercih edilmiştir. Ayrıca SUMO dinamik zaman simülasyonu için oldukça güçlü bir simülasyon aracıdır [50].

7. UYGULAMA (APPLICATION)

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



Şekil 5. SUMO kavşak yapısı görseli (SUMO intersection structure image)

SUMO simülasyon aracı python tabanlı açık kaynak kodlu trafik simülasyon aracıdır. Uygulanan kavşak SUMO ortamında var olduğu gibi aktarılmıştır. KKA algoritması yazılımı SUMO simülasyon aracına eklenmiştir. Karıncaların güncellenmesi sonrası var olan durum analizi gerçekleştirilmiş ve ortalama bekleme süresi değişimi sıfır olana kadar tekrarlanmıştır. Bu süre zarfında, arka planda KKA yazılımı SUMO girdi parametrelerini güncellemiştir. Bu parametreler araç türüne ve araç gidiş yönüne (faz yönüne) göre değişmektedir. Sabit parametreler, araç türü, ivmelenmesi, kalkış kayıp süresi, yeşil ışık faz sırası ve devre süresidir. Değişen (güncellenen) parametreler, faz yeşil ışık süreleridir. Bu güncellemeyi gerçekleştirmek için webster ve modifiye webster yöntemleri kullanılmıştır. Değişim için trafik yoğunluğu ve buna bağlı araç türü etkileri parametreleri her adımda hesaplanmıştır.

Örneğin, kavşağa giren otomobil sayısı 1564, kamyon sayısı 171 dir. Kalkış kayıp süreleri hesaplanması için hızlanma/yavaşlama ivmelenme oranları sırasıyla $3/4 \text{ m/s}^2$ ve $1-2/3-4 \text{ m/s}^2$ dir. Devre süresi 145, güvenli geçiş süresi 20 sn'dir. Yaya için ayrılan süre 10 sn'dir. Bu girdi verileri her bir KKA iterasyonu ile güncellenerek ortalama bekleme süresi optimizasyonu gerçekleştirilmiştir.

Webster ve modifiye webster yöntemleri kullanılarak yeşil ışık devre süreleri hesaplanmıştır. Veri setinde olduğu gibi simülasyonda Sarı - kırmızı ışık süresi 2 sn, kontrollü geçiş kırmızı ışık koruma süresi 2 sn, yeşil ışık flaşörü 5 sn. ve sarı ışık süresi 3 sn olarak kabul edilmiştir. Yayalar için tüm ışıkların kırmızı olduğu durum 14 sn. olarak alınmıştır. Simülasyon ortamında kullanılan parametreler Çizelge 4'te gösterilmektedir. Hava koşullarının dikkate alınabilmesi için SUMO parametrelerinde gerekli güncellemeler yapılması yeterlidir. Farklı hava koşullarının sebep olduğu yol durumlarına bağlı olarak değişecek ortalama hız, hızlanma yavaşlama ivmesi gibi parametreler güncellenerek önerilen yöntemlerin etkinliği incelenebilir [51].

Çizelge 5. SUMO’da kullanılan parametreler (The parameters used in SUMO)

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

Trafik ışık planlamasında en temel amaçlardan biri gecikme süresini minimize etmektir. Çalışmada karıncalar tarafından depolanan feromon miktarı ortalama gecikme süresi ile doğrudan ilişkilidir. KKA’da girdi olarak, her faz için mevcut trafik kuyruğu, ortalama gecikme süreleri kullanılmıştır. Her bir sinyal fazının optimal süresi algoritmanın çıktı değeridir. Veri setinde, her faz için kavşağa gelen saatlik araç sayıları ve tipleri verilmektedir. Fakat her bir araç için varış zamanı bilinmemektedir. SUMO trafik simülatörü, araçların gelişlerinin çeşitli dağılım ailelerine uygun bir şekilde ayarlanabildiği bir platformdur. Bu dağılımlar arasında en sık kullanılanlar normal dağılım, uniform dağılım, Poisson dağılım ve Bernoulli dağılımıdır. Poisson dağılımı, özellikle trafik akışı modellenmesinde kullanılmaktadır [52]. Bu dağılım, nadir olarak gerçekleşen olayların olasılıklarını tahmin etmek ve bu olayların oluşma olasılıklarını modellemek için oldukça kullanışlıdır. Bu yüzden 4. bölümde bahsedildiği gibi, saatlik varış zamanının, poisson dağılımını takip ettiği varsayılmıştır. KKA algoritması da, kuyruktaki araçların gecikme süresi ve bu süre içinde kavşağa gelecek olan araçların tahmini gecikme süresini içeren ortalama gecikme süresini minimize edecek en uygun yeşil ışık süresini belirlemektedir.

