

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SİNYALİZE KAVŞAKLAR İÇİN OPTİMİZASYON TABANLI  
TRAFİK YÖNETİM MODELİ**

**DOKTORA TEZİ**

**ZİYA ÇAKICI**

**DENİZLİ, ŞUBAT - 2020**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**SİNYALİZE KAVŞAKLAR İÇİN OPTİMİZASYON TABANLI  
TRAFİK YÖNETİM MODELİ**

**DOKTORA TEZİ**

**ZİYA ÇAKICI**

**DENİZLİ, ŞUBAT - 2020**

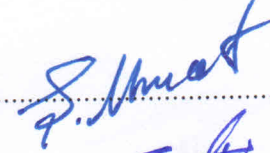
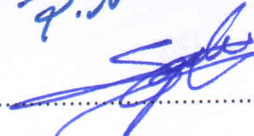
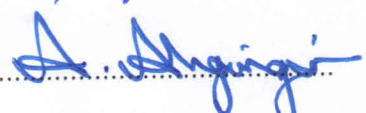
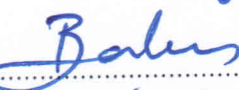
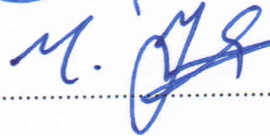
## KABUL VE ONAY SAYFASI

ZİYA ÇAKICI tarafından hazırlanan “SİNYALİZE KAVŞAKLAR İÇİN OPTİMİZASYON TABANLI TRAFİK YÖNETİM MODELİ” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 13.02.2020 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

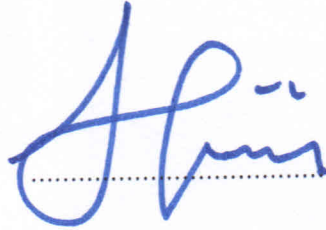
Jüri Üyeleri

İmza

Danışman  
Prof. Dr. Yetiş Şazi MURAT  
(Pamukkale Üniversitesi)  
Üye  
Prof. Dr. Serhan TANYEL  
(Dokuz Eylül Üniversitesi)  
Üye  
Prof. Dr. Ali Payidar AKGÜNGÖR  
(Kırıkkale Üniversitesi)  
Üye  
Doç. Dr. Özgür BAŞKAN  
(Pamukkale Üniversitesi)  
Üye  
Doç. Dr. Muhammed Yasin ÇODUR  
(Erzurum Teknik Üniversitesi)

  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....

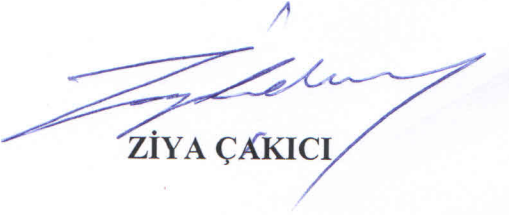
Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun  
26/02/2020 tarih ve ..09/02.. sayılı kararıyla onaylanmıştır.

  
.....

Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

  
**ZİYA ÇAKICI**

## ÖZET

**SİNYALİZE KAVŞAKLAR İÇİN OPTİMİZASYON TABANLI  
TRAFİK YÖNETİM MODELİ  
DOKTORA TEZİ  
ZİYA ÇAKICI  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. YETİŞ ŞAZİ MURAT)  
DENİZLİ, ŞUBAT - 2020**

Karayollarındaki sinyalize kavşaklarda meydana gelen zaman kayıpları, yakıt tüketimleri, egzoz emisyonları ve gürültü kirlilikleri; psikolojik, ekonomik ve çevresel birçok probleme sebep olabilmektedir. Karşılaşılabilecek olası problemler ise yalnızca, doğru ve sürdürülebilir kavşak denetim yaklaşımları ile en aza indirilebilir. Bu yüzden, özellikle son 25-30 yıldır, tüm dünyada, optimizasyon tabanlı trafik yönetimi ile ilgili çalışmalara ve araştırmalara ağırlık verilmiştir.

Bu çalışmada da, sinyalize kavşakların performanslarının artırılması ve hizmet düzeylerinin iyileştirilmesi amacıyla, kavşaktaki ortalama taşıt gecikmelerinin minimize edilmesini hedefleyen **Sinyal süresi ve Faz planı Optimizasyonu Tabanlı** yeni bir kavşak **Denetim** modeli “**SFOTD**” geliştirilmiştir. Geliştirilen modelde, sinyal süreleri ve faz planı eşzamanlı olarak **Diferansiyel Gelişim Algoritması** kullanılarak optimize edilmiştir. Ayrıca, modelde, sinyal süreleri ve faz planı belirli periyodlar ile güncellenerek, modelin trafik taleplerine duyarlı bir şekilde işletilmesi sağlanmıştır.

Çalışma kapsamında, öncelikli olarak, geliştirilen modelin etkinliğinin test edilmesi amacıyla, üç kollu ve dört kollu sinyalize kavşak için kavşak toplam trafik hacimlerinin birbirlerinden farklı olduğu 42 adet trafik hacim senaryosu oluşturulmuştur. Daha sonra, her bir senaryo, **Optimum Sabit Zamanlı Denetim (OSZD)**, **Trafik Uyarımalı Denetim (TUD)** ve **Sinyal süresi ve Faz Optimizasyonu Tabanlı Denetim (SFOTD)** modelleri göz önünde bulundurularak, VISSIM simülasyon programında ayrı ayrı analiz edilmiştir. Son olarak ise her bir trafik senaryosu için, farklı denetim modelleri uygulanarak elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak, üç kollu sinyalize kavşakta, geliştirilen model ile ortalama taşıt gecikmelerinin, OSZD modeline kıyasla ortalama %45, TUD modeline kıyasla ise ortalama %35 civarında azaltılabileceği belirlenmiştir. Buna ilave olarak, dört kollu sinyalize kavşakta ise, geliştirilen model ile ortalama taşıt gecikmelerinin, OSZD modeline kıyasla ortalama %30, TUD modeline kıyasla ise ortalama %15 civarında azaltılabileceği görülmüştür.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Trafik yönetimi, sinyalize kavşak, simülasyon, optimizasyon, diferansiyel gelişim algoritması.

## ABSTRACT

### OPTIMIZATION-BASED TRAFFIC MANAGEMENT MODEL FOR SIGNALIZED INTERSECTIONS

PH.D THESIS

ZIYA ÇAKICI

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

CIVIL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. YETİS SAZİ MURAT)

DENİZLİ, FEBRUARY 2020

Higher levels of loss of time, fuel consumption, exhaust emission and noise pollution which occur at signalized intersections on highways can cause many psychological, economic and environmental problems. Possible problems that can be encountered can only be minimized by proper and sustainable intersection management approaches. Therefore, especially for the last 25-30 years, many scientists from all over the world have focused on the studies and researches related to optimization-based traffic management.

In this study, in order to increase the performance and improve the level of service of signalized intersections, a new Signal timing and signal Phasing Optimization-based Traffic Management model “SPOTM” which aims to minimize the average vehicle delay at intersection is developed. In the proposed model, signal timing and signal phasing are optimized simultaneously using the Differential Evolution Algorithm. Besides, in this model, signal timings and signal phasing are updated with certain intervals continuously. Thus, it is provided that the model is operated as sensitive to traffic demands at intersection approaches.

In the scope of the study, firstly, 42 traffic demand scenarios which have different total traffic volume from each other for both three-legged and four-legged signalized intersection are created for testing the effectiveness of the proposed model. Then, each scenario is analyzed with VISSIM simulation software considering Optimum Fixed Time Management (OFTM), Vehicle Actuated Management (VAM) and Signal timing and signal Phasing Optimization-based Traffic Management (SPOTM), separately. In the last step, for each scenario, the average vehicle delay values obtained by applying different types of intersection management model are compared with each other.

As a result, for three-legged signalized intersection, it was determined that the average vehicle delay may be reduced by the rates of the average of 45% and 35% with the proposed model comparing to OFTM model and VAM model, respectively. In addition to this, for four-legged signalized intersection, it was seen that the average vehicle delay may be reduced by the rates of the average of 30% and 15% with the proposed model comparing to OFTM model and VAM model, respectively.

**KEYWORDS:** Traffic management, signalized intersection, simulation, optimization, differential evolution algorithm.

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b> .....	<b>ix</b>
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	<b>xii</b>
<b>KISALTMALAR LİSTESİ</b> .....	<b>xiv</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>xvi</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1    Daha Önce Yapılan Çalışmalar .....	4
1.2    Tezin Amacı .....	16
1.3    Tezin Kapsamı.....	18
<b>2. OPTİMİZASYON</b> .....	<b>20</b>
2.1    Meta-Sezgisel Optimizasyon Algoritmaları .....	21
2.1.1    Diferansiyel Gelişim Algoritması.....	25
<b>3. PERFORMANS PARAMETRESİ: GECİKME</b> .....	<b>32</b>
3.1    Avustralya (Akçelik) Gecikme Modeli .....	35
<b>4. KAVŞAK MODELLERİ VE KAVŞAK DENETİM TİPLERİ</b> .....	<b>37</b>
4.1    Kavşak Modelleri .....	37
4.1.1    Üç Kollu Sinyalize Kavşak Modeli .....	38
4.1.2    Dört Kollu Sinyalize Kavşak Modeli.....	39
4.2    Kavşak Denetim Tipleri .....	41
4.2.1    Optimum Sabit Zamanlı Denetim (OSZD).....	43
4.2.1.1    Üç ve Dört Kollu Sinyalize Kavşak Modelleri için Optimum Sabit Zamanlı Denetim (OSZD3 – OSZD4).....	44
4.2.2    Trafik Uyarmalı Denetim (TUD).....	49
4.2.2.1    Üç ve Dört Kollu Sinyalize Kavşak Modeli için Trafik Uyarmalı Denetim (TUD3 – TUD4).....	51
4.2.3    Sinyal Süresi ve Faz Optimizasyonu Tabanlı Denetim (SFOTD) .....	56
4.2.3.1    Üç ve Dört Kollu Sinyalize Kavşaklar için Olası Faz Planları .....	57
4.2.3.2    Üç ve Dört Kollu Sinyalize Kavşaklar için Optimizasyon Modelleri (SFOTD3 – SFOTD4).....	60
4.2.3.3    SFOTD3 ve SFOTD4 Yaklaşımlarının Genel İşleyişi.....	66
<b>5. ANALİZLER</b> .....	<b>68</b>
5.1    TUD4 Algoritmasının Etkinliğinin Test Edilmesi .....	68
5.2    SFOTD3’ ün Etkinliğinin Test Edilmesi .....	80
5.3    SFOTD4’ ün Etkinliğinin Test Edilmesi .....	95
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER</b> .....	<b>108</b>
6.1    Sonuçlar.....	108
6.2    Öneriler.....	114
<b>7. KAYNAKLAR</b> .....	<b>116</b>
<b>8. EKLER</b> .....	<b>129</b>
EK A: b Değerinin Belirlenmesi için Yapılan İstatistik Çalışmaları .....	129

