



Makale / Research Paper

Sinyalize Dönel Kavşaklarda Diferansiyel Gelişim Algoritması ile Sinyal Süre Optimizasyonu

Ziya ÇAKICI^{1a*}, Yetiş Şazi MURAT^{2b}

¹Bayburt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 69010 Bayburt/TÜRKİYE

²Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 20160 Denizli/TÜRKİYE

^aziyacakici@bayburt.edu.tr

Received/Geliş: 14.01.2021

Accepted/Kabul: 09.03.2021

Özet: “Vakit” in “Nakit” ten daha değerli olduğunu her fırsatta dile getiren insanoğlu, günlük hayatta, zamanının büyük bir bölümünü de trafikte harcamaktadır. Özellikle sinyalizasyon sistemi ile kontrol edilen kavşaklarda meydana gelen yüksek düzeyli zaman kayıpları, yakıt tüketimleri, gürültü kirlilikleri vb. psikolojik, ekonomik ve çevresel problemleri de beraberinde getirebilmektedir. Karşılaşılabilecek olası problemler ise yalnızca doğru ve güçlü bir matematiksel altyapıya sahip olan denetim stratejileri ile en aza indirilebilmektedir. Bu çalışmada, sinyalize dönel kavşakların performanslarının artırılması amacıyla, kavşaktaki ortalama taşıt gecikmesinin minimize edilmesini hedefleyen bir sinyal süresi optimizasyonu modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modelde, fazlara ait sinyal süreleri ve devre süresi Diferansiyel Gelişim Algoritması kullanılarak optimize edilmiştir. Çalışma kapsamında, modelin etkinliği, Denizli Kelleci Kardeşler Kavşağı’ndan 4 farklı zaman periyodunda toplanan gerçek trafik verileri kullanılarak VISSIM simülasyon programında test edilmiştir. Sonuç olarak, söz konusu model ile ortalama gecikmelerin, kavşaktaki mevcut duruma kıyasla yaklaşık %45’ e kadar azaltılabileceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sinyalize dönel kavşak; optimizasyon; VISSIM; ortalama gecikme; diferansiyel gelişim algoritması.

The Optimization of Signal Timings for Signalized Roundabouts using Differential Evolution Algorithm

Abstract: Mankind who express that “Time” is more valuable than “Cash” at every turn, spend a large part of their time in traffic in daily life. Higher levels of loss of time, fuel consumption, noise pollution, etc. which occur especially at intersections controlled with the signalization system can also bring along psychological, economic and environmental problems. Possible problems that can be encountered can only be minimized by the intersection management strategy which has a correct and strong mathematical background. In this study, in order to increase the performance of signalized roundabouts, a signal timing optimization model which aims to minimize average vehicle delay at signalized roundabout is created. In created model, signal timings for each phase sequences and cycle time are optimized using Differential Evolution Algorithm. In the scope of the study, the effectiveness of the model is tested on VISSIM simulation software by using real traffic data which are collected from Denizli Kelleci Kardeşler Intersection for different time durations. As a result, it was determined that the average vehicle delay at Kelleci Kardeşler Intersection may be reduced up to 45% by created model comparing to current situation.

Keywords: Signalized roundabout; optimization; VISSIM; average delay; differential evolution algorithm.

Bu makaleye atıf yapmak için

Çakici, Z., Murat, Y.S., “Sinyalize Dönel Kavşaklarda Diferansiyel Gelişim Algoritması ile Sinyal Süre Optimizasyonu” El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2021, 8 (2) ; 635-651.

How to cite this article

Çakici, Z., Murat, Y.S., “The Optimization of Signal Timings for Signalized Roundabouts using Differential Evolution Algorithm” El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 2021, 8 (2); 635-651.

ORCID ID: ^a0000-0001-7003-815X; ^b0000-0002-7033-7026

1. Giriş

Ülkemizde, hem şehir içi hem de şehirlerarası yol ağlarında sıklıkla karşılaşılan kavşak türlerinden birisi de sinyalize dönel kavşaklardır. Adından da anlaşılacağı üzere, bu tür kavşaklar, bir yuvarlak adadan ve bu yuvarlak adanın etrafına belirli bir düzen ile yerleştirilmiş sinyalizasyon sistemlerinden oluşmaktadır. Sinyalize dönel kavşaklarda, kavşak yaklaşımlarında ve yuvarlak ada etrafında bulunan taşıtların kavşaktan geçiş sırası ve düzeni, yaklaşım kollarındaki ve yuvarlak ada etrafındaki sinyalizasyon sistemleri ile sağlanmaktadır [1]. Böylece, kavşak içerisinde, farklı yönlü trafik akımları için kesişme olasılıkları ortadan kaldırılmakta ve trafik güvenliği artırılmaktadır [2].

Sinyalizasyon uygulamaları, trafik güvenliği bağlamında önemli kazanımların elde edilmesine imkân sağlamasına rağmen, psikolojik - ekonomik ve çevresel bir takım problemleri de beraberinde getirebilmektedir. Yüksek düzeydeki zaman kayıpları, yakıt tüketimleri, egzoz emisyonları ve gürültü kirlilikleri söz konusu problemlerden bazılarıdır. Belirtilen problemlerin en aza indirilebilmesi için en uygun yol, doğru ve sürdürülebilir kavşak denetim yaklaşımlarıdır [3]. Doğru ve sürdürülebilir kavşak denetimi için, öncelikli olarak yapılması gereken çalışmalardan birisi de sinyalizasyon sistemine ait sinyal sürelerinin en doğru ve en uygun şekilde belirlenmesidir. Sinyal süresi optimizasyonu üzerine yapılan birçok araştırma, optimizasyon tabanlı yaklaşımlar ile kavşak performanslarının ve hizmet düzeylerinin önemli oranlarda artırılabilirliğini açıkça ortaya koymuştur [4-8]. Literatürde, sinyalize kavşaklarda sinyal sürelerinin optimizasyonu üzerine yapılan birçok çalışma bulunmasına rağmen, sinyalize dönel kavşaklarda sinyal sürelerinin optimizasyonu üzerine yapılan çalışma sayısı oldukça azdır [9]. Sinyalize dönel kavşaklar için en uygun sinyal sürelerinin belirlenmesini içeren çalışmalardan bazıları şu şekilde özetlenebilir: Yang ve diğ., sinyalize dönel kavşaklarda güvenlik problemlerine sebep olabilecek örülme bölgelerini ve karışıklık noktalarını elimine eden yeni bir sinyal denetim yaklaşımı üzerinde çalışmışlardır. Çalışma kapsamında, yeşil süreler ve devre süresi, sirkülasyon şeridindeki kuyruk uzunlukları göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Analizler sonucunda, hedeflenen yeni yaklaşım ile kavşak kapasitesinin ortalama %72,1 artırılabilirliği belirlenmiştir [10]. Maher, karmaşık optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirilen cross-entropy metodunu kullanarak, sinyalize dönel kavşaklarda sinyal süresi optimizasyonu için yeni bir yöntem geliştirmiştir. Sonuç olarak, cross-entropy metodunun sinyalize dönel kavşaklarda sinyal süresi optimizasyonu için kullanılabilir (uygulanabilir) olduğu görülmüştür [11]. Mc Donald, yapmış olduğu çalışmada, sinyalize dönel kavşaklarda en uygun sinyal sürelerinin belirlenmesinde dikkate alınması gereken faktörleri detaylı bir şekilde incelemiştir [12]. Bai ve diğ., nümerik hesaplama ve deneysel trafik mühendisliği metotları üzerine yoğunlaşarak, farklı merkez ada yarıçapı ve devre sürelerinin, sinyalize dönel kavşağın performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır [13]. Ma ve diğ., sinyalize dönel kavşaklardaki şerit işaretlemelerini göz önünde bulundurarak, yeni bir sinyal süre optimizasyonu modeli geliştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışma kapsamında, kavşak kapasitesinin maksimizasyonu, gecikme ve devre süresinin ise minimizasyonu hedeflenmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlar ile geliştirilen modelin etkinliği kanıtlanmıştır [14]. Gokce ve diğ., sinyalize dönel kavşaklarda sinyal süresi optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Çalışma kapsamında, sinyalize dönel kavşağın sinyal sürelerini optimize etmek için Parçacık Sürü Optimizasyonu algoritması kullanılmıştır. Sonuç olarak, hedeflenen yaklaşım ile ortalama gecikmelerin yaklaşık %56 oranında azaltılabildiği görülmüştür [15]. Çakıcı ve Murat, sinyalize dönel kavşaklarda sinyal süresi hesabı için yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Çalışma kapsamında, farklı tip kavşaklar göz önünde bulundurularak, birbirinden farklı trafik hacim senaryoları için karşılaştırmalı kavşak performans analizleri yapılmıştır [16]. Murat ve diğ., sinyalize dönel kavşaklar için geliştirdikleri sinyal süresi hesabı yaklaşımını farklı trafik senaryoları altında test etmişlerdir. Analizler sonucunda, geliştirilen yaklaşım ile kavşaktaki ortalama taşıt gecikmelerinin önemli oranda azaltılabileceği belirlenmiştir [17]. Jiang ve diğ., yapmış oldukları çalışmada, sinyalize dönel kavşağın kapasitesini maksimize eden en uygun devre süresini belirlemeyi amaçlamışlardır. Sonuç olarak, çalışma kapsamında geliştirilen model ile kavşak kapasitesinin önemli oranda artırılabilirliği görülmüştür [18].