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

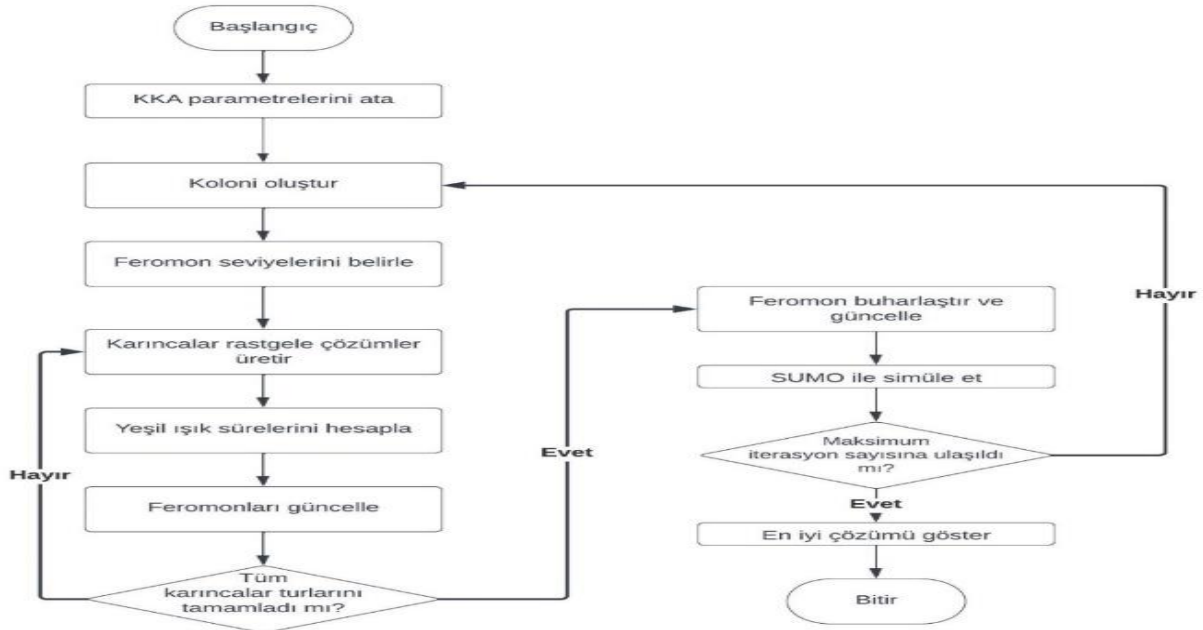
aracının varış zamanıdır. arasındaki mesafeyi ifade etmektedir

Girdiler elde edildikten sonra, yeşil ışık süresi Eş.22’ye göre hesaplanmaktadır [29].

$$j_{1green}(t_1, t_2) = \frac{q(q-1)hw}{2} + \sum_{i=1}^q (t_1 - t_a^i) + \frac{\lambda((q-1)hw)^2}{2} + \frac{\lambda((q-1)hw)[\lambda((q-1)hw)-1]hw}{2} \quad (22)$$

Eş. 22’deki yeşil ışık süresi, her iterasyonda karınca hareketlerine bağlı olarak tekrar hesaplanmaktadır. İterasyon sonuçlarının birbirlerine yaklaşması, yani ortalama gecikme farklarının sıfır olması ile algoritma sonlandırılmaktadır.