EK A: b Değerinin Belirlenmesi için Yapılan İstatistik Çalışmaları (Devamı).....	130
EK A: b Değerinin Belirlenmesi için Yapılan İstatistik Çalışmaları (Devamı).....	131
EK A: b Değerinin Belirlenmesi için Yapılan İstatistik Çalışmaları (Devamı).....	132
EK B: TUD4' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Hareket Yönü Bazlı Trafik Hacimleri.....	133
EK B: TUD4' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Hareket Yönü Bazlı Trafik Hacimleri (Devamı) .....	134
EK C: SFOTD3' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Hareket Yönü Bazlı Trafik Hacimleri.....	135
EK C: SFOTD3' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Hareket Yönü Bazlı Trafik Hacimleri (Devamı) .....	136
EK C: SFOTD3' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Hareket Yönü Bazlı Trafik Hacimleri (Devamı) .....	137
EK D: SFOTD4' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Hareket Yönü Bazlı Trafik Hacimleri.....	138
EK D: SFOTD4' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Hareket Yönü Bazlı Trafik Hacimleri (Devamı) .....	139
EK D: SFOTD4' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Hareket Yönü Bazlı Trafik Hacimleri (Devamı) .....	140
EK E: TUD4' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Farklı Denetim Tiplerinin Uygulanması Durumunda Elde Edilen Ortalama Taşıt Gecikmeleri ve Hizmet Düzeyleri .....	141
EK F: SFOTD3' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Farklı Denetim Tiplerinin Uygulanması Durumunda Elde Edilen Ortalama Taşıt Gecikmeleri ve Hizmet Düzeyleri .....	142
EK F: SFOTD3' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Farklı Denetim Tiplerinin Uygulanması Durumunda Elde Edilen Ortalama Taşıt Gecikmeleri ve Hizmet Düzeyleri (Devamı).....	143
EK F: SFOTD3' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Farklı Denetim Tiplerinin Uygulanması Durumunda Elde Edilen Ortalama Taşıt Gecikmeleri ve Hizmet Düzeyleri (Devamı).....	144
EK F: SFOTD3' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Farklı Denetim Tiplerinin Uygulanması Durumunda Elde Edilen Ortalama Taşıt Gecikmeleri ve Hizmet Düzeyleri (Devamı).....	145
EK G: SFOTD4' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Farklı Denetim Tiplerinin Uygulanması Durumunda Elde Edilen Ortalama Taşıt Gecikmeleri ve Hizmet Düzeyleri .....	146
EK G: SFOTD4' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Farklı Denetim Tiplerinin Uygulanması Durumunda Elde Edilen Ortalama Taşıt Gecikmeleri ve Hizmet Düzeyleri (Devamı).....	147
EK G: SFOTD4' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Farklı Denetim Tiplerinin Uygulanması Durumunda	



Elde Edilen Ortalama Taşıt Gecikmeleri ve Hizmet Düzeyleri (Devamı).....	148
EK G: SFOTD4' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Farklı Denetim Tiplerinin Uygulanması Durumunda Elde Edilen Ortalama Taşıt Gecikmeleri ve Hizmet Düzeyleri (Devamı).....	149
<b>9. ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>150</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Örnek bir optimizasyon problemi.....	21
Şekil 2.2: Meta-sezgisel algoritmaların sınıflandırması .....	23
Şekil 2.3: DGA temel adımları (Karaboğa 2014).....	25
Şekil 3.1: Sinyalize bir kavşakta beklemeye (durmaya) maruz kalan bir taşıta ait mesafe-zaman grafiği .....	32
Şekil 4.1: Analizlerde kullanılan üç kollu sinyalize kavşak modeli.....	39
Şekil 4.2: Analizlerde kullanılan dört kollu sinyalize kavşak modeli .....	40
Şekil 4.3: Trafik hacmi çok yüksek olan bir kavşağın sinyalizasyon sistemi ile denetlenmemesi durumunda kavşakta meydana gelen trafik sıklığı (Şanlıurfa) .....	42
Şekil 4.4: Üç kollu sinyalize kavşak modelinde optimum sabit zamanlı denetim (OSZD3) uygulaması .....	44
Şekil 4.5: Dört kollu sinyalize kavşak modelinde optimum sabit zamanlı denetim (OSZD4) uygulaması .....	45
Şekil 4.6: OSZD3 ve OSZD4 akış diyagramı.....	48
Şekil 4.7: Ortalama gecikme – detektörlerin dur çizgisine mesafesi arasındaki ilişki .....	50
Şekil 4.8: Üç kollu sinyalize kavşak modelinde trafik uyarmalı denetim (TUD3) uygulaması.....	52
Şekil 4.9: Üç kollu sinyalize kavşak modeli için VAP mantığı ile oluşturulan TUD3 algoritması akış diyagramı .....	53
Şekil 4.10: Dört kollu sinyalize kavşak modelinde trafik uyarmalı denetim (TUD4) uygulaması.....	54
Şekil 4.11: Dört kollu sinyalize kavşak modeli için VAP mantığı ile oluşturulan TUD4 algoritması akış diyagramı .....	55
Şekil 4.12: Üç kollu sinyalize kavşak modeli faz planı ve akım (hareket) bazlı devre diyagramı örneği .....	57
Şekil 4.13: Dört kollu sinyalize kavşak modeli faz planı ve akım (hareket) bazlı devre diyagramı örneği .....	58
Şekil 4.14: Üç kollu sinyalize kavşak modeli için optimum faz planı ve sinyal sürelerinin seçim adımları.....	61
Şekil 4.15: SFOTD3 yaklaşımı için üç kollu sinyalize kavşak modelindeki veri toplama noktaları yerleşimi.....	62
Şekil 4.16: Dört kollu sinyalize kavşak modeli için optimum faz planı ve sinyal sürelerinin seçim adımları.....	64
Şekil 4.17: SFOTD4 yaklaşımı için dört kollu sinyalize kavşak modelindeki veri toplama noktaları yerleşimi.....	65
Şekil 4.18: SFOTD3 ve SFOTD4' ün akış diyagramı.....	66
Şekil 5.1: TUD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan senaryolar için hareket yönü bazlı hacim değişim oranları.....	69
Şekil 5.2: TUD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 20 trafik hacim senaryosu için kavşak toplam trafik hacimleri .....	70
Şekil 5.3: TUD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 20 trafik hacim senaryosu için OSZD4' ün uygulanması	

durumunda, Akçelik bağıntısı ve VISSIM gecikme sonuçları arasındaki farklar .....	72
<b>Şekil 5.4:</b> TUD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 20 trafik hacim senaryosu için OSZD4' ün uygulanması durumunda, Akçelik gecikme bağıntısı ve VISSIM ortalama gecikme karşılaştırması .....	73
<b>Şekil 5.5:</b> TUD4 ' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan bazı senaryolar için, detektör yerleşiminin ortalama taşıt gecikmesi üzerindeki etkisi .....	73
<b>Şekil 5.6:</b> TUD4 ' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan bazı senaryolar için, detektör yerleşiminin ortalama taşıt gecikmesi üzerindeki etkisi (devam).....	74
<b>Şekil 5.7:</b> TUD4' ün etkinliğinin test edilmesi için yapılan analizlerden elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri .....	77
<b>Şekil 5.8:</b> TUD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla yapılan 10 numaralı senaryoya ait analizler için VISSIM' den elde edilen simülasyon görüntüleri .....	78
<b>Şekil 5.9:</b> TUD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 20 trafik hacim senaryosu için OSZD4 yerine TUD4 uygulanması durumunda elde edilen başarımlar oranları.....	79
<b>Şekil 5.10:</b> SFOTD3' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan senaryolar için hacimlerdeki hareket yönü bazlı artırımı ve azaltım oranları .....	81
<b>Şekil 5.11:</b> SFOTD3' ün etkinliğinin test edilmesi için oluşturulan senaryolara ait kavşak toplam trafik hacimleri .....	82
<b>Şekil 5.12:</b> SFOTD3' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 42 trafik hacim senaryosu için OSZD3' ün uygulanması durumunda, Akçelik bağıntısı ve VISSIM gecikme sonuçları arasındaki farklar .....	84
<b>Şekil 5.13:</b> SFOTD3' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 42 trafik hacim senaryosu için OSZD3' ün uygulanması durumunda, Akçelik gecikme bağıntısı ve VISSIM ortalama gecikme karşılaştırması .....	85
<b>Şekil 5.14:</b> Üç kollu sinyalizasyon kavşak modelinde hacimlerin düşük, orta ve yüksek olması durumlarında, bazı senaryolar için detektör yerleşimlerinin ortalama taşıt gecikmesi üzerindeki etkisi .....	86
<b>Şekil 5.15:</b> Hacimlerin düşük olması durumunda, SFOTD3' ün etkinliğinin test edilmesi için yapılan analizlerden elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri .....	89
<b>Şekil 5.16:</b> Üç kollu sinyalizasyon kavşak modeli için hacimlerin düşük olması durumunda elde edilen senaryo bazlı başarımlar oranları .....	89
<b>Şekil 5.17:</b> Hacimlerin orta olması durumunda, SFOTD3' ün etkinliğinin test edilmesi için yapılan analizlerden elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri .....	91
<b>Şekil 5.18:</b> Üç kollu sinyalizasyon kavşak modeli için hacimlerin orta olması durumunda elde edilen senaryo bazlı başarımlar oranları .....	91
<b>Şekil 5.19:</b> Hacimlerin yüksek olması durumunda, SFOTD3' ün etkinliğinin test edilmesi için yapılan analizlerden elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri .....	93

<b>Şekil 5.20:</b> Üç kollu sinyalize kavşak modeli için hacimlerin yüksek olması durumunda elde edilen senaryo bazlı başarımlar oranları .....	93
<b>Şekil 5.21:</b> SFOTD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan senaryolar için hacimlerdeki hareket yönü bazlı artırım ve azaltım oranları .....	95
<b>Şekil 5.22:</b> SFOTD4' ün etkinliğinin test edilmesi için oluşturulan senaryolara ait kavşak toplam trafik hacimleri .....	96
<b>Şekil 5.23:</b> SFOTD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 42 trafik hacim senaryosu için OSZD4' ün uygulanması durumunda, Akçelik bağıntısı ve VISSIM gecikme sonuçları arasındaki farklar.....	98
<b>Şekil 5.24:</b> SFOTD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 42 trafik hacim senaryosu için OSZD4' ün uygulanması durumunda, Akçelik gecikme bağıntısı ve VISSIM ortalama gecikme karşılaştırması .....	99
<b>Şekil 5.25:</b> Dört kollu sinyalize kavşak modelinde hacimlerin düşük, orta ve yüksek olması durumlarında, bazı senaryolar için detektör yerleşimlerinin ortalama taşıt gecikmesi üzerindeki etkisi .....	100
<b>Şekil 5.26:</b> Hacimlerin düşük olması durumunda, SFOTD4' ün etkinliğinin test edilmesi için yapılan analizlerden elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri .....	102
<b>Şekil 5.27:</b> Dört kollu sinyalize kavşak modeli için hacimlerin düşük olması durumunda elde edilen senaryo bazlı başarımlar oranları.....	102
<b>Şekil 5.28:</b> Hacimlerin orta olması durumunda, SFOTD4' ün etkinliğinin test edilmesi için yapılan analizlerden elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri .....	104
<b>Şekil 5.29:</b> Dört kollu sinyalize kavşak modeli için hacimlerin orta olması durumunda elde edilen senaryo bazlı başarımlar oranları ....	104
<b>Şekil 5.30:</b> Hacimlerin yüksek olması durumunda, SFOTD4' ün etkinliğinin test edilmesi için yapılan analizlerden elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri .....	106
<b>Şekil 5.31:</b> Dört kollu sinyalize kavşak modeli için hacimlerin yüksek olması durumunda elde edilen senaryo bazlı başarımlar oranları ....	106