Daha önce yapılan çalışmalardan da görüldüğü üzere, sinyalizasyon dönel kavşaklarda en uygun sinyal sürelerinin belirlenmesi ile kavşak kapasitesi artırılabilir ve kavşakta meydana gelen zaman kayıpları azaltılabilir. Bu çalışmada da, sinyalizasyon dönel kavşakların performanslarının artırılması ve hizmet düzeylerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, trafik akımlarının şerit bazlı değerlendirildiği Akçelik gecikme modeli [19] kullanılarak, en güçlü meta-sezgisel algoritmalarından birisi olan Diferansiyel Gelişim Algoritması [20, 21] ile optimum sinyal süreleri belirlenmiş ve kavşaktaki ortalama taşıt gecikmeleri minimize edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca, oluşturulan optimizasyon modelinin geçerliliği, 4 farklı zaman diliminde Denizli Kelleci Kardeşler Kavşağı'ndan toplanan detaylı trafik verileri (gecikmeler, trafik hacimleri, trafik kompozisyonları vb.) kullanılarak VISSIM simülasyon programında [22] test edilmiştir.

Bu çalışma 5 bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde, Denizli Kelleci Kardeşler Kavşağı ile ilgili genel bilgiler (yaklaşım kollarındaki ve yuvarlak ada etrafındaki şerit genişlikleri - sayıları, kavşak geometrisi, akım bazlı devre diyagramı ve kavşaktaki sinyal süreleri) verilmiş ve söz konusu kavşakta, 4 farklı zaman diliminde elde edilen trafik verileri kapsamlı olarak sunulmuştur. Üçüncü bölümde, Akçelik gecikme modeli ve sinyalizasyon dönel kavşaklar için oluşturulan sinyal süresi optimizasyonu modeli detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, çalışma kapsamında yapılan analizlere yer verilmiş ve analiz sonuçları tablolar ve grafikler kullanılarak özetlenmiştir. Son bölümde ise analiz sonuçlarından elde edilen bulgular değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.

2. Çalışma Alanı

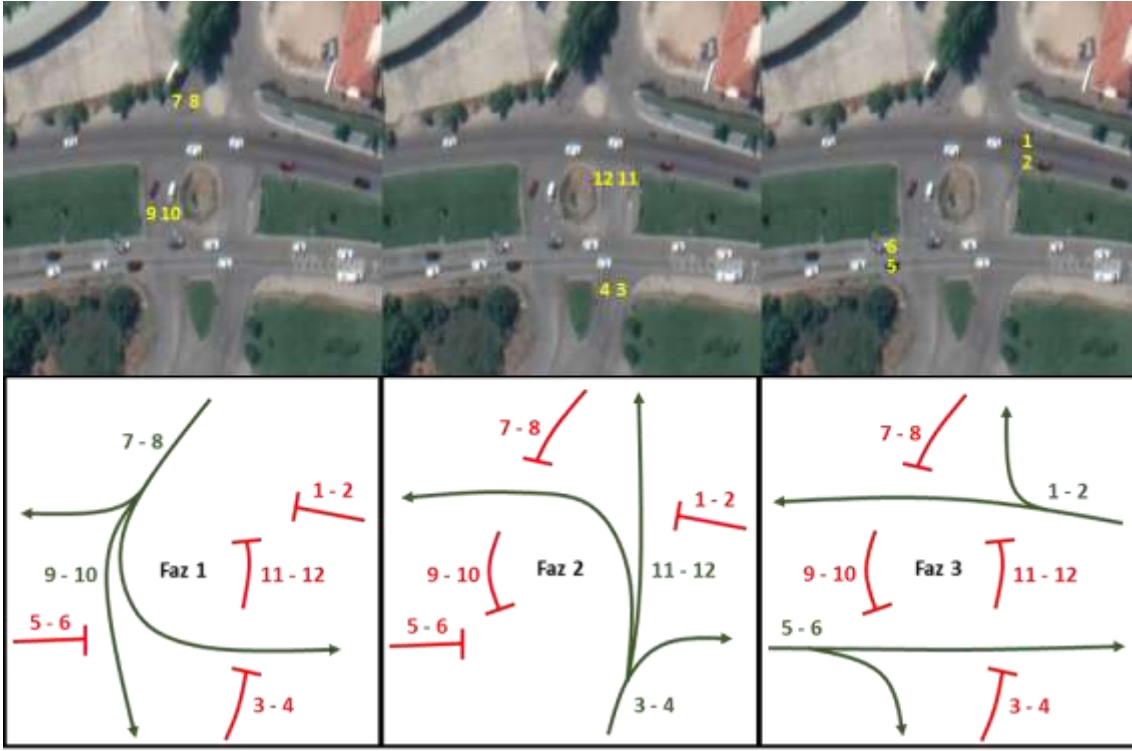
Denizli – Antalya karayolu üzerinde bulunan Kelleci Kardeşler Kavşağı, dört farklı yaklaşım kolundan oluşan ve yaklaşık 14,00 m. ada çapına sahip olan bir sinyalizasyon dönel kavşaktır. Kavşak yaklaşım kollarının her birinde iki adet kavşağa giriş ve iki adet kavşaktan çıkış şeridi olmak üzere toplam dört şerit bulunmaktadır. Yaklaşım kollarındaki tüm şeritlerin genişlikleri yaklaşık 3,50 m. olarak ölçülmüştür. Ayrıca, ada etrafındaki sirkülasyon şerit sayısı iki olup bu şeritlerin genişlikleri de yaklaşık 4,00 m.'dir. Kelleci Kardeşler Kavşağı'na ait iki ve üç boyutlu görüntüler Şekil 1' de gösterilmektedir [23].



Şekil 1. Kelleci Kardeşler Kavşağı – Denizli [23]

Kelleci Kardeşler Kavşağı'ndaki trafik akımları sabit zamanlı sinyal denetim sistemi ile yönetilmektedir ve kavşakta üç fazlı denetim tekniği uygulanmaktadır. Kavşağa ait mevcut faz planı Şekil 2' de detaylı olarak sunulmuştur.

Şekil 2' den görüldüğü üzere, Faz 1' de 7-8-9-10 numaralı akımlara, Faz 2' de 3-4-11-12 numaralı akımlara ve Faz 3' de de 1-2-5-6 numaralı akımlara geçiş hakkı verilmiştir.



Şekil 2. Kelleci Kardeşler Kavşağı mevcut faz planı

Ayrıca, Faz 3’ de kavşaktaki trafik güvenliği ön planda tutulmuş ve 1-2-5-6 nolu akımlar için sola dönüş hareketlerine izin verilmemiştir. Bu durumda, 1 ve 2 numaralı akımlardan sola dönüş hareketi yapacak olan taşıtların kavşağı terk edebilmesi için Faz 1’ i, 5 ve 6 numaralı akımlardan sola dönüş hareketi yapacak olan taşıtların kavşağı terk edebilmesi için ise Faz 2’ yi beklemeleri gerektiği söylenebilir. Kavşaktaki mevcut faz planının belirlenmesinin ardından, kavşağa ait akım bazlı devre diyagramı oluşturulmuştur. Şekil 3’ de, Kelleci Kardeşler Kavşağı’na ait akım bazlı devre diyagramı gösterilmektedir.

Akım No	Devre Diyagramı		
1 - 2			Faz 3
3 - 4		Faz 2	
5 - 6			Faz 3
7 - 8	Faz 1		
9 - 10	Faz 1		
11 - 12		Faz 2	

Şekil 3. Kelleci Kardeşler Kavşağı akım bazlı devre diyagramı

Bir sonraki aşamada, kavşaktan alınan kamera kayıtlarından yararlanılarak her bir faza ait sinyal süreleri tespit edilmiştir. Kronometre kullanılarak tespit edilen sinyal süreleri Tablo 1’ de detaylı olarak sunulmaktadır.