KKA ele alınan probleme uygulanırken alınan kararlar şu şekildedir. Kavşaktaki yeşil ışık durumları, en kısa ve en uzun yeşil ışık süreleri, ışıkların durum değiştirme sırası KKA parametreleri olarak atanmaktadır. Yeşil ışık durumları, aynı anda yeşil veya kırmızı yanar fazları belirtmektedir. Kavşakta karışıklığa sebep vermeyecek şekilde birden fazla faz için yeşil ışık yanabilir. KKA’nın akış diagramı Şekil 6’da gösterilmiştir. Webster yöntemi ile belirlenen devre süresi kavşaktaki bir tur ışık döngü süresini vermektedir. HCM kuralları dikkate alınarak kavşakta kontrollü geçişi ve güvenliği sağlayan sarı + kırmızı ve sarı ışık süreleri belirlenmiştir. Bu süre daha önce Şekil 3’te gösterildiği üzere toplam 20 saniyedir. Yine HCM kurallarına göre her bir faz için en kısa yeşil ışık süresi 5 sn. olarak belirlenmiştir. Kavşak güvenliği için yeşil ışık süresi sonunda kullanılan yeşil ışık flaş süresi de dahil edilerek en uzun yeşil ışık süresi 85 olarak hesaplanmıştır. Tüm bu değerler, KKA algoritmasının başlangıç değerleri olarak atanmıştır.



Şekil 6. Uygulanan KKA'nın akış diyagramı (Flowchart of the applied ACO)

KKA doğası gereği ihtiyaca göre karınca kolonisi oluşturulmakta ve feromon seviyeleri belirlenmektedir. Koloni sayısı daha hızlı çözüm üretmek ve algoritmanın çalışma zamanını belirlemek için önemlidir. Bu önem dikkate alınarak sıra tabanlı KKA kullanıldığı daha önce açıklanmıştır. Sonraki adımda karıncalar Eş. 1'e göre rastgele çözümler üretmektedir. Üretilen çözümler ile her faz için yeşil ışık süreleri Eş.22'ye göre hesaplanmakta ve Eş. 4'e göre feromonlar güncellenmektedir. Elde edilen yeşil ışık sürelerine göre Çizelge 4'te verilen parametreler ile SUMO ile simüle edilmektedir. Önerilen model maksimum iterasyon sayısına erişince tamamlanmaktadır. Maksimum iterasyon sayısı değişim (iyileşme) olmadan geçen en yüksek koloni sayısı olarak belirlenmiştir. Her fazdaki araç yoğunluğu ve yeşil ışık süresine göre KKA tarafından belirlenen oranda feromon salınır. Feromonların buharlaşma oranına göre de karınca sayısı değişmektedir.

Buharlaşma farkı oluşmadığı son durum bizim için, maksimum iterasyon sayısıdır.

Çizelge 5'te, mevcut durum ile birlikte webster, Modifiye webster, Webster gecikmeli KKA ve Modifiye webster gecikmeli KKA için hesaplanmış yeşil ışık devre süreleri ve her yön için hesaplanmış yeşil ışık süreleri verilmiştir. Webster modeli için devre süresi 170 sn. olarak, modifye webster modeli için 165 sn olarak hesaplanmıştır. 8 saatlik veri seti simülasyonunda mevcut durumda yaklaşık 200 kere kavşaktaki ışık döngüsü tekrarlanırken Webster ile yaklaşık 170 kere tekrarlanmıştır.

Veri seti incelendiğinde yoğunluğun daha yüksek olduğu yön 1 ve yön 2 ye yeşil ışık süresi webster yöntemi ile daha uzun hesaplanmıştır. Çünkü webster yöntemi, doygun akım değerini temel alan bir yöntemdir. Birim zamanda geçen araç sayısı daha yüksek olduğundan bu fazlara daha uzun yeşil ışık süresi atanmıştır.