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 3.1:</b> Sinyalize kavşaklar için ortalama kontrol gecikmesi ve hizmet düzeyi arasındaki ilişki (HCM 2010) .....	34
<b>Tablo 4.1:</b> OSZD3 için oluşturulan amaç fonksiyonu, karar değişkenleri ve kısıtlar seti .....	46
<b>Tablo 4.2:</b> OSZD4 için oluşturulan amaç fonksiyonu, karar değişkenleri ve kısıtlar seti .....	47
<b>Tablo 4.3:</b> Detektör mesafesine bağlı minimum yeşil süreler.....	51
<b>Tablo 4.4:</b> Üç kollu sinyalize kavşak modeli için tasarlanan olası faz planları .....	58
<b>Tablo 4.5:</b> Dört kollu sinyalize kavşak modeli için tasarlanan olası faz planları .....	59
<b>Tablo 4.6:</b> SFOTD3 yaklaşımı için oluşturulan amaç fonksiyonu, karar değişkenleri ve kısıtlar seti .....	60
<b>Tablo 4.7:</b> SFOTD4 yaklaşımı için oluşturulan amaç fonksiyonu, karar değişkenleri ve kısıtlar seti .....	63
<b>Tablo 5.1:</b> TUD4' ün etkinliğinin test edilmesi için oluşturulan referans trafik hacim matrisi .....	69
<b>Tablo 5.2:</b> TUD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 20 trafik hacim senaryosu için OSZD4' ün uygulanması durumunda elde edilen optimum sinyal süreleri ve ortalama taşıt gecikmeleri .....	71
<b>Tablo 5.3:</b> TUD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 20 trafik hacim senaryosu için OSZD4' ün uygulanması durumunda, Akçelik gecikme bağıntısı ve VISSIM ile elde edilen ortalama gecikme değerleri.....	72
<b>Tablo 5.4:</b> TUD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 20 trafik hacim senaryosu için yaklaşık optimum detektör yerleşimleri.....	74
<b>Tablo 5.5:</b> Talepte dalgalanmaların meydana geldiği zaman dilimleri ve dalgalanmaların nicelikleri üzerine oluşturulan örnek durumlar .....	75
<b>Tablo 5.6:</b> SFOTD3' ün etkinliğinin test edilmesi için oluşturulan referans trafik hacim matrisi .....	80
<b>Tablo 5.7:</b> SFOTD3' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 42 trafik hacim senaryosu için OSZD3' ün uygulanması durumunda elde edilen optimum sinyal süreleri ve ortalama taşıt gecikmeleri .....	83
<b>Tablo 5.8:</b> SFOTD3' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 42 trafik hacim senaryosu için OSZD3' ün uygulanması durumunda, Akçelik gecikme bağıntısı ve VISSIM ile elde edilen ortalama gecikme değerleri.....	84
<b>Tablo 5.9:</b> SFOTD3' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 42 trafik hacim senaryosu için TUD3 uygulanması durumunda yaklaşık optimum detektör yerleşimleri.....	87

<b>Tablo 5.10:</b> SFOTD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 42 trafik hacim senaryosu için OSZD4' ün uygulanması durumunda elde edilen optimum sinyal süreleri ve ortalama taşıt gecikmeleri .....	97
<b>Tablo 5.11:</b> SFOTD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 42 trafik hacim senaryosu için OSZD4' ün uygulanması durumunda, Akçelik gecikme bağıntısı ve VISSIM ile elde edilen ortalama gecikme değerleri.....	98
<b>Tablo 5.13:</b> SFOTD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 42 trafik hacim senaryosu için TUD4 uygulanması durumunda yaklaşık optimum detektör yerleşimleri.....	101
<b>Tablo A.1:</b> En uygun “b” değerinin belirlenmesi için yapılan analizler sonucunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri.....	129
<b>Tablo A.2:</b> Dağılım testi sonuçları .....	130
<b>Tablo A.3:</b> Paired-t testi sonuçları .....	131
<b>Tablo B.1:</b> Kavşak yaklaşımlarındaki taleplerin düşük ve orta olması durumlarında hareket yönü bazlı trafik hacimleri .....	133
<b>Tablo B.2:</b> Kavşak yaklaşımlarındaki taleplerin yüksek ve çok yüksek olması durumlarında hareket yönü bazlı trafik hacimleri .....	134
<b>Tablo C.1:</b> Kavşak yaklaşımlarındaki taleplerin düşük olması durumunda hareket yönü bazlı trafik hacimleri .....	135
<b>Tablo C.2:</b> Kavşak yaklaşımlarındaki taleplerin orta olması durumunda hareket yönü bazlı trafik hacimleri .....	136
<b>Tablo C.3:</b> Kavşak yaklaşımlarındaki taleplerin yüksek olması durumunda hareket yönü bazlı trafik hacimleri .....	137
<b>Tablo D.1:</b> Kavşak yaklaşımlarındaki taleplerin düşük olması durumunda hareket yönü bazlı trafik hacimleri .....	138
<b>Tablo D.2:</b> Kavşak yaklaşımlarındaki taleplerin orta olması durumunda hareket yönü bazlı trafik hacimleri .....	139
<b>Tablo D.3:</b> Kavşak yaklaşımlarındaki taleplerin yüksek olması durumunda hareket yönü bazlı trafik hacimleri .....	140
<b>Tablo E.1:</b> Trafik taleplerinde dalgalanma görülmesi ve görülmemesi durumlarında elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri ve hizmet düzeyleri .....	141
<b>Tablo F.1:</b> Oluşturulan senaryolar için OSZD3 yerine TUD3 uygulanması durumunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri ve hizmet düzeyleri .....	142
<b>Tablo F.2:</b> Oluşturulan senaryolar için OSZD3 yerine SFOTD3 / Y=0 uygulanması durumunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri ve hizmet düzeyleri .....	143
<b>Tablo F.3:</b> Oluşturulan senaryolar için TUD3 yerine SFOTD3 / Y=0 uygulanması durumunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri ve hizmet düzeyleri .....	144
<b>Tablo F.4:</b> Oluşturulan senaryolar için OSZD3 yerine SFOTD3 / Y=1 uygulanması durumunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri ve hizmet düzeyleri .....	145
<b>Tablo G.1:</b> Oluşturulan senaryolar için OSZD4 yerine TUD4 uygulanması durumunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri ve hizmet düzeyleri .....	146

<b>Tablo G.2:</b> Oluşturulan senaryolar için OSZD4 yerine SFOTD4 / Y=0 uygulanması durumunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri ve hizmet düzeyleri .....	147
<b>Tablo G.3:</b> Oluşturulan senaryolar için TUD4 yerine SFOTD4 / Y=0 uygulanması durumunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri ve hizmet düzeyleri .....	148
<b>Tablo G.4:</b> Oluşturulan senaryolar için OSZD4 yerine SFOTD4 / Y=1 uygulanması durumunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri ve hizmet düzeyleri .....	149

## SEMBOL LİSTESİ

$f(\mathbf{x})$	: Amaç fonksiyonu
$g_k(\mathbf{x})$	: Kısıtlar seti
$\mathbf{x}$	: Karar değişkenleri vektörü
$n$	: Probleme ait toplam değişken sayısı
$j$	: Probleme ait değişkenler ( $j=1, 2, \dots, n$ )
$x_{j,min}$	: Değişken $j$ ' ye ait alt sınır değeri
$x_{j,max}$	: Değişken $j$ ' ye ait üst sınır değeri
$p$	: Popülasyon boyutu
$F$	: Mutasyon (ölçekleme) faktörü
$CR$	: Çaprazlama oranı
$G_{max}$	: Maksimum iterasyon (jenerasyon) sayısı
$G$	: Jenerasyon
$\mathbf{x}_{i,G}$	: $G$ . jenerasyondaki $i$ numaralı çözüm vektörü
$\mathbf{x}_{i,j,G=0}$	: Başlangıç jenerasyonunun $i$ numaralı aday çözüm içerisinde bulunan $j$ numaralı karar değişkeninin başlangıç değeri
$\mathbf{v}_{i,G}$	: Jenerasyon (iterasyon) $G$ ' de, mutasyon operatörü kullanılarak $\mathbf{x}_{i,G}$ vektöründen elde edilen yeni çözüm vektörü
$r_k$	: $[1,p]$ çözüm aralığında rastgele üretilmiş tam sayılar
$\mathbf{x}_{r_1,G}$	: Jenerasyon $G$ ' de, mutasyon işlemi için rastgele seçilen birinci kromozoma ait çözüm vektörü
$\mathbf{x}_{r_2,G}$	: Jenerasyon $G$ ' de, mutasyon işlemi için rastgele seçilen ikinci kromozoma ait çözüm vektörü
$\mathbf{x}_{r_3,G}$	: Jenerasyon $G$ ' de, mutasyon işlemi için rastgele seçilen üçüncü kromozoma ait çözüm vektörü
$\mathbf{u}_{i,G}$	: $G+1$ jenerasyonuna aday deneme vektörü
$\mathbf{u}_{i,j,G}$	: Jenerasyon $G+1$ için, çaprazlama işlemi sonrasında elde edilen yeni çözüm vektöründeki $j$ değişkeni
$\mathbf{x}_{i,j,G}$	: $G$ jenerasyonundaki $i$ . çözüm vektörünün $j$ . karar değişkeni
$\mathbf{v}_{i,j,G}$	: $G$ jenerasyonunda mutasyon işlemi sonucu oluşturulan $i$ . çözüm vektörünün $j$ . karar değişkeni
$j_{rand}$	: $[1,n]$ kapalı aralığında rastgele olarak üretilmiş üniform dağılıma sahip tam sayı' dır.
$f(\mathbf{x}_{i,G})$	: Mevcut çözüm vektörü için hesaplanan amaç fonksiyonu değeri
$f(\mathbf{u}_{i,G})$	: Mutasyon ve çaprazlama sonucu oluşan yeni çözüm vektörü için hesaplanan amaç fonksiyonu değeri
$\mathbf{x}_{i,G+1}$	: Seçim işlemi sonucunda, $(G+1)$ . jenerasyona (iterasyona) aktarılan çözüm vektörü
$TD$	: Toplam gecikme
$C$	: Devre süresi
$q$	: Trafik akımı
$qC$	: Devre başına taşıt biriminden gelişlerin ortalama sayısı
$g$	: Etkin yeşil süre
$\alpha$	: Yeşil süre oranı
$s$	: Doygun akım
$y$	: Akım oranı
$N_o$	: Taşıt biriminden ortalama taşan kuyruk
$\beta$	: Doygunluk derecesi



$Q$	: Saniye başına taşıt biriminden kapasite
$T_f$	: Akım periyodu
$QT_f$	: $T_f$ boyunca deşarj olabilen maksimum taşıt sayısı
$z$	: $\beta-1$ (Eğer $\beta < 1$ ise $z$ negatif değere sahiptir)
$\beta_0$	: Ortalama taşan kuyruğun yaklaşık olarak 0 olması durumundaki doygunluk derecesi
$sg$	: Devre başına taşıt biriminden kapasite
$d$	: Saniye başına taşıt biriminden ortalama gecikme
$k$	: Kavşaktaki toplam şerit sayısı
$f_i$	: SFOTD3 için oluşturulan faz planlarında Faz I' e ait yeşil süreler ( $i=1, 2, \dots, 8$ )
$ff_i$	: SFOTD3 için oluşturulan faz planlarında Faz II' ye ait yeşil süreler ( $i=1, 2, \dots, 8$ )
$fff_i$	: SFOTD3 için oluşturulan faz planlarında Faz III' e ait yeşil süreler ( $i=1, 2, \dots, 8$ )
$Gck_i$	: SFOTD3 için oluşturulan olası faz planlarına ait ortalama taşıt gecikmeleri ( $i=1, 2, \dots, 8$ )
$b$	: SFOTD3 ve SFOTD4' de sinyal süreleri ve faz planlarının güncellenme periyodu (5 devre)
$p_j$	: SFOTD4 için oluşturulan faz planlarında Faz I' e ait yeşil süreler ( $j=1, 2, \dots, 21$ )
$pp_j$	: SFOTD4 için oluşturulan faz planlarında Faz II' ye ait yeşil süreler ( $j=1, 2, \dots, 21$ )
$ppp_j$	: SFOTD4 için oluşturulan faz planlarında Faz III' e ait yeşil süreler ( $j=1, 2, \dots, 21$ )
$pppp_j$	: SFOTD4 için oluşturulan faz planlarında Faz IV' e ait yeşil süreler ( $j=1, 2, \dots, 21$ )
$Dly_j$	: SFOTD4 için oluşturulan olası faz planlarına ait ortalama taşıt gecikmeleri ( $j=1, 2, \dots, 21$ )