Tablo 1. Kelleci Kardeşler Kavşağı mevcut sinyal süreleri

Faz	Yeşil Süre (sn)	Sarı Süre (sn)	Kırmızı Süre (sn)	Devre Süresi (sn)
Faz 1 (Akım: 7-8-9-10)	22+2=24	1+2=3	3+3+4+103=113	
Faz 2 (Akım: 3-4-11-12)	20+2=22	1+2=3	3+3+4+105=115	140
Faz 3 (Akım: 1-2-5-6)	73+2=75	1+2=3	3+3+4+52=62	

Çalışmanın bu bölümünde, Denizli Büyükşehir Belediyesi Ulaşım Dairesi Başkanlığı'ndan temin edilen kamera kayıtlarından yararlanılmıştır. Öncelikli olarak, 4 farklı zaman periyodu için (07:30-08:30 / 11:00-12:00 / 13:00-14:00 / 17:30-18:30) 1' er saatlik görüntüleri içeren video-kamera kayıtları ofis ortamında analiz edilmiştir. Gözlem çalışmaları sonucunda elde edilen yaklaşım kolu bazlı trafik hacimleri Tablo 2' de detaylı olarak verilmektedir.

Tablo 2. Kelleci Kardeşler Kavşağı yaklaşım kolu bazlı trafik hacimleri

Zaman Periyodu	Hacimler (ta/sa)					Yaklaşım Hacim (ta/sa)	Toplam Trafik Hacmi (ta/sa)
	(Normal Taşıt/Ağır Taşıt/Toplam Taşıt)						
	Yaklaşım Kolu (B-V)	Denizli	Antalya	Baraj	Kelleci Kardeşler		
07:30 – 08:30	Denizli	***	427/59/486	36/6/42	3/0/3	531	1069
	Antalya	300/53/353	***	5/0/5	1/0/1	359	
	Baraj	23/2/25	31/3/34	***	39/7/46	105	
	Kelleci Kardeşler	21/1/22	6/0/6	42/4/46	***	74	
11:00 – 12:00	Denizli	***	383/63/446	47/3/50	5/0/5	501	1027
	Antalya	359/74/433	***	2/0/2	1/0/1	436	
	Baraj	5/4/9	18/4/22	***	32/0/32	63	
	Kelleci Kardeşler	16/3/19	0/0/0	8/0/8	***	27	
13:00 – 14:00	Denizli	***	359/67/426	63/4/67	6/0/6	499	1033
	Antalya	370/61/431	***	1/0/1	0/2/2	434	
	Baraj	5/5/10	13/1/14	***	31/2/33	57	
	Kelleci Kardeşler	8/0/8	16/0/16	16/3/19	***	43	
17:30 – 18:30	Denizli	***	369/45/414	76/10/86	4/0/4	504	1180
	Antalya	410/97/507	***	5/2/7	8/1/9	523	
	Baraj	18/6/24	28/1/29	***	44/7/51	104	
	Kelleci Kardeşler	15/1/16	14/0/14	17/2/19	***	49	

Tablo 2' de verilen saatlik trafik hacimlerinden Denizli ve Antalya yaklaşım kollarının ana akımları, Baraj ve Kelleci Kardeşler yaklaşım kollarının ise yan akımları oluşturduğu söylenebilir. Yaklaşım kolu bazlı trafik hacimlerinin belirlenmesinin ardından, daha önceki çalışmalarda [24, 25] belirtilen gecikme ölçüm yöntemi göz önünde bulundurularak her bir taşıtın (bu çalışma kapsamında toplam 4309 taşıt) kavşakta kaybettiği zaman ayrı ayrı belirlenmiştir. 4 farklı zaman periyodu için,

ölçümler sonucunda elde edilen yaklaşım kolu ve kavşak bazlı ortalama gecikme değerleri Tablo 3’ de sunulmaktadır.

Tablo 3. Kelleci Kardeşler Kavşağı yaklaşım kolu ve kavşak bazlı ortalama gecikmeler

Zaman Periyodu 07:30 – 08:30	Yaklaşım Kolu	Yaklaşım Kolu Ortalama Gecikme (sn/ta)	Kavşak Ortalama Gecikme (sn/ta)	Zaman Periyodu 13:00 – 14:00	Yaklaşım Kolu	Yaklaşım Kolu Ortalama Gecikme (sn/ta)	Kavşak Ortalama Gecikme (sn/ta)
	Denizli	15,38	23,50		Denizli	17,94	23,08
Antalya	21,59	Antalya		21,65			
Baraj	54,35	Baraj		61,65			
Kelleci Kardeşler	47,27	Kelleci Kardeşler		46,12			
Zaman Periyodu 11:00 – 12:00	Yaklaşım Kolu	Yaklaşım Kolu Ortalama Gecikme (sn/ta)	Kavşak Ortalama Gecikme (sn/ta)	Zaman Periyodu 17:30 – 18:30	Yaklaşım Kolu	Yaklaşım Kolu Ortalama Gecikme (sn/ta)	Kavşak Ortalama Gecikme (sn/ta)
	Denizli	17,24	23,90		Denizli	23,25	26,69
Antalya	25,17	Antalya		21,68			
Baraj	59,91	Baraj		58,86			
Kelleci Kardeşler	42,96	Kelleci Kardeşler		47,37			

Tablo 3 dikkatle incelendiğinde, Denizli ve Antalya yaklaşımlarındaki (ana akımlardaki) ortalama gecikmelerin Baraj ve Kelleci Kardeşler yaklaşımlarındaki (yan akımlardaki) ortalama gecikmelerden daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca, 17:30 – 18:30 zaman periyodundaki hacim artışının gecikmeye olan olumsuz etkisi de belirgin bir şekilde karşımıza çıkmaktadır.

3. Sinyalize Dönel Kavşaklar için Sinyal Süresi Optimizasyonu Modeli

Sinyalize dönel kavşaklar için önerilen sinyal süresi optimizasyon modeli MATLAB [26] ortamında geliştirilmiştir. Programda, trafik akımlarının gecikme hesabı için Akçelik gecikme modeli, sinyal sürelerinin optimum değerlerini belirlemek için ise Diferansiyel Gelişim Algoritması kullanılmıştır.

3.1. Akçelik Gecikme Modeli

Sağlam matematiksel temellere dayalı bir altyapıya sahip olan sinyal denetim stratejileri, sinyalize kavşaklarda meydana gelen gecikmelerin minimize edilmesinde oldukça önemli bir yer tutmaktadır. Bu yüzden, yaklaşık 60 yıldır, gecikmenin matematiksel modellenmesi ile ilgili çalışmalara ağırlık verilmiştir [27]. Webster, HCM ve Akçelik gecikme modelleri en çok kullanılan ve en fazla bilinen modellerdir. Bu matematiksel modeller kullanılarak, sinyalize bir kavşak için, gecikmeleri minimize eden en uygun sinyal süreleri belirlenebilir. Webster ve HCM gecikme modelleri faza dayalı, Akçelik gecikme modeli ise harekete (akıma) dayalı sinyal tasarımını amaçlamaktadır. Bu çalışmada, kavşak yaklaşım kollarındaki trafik, akım bazlı olarak ele alındığı için sinyal süresi optimizasyonu problemi Akçelik gecikme bağıntısı kullanılarak çözülmüştür [19]. Akçelik gecikme bağıntısı’nda, bir akım için toplam gecikmenin değeri Eşitlik 1 ile hesaplanabilmektedir:

$$D = \frac{qC \times (1-u)^2}{2 \times (1-y)} + N_o x \quad (1)$$

Eşitlik 1' de; D : saniye biriminden toplam gecikme, q : saniye başına taşıt biriminden akım, C : saniye biriminden devre süresi, qC : devre başına taşıt biriminden ortalama geliş sayısı, u : yeşil süre oranı ($u=g/c$; g : saniye biriminden etkin yeşil süre), y : akım oranı ($y=q/s$; s : saatlik taşıt biriminden doygun akım), N_0 : taşıt biriminden ortalama taşan kuyruk, x : doygunluk derecesi ($x=q/Q$; Q : saniye başına taşıt biriminden kapasite)' dir.

Akçelik gecikme modelinde, doygun altı ($x < 1$) ve doygun üstü ($x \geq 1$) durumlardaki ortalama taşan kuyrukların tahmini ise Eşitlik 2 kullanılarak yapılabilmektedir:

$$N_0 = \begin{cases} \frac{QT_f}{4} \left(z + \sqrt{z^2 + \frac{12(x-x_0)}{QT_f}} \right), & x \geq x_0 \\ 0, & x < x_0 \end{cases} ; \left(x_0 = 0.67 + \frac{sg}{600} \right) \quad (2)$$

Eşitlik 2' de; T_f : akım periyodu, QT_f : T_f periyodu boyunca deşarj olabilen maksimum taşıt sayısı, z : $x-1$ (Eğer $x < 1$ ise z negatiftir), x_0 : N_0 ' nun yaklaşık olarak 0 olması altındaki doygunluk derecesi, sg : devre başına taşıt biriminden kapasite' dir.