Çizelge 6. Webster, modifiye webster, KKA, mevcut durum devre süreleri ve yeşil ışık dağılımları (Webster, modified webster, ACO, current stage durations, and green light distributions)

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

Simülasyon ortamında araç türüne göre ivmelenme, araç boyutu ve kalkış kayıp süreleri dikkate alınarak modifiye webster ile süreler yeniden hesaplanmıştır. Bu sürelerin ortalama bekleme süresi üzerindeki etkisi SUMO ile incelenmiştir. Çizelge 6'da her bir yön için ortalama bekleme süreleri hesaplanmıştır. Devre süresinin artması ile 8 saatlik simülasyonda devre döngü sayısı azalmasına rağmen ortalama bekleme süresi azalmıştır. Özellikle araç yoğunluğunun yüksek olduğu yön 1 için yeşil ışık süresi mevcut duruma göre %95 artarken ortalama bekleme süresi %47 oranında azalmıştır. Yön 2 için yeşil

ışık süreleri %15 artarken ortalama bekleme süresi %43 oranında azalmıştır. Kavşaktaki tüm araçlar için en kötü bekleme süresi mevcut durumda yaklaşık 310 sn.'yi bulmaktadır. KKA ile bu süre 360 sn. olarak hesaplanmıştır. En kötü durumda KKA ile hesaplamının yüksek çıkmasının sebebi devre süresinin daha yüksek olmasıdır. Özellikle kavşağın en yoğun zamanında yön 4'teki araçlar bu süreleri erişebilmektedir. Ancak ortalama bekleme süresi ile tüm araçları için mevcut duruma göre yaklaşık %40 oranında azaldığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 7. Webster, modifiye webster, KKA, Mevcut durum için saniye cinsinden ortalama gecikme süreleri (Webster, modified webster, ACO, average delay times in seconds for the current Situation)

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

Yöntemler arasındaki istatistiksel farklılıklar ANOVA (Analysis of Variance) testi kullanılarak Excel'de değerlendirilmiştir. Her bir algoritma için SUMO simülatörü 32 defa çalıştırılmış ve elde edilen verilerden ortalama gecikme süreleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, farklı ışık planlama yöntemlerinin (Webster, Modifiye Webster, Webster Tabanlı KKA ve Modifiye Webster Tabanlı KKA) ortalama gecikme süreleri üzerinde anlamlı bir etkisi olduğu bulunmuştur ($F(3, 124) = 9450,59, p < 0,001$). ANOVA sonuçlarına göre, gruplar arasındaki fark istatistiksel olarak anlamlıdır, bu da en az bir grup ortalamasının diğerlerinden istatistiksel olarak farklı olduğunu göstermektedir. Gruplar arasındaki farkın kaynaklandığı belirlenen varyansın büyüklüğü, grup içi varyansın ($MS = 0,0335$) çok üzerindedir, bu da gruplar arasındaki farkın güçlü olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada farklı araç türlerinin gecikme süresine etkisi incelenmiştir.

Ayrıca, aynı önerilen model ile gerçekleştirilen iyileştirmenin yakıt tüketimi ve CO2 emisyon Bu incelemeler geçerliliği ve doğrulu kabul edilen SUMO simülasyon aracı ile gerçekleştirilmiştir. Gazi Üniversitesi Kent İçi Ulaşım Teknolojileri Erişebilirlik Uygulama Ve Araştırma Merkezi (KUTEM)'den elde edilen veriler ile kavşağı kullanan farklı araç türlerinin etkisi incelenmiştir. İlgili araç türlerinin rölantideki yakıt tüketimi (mL/saat) ve havaya salınan CO2 emisyon değerleri Rahmi vd.'nin yayınından alınmıştır [53]. Yakıt kullanım değerleri araçların kavşağa vardığı andan kavşağı terk ettiği ana kadar geçen süre için hesaplanmıştır. Gecikme süresinde en çok azalmayı sağlayan Modifiye Webster Gecikmeli KKA algoritmasına göre, iyileşmenin yakıt tüketimi ve emisyon yayılımına etkisi SUMO simülatörü kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar Çizelge 7 ve Çizelge 8'de gösterilmiştir.