## KISALTMALAR LİSTESİ

<b>B/C</b>	: Benefit/Cost (Fayda/Maliyet)
<b>vb</b>	: ve benzeri
<b>TL</b>	: Türk Lirası
<b>ve diğ</b>	: ve diğerleri
<b>HCM</b>	: Highway Capacity Manual
<b>GA</b>	: Genetik Algoritma
<b>BM</b>	: Bulanık Mantık
<b>YAK</b>	: Yapay Arı Kolonisi
<b>PSO</b>	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
<b>TA</b>	: Tabu Arama
<b>GKA</b>	: Guguk Kuşu Arama
<b>SFOTD</b>	: Sinyal süresi ve Faz Optimizasyonu Tabanlı Denetim
<b>OSZD</b>	: Optimum Sabit Zamanlı Denetim
<b>TUD</b>	: Trafik Uyarmalı Denetim
<b>DGA</b>	: Diferansiyel Gelişim Algoritması
<b>AAA</b>	: Armoni Arama Algoritması
<b>m</b>	: Metre
<b>OSZD3</b>	: Üç kollu sinyalize kavşak modeli için Optimum Sabit Zamanlı Denetim
<b>sn</b>	: Saniye
<b>bo</b>	: Birim otomobil
<b>sa</b>	: Saat
<b>şe</b>	: Şerit
<b>OSZD4</b>	: Dört kollu sinyalize kavşak modeli için Optimum Sabit Zamanlı Denetim
<b>VAP</b>	: Vehicle Actuated Programming
<b>TUD3</b>	: Üç kollu sinyalize kavşak modeli için Trafik Uyarmalı Denetim
<b>min</b>	: Minimum
<b>TUD4</b>	: Dört kollu sinyalize kavşak modeli için Trafik Uyarmalı Denetim
<b>dk</b>	: Dakika
<b>SFOTD3</b>	: Üç kollu sinyalize kavşak modeli için Sinyal Süresi ve Faz Optimizasyonu Tabanlı Denetim
<b>SFOTD4</b>	: Dört kollu sinyalize kavşak modeli için Sinyal Süresi ve Faz Optimizasyonu Tabanlı Denetim
<b>B - V</b>	: Başlangıç - Varış
<b>ta</b>	: Taşıt
<b>No</b>	: Numara
<b>Batı Y. K.</b>	: Batı Yaklaşım Kolu
<b>Kuzey Y. K.</b>	: Kuzey Yaklaşım Kolu
<b>Doğu Y. K.</b>	: Doğu Yaklaşım Kolu
<b>Güney Y. K.</b>	: Güney Yaklaşım Kolu
<b>SFOTD3 / Y=0</b>	: Üç kollu sinyalize kavşak modeli için Sinyal Süresi ve Faz Optimizasyonu Tabanlı Denetim / Yaklaşma=0
<b>SFOTD3 / Y=1</b>	: Üç kollu sinyalize kavşak modeli için Sinyal Süresi ve Faz Optimizasyonu Tabanlı Denetim / Yaklaşma=1

**SFOTD4 / Y=0**

: Dört kollu sinyalize kavşak modeli için Sinyal Süresi ve Faz Optimizasyonu Tabanlı Denetim / Yaklaşma=0

**SFOTD4 / Y=1**

: Dört kollu sinyalize kavşak modeli için Sinyal Süresi ve Faz Optimizasyonu Tabanlı Denetim / Yaklaşma=1

## ÖNSÖZ

Bu çalışma, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora tezi olarak hazırlanmıştır.

“Sinyalize Kavşaklar için Optimizasyon Tabanlı Trafik Yönetim Modeli” isimli tez çalışmasını bana öneren, tezin tüm aşamalarında değerli bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, bu zorlu süreçte manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danışmanım, değerli hocam Prof. Dr. Yetiş Şazi MURAT' a teşekkürü bir borç bilirim.

Özellikle son 3 yıldır, bu tez çalışması ile ilgili görüş ve önerilerine sıkça başvurduğum ve kendilerinden birçok şey öğrendiğim Tez İzleme Komitesi üyeleri saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Ali Payidar AKGÜNGÖR' e ve Doç. Dr. Özgür BAŞKAN' a şükranlarımı sunarım. Ayrıca, tez jürisi'nde yer alarak bizleri onurlandıran çok değerli hocalarım Prof. Dr. Serhan TANYEL' e ve Doç. Dr. Muhammed Yasin ÇODUR' a çalışmanın geliştirilmesine yönelik katkılarından ve önerilerinden dolayı teşekkür ederim.

Doktora ders döneminde, kendisinden almış olduğum bir ders kapsamında beni “Optimizasyon” ile tanıştıran ve bana yeni bir akademik bakış açısı kazandıran değerli hocam Prof. Dr. Mustafa Tamer AYVAZ' a da çok şey borçlu olduğumu burada belirtmem gerekir.

Tez çalışmam boyunca kullanmış olduğum VISSIM simülasyon programı için PTV Planung Transport Verkehr AG' ye ve bu programı temin etme aşamasında yardımlarını esirgemeyen değerli dostum Dr. Öğr. Üyesi Metin Mutlu AYDIN' a da teşekkür ederim.

Yaklaşık 6 yıllık bir süreci kapsayan doktora serüvenimde kendimi yorgun hissettiğim, umutsuzluğa kapıldığım ve kendime olan inancımı kaybettiğim zorlu dönemler de oldu. Yaşadığım zor zamanlarda varlıkları, motivasyonları ve manevi destekleriyle dimdik ayakta kalmamı sağlayan değerli kardeşlerim Arş. Gör. Dr. Sinan MARAŞ ve Arş. Gör. Muhammet KAMAL ile çok değerli arkadaşım Dr. Fzt. Güzin KARA' ya yürekten teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte, özellikle yorulduğum ve bunaldığım dönemlerde, benim için adeta birer enerji ve mutluluk kaynağı olan sevgili yeğenlerim Mustafa, Elif Naz ve Ece Nur ÇAY' a da ayrı ayrı teşekkür ederim.

Ayrıca, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, yaşadığım en zor ve sıkıntılı zamanlarda dahi beni bir an olsun yalnız bırakmayan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Vecihe ÇAKICI' ya, babam Rıza ÇAKICI' ya ve ablam Esma ÇAY' a müteşekkir olduğumu belirtir, bu tez çalışmasının ülkemize faydalı olmasını temenni ederim.

Ziya ÇAKICI

# 1. GİRİŞ

En genel tanımıyla sürdürülebilirlik; gelecek nesillerin, gelecekte kendi ihtiyaçlarını karşılayabilmeleri için sahip oldukları kaynaklara dokunulmaksızın, bugünün ihtiyaçlarının mevcut kaynaklar çerçevesinde karşılanabilmesidir. Hemen hemen tüm alanlarda olduğu gibi, ulaşım ve ulaştırma alanları ile ilgili projelerde ve yatırımlarda da sürdürülebilirliğin sağlanması oldukça önemlidir. Sürdürülebilir ulaşım ve ulaştırma politikaları kapsamında, karar vericiler tarafından tercih edilen projelerin ve/veya yatırımların sahip olması gereken genel özellikleri şu şekilde özetlemek mümkündür:

- Yapım malzemeleri ve gereçleri düşünüldüğünde, ilerleyen yıllarda, kaynak bazında çeşitli problemlere sebep olmamalıdır.
- Çevreci, çevreye uyumlu ve doğa dostu (çevreyi koruyan) olmalıdır.
- Fayda/Maliyet (B/C) oranları oldukça yüksek olmalıdır.
- Hem ekonomik savurganlığın (israfın) önlenmesi hem de yeşil ve sağlıklı bir çevre oluşturulması bağlamında, yakıt tüketiminin azaltılmasını ilke edinmelidirler.
- Tek tip ulaştırma sistemi odaklı olmamalıdır. Farklı tip ulaştırma sistemlerinin birbirleriyle uyum sağlayacak şekilde işletilebilmesine olanak sağlamalıdır (Kılınçaslan 2012).

Proje ve/veya yatırımların yukarıda belirtilen özelliklere sahip olmamaları durumunda, kentlerdeki ulaşım altyapıları ve ulaştırma sistemleri ile ilgili problemlerin her geçen gün katlanarak devam etmesi ve bunun sonucunda ekonomik, psikolojik ve sosyal açıdan “yaşamı güç şehirler” in ortaya çıkması kaçınılmazdır. Buna ilave olarak, özellikle kent merkezlerinde görülen yer değiştirme taleplerinin, sürdürülebilir olmayan projeler ve yatırımlar ile karşılanmaya çalışılması da “yaşamı güç şehirler” in oluşumunu açık bir şekilde destekler niteliktedir.

Özellikle son yıllarda, dünyadaki ekonomik ve teknolojik gelişmeler ile birlikte insanların yer değiştirme talepleri önemli düzeyde artış göstermiştir. Ulaşım taleplerinde görülen hızlı ve yüksek düzeydeki bu artışlar, taşıt sahipliğindeki ve

motorlu taşıt sayısındaki artışı da beraberinde getirmiştir. Motorlu taşıt sayısındaki artış ile birlikte mevcut karayolu ağlarının önemli bir kısmı günden güne yetersiz hale gelmiş ve birçok karar verici problemin çözümünü yeni yol ağlarının inşa edilmesi olarak belirtmiştir. Trafik mühendisliği ve ulaşım planlaması bütününde incelendiğinde, problemin çözümüne yönelik yapılan bu önerinin sürdürülebilir ulaşımı destekler nitelikte olmadığı açıktır. Daha önce yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu da, karayollarındaki yeni yol ağlarının inşası ile trafikte geçici bir rahatlama sağlanabileceğini fakat bunun her zaman kalıcı bir çözüm olarak görülmemesi gerektiğini ortaya koymuştur (Şahin 2015).

Bazı durumlarda, yeni yol ağlarının inşası ile normale dönen trafik akışları, bir süre sonra yol kullanıcılarının algılarına bağlı olarak ağdaki taşıt sayısı artışı nedeniyle yeniden bozulabilmektedir. İnşa edilecek yeni karayolu ağlarının yüksek maliyetleri de göz önünde bulundurulduğunda, kullanıcılara yeni alternatifler sunmak yerine, mevcut yol ağlarının geliştirilmesi ve/veya iyileştirilmesinin daha istikrarlı, mantıklı ve sürdürülebilir çözümler olduğu görülmektedir. Mevcut yol ağlarının geliştirilmesi ve/veya iyileştirilmesi farklı şekillerde gerçekleştirilebilmektedir (Gülgeç 1998; Yayla 2008):

- Mevcut karayolu ağlarına yeni şeritlerin ilave edilmesi ile daha düşük bir maliyetle daha yüksek kapasite değerlerinin elde edilmesinin sağlanması,
- Karayolu ağlarında yapılacak yeni yatay ve düşey işaretlemeler ile kullanıcı hatalarının minimum düzeye indirilmesi ve ulaşım ağlarının güvenliğinin artırılması,
- Karayolu üstyapılarının bakım ve onarımlarının yerinde ve zamanında yapılması ile kullanıcılara daha konforlu bir seyahat sunulması,
- Sinyalizasyon uygulamaları ile karayollarının kritik kesimleri olan kavşaklardaki trafik akımlarının hareketlerinin güvenliğinin ve düzenliliğinin sağlanması vb. şeklindedir.