Modelde, kavşaktaki ortalama taşıt gecikmesi de Eşitlik 3 yardımı ile hesaplanabilmektedir:

$$d = D/q \quad (3)$$

Eşitlik 3' de; d : saniye başına taşıt biriminden ortalama taşıt gecikmesi' dir.

3.2. Sinyal Süresi Optimizasyonu Modeli

Akçelik gecikme modeli detaylı olarak incelendiğinde, sinyalizasyon bir kavşaktaki gecikmelerin, trafik ile ilgili parametreler (akım, akım oranı ve akım periyodu) dışında yeşil süreye ve devre süresine bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Bu durumda, en uygun devre süresi ve yeşil süre seçiminin, kavşaktaki sinyalizasyon sistemi kaynaklı gecikmeleri minimize etmek için oldukça önemli olduğu söylenebilir. Daha önce de belirtildiği üzere, Akçelik gecikme modeli akım bazlı sinyal tasarımını amaçladığı için, çalışmanın bu bölümünde, öncelikli olarak, kavşak yaklaşımlarındaki ve yuvarlak ada etrafındaki sirkülasyon şeritlerindeki her bir trafik akımı ayrı ayrı numaralandırılmıştır. Şekil 4'de, Kelleci Kardeşler Kavşağı'ndaki akımların numaralandırılması ile ilgili detaylar verilmektedir.



Şekil 4. Kelleci Kardeşler Kavşağı akım numaraları

Şekil 4 dikkatle incelendiğinde, Kelleci Kardeşler ve Baraj yaklaşım kolu tarafındaki sirkülasyon şeritlerinde herhangi bir numaralandırma yapılmadığı görülmektedir. Kavşaktaki mevcut faz planı (Şekil 2) göz önünde bulundurulduğunda, belirtilen şeritlerde herhangi bir depolama yapılmadığı için bu şeritlerin numaralandırılmasına gerek duyulmamıştır. Fakat Denizli ve Antalya yaklaşım kollarından gelip sola dönüş hareketi yapacak olan taşıtlar, ada etrafında depolamaya maruz kalacağı için bu yaklaşım kolları tarafındaki sirkülasyon şeritleri numaralandırılmıştır. Bu şekilde bir yaklaşım ile, depolamanın yapıldığı sirkülasyon şeritlerinde meydana gelen gecikmeler, kavşak yaklaşım kollarındaki gecikmelere dahil edilerek sinyalize dönel kavşaktaki toplam gecikmenin hesabı daha sistematik ve kolay bir hale getirilmiştir. Akım numaralandırma işlemlerinin tamamlanmasının ardından, sinyalize dönel kavşağın sinyal süresi problemi için bir optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Bilindiği üzere, bir optimizasyon modeli amaç fonksiyonu, karar değişkenleri ve kısıtlar setinden oluşmaktadır [28]. Çalışma kapsamında oluşturulan modele ait amaç fonksiyonu, karar değişkenleri ve kısıtlar seti Tablo 4' de detaylı olarak sunulmaktadır.

Tablo 4. Modele ait amaç fonksiyonu, karar değişkenleri ve kısıtlar seti

Amaç Fonksiyonu:

$$f = \min \left(d = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{\sum_{i=1}^k q_i} \right)$$

n : Kavşakta gecikme hesabında dikkate alınan tüm akımlar ($n = 1, 2, 3, \dots, 12$)

k : Kavşak yaklaşım kollarından kavşağa giriş yapan akımlar ($k = 1, 2, 3, \dots, 8$)

Karar Değişkenleri:

g_1 : Faz 1' e ait yeşil süre - g_2 : Faz 2' ye ait yeşil süre - g_3 : Faz 3' e ait yeşil süre

Kısıtlar Seti:

• **Devre Süresi Kısıtı:**

$$40 \leq C \leq 150$$

• **Yeşil Süre Kısıtı:**

$$9 \leq g_1 \leq 75 - 9 \leq g_2 \leq 75 - 9 \leq g_3 \leq 75$$

• **Doygunluk Derecesi (q/Q) Kısıtı:**

1 numaralı akım;

$$0 \leq \frac{q_1 \times C}{s_1 \times g_3} \leq 1,2$$

2 numaralı akım;

$$0 \leq \frac{q_2 \times C}{s_2 \times g_3} \leq 1,2$$

3 numaralı akım;

$$0 \leq \frac{q_3 \times C}{s_3 \times g_2} \leq 1,2$$

4 numaralı akım;

$$0 \leq \frac{q_4 \times C}{s_4 \times g_2} \leq 1,2$$

5 numaralı akım;

$$0 \leq \frac{q_5 \times C}{s_5 \times g_3} \leq 1,2$$

6 numaralı akım;

$$0 \leq \frac{q_6 \times C}{s_6 \times g_3} \leq 1,2$$

7 numaralı akım;

$$0 \leq \frac{q_7 \times C}{s_7 \times g_1} \leq 1,2$$

8 numaralı akım;

$$0 \leq \frac{q_8 \times C}{s_8 \times g_1} \leq 1,2$$

9 numaralı akım;

$$0 \leq \frac{\left(\frac{q_{1,sol} + q_{2,sol}}{2} \right) \times C}{s_9 \times g_1} \leq 1,2$$

10 numaralı akım;

$$0 \leq \frac{\left(\frac{q_{1,sol} + q_{2,sol}}{2} \right) \times C}{s_{10} \times g_1} \leq 1,2$$

11 numaralı akım;

$$0 \leq \frac{\left(\frac{q_{5,sol} + q_{6,sol}}{2} \right) \times C}{s_{11} \times g_2} \leq 1,2$$

12 numaralı akım;

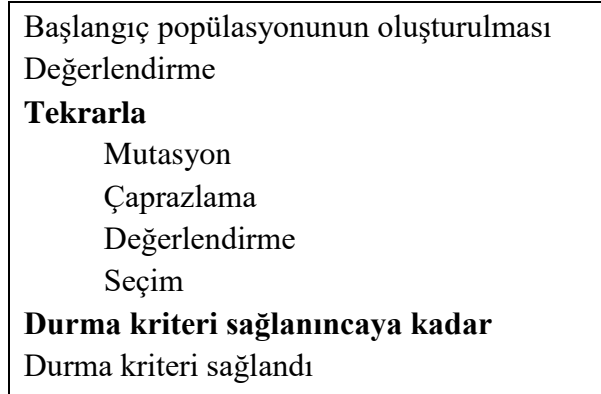
$$0 \leq \frac{\left(\frac{q_{5,sol} + q_{6,sol}}{2} \right) \times C}{s_{12} \times g_2} \leq 1,2$$

Tablo 4’ den görüldüğü üzere, Kelleci Kardeşler Kavşağının sinyal süresi optimizasyonu için oluşturulan modelde fazlara ait sinyal süreleri karar değişkenleri olarak göz önünde bulundurulmuştur. Bununla birlikte, model, 1’ i devre süresi, 3’ ü yeşil süre, 12’ si de her bir akım için doygunluk derecesi kısıtı olmak üzere toplam 16 adet kısıttan oluşmaktadır.

Sinyalize kavşaklardaki sinyal sürelerinin optimizasyonu ile ilgili çalışmaların birçoğunda, minimum yeşil süre, genel olarak, 5 sn. ile 7 sn. arasında bir değer alınmıştır [29-31]. Bu çalışmada, sinyalize dönel kavşaktaki bazı akımlar için, aynı fazda, hem yaklaşım kollarında hem de ada etrafında bulunan sinyal denetim sistemine göre hareket etme zorunluluğu olduğu görülmüştür. Bu nedenle, belirtilen akımların hareketlerinin sürekliliğinin ve düzenliliğinin sağlanması (sık “dur-kalk” ların önlenmesi) amacıyla sinyalize dönel kavşak için minimum yeşil süreler 9 sn. olarak belirlenmiştir. Maksimum yeşil süreler için ise Kelleci Kardeşler Kavşağı’ndaki mevcut yeşil sürelerin en büyüğü olan 75 sn. değeri kullanılmıştır.