Çizelge 8. Polatlı Refik Cesur Kavşağı yakıt tüketiminde sağlanan toplam tasarruf (Total fuelsaving achieved at Polatlı Refik Cesur intersection)

Araç türü	Gecikmede sağlanan iyileşme (sn)	Rölantide tüketimi(ml/saat)	yakıt Pik saatte sağlanan yakıt tasarrufu (ml)	Pik saatte sağlanan yakıt tasarrufu (litre)
Otomobil	71128,75	891	17604,37	17,60
OYTT	3102,15	891	767,7821	0,77
Otobüs	852	2044	483,7467	0,48
Kamyon	4986,78	2044	2831,383	2,83
Treyler	4973,12	2044	2823,627	2,82
TOPLAM				24,51

Çizelge 7’de, Polatlı Refik Cesur Kavşağı’ndaki gecikme sürelerindeki iyileşmelerin farklı araç türlerinde sağladığı yakıt tasarrufu miktarları görülmektedir. Bu sonuçlar, gecikme süresinde en iyilemeyi sağlayan Modifiye Webster Gecikmeli KKA algoritmasının uygulanmasıyla sağlanabilecek potansiyel yakıt

tasarrufunu akademik ve nicel bir şekilde sunmaktadır. Gecikmede sağlanan iyileşme kavşağa gelen toplam 2321 otomobil, 137 OYTT, 28 otobüs, 180 kamyon, 141 treyler için hesaplanmıştır. Pik saatlerde sağlanan yakıt tüketimi kavşağa giren toplam araçlar için hesaplanmıştır.

Çizelge 9. Polatlı Refik Cesur kavşağı CO₂ emisyonunda sağlanan iyileşme (Improvement in CO₂ emissions at Polatlı Refik Cesur intersection)

Araç türü	Pik saatte sağlanan yakıt tasarrufu (ml)	CO ₂ salınımı (gram/ml)	Pik saatte sağlanan CO ₂ emisyonunda iyileşme (gram/saat)
Otomobil	17604,37	2,35	41370,26
OYTT	767,7821	2,35	1804,288
Otobüs	483,7467	2,633	1273,705
Kamyon	2831,383	2,633	7455,031
Treyler	2823,627	2,633	7434,61
TOPLAM			59337,89

Çizelge 8’de farklı araç türlerinin CO₂ emisyonu açısından farklı performans gösterdiği gösterilmektedir. Bu performansın yakıt tüketimi ve CO₂ emisyonu arasında bir denge kurduğu ortaya konmuştur. Bu bilgiler, taşıma ve ulaşım sektörlerinde çevresel etkiyi azaltmak için stratejiler geliştirilirken dikkate alınmalıdır.

7. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, Polatlı Refik Cesur kavşağındaki devre süreleri ve yeşil ışık süreleri optimize edilerek ortalama bekleme süresinin azaltılması amaçlanmıştır. Bu amaç ile Webster ve araç türü yoğunluğunu dikkate alan, yüksek akım oranlarında daha dengeli yeşil ışık süresi dağılımı yapan modifiye webster ile KKA algoritması önerilmiştir. Devre süresinin en uygun değerini belirlemek ve ortalama gecikme süresini en aza indirmek için önerilen algoritmalar SUMO ile simüle edilmiştir. Hesaplama sonuçları, gecikme süresinin, Webster ve Modifiye Webster yöntemleri ile yaklaşık sırasıyla %32 ve %42 oranlarında azaltmanın mümkün olduğunu göstermiştir. Kavşaktaki araç türünün farklılığı dikkate alınarak gerçekleştirilen modifiye webster ile ortalama gecikme sürelerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Çalışmada ortalama bekleme süresi azalırken en kötü senaryoda en uzun bekleme süresi artmıştır. Bu artış hesaplanan devre süresi artışından kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak, optimum devre süresi ve KKA ile hesaplanan yeşil ışık süreleri ile ortalama gecikme azaltılarak kavşaklardaki trafik yoğunluğunun azaltılması sağlanmaktadır. Gecikmelerde sağlanan bu iyileştirmelerin yakıt tasarrufu ve emisyon üzerindeki etkisi incelenmiştir. Araç türleri de dikkate alınarak yapılan bu analizler konunun daha derinlemesine ve özgün bir şekilde ele almamızı sağlamıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde vermiş oldukları destekten dolayı Gazi Üniversitesi Kent İçi Ulaşım Teknolojileri Erişebilirlik Uygulama Ve Araştırma Merkezi (KUTEM) Birimi’ne teşekkür ederiz.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS’ CONTRIBUTIONS)