Dünyanın birçok ülkesinde olduğu gibi, ülkemizde de özellikle İstanbul, Ankara ve İzmir gibi yüksek nüfus yoğunluğuna sahip olan kentler başta olmak üzere birçok kentte karşılaşılan en önemli sorunlardan birisi de trafik problemleridir. Trafik kaynaklı zaman kayıpları ile birlikte meydana gelen ekonomik ve çevresel zararlar

(egzoz emisyonu ve gürültü kirliliği artışı), yerel yönetimleri ve ilgili birimleri söz konusu problemleri ortadan kaldırmak veya minimum düzeye indirmek için, yüksek bütçeler ayırmaya zorunlu hale getirmiştir. Örneğin; 2019 yılı için, İstanbul Büyükşehir Belediyesi 24 Milyar TL' lik bütçesinin yaklaşık %25' lik bölümünü, İzmir Büyükşehir Belediyesi ise 6 Milyar TL' lik bütçesinin yaklaşık %26' lık bölümünü ulaşım ve trafik problemlerinin çözümüne ayırmıştır (Anonim 2018a; Anonim 2018b). Bununla birlikte, ülkemizdeki diğer büyük ve orta ölçekli kentlerde de, ulaşım alt yapılarının geliştirilmesi ve ulaştırma sistemlerinin etkinliğinin artırılması için ulaşım altyapısına yüksek bütçeler ayrılmaktadır (Anonim 2019a; Anonim 2019b; Anonim 2019c). Bu durum, karar vericilerin ve yerel yönetimlerin, kentlerin kanayan yarası olan trafik ve ulaşım problemlerinin ortadan kaldırılmasına veya minimize edilmesine verdikleri önemin önemli bir göstergesi olarak görülmektedir. Ulaşım ve trafik ile ilgili projeler için ayrılan yüksek bütçelere karşın, bu projelerden yeterli fayda ve iyileşmelerin sağlanıp sağlanamadığı ise akıllardaki en önemli soru işaretidir. Buna ilave olarak, fayda ve iyileşmelerin sağlanması durumunda, bu fayda ve iyileşmelerin dikkate değer düzeyde olup olmadığının belirlenmesi de bir başka önemli soru işareti olarak karşımıza çıkmaktadır.

Şehir içi ve şehirlerarası yol ağlarında en fazla yatırım ve harcamanın yapıldığı ulaşım altyapı alanlarından birisi de, farklı yönlerden gelen trafik akımlarının kesiştiği, birleştiği ve ayrıldığı kritik karayolu kesimleri olan kavşaklardır. Özellikle sinyalizasyon kavşakları; duruş-kalkışların, beklemelerin, kısa sürede hızlanmaların, kısa sürede yavaşlamaların ve trafik sıkışıklıklarının en fazla görüldüğü alanlar oldukları için bu bölgelerdeki yakıt tüketimleri ve doğaya salınan egzoz emisyonları oldukça yüksek düzeydedir (Ma ve diğ. 2014). Bu nedenle, belirtilen bölgeler, hem ekonomik hem de çevresel açıdan bir takım problemlere sebep olabilmektedir. Kavşak yaklaşım kollarında bulunan trafik akımlarının hareketlerinin güvenliğinin, düzenliliğinin ve sürekliliğinin sağlanarak, taşıtların kavşaktaki bekleme ve durma sürelerinin minimize edilmesi, meydana gelebilecek olası problemleri azaltmak için önemli bir adımdır.

Trafik hacimlerinin yüksek olduğu sinyalizasyon kavşaklarda, bekleme ve durma sürelerinin minimizasyonu etkin bir sinyal denetim (kontrol) stratejisi ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu yüzden, özellikle son 60 yıldır, sinyal denetim sistemleri ve bu sistemlerin performanslarının geliştirilmesi üzerine birçok çalışma

yapılmış ve bugün halen daha yapılmaya devam etmektedir. 20. yüzyılın ilk yarısında sabit zamanlı denetim stratejisi uygulanırken, ikinci yarısının başlarında sabit zamanlı sinyal denetim sistemlerinin işletiminin optimize edilmesi ile ilgili çalışmalara ağırlık verilmiş ve optimum sabit zamanlı denetim stratejileri ön plana çıkmıştır (Webster 1958). 20. yüzyılın son çeyreğinden itibaren ise sistemlerin kavşak yaklaşımlarındaki trafik taleplerine duyarlı (tepki veren) bir hale getirilmesi ve böylece işletim etkinliklerinin daha fazla artırılması amaçlanmıştır (Akcelik 1994; Rezzai ve diğ. 2015; Yu ve diğ. 2016).

Akıllı ulaşım sistemlerinin önemli bir parçasını da oluşturan bu sistemler, ya optimizasyona ya da oluşturulan bir kontrol algoritmasına dayalı olarak farklı şekillerde karşımıza çıkabilmektedir (Li ve Prevedouros 2004). Herhangi bir kontrol algoritmasına dayalı olarak işletilen sistemler “trafik uyarmalı denetim sistemleri”, optimizasyon temelli işletilen sistemler ise “adaptif denetim sistemleri” olarak isimlendirilmektedir. Sürdürülebilir ulaşım politikaları ve stratejileri kapsamında, sinyalize kavşaklardaki gecikmelerin, gürültü kirliliklerinin, yakıt tüketimlerinin ve egzoz emisyonlarının minimize edilmesi amacıyla, hem trafik uyarmalı denetim sistemleri hem de adaptif denetim sistemleri ile ilgili çalışmalar bugün halen daha yoğun bir şekilde devam etmektedir (Wang ve diğ. 2018; Mohajerpoor ve diğ. 2019). Bu bağlamda, sürekli geliştirilen yeni stratejiler ve hesap yaklaşımları ile sinyalize kavşakların en etkin ve en verimli şekilde işletilmeleri hedeflenmektedir.

## **1.1 Daha Önce Yapılan Çalışmalar**

Optimizasyon temelli sinyalize kavşak denetimi ile ilgili ilk çalışmalar 1958 yılında İngiliz trafik bilimci F. V. Webster tarafından gerçekleştirilmiştir (Webster 1958). Özellikle son 30 yıldır, bilim ve teknolojiye önemli gelişmeler ile birlikte birçok alanda olduğu gibi ulaşım planlaması ve trafik yönetimi alanlarında da dikkate değer düzeyde gelişmeler ve ilerlemeler kaydedilmiştir. Yeni hesaplama yöntemlerinin ve algoritmaların geliştirilmesi, araziden anlık veri toplama işlemlerinin daha kolay bir hale gelmesi, teknolojik araç ve gereçlerden (yazılım ve donanım) daha etkin bir şekilde faydalanılması ve karşılaşılan problemler için sürdürülebilir - çevre



dostu ve ekonomik çözümlerin aranması, kavşak denetim sistemlerinin gelişiminde ve ilerlemesinde önemli bir rol oynamıştır.

Sinyalize kavşakların optimum işletimi, kavşaktaki trafiğin doğru bir şekilde yönetilmesi ile gerçekleştirilebilmektedir. Sinyalizasyon sistemi için, en doğru devre süresinin seçilmesi, en uygun faz tasarımının yapılması ve en uygun faz sürelerinin belirlenmesi, doğru bir kavşak denetimi için en önemli unsurlardır (Dabiri ve Abbas 2016). Söz konusu unsurlardan biri veya birkaçının sağlanamaması veya göz ardı edilmesi durumunda, kavşağın optimum işletildiğini iddia etmek mümkün değildir. Literatürde, sinyalize kavşaklardaki sinyal sürelerinin optimizasyonu, sinyal fazlarının tasarımı ve optimizasyon tabanlı (temelli) trafik denetimi ile alakalı birçok çalışma bulunmaktadır. Yapılan çalışmalardan bazıları şu şekilde özetlenebilir:

Linkenheld ve diğ. (1992), sinyalizasyon sistemlerinin faz planı ve sinyal süreleri üzerine yapmış oldukları çalışmada, bir sinyal denetim sistemi için ne kadar fazla gerek duyulduğunu ve bu fazlar için ne kadar yeşil süre ayrılması gerektiğini belirlemek amacıyla sezgisel bir yöntem önermişlerdir. Çalışmada, izole bir kavşağın sinyal sürelerinin tasarımında yeni bir sistem geliştirmek için, "PHAST" adı verilen bilgiye dayalı bir uzman sistem teknolojisi kullanılmıştır. Girdi olarak trafik hacimlerini ve kavşak geometrisini alan PHAST, çıktı olarak ise en uygun faz planını, devre süresini ve fazlara ait yeşil süreleri vermektedir. Çalışma kapsamında, PHAST'ın performansı, Highway Capacity Manual (HCM)' den örnekleri içeren çeşitli kavşakların faz planları ve sinyal süreleri kullanılarak doğrulanmış ve sonuç olarak PHAST teknolojisinin, talebe duyarlı kavşak kontrolünde kullanılabileceği belirtilmiştir.

Sinyalize kavşakların çevrim dışı optimizasyonu; devre süresinin, faz sekmelerinin, ofsetlerin ve fazlara ait yeşil sürelerin en uygun değerlerinin seçimini içermektedir. Hadı ve Wallace (1994), yapmış oldukları çalışmada, Cauchy tavlama benzetimi algoritmasını kullanarak TRANSYT-7F programı için bir faz sekmesi optimizasyon özelliği geliştirmişlerdir. Algoritma, devre süresini, faz sekmelerini, offsetleri ve fazlara ait sinyal sürelerini optimize etmek için uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, algoritmanın, faz planlarını ve sinyal sürelerini optimize etmek için iyi bir potansiyele sahip olduğunu göstermiştir.

Wolshon ve Taylor (1999), “SCATS” adaptif kavşak denetim uygulamasının sonucunda ortaya çıkan gecikme parametreleri arasındaki farklılıkları analiz etmişlerdir. Çalışmada, hem SCATS kontrolü için hem de saatlik olarak sinyal süreleri güncellenen bir denetim stratejisi için makroskobik simülasyon yapılmış ve her iki denetim şekli altında elde edilen gecikmelerin karşılaştırması sunulmuştur. Sonuç olarak, SCATS’ ın, diğer yaklaşıma kıyasla, gecikmeleri kavşak yaklaşım kolları arasında daha dengeli bir şekilde dağıttığı ve bu sayede, kavşak yaklaşım kollarındaki incremental (artımlı) gecikmelerin önlenebildiği görülmüştür.

Mirchandani ve Head (2001), yapmış oldukları çalışmada, RHODES olarak adlandırılan gerçek zamanlı adaptif trafik sinyal kontrol sistemini tartışmışlardır. Çalışma kapsamında, RHODES’ in mimarisi, algoritması ve analizleri detaylı olarak sunulmuştur. Ayrıca, mevcut trafik hacim senaryolarının simülasyon modellerinde, RHODES uygulamasına dayalı olan laboratuvar test sonuçları, RHODES sisteminin etkinliğini açık bir şekilde göstermiştir. Çalışma sonucunda, RHODES’ in, ortalama taşıt gecikmelerini, talebin düşük olması durumunda yaklaşık %50, talebin yüksek olması durumunda ise yaklaşık %30 azaltabildiği belirlenmiştir.

Wang ve diğ. (2001), en uygun faz planı tasarımı yapan ve bu faz planı için en uygun sinyal sürelerinin belirlenmesi problemini çözen bir sistem geliştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, farklı trafik talepleri için, en uygun faz tasarımı ve eğer gerekirse en uygun süre ataması (paylaşımı) öneren TIMELY isimli bir model sunulmuştur. Çalışma sonucunda, önerilen modelin, sinyalize kavşakların işletiminde oldukça etkin ve başarılı olabileceği belirtilmiştir.

Wong ve Wong (2003), izole sinyalize kavşaklardaki sinyal süreleri ve şerit işaretlemelerinin entegre tasarımı için, şerit bazlı optimizasyon yöntemi sunmuşlardır. Çalışma kapsamında, hem taşıt trafiği hem de yaya hareketleri beraber göz önüne alınarak, kapasite maksimizasyonu ve devre süresi minimizasyonu problemleri birlikte çözülmeye çalışılmıştır. Çalışma sonucunda, önerilen metodun etkinliği sayısal örnekler ile kanıtlanmıştır.