Tablo 4’ de, doygunluk derecesi ile ilgili kısıtlar dikkatle incelendiğinde, kavşak yaklaşım kollarındaki akım hesapları ile sirkülasyon şeritlerindeki akım hesaplarının farklı olduğu görülmektedir. 9-10 ve 11-12 numaralı akımlar, sırasıyla Denizli (1-2 numaralı akım) ve Antalya (5-6 numaralı) yaklaşım kollarından gelip sola dönüş hareketi yapan akımlardan oluşmaktadır. Faz 3’ deki depolama, her iki yönde de iki şeritte (akımda) gerçekleştirildiği için, her bir şeride ait (akım) değeri, sola dönüş hareketi yapan toplam akım değeri 2’ ye bölünerek hesaplanmaktadır. Oluşturulan optimizasyon modelinde, her bir akım için doygunluk dereceleri ise minimum 0, maksimum 1,2 olacak şekilde sınırlandırılmıştır.

Modelin oluşturulmasının ardından, optimizasyon işlemi için kullanılacak olan algoritmanın seçimi üzerinde çalışılmıştır. Araştırmalar sonucunda, farklı avantajları (Basit, hızlı, kolayca kodlanabilir-kullanılabilir-değiştirilebilir vb.) nedeniyle birçok mühendislik probleminin çözümünde, Diferansiyel Gelişim Algoritması’ nın tercih edildiği ve bu algoritma ile oldukça başarılı sonuçlar elde edilebildiği görülmüştür [32-34]. Diferansiyel Gelişim Algoritması, işleyiş ve operatörleri itibarıyla Genetik Algoritma’ ya benzeyen stokastik araştırmalara dayalı evrim tabanlı bir algoritmadır [35]. Algoritmanın temel adımları Şekil 5’ de detaylı olarak gösterilmektedir [36].



Şekil 5. Diferansiyel gelişim algoritması temel adımları

Şekil 5’den görüldüğü üzere, Diferansiyel Gelişim Algoritması’ nda probleme ait en iyi (yaklaşık optimum) çözüme tekrarlı işlemler sonucunda ulaşılabilir. Bu aşamada, popülasyondaki her bir birey, popülasyondan rastgele seçilen 3 farklı bireyden mutasyon ve çaprazlama işlemleri sonucunda oluşan yeni birey ile karşılaştırılmaktadır. Daha sonra, her iki bireyin uygunluğu değerlendirilmekte ve uygunluğu daha iyi olan birey seçim operatörü kullanılarak bir sonraki jenerasyona aktarılmaktadır [37].

Diferansiyel Gelişim Algoritması' nda kullanıcı tarafından belirlenmesi gereken 4 farklı kontrol parametresi bulunmaktadır. Bu parametreler; Popülasyon boyutu (p), Mutasyon – Ölçekleme faktörü (F), Çaprazlama oranı (CR) ve Maksimum iterasyon sayısı (G_{maks})'dır. Bu çalışmada, literatürde daha önce yapılan çalışmalar da göz önünde bulundurularak [38, 39], belirtilen parametreler için seçilen değerler Tablo 5' de verilmektedir.

Tablo 5. Diferansiyel gelişim algoritmasındaki parametreler için seçilen değerler

Popülasyon boyutu (p)	Mutasyon faktörü (F)	Çaprazlama oranı (CR)	Mak. iterasyon sayısı (G_{maks})
50	0,8	0,8	1000

Son olarak, algoritmaya ait kontrol parametrelerinin de belirlenmesinin ardından, Diferansiyel Gelişim Algoritması kullanılarak MATLAB' da sinyalize dönel kavşak için sinyal süresi optimizasyonu programı hazırlanmıştır.

4. Analizler

Bu bölümde, öncelikli olarak, çalışma kapsamında kullanılan Akçelik gecikme modelinin başarımının test edilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, dört farklı zaman periyodunda, Kelleci Kardeşler Kavşağı'ndan ölçülen ortalama gecikmeler (Tablo 3), Akçelik gecikme modeli kullanılarak elde edilen ortalama gecikmeler ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Tablo 6' da detaylı olarak sunulmaktadır.

Tablo 6. Araziden ölçülen ve Akçelik gecikme modeli kullanılarak elde edilen ortalama gecikmeler

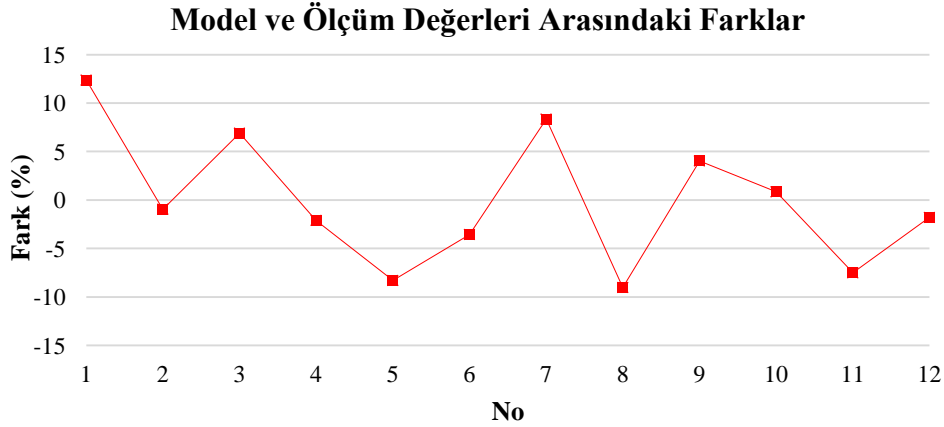
Zaman Periyodu	No	Kesim	Ortalama Gecikme (sn/ta)		Fark (%)
			Arazi Ölçümü	Akçelik Gecikme Modeli	
07:30 – 08:30	1	Anayol (Denizli-Antalya)	17,88	20,09	12,36
	2	Yan yol (Kelleci Kardeşler - Baraj)	51,42	50,93	-0,95
	3	Ortalama (Kavşak)	23,50	25,12	6,89
11:00 – 12:00	4	Anayol (Denizli-Antalya)	20,93	20,49	-2,10
	5	Yan yol (Kelleci Kardeşler - Baraj)	54,82	50,27	-8,30
	6	Ortalama (Kavşak)	23,90	23,05	-3,56
13:00 – 14:00	7	Anayol (Denizli-Antalya)	19,67	21,31	8,34
	8	Yan yol (Kelleci Kardeşler - Baraj)	54,97	50,01	-9,02
	9	Ortalama (Kavşak)	23,08	24,01	4,03
17:30 – 18:30	10	Anayol (Denizli-Antalya)	22,45	22,64	0,85
	11	Yan yol (Kelleci Kardeşler - Baraj)	55,18	51,04	-7,50
	12	Ortalama (Kavşak)	26,69	26,21	-1,80

Akçelik Gecikme Modeli kullanılarak yapılan hesaplamalarda;

- 1 ağır taşıt = 2 birim otomobil olarak kabul edilmiştir.

Baraj yaklaşım kolundaki şeritler hariç tüm şeritlerin doymun akım değeri 1800 bo/sa/şe olarak göz önünde bulundurulmuştur. Baraj yaklaşım kolu yaklaşık % 7-8' lik çıkış (rampa) eğimine sahip olduğundan, 3 ve 4 numaralı şeritler için doymun akım değeri 1400 bo/sa/şe olarak seçilmiştir.

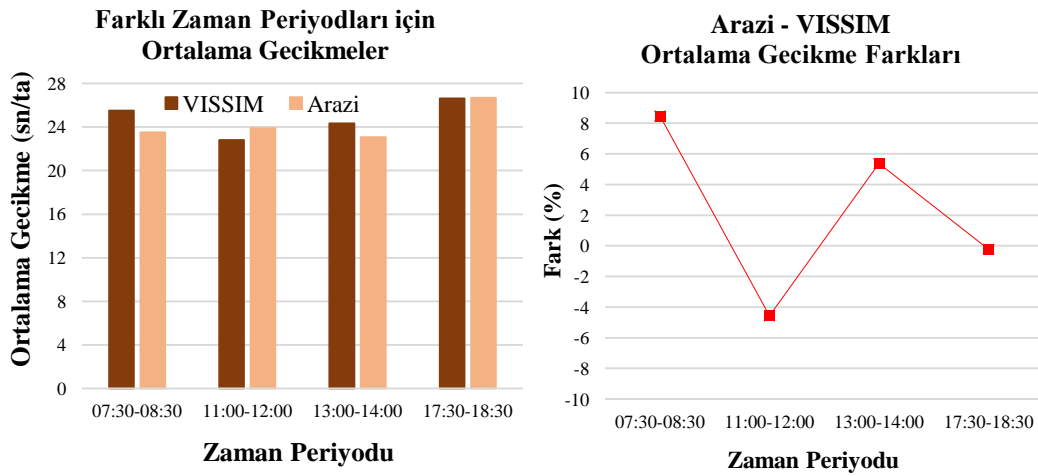
Tablo 6' dan, Akçelik gecikme modeli elde edilen ortalama gecikmelerin, araziden ölçülen ortalama gecikmelere oldukça yakın olduğu görülebilmektedir. Model ve ölçüm değerleri arasındaki farklar (%) Şekil 6' da grafiksel olarak gösterilmektedir.