Tuğçe İNAĞ: Uygulamayı yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Murat Arıkan: Sonuçları analiz etmiş, metinde düzeltmeler yapmıştır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Fu, X., Gao, H., Cai, H., Wang, Z. and Chen, W. “How to improve urban intelligent traffic? A case study using traffic signal timing optimization model based on swarm intelligence algorithm” *Sensors*, 21(8): 2631, (2021).
- [2] Salawudeen, A.T., Umoh, I.J., Sadiq, B.O., Oyenike, O.I. and Mu’azu, M.B. “An adaptive ant colony optimisation for improved lane detection in intelligent automobile vehicles” *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 19(2) : 108-123, (2022).
- [3] Balta, M. and Ozcelik, I. “Traffic Signaling Optimization for Intelligent and Green Transportation in Smart Cities” *International Conference on Smart City and Emerging Technology, ICSCET* (2018).

- [4] Rida, N., Ouadoud, M. and Hasbi, A., "Ant colony optimization for real time traffic lights control on a single intersection." *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 14(2): 196-214, (2020).
- [5] Cui, Z., Sun, B., Wang, G., Xue, Y. and Chen, J., "A novel oriented cuckoo search algorithm to improve DV-Hop performance for cyber-physical systems", *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 103: 42-52, (2017).
- [6] Gao, K., Wu, N. and Wang, R., "Meta-heuristic and MILP for Solving Urban Traffic Signal Control", *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, IESM*, (2019).
- [7] Gao, K., Zhang, Y., Zhang, Y., Su, R. and Suganthan, P.N., "Meta-Heuristics for Bi-Objective Urban Traffic Light Scheduling Problems", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(7): 2618-2629, (2019).
- [8] Shaikh, P.W., El-Abd, M., Khanafer, M. and Gao, K., "A Review on Swarm Intelligence and Evolutionary Algorithms for Solving the Traffic Signal Control Problem", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(1): 48-63, (2022).
- [9] Salawudeen, A.T., Umoh, I.J., Sadiq, B.O., Oyenike, O.I. and Mu'azu, M.B., "An adaptive ant colony optimisation for improved lane detection in intelligent automobile vehicles", *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 19(2): 108-123, (2022).
- [10] Rida, N., Ouadoud, M. and Hasbi, A., "Ant colony optimization for real time traffic lights control on a single intersection", *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 14(2): 196-214, (2020).
- [11] He, J. and Hou, Z., "Ant colony algorithm for traffic signal timing optimization", *Advances in Engineering Software*, 43(1): 14-18, (2012).
- [12] Liao, S., Wu, Y., Ma, K. and Niu, Y., "Ant Colony Optimization With Look-Ahead Mechanism for Dynamic Traffic Signal Control of IoV Systems", *IEEE Internet of Things Journal*, 11(1): 366-377, (2024).
- [13] Cui, Z., Sun, B., Wang, G., Xue, Y. and Chen, J., "A novel oriented cuckoo search algorithm to improve DV-Hop performance for cyber-physical systems", *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 103: 42-52, (2017).
- [14] Gao, K., Wu, N. and Wang, R., "Meta-heuristic and MILP for Solving Urban Traffic Signal Control", *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, IESM*, (2019).
- [15] Gao, K., Zhang, Y., Zhang, Y., Su, R. and Suganthan, P.N., "Meta-Heuristics for Bi-Objective Urban Traffic Light Scheduling Problems", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(7): 2618-2629, (2019).