Li ve Prevedouros (2004), yapmış oldukları çalışmada, doygun üstü trafik durumlarının görüldüğü sinyalize kavşaklar için, TACOS adını verdikleri bir adaptif trafik denetim metodu geliştirmişlerdir. TACOS’ da sinyal sürelerinin yanı sıra, trafik

akımlarının birbirleriyle kesişme durumları göz önünde bulundurularak faz sırası da optimize edilmeye çalışılmıştır. Analizler sonucunda, doymuş üstü durumlarda, TACOS yaklaşımı ile sabit zamanlı ve trafik uyarmalı denetime kıyasla çok daha fazla iyileşmeler sağlanabildiği belirlenmiştir.

Lee ve diğ. (2005), Genetik Algoritma (GA) ile adaptif trafik sinyal kontrolü üzerinde çalışmışlardır. Çalışma kapsamında geliştirilen denetim sistemi üç ana bileşenden oluşmaktadır: GA optimizasyon modülü, trafik simülasyon modülü ve gerçek zamandaki sinyal sürelerini optimize etmek için hepsinin birlikte çalıştığı bir veri tabanı yönetim sistemi içermektedir. Oluşturulan algoritma, çevrimiçi değerlendirme için mikrosimülasyon kullanılarak test edilmiştir. Çalışma sonucunda, GA tabanlı gerçek zamanlı denetimin, optimum sabit zamanlı denetimden daha iyi performans gösterdiği görülmüştür.

Stevanovic ve diğ. (2007), GA tabanlı VISGAOST isimli bir sinyal süresi optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Çalışma kapsamında, geliştirilen model, iki farklı yol ağında test edilmiştir. Sonuç olarak, her iki ağ için de, GA ile optimize edilen sinyal süreleri ile Synchro programı tarafından sağlanan optimum sinyal sürelerine kıyasla, gecikmelerin ve durmaların en az %5 oranında azaltılabildiği görülmüştür.

Shoufeng ve diğ. (2008), adaptif trafik denetimi bağlamında Q-learning algoritmasının performansını test etmeyi amaçlamışlardır. Q-learning algoritması için, durum (karar verme faktörü) kavşağın toplam gecikmesi, eylem (karar verilen) ise fazlara ait sinyal süreleridir. Çalışma kapsamında, izole sinyalizasyon bir kavşakta, geliştirilen yöntem ve sabit zamanlı denetim ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları, değişken trafik durumlarında, Q-learning tabanlı yöntem ile gecikmelerin önemli oranda azaltılabildiğini göstermiştir.

Zheng ve diğ. (2010), trafik uyarmalı denetim sistemlerinin performanslarını geliştirirken, uyarmalı kontrolcülerin adaptif fonksiyonelliğini sağlamayı amaçlayan gerçek zamanlı bir adaptif trafik sinyal denetim modeli üzerinde çalışmışlardır. Geliştirilen modelde, her bir fazda gelecek taşıt sayılarını belirlemek için bir akım tahmin algoritması kullanılmıştır. Bununla birlikte, sinyal süreleri kararları bu akım tahmin modeli göz önünde bulundurularak verilmektedir. Çalışmada, 38 trafik uyarmalı denetimden oluşan ağdaki denetim modeli PARAMICS'de değerlendirilmiş

ve test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, üzerinde çalışılan modelin, farklı trafik durumlarında, ağın performansını önemli düzeyde iyileştirdiğini ortaya koymuştur.

Angulo ve diğ. (2011), adaptif trafik denetimi için farklı hesaplama tekniklerinin bir uygulamasını sunmuşlardır. Çalışma kapsamında, adaptif denetim ile adaptif olmayan statik ve dinamik denetimler karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, adaptif denetim ile seyahat sürelerinin önemli oranda azaltılabildiği görülmüştür.

Trafikteki doğrusal olmayışın ve rastsallığın üstesinden gelebilmek için, trafik denetim sistemlerinde evrimsel hesap algoritmaları, bulanık sistemler, yapay sinir ağları vb. içeren hesapsal zekâ yöntemleri kullanılmaktadır. Hesapsal zeka teknolojileri trafik sinyal denetimine esneklik, otonomi ve sağlamlık gibi bir takım özellikler getirmektedir. Zhao ve diğ. (2012), yapmış oldukları çalışmada, trafik sinyal denetiminde yaygın olarak kullanılan hesapsal zekâ yöntemlerini (Bulanık sistem, yapay sinir ağı, evrimsel hesaplama ve sürü zekası, pekiştirmeli öğrenme ve adaptif dinamik programlama vb.) araştırmışlardır.

Samadi ve diğ. (2012), İran' ın Mashhad şehrinde uygulanan SCATS adaptif trafik denetim sistemini değerlendirmişlerdir. Çalışma kapsamında, trafik uyarmalı denetim ile SCATS performans açısından karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, SCATS' ın ortalama gecikmeyi azalttığı görülmüştür. Bununla birlikte yakıt tüketimi ve hava kirliliği üzerinde de adaptif trafik denetim sistemlerinin olumlu etkileri çalışmada vurgulanmıştır.

McKenny ve White (2012), sensörler ile yapılan trafik gözlemlerine ve trafik ışıkları arasındaki etkileşime dayalı olan adaptif bir trafik denetim sistemi geliştirmişlerdir. Geliştirilen adaptif sistemin etkinliği, Kanada' daki Ottawa şehrinde elde edilen trafik verileri kullanılarak test edilmiştir. Sonuç olarak, adaptif denetim ile sabit zamanlı denetime kıyasla daha yüksek ağ performanslarının sağlanabildiği görülmüştür.

Gündoğan ve diğ. (2014), ATAK adını verdikleri bir adaptif trafik denetim sistemi geliştirmişlerdir. Geliştirilen sistemde, optimizasyon yöntemi olarak, GA ve Bulanık Mantık (BM) kullanılmıştır. Çalışmada, sinyal sürelerinin optimizasyonu için GA' ya, trafik denetim aygıtlarının işletimi boyunca beklenmeyen durumları kontrol

etmek için ise BM yöntemine başvurulmuştur. Çalışma sonucunda, ATAK sistemi uygulaması ile optimum sabit zamanlı denetime kıyasla, seyahat sürelerinin yaklaşık %15 oranında azaltılabileceği belirtilmiştir.

Vilarinho ve Tavares (2014), ağ dinamikleri üzerinde anlık bilgiye dayalı sinyal süre optimizasyonu ve faz planı tasarımını aynı anda yapmayı amaçlayan trafik sinyal denetimi için yeni bir yöntem önermişlerdir. Çalışma kapsamında, en uygun sinyal sürelerine ve faz planına, toplam gecikme minimize edilerek karar verilmiştir. Önerilen yaklaşım ile öngörülemeyen durumlarda oldukça iyi sonuçlar elde edildiği belirlenmiştir.

Sabit zamanlı denetim, trafik taleplerinin yüksek olduğu durumlara uyum sağlayamamaktadır ve bu yüzden güçlü bir denetim tekniği olarak görülmemektedir. Bu sebeple, sinyalizasyon kavşaklarında, trafik taleplerine duyarlı denetim tekniği uygulaması bir gereklilik oluşturmaktadır. Yulianto ve Sutanto (2014), koordine kavşak için BM tabanlı bir adaptif trafik denetimci tasarlamışlardır. Tasarımın etkinliği VISSIM simülasyon programı ile incelenmiş ve test edilmiştir. Sonuç olarak, geliştirilen adaptif denetimci ile özellikle trafik hacimlerinin yüksek olması durumunda, kavşak performansının önemli düzeyde iyileştirilebildiği belirlenmiştir.

Koltovska ve Bombol (2014), kent içi izole kavşaklar için bir adaptif trafik denetim stratejisi geliştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışma kapsamında, Q-learning algoritması kullanılarak ve mevcut - gözlemlenen parametrelere dayalı olarak, durumlar kümesini tanımlamak için bir yeni yaklaşım ortaya konmuştur. Geliştirilen kendi kendine öğrenen adaptif trafik denetim stratejisi gerçek bir kavşakta test edilmiştir. Daha sonra, adaptif denetimin performansı, sabit zamanlı ve trafik uyarımlı denetimin performansları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, adaptif trafik denetimci ile ortalama gecikme ve duruş sayısı gibi performans ölçütleri için en iyi değerlerin elde edildiği görülmüştür.

Aljaafreh ve Al-Oudat (2014), sinyal sürelerinin yanı sıra, faz sekmelerini de optimize etmeyi amaçlayan bir adaptif trafik denetim sistemi üzerinde çalışmışlardır. Çalışma kapsamında, faz sekmelerinin optimizasyonu için modifiye edilmiş iş planlama algoritması kullanılmıştır. Sonuç olarak, hedeflenen yöntem ile kavşaktaki ortalama taşıt gecikmelerinin önemli oranda azaltılabildiği görülmüştür.

Jin ve Ma (2014), grup bazlı sinyal denetim uygulaması ve sinyal süreleri optimizasyonu üzerinde çalışmışlardır. Çalışma kapsamında, Stockholm' deki küçük bir ulaşım ağını değerlendirmek ve optimize etmek için teste dayalı deneyler uygulanmıştır. Sonuç olarak, grup bazlı denetim sistemlerinin, esnek faz planlarına sahip olmaları nedeniyle, sabit zamanlı ve trafik uyarmalı denetim sistemlerine kıyasla yeşil süreleri çok daha iyi kullandıkları tespit edilmiştir. Ayrıca, grup bazlı sinyal denetiminin performans iyileştirme açısından oldukça başarılı olduğu tespit edilmiştir.

Studer ve diğ. (2015), sabit zamanlı sinyal denetiminin zorlukları ve meydana getirmiş olduğu problemler hakkında bir takım değerlendirmeler yapmışlar ve söz konusu problemler için çözüm önerileri sunmaya çalışmışlardır. Çalışmada, adaptif sinyal denetiminin problemlerin çözümüne yönelik önemli bir yöntem olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, bu bağlamda, SCATS, SCOOT, INSYNC ve UTOPIA adaptif denetim sistemleri seyahat süresi, yakıt tüketimi, emisyon, gecikme ve tesis kurulum masrafları göz önünde bulundurularak detaylı bir şekilde karşılaştırılmıştır.

Araghi ve diğ. (2015a), sinyal süresi optimizasyonu alanında yapılan önemli çalışmalardan bir özet sunmuşlardır. Çalışmada, Q-learning, sinir ağları ve BM gibi hesapsal zeka yöntemlerine değinilmiştir. Çalışma kapsamında, izole bir kavşaktaki sinyal sürelerini belirlemek için, belirtilen hesapsal zeka yöntemleri kullanılmıştır. Uygulanan farklı hesapsal yöntemler aynı platform üzerinde geliştirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte, iki farklı senaryo için Q-learning, sinir ağı ve BM sistemi arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Çalışma sonucunda, sabit zamanlı denetimci ile kıyaslandığında Q-learning' in %66, sinir ağının %71 ve BM' nin ise %74 oranında daha yüksek performans gösterdiği görülmüştür.

Jin ve Ma (2015), makine öğrenmesi yöntemini kullanarak, sinyal süresi kararları verebilme kabiliyetine sahip olan bir sinyal denetim sistemi geliştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, grup bazlı faz planları kullanılarak, pekiştirmeli öğrenme algoritması ile bir adaptif sinyal denetim sistemi geliştirilmiştir. Bu bağlamda, SARSA ve Q-learning olmak üzere iki farklı öğrenme algoritması incelenmiştir. Ayrıca, grup bazlı sabit zamanlı denetim, grup bazlı adaptif denetim ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak, grup bazlı adaptif denetimin, grup bazlı sabit zamanlı denetime kıyasla daha iyi bir performans gösterdiği ve adaptif grup bazlı sinyal denetim sistemi için, SARSA'

nın Q-learning yaklaşımına göre daha mantıklı ve daha uygun bir tercih olduğu belirlenmiştir.