Şekil 6. Akçelik gecikme modeli – arazi ölçümleri arasındaki oransal farklar

Şekil 6 dikkatle incelendiğinde, model ile elde edilen ortalama gecikmeler ile ölçümler sonucunda elde edilen ortalama gecikmeler arasındaki farkların genel olarak %10' dan daha az olduğu görülmektedir. Bu durumda, Akçelik gecikme modelinin, kavşaklardaki gecikme ölçümlerinde ve gecikme tahminlerinde oldukça başarılı ve güvenilir sonuçlar sağladığı söylenebilir.

Çalışmanın bir sonraki aşamasında, Kelleci Kardeşler Kavşağı VISSIM simülasyon programında modellenmiş ve kavşağa ait trafik verileri (Tablo 2) ile sinyal denetim bilgileri (Şekil 2, Şekil 3, Tablo 1) programa aktarılmıştır.



Şekil 7. Mevcut ortalama gecikmeler - VISSIM' den elde edilen ortalama gecikmeler ve oransal farklar

Kavşak yaklaşımlarındaki çakışma noktaları, azaltılmış hız alanları, normal ve ağır taşıtların bölgesel hızları ve sürücü davranışları (şerit değiştirme, takip aralıkları, güvenlik faktörü) ile ilgili yapılan düzenlemeler sonucunda, Kelleci Kardeşler Kavşağı, 4 farklı zaman periyodu için VISSIM’ de analiz edilmiştir. Kavşaktaki mevcut ortalama gecikmeler ile VISSIM’ den elde edilen ortalama gecikmeler ve bu ortalama gecikmeler arasındaki farklar (%) Şekil 7’ de detaylı olarak gösterilmektedir.

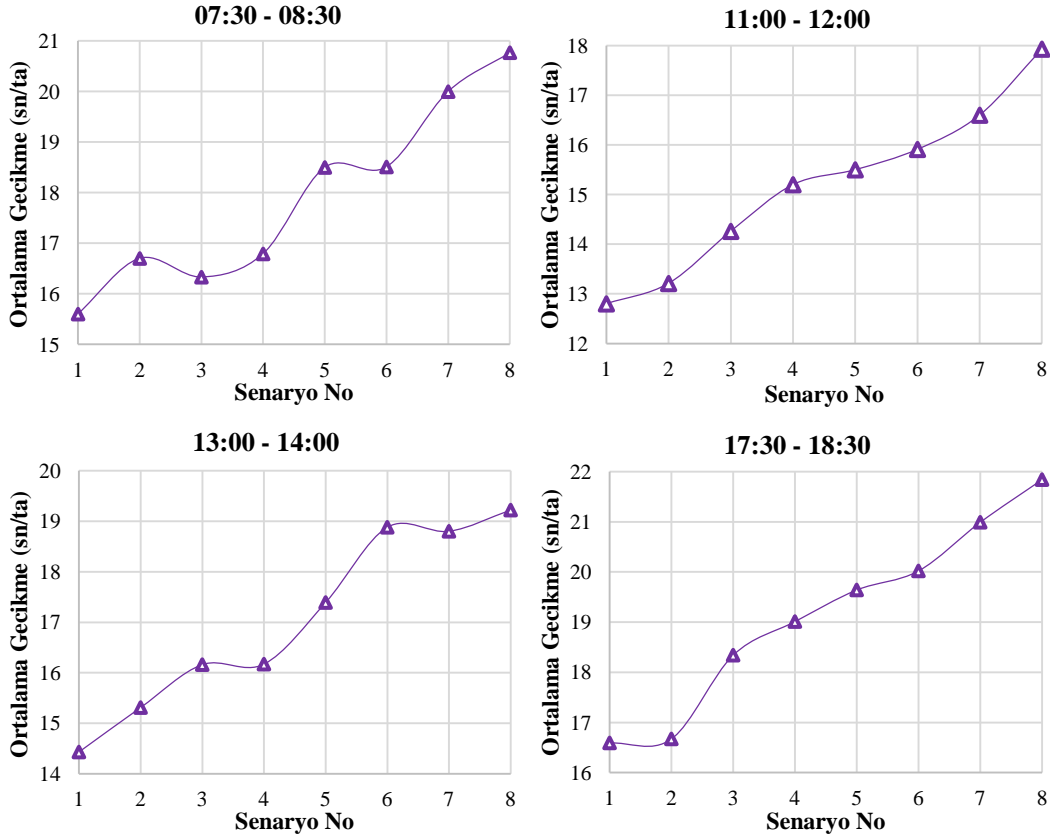
Şekil 7’den görüldüğü üzere, VISSIM den elde edilen ortalama gecikmeler ile Arazi ölçümleri sonucu elde edilen ortalama gecikmeler arasındaki farklar %10’ un altındadır. Bu durum, Kelleci Kardeşler Kavşağı’nın mevcut durumunun VISSIM simülasyon programına başarılı bir şekilde aktarılabilmesinin önemli bir göstergesidir.

Tablo 7. Dört farklı zaman periyodu için elde edilen optimum sinyal süreleri ve ortalama gecikmeler

Zaman Periyodu	Senaryo No	Minimum Yeşil Süre (g_{min})	g_1 (sn)	g_2 (sn)	g_3 (sn)	C (sn)	Ortalama Gecikme (sn/ta)
07:30 – 08:30	1	9	9	9	43	80	15,05
	2	10	10	10	46	85	15,76
	3	11	11	11	48	89	16,48
	4	12	12	12	50	93	17,20
	5	13	13	13	53	98	17,92
	6	14	14	14	55	102	18,64
	7	15	15	15	58	107	19,36
	8	16	16	16	60	111	20,08
11:00 – 12:00	1	9	9	9	67	104	13,09
	2	10	10	10	71	110	13,73
	3	11	11	11	75	116	14,38
	4	12	12	12	75	118	15,03
	5	13	13	13	75	120	15,69
	6	14	14	14	75	122	16,37
	7	15	15	15	75	124	17,07
	8	16	16	16	75	126	17,78
13:00 – 14:00	1	9	9	9	59	96	14,01
	2	10	10	10	62	101	14,69
	3	11	11	11	65	106	15,37
	4	12	12	12	68	111	16,05
	5	13	13	13	71	116	16,73
	6	14	14	14	75	122	17,42
	7	15	15	15	75	124	18,11
	8	16	16	16	75	126	18,81
17:30 – 18:30	1	9	9	9	46	83	15,66
	2	10	10	10	48	87	16,41
	3	11	11	11	51	92	17,16
	4	12	12	12	53	96	17,91
	5	13	13	13	56	101	18,66
	6	14	14	14	58	105	19,42
	7	15	15	15	61	110	20,17
	8	16	16	16	64	115	20,92

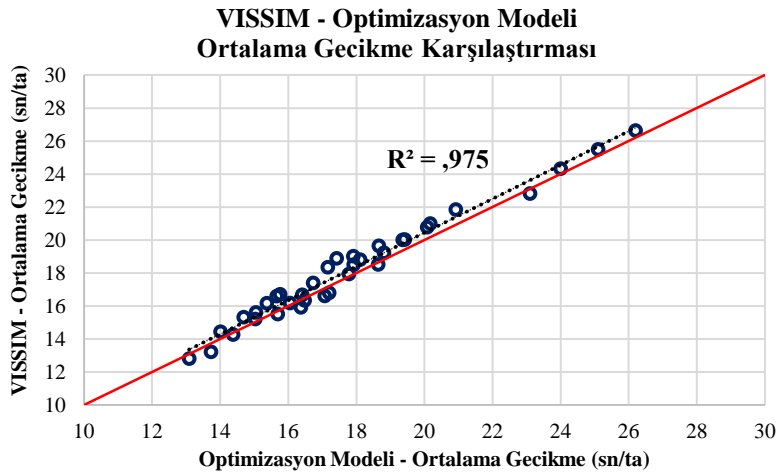
- Sarı, Kırmızı ve Ortak Kırmızı süreler (Kayıp Süreler), kavşaktaki mevcut süreler olarak göz önünde bulundurulmuştur ve 1 ağır taşıt = 2 birim otomobil olarak kabul edilmiştir.
- Şerit 3 ve Şerit 4 için doygun akım değerleri 1400 bo/sa/şe; diğer şeritler için ise doygun akım değerleri 1800 bo/sa/şerit olarak kabul edilmiştir.