- [16] Zine-Dine, K. and Madani, A., "Using PSO algorithm for the traffic lights setting problem with cellular automaton model" *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 53(1): 89-93, (2013).
- [17] Wang, L., Gao, K., Lin, Z. and Huang, W., "Problem Feature-Based Meta-Heuristics with Reinforcement Learning for Solving Urban Traffic Light Scheduling Problems", *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, (2022).
- [18] Chen, X. and Yuan, Z., "Environmentally friendly traffic control strategy-A case study in Xi'an city", *Journal of Cleaner Production*, 249: 119397, (2020).
- [19] Ji, Y., Hu, B., Hill, G., Guo, W., Blythe, P. and Gao, L., "Signal coordination scheme based on traffic emission", *IET Intelligent Transport Systems*, 10(2): 89-96, (2016).
- [20] Zhang, Q., Dong, W. and Xing, X., "PBIL algorithm for signal timing optimization of isolated intersection", *Communications in Computer and Information Science*, 472: 606-610, (2014).
- [21] Balta, M. and Ozcelik, I., "Traffic Signaling Optimization for Intelligent and Green Transportation in Smart Cities", *International Conference on Smart City and Emerging Technology, ICSCET*, (2018).
- [22] Elgarej, M., Khalifa, M. and Youssfi, M., "Traffic lights optimization with distributed ant colony optimization based on multi-agent system", *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9944: 266-279, (2016).
- [23] Witeck, G.R., Rocha, A.M.A.C., Silva, G.O., Silva, A., Durães, D. and Machado, J. "A Bibliometric Review and Analysis of Traffic Lights Optimization". *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 13378: 43-54, (2022).
- [24] Li, L., Ma, Y., Wang, B., Dong, H. and Zhang, Z., "Research on traffic signal timing method based on ant colony algorithm and fuzzy control theory", *Proceedings of Engineering and Technology Innovation*, 11: 21-29, (2019).
- [25] Srivastava, S. and Sahana, S.K., "Nested, hybrid evolutionary model for traffic signal optimization", *Applied Intelligence*, 46(1): 113-123, (2017).
- [26] Celtek, S.A., Durdu, A. and Alı, M.E.M., "Real-time traffic signal control with swarm optimization methods", *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 166, (2020).
- [27] Tomescu, O., Moise, I.M., Stanciu, A.E. and Batros, I., "Adaptive traffic light control system using ad-hoc vehicular communications network", *Taiwanese Association for Artificial Intelligence*, 74(2): 1-8, (2012).
- [28] Duman, Z.N., Murat, Y.S. and Yılmaz, M., "Koordine Kavşaklarda Sinyalizasyon Sistemine Etki Eden Parametrelerin İncelenmesi Vaka Durum Çalışması", *Politeknik Dergisi*, 1-1, (2023).
- [29] Renfrew, D. and Yu, X.-H., "Traffic signal optimization using ant colony algorithm" *International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, (2012).
- [30] Shih, P.S., Liu, S. and Yu, X.H., "Ant Colony Optimization for Multi-phase Traffic Signal Control" *7th International Conference on Intelligent Transportation Engineering, ICITE*, (2022).
- [31] Song, Q., Zhao, Q., Wang, S., Liu, Q. and Chen, X., "Dynamic path planning for unmanned vehicles based on fuzzy logic and improved ant colony optimization", *IEEE Access*, 8: 62107-62115, (2020).
- [32] Putha, R., Quadrifoglio, L. and Zechman, E., "Comparing ant colony optimization and genetic algorithm approaches for solving traffic signal coordination under