Khalighi (2015), yapmış olduğu çalışmada, toplam taşıt emisyonlarını minimize ederek, izole kavşaktaki sinyal sürelerini doygun altı durumda optimize eden bir gerçek zamanlı sinyal kontrol sistemi geliştirmiştir. Önerilen metodun değerlendirilmesi için, gerçek kavşaklardan veriler kullanılmıştır. Sonuçlar, emisyon bazlı sinyal denetim sisteminin, geleneksel sabit zamanlı denetim sistemi ile kıyaslandığında, emisyonu birçok durumda önemli oranda azalttığını göstermiştir.

Odeh ve diğ. (2015), adaptif trafik sinyal denetimi için, BM ve GA' yı birbirine bağlayan bir hibrid algoritma üzerinde çalışmışlardır. Simülasyon sonuçları, hibrid algoritma ile sabit zamanlı denetime kıyasla %34' e kadar iyileşme sağlanabildiğini göstermiştir. Bunun yanı sıra, oluşturulan yaklaşım ile BM tabanlı denetimcilere kıyasla da yaklaşık %31' e kadar iyileşme sağlanabildiği görülmüştür.

Dujardin ve diğ. (2015), kavşaktaki bekleme süresi ve toplam duruş sayısını minimize eden adaptif bir trafik denetim stratejisi geliştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, adaptif trafik denetim problemi çok amaçlı karışık tamsayı doğrusal program olarak modellenmiş ve bu bağlamda adaptif referans noktası yaklaşımına dayalı interaktif bir sistem ortaya konulmuştur. Çalışma kapsamında yapılan analizlerde, sistemin, gerçek zamanlı trafik durumlarına oldukça iyi düzeyde uyum sağlayabildiği görülmüştür. Bununla birlikte, önerilen sistem standart yarı adaptif bir sistem ile karşılaştırılmış ve söz konusu sistemin, standart yarı adaptif sisteme kıyasla çok daha iyi çözümler sağladığı sonucuna ulaşılmıştır.

Araghi ve diğ. (2015b), yapmış oldukları çalışmada, akıllı trafik denetim sistemlerinin optimum parametrelerinin belirlenmesi için gelişmiş guguk kuşu arama optimizasyonu algoritması kullanmışlardır. Çalışma kapsamında, Q-learning ve sabit zamanlı kontrolcülerin yanı sıra, sinir ağı ve adaptif nöro-bulanık çıkarım sistemi olmak üzere iki akıllı kontrolcü de uygulanmıştır. 9 adet dört kollu sinyalizasyon kavşaktan oluşan trafik ağından elde edilen sonuçlar, guguk kuşu arama algoritması kullanılarak eğitilen akıllı denetim sistemlerinin optimalitesini göstermiştir. Ayrıca, sabit zamanlı denetim ile kıyaslandığında, ortalama performansın, sinir ağı ile %44, adaptif nöro-

bulanık çıkarım sistemi ile %39, Q-learning ile ise %35 daha fazla arttırılabileceği tespit edilmiştir.

Chen ve diğ. (2015), simülasyon bazlı adaptif trafik sinyal kontrol problemi üzerinde çalışmışlardır. Çalışma kapsamında, simülatörde farklı trafik hacim senaryoları oluşturulmuş ve her bir talep düzeyinde en uygun sinyal planını oluşturmak için simülasyona dayalı optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Daha sonra, oluşturulan simülasyona dayalı adaptif trafik denetim yaklaşımı, doğu Manhattan (New York)'daki bir alandaki sinyal süre planlarını belirlemek için uygulanmıştır. Çalışma kapsamında, önerilen yaklaşımın ve arazideki mevcut sinyal planlarının performansı detaylı olarak karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, önerilen yaklaşım ile mevcut duruma kıyasla önemli düzeyde iyileşmeler sağlanabileceği belirlenmiştir.

Yuedong ve diğ. (2016), parçacık sürü optimizasyon tekniğini kullanarak, farklı faz kombinasyonları için sinyal sürelerinin optimizasyonunu amaçlamışlardır. Çalışmada amaç fonksiyonu olarak, duruş sayısının minimizasyonu dikkate alınmıştır. Önerilen metot, Çin' de bulunan bir kavşakta uygulanmış ve duruş sayısında yaklaşık %19' luk bir azalma gözlenmiştir.

Abdelghaffar ve diğ. (2016), yapmış oldukları çalışmada, oyun teorisi yaklaşımına dayalı yeni bir izole trafik sinyal denetim algoritması sunmuşlardır. Çalışmada, optimum kontrol stratejisini elde etmek için Nash pazarlık çözümü uygulanmıştır. Daha sonra, oluşturulan algoritma, INTEGRATION mikrosimülasyon yazılımında değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında, önerilen algoritma, farklı talep durumlarında Nash pazarlık yaklaşımının performansını değerlendirmek için, optimum sabit zamanlı ve trafik uyarımalı denetim algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, farklı talepler için, Nash pazarlık yaklaşımı ile ortalama seyahat sürelerinin %37 ile %65 aralığında, toplam gecikmenin %41 ile %64 aralığında, emisyon düzeylerinin ise %6 ile %17 aralığında azaltılabileceği görülmüştür.

Matei ve diğ. (2016), sinyalizasyon kavşaktaki taşıtların geliş sürelerine dayalı olan ve her fazın sonunda optimize edilen trafik sinyal sürelerinin karakteristiklerinde adaptif bir sinyal denetim stratejisi geliştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışma kapsamında yapılan analizlerden, adaptif denetim ile toplam seyahat sürelerinin önemli oranlarda



azaltılabileceği ve hizmet düzeyinin önemli oranlarda iyileştirilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Chen ve Sun (2016), taşıt geliş tahmin modeli ve sinyal süre optimizasyonu algoritmasından oluşan gelişmiş bir adaptif denetim metodu üzerinde çalışmışlardır. Çalışma kapsamında, gerçek zamanlı sinyal denetim algoritması dinamik programlama kullanılarak formüle edilmiştir. Sinyal süre optimizasyonun amaç fonksiyonu olarak gecikme ve kuyruk uzunluklarının minimizasyonu ile kapasite maksimizasyonu kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, geliştirilen adaptif denetim metodunun uygulanabilir olduğu belirtilmiştir.

Aavani ve diğ. (2017), yapmış oldukları çalışmada, tüm dünyada yaygın bir şekilde kullanılan ACS-Lite, OPAC, RHODES, SCATS, SCOOT gibi mevcut adaptif denetim sistemlerini detaylı bir şekilde tanıtmışlar ve bu sistemleri farklı kriterleri göz önünde bulundurarak karşılaştırmışlardır. Yazarlar, yapılan karşılaştırmaların, en uygun adaptif trafik denetim sisteminin seçimi için, bir karar-destek gereci olabileceğini belirtmişlerdir.

Castro ve diğ. (2017), sinyal sürelerinin yanı sıra faz planını da değiştirebilen bir adaptif biyolojik kaynaklı sinir ağı amaçlamışlardır. Denetimci, üç yaklaşım koluna sahip bir kavşak üzerinde değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda, adaptif biyolojik kaynaklı sinir ağı ile kavşak kapasitesinin önemli oranda arttırılabildiği tespit edilmiştir.

Touhbi ve diğ. (2017), farklı trafik koşullarında, adaptif trafik sinyal denetimi için, pekiştirmeli öğrenme yaklaşımının performansını analiz etmeyi amaçlamışlardır. Çalışma kapsamında, PARAMICS mikrosimülasyon yazılımı kullanılarak, izole bir kavşak için pekiştirmeli öğrenme bazlı denetim geliştirilmiştir. Sonuç olarak, farklı trafik hacim senaryoları altında (Düşük hacim/Yüksek hacim) ve farklı trafik dinamiklerinde (Akım üniform/Akım değişken), pekiştirmeli öğrenme yaklaşımı ile sabit zamanlı kontrolcüye kıyasla ortalama gecikmelerin ve kuyruk uzunluklarının %8 ile %68 aralığında azaltılabileceği görülmüştür.

Shinde (2017), yapmış olduğu çalışmada, sinyalize kavşaklarda daha etkili bir sinyal denetimi sağlamak için, Adaptif Trafik IşıK Kontrol Sistemi (ATLCS) olarak

adlandırdığı yeni bir denetim yöntemi üzerinde çalışmıştır. Çalışma kapsamında ATLCs' nin performansı geleneksel sabit zamanlı denetim sistemi ile karşılaştırılmış ve Adaptif Trafik Işık Kontrol Sistemi' nin, geleneksel sabit zamanlı denetim sistemine kıyasla daha etkin ve çevre dostu olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Li ve diğ. (2017), yapmış oldukları çalışmada, optimum sinyal süresi problemini iki seviyeli bir optimizasyon çerçevesinde çözmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, üst seviyede, GA kullanılarak sürücülerin ortalama seyahat sürelerini minimize eden sinyal süreleri, alt seviyede ise kullanıcıların sinyal sürelerine tepkileri belirlenmiştir.

Adebiyi ve diğ. (2018), sinyalize kavşaklardaki fazları ve fazlara ait sinyal sürelerini dinamik olarak yöneten adaptif bir trafik denetim sistemi geliştirmişlerdir. Geliştirilen modelde, fazlara ait sinyal süreleri, trafik durumları göz önünde bulundurularak, Yapay Arı Kolonisi (YAK) algoritması kullanılarak optimize edilmiştir. Çalışma sonucunda, geliştirilen sistemin, ortalama bekleme sürelerinin azaltılmasında oldukça başarılı olduğu tespit edilmiştir.

Manandhar ve Joshi (2018), sinyalize kavşaktaki trafik akımlarına uyum sağlayan bir akıllı trafik denetim sistemi geliştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışma kapsamında, kavşaktaki trafik akımlarını kontrol etmek için Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve İstatistiksel Çoklama' dan oluşan bir hibrid sistem geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmanın performansı test edilmiş ve söz konusu hibrid algoritmanın, sabit zamanlı denetime kıyasla bekleme sürelerini %67 ile %89 arasında azaltabildiği belirlenmiştir.

Chentoufi ve Ellaia (2018), yapmış oldukları çalışmada, adaptif trafik sinyal süre optimizasyonu için Tabu Arama (TA) algoritması ve PSO algoritmasından oluşan bir hibrid algoritma geliştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışma kapsamında, geliştirilen algoritmanın etkinliği izole bir sinyalize kavşakta test edilmiştir. Sonuç olarak, geliştirilen sistemin, sinyalize kavşaklardaki toplam gecikmelerin minimize edilmesinde oldukça başarılı olduğu görülmüştür.

Tian ve diğ. (2018), gerçek zamanlı trafik yönetimi için biyolojik bir adaptif trafik sinyal denetim yaklaşımı geliştirmeyi amaçlamışlardır. Söz konusu adaptif

kontrol modeli, PSO' dan esinlenilerek sürü zekâsına dayalı olarak geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşımda her bir kavşak bir parçacık olarak, tüm trafik ağı ise bir parçacık sürüsü olarak düşünülmüştür. Daha sonra trafik işletim etkinliği optimize edilmeye çalışılmıştır. Çalışma kapsamında yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar ışığında, geliştirilen algoritma ile kavşak yaklaşımlarındaki kuyruk uzunluklarının önemli düzeyde azaltılabileceği tespit edilmiştir.

Zhai ve diğ. (2018), sinyal fazı optimizasyonuna dayalı adaptif bir sinyal denetimi geliştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada, bir sinyal devresi süresince kavşaktaki kapasiteyi maksimize etmek için, birincil ve ikincil uyumlu fazlardan oluşan sinyal fazında birincil ve ikincil kontrol mekanizması tasarlanmıştır. Bu sayede, sinyal sürelerinin yanı sıra sinyal fazlarının da dinamik olarak değişimi gerçekleştirilebilmiştir. Çalışma kapsamında, adaptif denetimden elde edilen sonuçlar, sabit zamanlı ve tam uyarmalı denetimden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, önerilen denetim yaklaşımı ile ortalama taşıt gecikmelerinin önemli oranda azaltılabileceği görülmüştür.