Benzetim çalışmalarının ardından, 4 farklı zaman periyodu için, sinyal süresi optimizasyonu çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada, minimum yeşil süre değişiminin kavşak ortalama gecikmesi üzerindeki etkisini görebilmek amacıyla, minimum yeşil süreler 9 sn. ile 16 sn. arasında değiştirilerek 8 farklı senaryo oluşturulmuş ve her bir zaman periyodunda bu senaryolar için optimum sinyal süreleri elde edilmiştir. MATLAB’ da hazırlanan program ile elde edilen optimum sinyal süreleri ve ortalama gecikmeler Tablo 7’de sunulmaktadır.



Şekil 8. Minimum yeşil süre senaryoları için VISSIM’ den elde edilen ortalama gecikmeler

Optimum sinyal sürelerinin elde edilmesinin ardından, her bir zaman periyodu, tüm senaryolar göz önünde bulundurularak VISSIM’ de ayrı ayrı analiz edilmiştir. 4 farklı zaman periyodunda, her bir senaryo için VISSIM’ den elde edilen ortalama gecikmeler Şekil 8’ de grafiksel olarak gösterilmektedir.

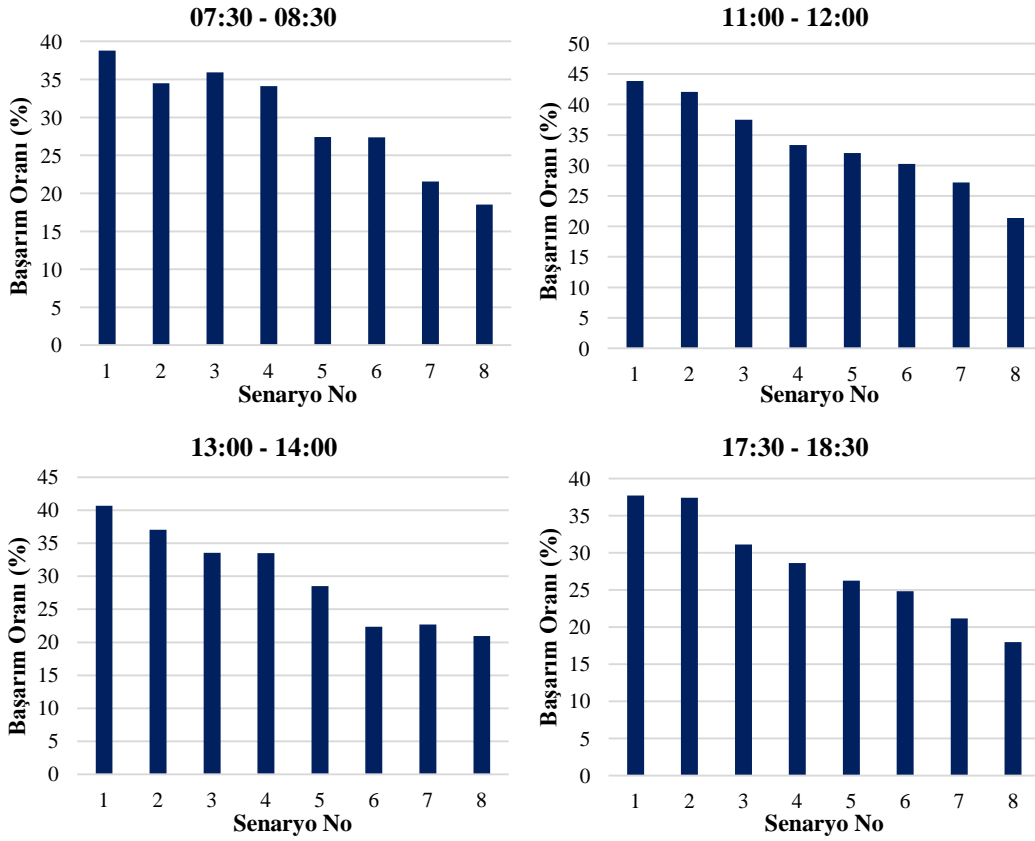


Şekil 9. VISSIM ve optimizasyon modeli ortalama gecikme karşılaştırması

Şekil 8’ den görüldüğü üzere, minimum yeşil sürenin değeri arttıkça, genel olarak, kavşaktaki ortalama gecikmeler de artmıştır. Bu durumda, Kelleci Kardeşler Kavşağı’nda, 1 ve 2 numaralı fazlar için 9 sn. yeşil süre kullanılarak ortalama gecikmelerin önemli oranlarda azaltılabileceği söylenebilir.

Çalışmanın bir sonraki aşamasında, optimizasyon modeli kullanılarak elde edilen ortalama gecikmeler ile VISSIM’ den elde edilen ortalama gecikmelerin birbirleriyle tutarlı olup olmadıklarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda, optimizasyon modeli ve VISSIM’ den elde edilen gecikme sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmıştır (Şekil 9). Yapılan değerlendirmeler sonucunda, VISSIM ve model sonuçlarının birbirleriyle yüksek düzeyde tutarlılık gösterdiği belirlenmiştir ($R^2 = 0,97$).

Bu bölümde, son olarak, her bir zaman periyodunda, tüm senaryolardaki optimum sinyal süreleri için VISSIM’ den elde edilen ortalama gecikmeler kavşaktaki mevcut durumdaki ortalama gecikmeler ile karşılaştırılmıştır. Sinyal süresi optimizasyonu sonucunda elde edilen senaryo bazlı başarımların oranları (%) Şekil 10’ da detaylı olarak sunulmaktadır.



Şekil 10. Sinyal süresi optimizasyonu sonucunda elde edilen senaryo bazlı başarımların oranları

Şekil 10’ dan, tüm zaman periyotlarında da, minimum yeşil sürenin değeri arttıkça, başarımların oranlarının genel olarak azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte, belirtilen zaman periyotları için başarımların oranlarının, modelde kullanılan minimum yeşil süre değerine bağlı olarak, yaklaşık %15-20 ile %40-45 arasında değiştiği söylenebilir.

Çalışma kapsamında yapılan analizler sonucunda elde edilen bulguları genel olarak şu şekilde özetlemek mümkündür:

- Oluşturulan optimizasyon modeli ile Kelleci Kardeşler Kavşağı'ndaki ortalama gecikmelerin, modelde kullanılan minimum yeşil süre değerine bağlı olarak, minimum %17,99; maksimum %43,88 ve ortalama da %30,32 oranında azaltılabileceği belirlenmiştir.
- Kelleci Kardeşler Kavşağı'nda en yüksek başarımlar minimum yeşil sürenin 9 sn. olması durumunda elde edilmiştir. Bu durumun sebebi, Kelleci Kardeşler ve Baraj yaklaşım kollarındaki saatlik trafik hacimlerinin oldukça düşük olmasıdır.
- Denizli ve Antalya yaklaşım kollarından sola dönüş hareketi yapacak olan taşıt sayıları ve kompozisyonları da dikkate alındığında, Faz 1 ve Faz 2 için 9 sn.' lik yeşil sürelerin yeterli olabileceği görülmüştür.
- Çevre dostu, ekonomik ve sürdürülebilir bir kavşak denetimi için, Kelleci Kardeşler Kavşağı'ndaki mevcut sinyal sürelerinin (fazlara ait yeşil süreler ve devre süresi) kavşak yaklaşımlarındaki mevcut trafik durumları göz önünde bulundurularak yeniden düzenlenmesi gerektiği söylenebilir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, şehir içi ve şehirlerarası yol ağlarında sıklıkla karşılaşılan sinyalizasyon dönel kavşakların performanslarının artırılabilmesi amacıyla, kavşaktaki trafik akımlarının şerit (akım) bazlı ele alındığı bir sinyal süresi optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Bu bağlamda, oluşturulan modelin etkinliği, Denizli' de bulunan Kelleci Kardeşler Kavşağı' ndan 4 farklı zaman diliminde toplanan gerçek trafik verileri (trafik hacimleri, taşıt kompozisyonları, sağa ve sola dönüş oranları, gecikmeler) kullanılarak VISSIM simülasyon programında test edilmiştir. Analizlerden elde edilen bulgular ışığında, oluşturulan optimizasyon tabanlı model ile sinyalizasyon dönel kavşaklardaki ortalama gecikmelerin önemli oranlarda (%45' e kadar) azaltılabileceği söylenebilmektedir. Çalışma kapsamında, optimizasyon tabanlı model ile sinyalizasyon dönel kavşakların daha etkin ve daha verimli bir şekilde yönetilebileceği açık bir şekilde görülmüştür. Ayrıca, söz konusu modelin, karayolu ağlarındaki sinyalizasyon dönel kavşaklarda uygulanması durumunda, seyahat sürelerinde, egzoz emisyonlarında, gürültü kirliliklerinde ve yakıt tüketimlerinde de yüksek oranlarda başarımlar sağlanılabileceği düşünülmektedir.