- oversaturation conditions”, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 27(1): 14-28, (2012).
- [33] Pérez-Carabaza, S., Gálvez, A. and Iglesias, A., “Rank-Based Ant System with Originality Reinforcement and Pheromone Smoothing”, *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(21), (2022).
- [34] Balta, M. and Özçelik, İ., “Şehir içi kavşak yönetim sistemleri için SDN temelli bir VANET mimari önerisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(3): 1451-1468, (2019).
- [35] Zakariya, A.Y. and Rabia, S.I., “Estimating the minimum delay optimal cycle length based on a time-dependent delay formula”, *Alexandria Engineering Journal*, 55(3): 2509-2514, (2016).
- [36] Wagner, P., Gartner, N., Oertel, R. and Lu, T., “Webster’s Delay Formula – revisited”, *93rd Annual Meeting Transportation Research Board*, Washington, (2014).
- [37] Tepley, S., Allingham, D., Richardson, D. and Stephenson, B. “Canadian capacity guide for signalized intersections”, (2008).
- [38] Webster, F.V., “Traffic Signal Settings,” *Road Research Technique*, 39, (1958).
- [39] Ali, M.E.M., Durdu, A., Celtek, S. and Yilmaz, A. An Adaptive Method for Traffic Signal Control Based on Fuzzy Logic With Webster and Modified Webster Formula Using SUMO Traffic Simulator”, *IEEE Access*, 1-1, (2021).
- [40] Cheng, D., Messer, C.J., Tian, Z.Z. and Liu, J., “Modification of Webster’s minimum delay cycle length equation based on HCM 2000”, *Transportation Research Board for Presentation and Publication at the 2003 Annual Meeting in Washington. DC*, (2003).
- [41] Kotusevski, G. and Hawick, K., “A review of traffic simulation software”, *Research Letters in the Information and Mathematical Sciences*, 13: 35-54, (2009).
- [42] Manandhar, B. and Joshi, B., “Adaptive traffic light control with statistical multiplexing technique and particle swarm optimization in smart cities”, *IEEE 3rd International Conference on Computing, Communication and Security (ICCCS)*, (2018).
- [43] Zaatouri, K., Jeridi, M.H. and Ezzedine, T., “Adaptive traffic light control system based on WSN: algorithm optimization and hardware design”, *26th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, (2018).
- [44] Andayani, U., Arisandi, D., Siregar, B., Syahputra, M., Muchtar, M., Manurung, O.Y., Nasution, T., “Simulation of Dynamic Traffic Light Setting Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)”, *Journal of Physics: Conference Series*, (2019).
- [45] Walukow, S.B., Doringin, F.J., Katuuk, R.E. and Wauran, A.S., “Regulation of the Real Time Traffic Light at Teling Intersection in Manado City by using Fuzzy Logic and ANFIS”, *International Conference on Applied Science and Technology (iCAST)*, (2018).
- [46] Wei, H., Zheng, G., Yao, H. and Li, Z., “Intellilight: A reinforcement learning approach for intelligent traffic light control”, *24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, (2018).
- [47] Lee, S., Younis, M., Murali, A. and Lee, M., “Dynamic local vehicular flow optimization using real-time traffic conditions at multiple road intersections” *IEEE Access*, 7: 28137-28157, (2019).
- [48] Saidallah, M., El Fergougui, A. and Elalaoui, A.E., “A comparative study of urban road traffic simulators”, *MATEC Web of Conferences*, (2016).
- [49] Solmaz, H., Kocakulak, T. and Şahin, F., “Control and Optimization of Pre-Transmission Parallel Hybrid Vehicle with Fuzzy Logic Method and Comparison with Conventional Rule Based Control Strategy”, *Politeknik Dergisi*, 26(3): 1035-1047, (2023).
- [50] Ali, M.E.M., Durdu, A., Celtek, S.A. and Yilmaz, A. “An Adaptive Method for Traffic Signal Control Based on Fuzzy Logic With Webster and Modified Webster Formula Using SUMO Traffic Simulator”, *IEEE Access*, 9, 102985-102997, (2021).
- [51] Faezi, S. and Dolatabadi, M.M., “Saturation Flow Rate of Urban At-Grade Signalized Intersection Under Different Climatic Conditions (Case Study: Sattari-Mokhberi Intersection)” *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-12, (2021).
- [52] Mohiddin, S.K., Prasanth, C., Rathore, G.S. and Hemanth, C., “Mathematical analysis of adaptive queue length-based traffic signal control”, *Lecture Notes in Electrical Engineering*, (2019).
- [53] Akçelik, R., Smit, R. and Besley, M., “Recalibration of a vehicle power model for fuel and emission estimation and its effect on assessment of alternative intersection treatments”, *4th International Roundabout Conference, Seattle, WA, USA*, (2014).