Daha önce de belirtildiği üzere, Kelleci Kardeşler Kavşağı 3 fazlı denetim tekniği ile yönetilmektedir. Bu yüzden, bu çalışma kapsamında, yalnızca 3 fazlı denetim tekniği için bir optimizasyon modeli oluşturulmuştur. Sonraki çalışmalarda, 2 veya 4 fazlı denetim tekniği ile yönetilen sinyalizasyon dönel kavşaklar için de yeni optimizasyon modellerinin oluşturulması ve bu modellerin, bu çalışmadakine benzer şekilde, mikrosimülasyon ortamında test edilmesi hedeflenmektedir.

Yazar(lar)ın Katkıları

ZÇ ve YŞM çalışmayı birlikte gerçekleştirdi ve makaleyi yazdı. Her iki yazar da makalenin son halini okudu ve onayladı.

Çıkar Çatışması

Yazarlar, çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

- [1]. Johnnie, B. E., Ahmed, A. and Iman, A., "Extent of Delay and Level of Service at Signalized Roundabout", International Journal of Engineering & Technology, 2012, 2 (3): 419-424.

- [2]. Ghanim, M., Kharbeche, M., Hannun, J., Hannun, J. and Shamiyeh, K., “Safety and Operational Performance of Signalized Roundabouts: A Case Study in Doha”, *Procedia Computer Science*, 2020, 170 (2020): 427-433
- [3]. Çakıcı, Z. “Sinyalize Kavşaklar için Optimizasyon Tabanlı Trafik Yönetim Modeli”, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [4]. Wong, C. K. and Wong, S. C., “Lane-based Optimization of Signal Timings for Isolated Junctions”, *Transportation Research Part B: Methodological*, 2003, 37: 63-84.
- [5]. Murat, Y. S. and Kikuchi, S., “The Fuzzy Optimization Approach: A Comparison with The Classical Optimization Approach using The Problem of Timing a Traffic Signal”, *Transportation Research Record*, 2007, 2024: 82-91.
- [6]. Liu, Q. and Xu, J., “Traffic Signal Timing Optimization for Isolated Intersections Based on Differential Evolution Bacteria Foraging Algorithm”, *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 2012, 43: 210-215.
- [7]. Akgüngör, A. P., Yılmaz Ö., Korkmaz, E. ve Doğan, E., “Meta-Sezgisel Yöntemlerle Sabit Zamanlı Sinyalize Kavşaklar için Optimum Devre Süresi Modeli”, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2019, 6 (2): 259-269.
- [8]. Qadri, S. S. S. M., Gokce, M. A. and Oner, E., “State-of-Art Review of Traffic Signal Control Methods: Challenges and Opportunities”, *European Transport Research Review*, 2020, 12: 1-23.
- [9]. Çakıcı, Z. “Sinyalize Dönel (Yuvarlakada) Kavşakların Tasarım Esaslarının Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.
- [10]. Yang, X., Li, X. and Xue, K., “A New Traffic Signal Control for Modern Roundabouts: Method and Application”, *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*, 2004, 5 (4): 282-287.
- [11]. Maher, M., “The Optimization of Signal Settings on a Signalized Roundabout using The Cross-Entropy Method”, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2008, 23 (2): 76-85.
- [12]. Mc. Donald, M., “Signal Controlled Roundabouts”, *Local Transport Note 1/09*, Norwich, 2009.
- [13]. Bai, Y., Chen, W. and Xue, K., “Association of Signal-Controlled Method at Roundabout and Delay”, 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, Changsha, 816-820, 2010.
- [14]. Ma, W., Liu, Y., Head, L. and Yang, X., “Integrated Optimization of Lane Markings and Timings for Signalized Roundabouts”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, 36: 307-323.
- [15]. Gokce, M. A., Oner, E. and Isik, G., “Traffic Signal Optimization with Particle Swarm Optimization for Signalized Roundabouts”, *Simulation: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International*, 2015, 91 (5): 456-466.
- [16]. Çakıcı, Z. ve Murat, Y. S., “Sinyalize Dönel Kavşaklar için Hesap Yöntemi Önerisi ve Performans Analizi”, *İMO Teknik Dergi*, 2016, 27 (4): 7569-7592.
- [17]. Murat, Y.S., Cakici, Z. and Tian,Z., “A Signal Timing Assignment Proposal for Urban Multi Lane Staged Controlled Signalized Roundabouts”, *GRADEVINAR*, 2019, 71 (2): 113-124.
- [18]. Jiang, Z., Wang, T., Li, C., Pan, F. and Yang, X., “Investigation on Two-Stop-Line Signalized Roundabout: Capacity and Optimal Cycle Length”, *Journal of Advanced Transportation*, 2019, Article ID 5720290: 1-9.
- [19]. Akcelik, R., “Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis”, *Australian Road Research Board*, Research Report ARR No:123, 1998.
- [20]. Dogan, E. and Akgungor, A. P., “Optimizing A Fuzzy Logic Traffic Signal Controller via The Differential Evolution Algorithm under Different Traffic Scenarios”, *Simulation: Transactions of The Society for Modeling and Simulation International*, 2016, 92 (11): 1013-1023.

- [21]. Ramkumar, P. and Suribabu, C. R., “Optimal Design of Plane Truss Structures using Differential Evolution Algorithm”, *Jordan Journal of Civil Engineering*, 2017, 11 (1): 91-102.
- [22]. PTV VISSIM 10, PTV AG, 2017.
- [23]. <https://www.google.com.tr/maps/>
- [24]. Murat, Y. S. and Baskan, O., “Modeling Vehicle Delays at Signalized Junctions: Artificial Neural Networks Approach”, *Journal of Scientific and Industrial Research*, 2006, 65: 558-564.
- [25]. Bagdatli, M. E. C., “Vehicle Delay Modeling at Signalized Intersections with Gene-Expression Programming”, *Journal of Transportation Engineering Part A: Systems*, 2020, 146 (9): 04020107.
- [26]. MATLAB R2013b, MATHWORKS, 2013.
- [27]. Saha, A., Chandra, S. and Ghosh, I., “Delay at Signalized Intersections under Mixed Traffic Conditions”, *Journal of Transportation Engineering Part A: Systems*, 2017, 143 (8): 04017041.
- [28]. Küpeli, İ., Sarucan, A. ve Küpeli, A. S., “Dağıtık Permütasyon Akış Tipi Çizelgeleme Problemlerinin Yapay Arı Koloni Algoritması ile Çözümü”, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 2020, 7 (2): 549-562.
- [29]. Ceylan, H. and Bell, M. G. H., “Traffic Signal Timing Optimisation Based on Genetic Algorithm Approach, including Drivers’ Routing”, *Transportation Research Part B: Methodological*, 2004, 38: 329-342.
- [30]. Dell’Orco, M., Baskan, O. and Marinelli, M., “A Harmony Search Algorithm Approach for Optimizing Traffic Signal Timings”, *Promet Traffic & Transportation*, 2013, 25 (4): 349-358.
- [31]. Thunig, T., Scheffler, R., Strehler, M. and Nagel, K., “Optimization and Simulation of Fixed-Time Traffic Signal Control in Real-World Applications”, *Procedia Computer Science*, 2019, 151 (2019): 826-833.
- [32]. Korkmaz, E. and Akgungor, A. P., “Delay Estimation Models for Signalized Intersections using Differential Evolution Algorithm”, *Journal of Engineering Research*, 2017, 5 (3): 16-29.
- [33]. Kamal, M. and İnel, M., “Optimum Design of Reinforced Concrete Continuous Foundaditon using Differential Evolution Algorithm”, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, 44: 8401-8415.
- [34]. Tan, E., Sadak, D. ve Ayvaz, M. T., “Kanalizasyon Sistemlerinin Diferansiyel Evrim Algoritması Kullanılarak Optimum Tasarımı”, *İMO Teknik Dergi*, 2020, 31 (5): 10229-10250.
- [35]. Storn, R. and Price, K., “Differential Evolution a Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces”, *Journal of Global Optimization*, 1997, 11: 341-359.
- [36]. Karaboğa, D., “Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları”, 1, Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Ticaret Limited Şirketi, Ankara, 2014.
- [37]. Liu, H., Cai, Z. and Wang, Y., “Hybridizing Particle Swarm Optimization with Differential Evolution for Constrained Numerical and Engineering Optimization”, *Applied Soft Computing*, 2010, 10 (2): 629-640.
- [38]. Keskindürk, T., “Diferansiyel Gelişim Algoritması”, *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2006, 9 (1): 85-99.
- [39]. Manolis, A., Sidiropoulos, E. and Evangelides, C., “Targeted Path Search Algorithm for Optimization of Water Distribution Networks”, *Urban Water Journal*, 2021, 18 (3): 195-207.