Chen ve diğ. (2019), arter sinyal koordinasyonu için pekiştirmeli öğrenmeye dayalı yeni bir adaptif sinyal kontrol yaklaşımı geliştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışma kapsamında, geliştirilen algoritma gerçek zamanlı trafik verileri kullanılarak uygulanmıştır. SUMO mikrosimülatörü ile elde edilen deneysel sonuçlar, önerilen algoritmanın, sabit zamanlı denetim ve mevcut sinyal kontrol metotları ile kıyaslandığında, bekleme sürelerini sırasıyla yaklaşık %15 ve %24 oranlarında azaltabildiğini göstermiştir.

Jia ve diğ. (2019), gecikme ve emisyonu azaltırken aynı zamanda kavşak kapasitesini arttırmayı amaçlayan çok-amaçlı sinyal süresi optimizasyon modeli üzerinde çalışmışlardır. Çalışma kapsamında, amaç probleminin problem karakteristikleri göz önünde bulundurularak, PSO algoritmasına dayalı meta-sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir. Önerilen yaklaşımın geçerliliği Çin' deki sinyalizasyon kavşaklarda test edilmiştir. Sonuç olarak, geliştirilen algoritma ile mevcut duruma kıyasla çok daha iyi bir kavşak performansı elde edilebileceği görülmüştür.

Wu ve diğ. (2019), gerçek zamanlı trafik sinyal denetim problemini çözmek için, Guguk Kuşu Arama (GKA) algoritmasına dayalı BM denetim üzerinde

çalışmışlardır. Denetim modeli dört kollu bir sinyalize kavşak üzerinde test edilmiştir. En uygun faz yeşil süreleri, gerçek zamanlı trafik durumu göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, ortalama taşıt gecikmelerinin, sabit zamanlı ve BM denetimcilere kıyasla %5 ile %41 aralığında azaltılabileceği tespit edilmiştir.

## 1.2 Tezin Amacı

Literatürde daha önce yapılan çalışmalardan da görüldüğü üzere, farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen adaptif denetim sistemi yaklaşımlarının büyük bir çoğunluğunda yalnızca sinyal sürelerinin optimizasyonu üzerinde durulmuştur. Bununla birlikte, hem sinyal süreleri hem de faz planının optimizasyonunun birlikte dikkate alındığı çalışma sayısı ise neredeyse yok denecek kadar azdır. Fakat en uygun sinyal sürelerinin yanı sıra, en uygun faz planı seçiminin de kavşaktaki ortalama taşıt gecikmelerinin azaltılmasında önemli bir role sahip olduğu daha önce yapılan birçok çalışmada net bir şekilde belirtilmiştir (Linkenheld ve dig. 1992; Aljaafreh ve Al-Oudat 2014; Çakıcı ve Murat 2016). Bu nedenle, bu çalışmada, literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak, kavşaktaki sinyal süreleri ile birlikte faz planlarının da eş zamanlı olarak optimize edildiği ve hem sinyal sürelerinin hem de faz planlarının belirli periyodlar ile sürekli olarak güncellendiği adaptif bir kavşak denetim sisteminin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Söz konusu sistemde, sinyal süreleri ile birlikte faz planı optimizasyonunun da göz önünde bulundurulmasıyla, sinyalize kavşakların çok daha etkin ve verimli bir şekilde işletilebilecekleri düşünülmektedir.

Çalışma kapsamında, sinyalize kavşakların performanslarının artırılması ve hizmet düzeylerinin iyileştirilmesi amacıyla, kavşaktaki ortalama taşıt gecikmelerinin minimize edilmesini hedefleyen Sinyal süresi ve Faz planı Optimizasyonu Tabanlı yeni bir kavşak Denetim “**SFOTD**” modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modelde, fazlara ait sinyal süreleri (yeşil süreler) ve faz planı, tüm kavşak yaklaşımlarındaki trafik talepleri göz önünde bulundurularak, eş zamanlı olarak optimize edilmektedir. Bunun yanı sıra, kavşak yaklaşımlarında sürekli gerçekleştirilen gözlem ve hesaplamalar yardımıyla, hem fazlara ait sinyal süreleri hem de faz planları belirli periyodlarla dinamik olarak güncellenmektedir. Böylece, kavşaktaki denetim

sisteminin, kavşak yaklaşımlarındaki trafik taleplerindeki değişimlere duyarlı bir şekilde işletilmesi sağlanmaktadır.

Sinyalize kavşaklar için geliştirilen SFOTD ile genel olarak;

- Sinyalize kavşakların güvenli bir şekilde yönetilmesinin,
- Sinyalize kavşakların maksimum kapasite ile işletiminin sağlanmasının,
- Kavşakta yaşanan zaman kayıplarının minimum düzeye indirgenerek, seyahat sürelerinin düşürülmesinin sağlanmasının,
- Uzun süreli bekleme ve duruşların önüne geçilerek, seyahat kalitesinin artırılmasının,
- Sürdürülebilir ulaşımın gerçekleştirilebilmesi için önemli önceliklerden olan yakıt tüketiminin ve egzoz emisyonlarının minimize edilmesinin,
- Taşıtların kavşakta bekleme ve durma sürelerine paralel olarak oluşan gürültü kirliliğinin minimize edilmesinin,

hedeflendiği söylenebilir.

Bu çalışmada, öncelikli olarak, farklı denetim tiplerinin kavşak performansı üzerindeki etkilerinin değerlendirilebilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, çalışma kapsamında geliştirilen SFOTD modeli, birbirinden farklı trafik hacim senaryoları göz önünde bulundurularak, optimum sabit zamanlı denetim (OSZD) ve trafik uyarmalı denetim (TUD) modelleri ile karşılaştırılmıştır. Bir sonraki aşamada ise, analizler ile elde edilen sonuçlardan yola çıkarak, akım bazlı (sağa dönen, sola dönen, düz giden) trafik taleplerinin, SFOTD modelinin başarımı üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Son olarak da, analiz çalışmalarından elde edilen sonuç ve bulgulardan yararlanılarak, SFOTD modelinin tüm olumlu ve olumsuz yönleriyle genel bir değerlendirmesinin yapılması amaçlanmıştır.

### 1.3 Tezin Kapsamı

Bu çalışma 6 bölümden oluşmaktadır.

Çalışmanın ikinci bölümünde, öncelikli olarak, optimizasyon kavramının genel bir tanımı yapılmış ve optimizasyonun bölümlerinden bahsedilmiştir. Daha sonra, meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları, bu algoritmaların özellikleri ve sınıflandırılması detaylı olarak ele alınmıştır. Bu bölümde son olarak ise, çalışma kapsamında kullanılan Diferansiyel Gelişim Algoritması ile ilgili genel bilgiler verilmiş ve bu algoritmaya ait işlem adımları detaylı olarak açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde, sinyalize kavşakların işletim performanslarının belirlenmesinde ve değerlendirilmesinde kullanılan bir parametre olan gecikmeye yer verilmiştir. Gecikmenin ölçümü, modellemesi (Webster, HCM, Avustralya) ve tahmini ile ilgili kısa değerlendirmeler yapılmıştır. Bu bölümde son olarak ise, harekete dayalı sinyal tasarımının amaçlandığı Avustralya (Akçelik) gecikme modeli sunulmuştur.

Dördüncü bölümde, öncelikli olarak, tez çalışması kapsamındaki analiz çalışmaları için oluşturulan üç ve dört kollu sinyalize kavşak modellerinden bahsedilmiş ve bu modellere ait çeşitli bilgiler verilmiştir. Daha sonra ise, söz konusu kavşak modelleri üzerinde uygulanacak olan farklı kavşak denetim tipleri (**Optimum Sabit Zamanlı Denetim – OSZD / Trafik Uyarmalı Denetim – TUD / Sinyal süreleri ve Faz Optimizasyonu Tabanlı Denetim - SFOTD**) detaylı olarak açıklanmıştır.

Beşinci bölüm, çalışma kapsamında yapılan analizlerden oluşmaktadır. Bu bölümde, öncelikli olarak, VISSIM' in VISVAP uygulaması ile oluşturulan Trafik Uyarmalı Denetim - TUD kontrol mantığı, dört kollu kavşak modelinde, 20 trafik senaryosu üzerinde, talepte dalgalanma olup olmaması durumları göz önünde bulundurularak, test edilmiştir. Daha sonra ise, Sinyal süresi ve Faz Optimizasyonu Tabanlı Denetim – SFOTD' in etkinliğinin belirlenmesi amacıyla, hem üç kollu hem de dört kollu sinyalize kavşak modelleri için 42 farklı trafik senaryosu oluşturulmuş ve her bir senaryo tüm denetim tipleri (OSZD – TUD – SFOTD) göz önünde bulundurularak, VISSIM simülasyon programında ayrı ayrı analiz edilmiştir. Bir sonraki aşamada da, her bir trafik senaryosu için, farklı denetim tipleri uygulanarak

elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Tüm analizlere ait ortalama taşıt gecikmeleri ve ortalama taşıt gecikmesi karşılaştırmaları tablo ve grafikler halinde sunulmuştur.

Çalışmanın son bölümünde ise, çalışmanın tamamında elde edilen sonuçlar ve bulgular geniş bir perspektifte değerlendirilip özetlenerek, ileriye yönelik yapılacak olan çalışmalara ilişkin çeşitli öneriler sunulmuştur.

## 2. OPTİMİZASYON

Optimizasyon; bir sistemde var olan kaynakları (işgücü, zaman, para, süreçler, hammadde, ekipman vb.) verimli bir şekilde kullanarak, belirli amaçlara (maliyetin enazaltılması, kârın ençoklanması, kapasite kullanımının enyükseltilmesi, verimliliğin ençoklanması vb.) ulaşmayı sağlayan bir teknoloji olarak tanımlanmaktadır (Türkey 2016). Diğer bir deyişle, herhangi bir problem için, belirli koşullar altında, mevcut alternatiflerden en iyisini veya en uygun olanını seçme ve belirleme işlemidir (Akyol ve Alataş 2012). Matematiksel olarak ifade etmek gerekirse, bir fonksiyonun maksimize veya minimize edilmesi olarak da tanımlanabilmektedir.

Özellikle son 30-35 yıldır, dünyadaki birçok ülkede görülen ekonomik ve teknolojik gelişmeler, kaynak kısıtlılıkları, rekabet artışları ve hemen hemen her alanda daha karmaşık hale gelen sistemler birçok problemin ortaya çıkmasına sebep olmuş ve bu problemlerin klasik yöntemler ile çözümü çok zor bir hale gelmiştir. Bu yüzden, çoğu zaman, çözümü oldukça güç olan bu problemlerin çözüme kavuşturulabilmesi için optimizasyona başvurulmuştur. Günümüzde de mühendislik, sağlık, ekonomi alanlarındaki problemler başta olmak üzere birçok problemin çözümünde optimizasyona başvurulmaya devam edilmektedir (Şensoy ve diğ. 2014; Yasar 2016; Baskan ve Ozan 2018). Bu durum, bugün halen daha optimizasyon kavramının güncelliğini koruduğunun önemli bir göstergesidir (Şen 2004; Karaboğa 2014).

Optimizasyon, gerçek hayatta karşılaşılan problemlerin matematiksel olarak ifade edildiği *Modelleme* bölümü ile modelin tüm şartlarını sağlayan en iyi çözümün (çözümlerin) araştırılıp elde edildiği *Çözümleme* bölümünden oluşmaktadır. Modelleme bölümünde, karşılaşılan problem için amaç fonksiyonu, kısıtlar seti, değişkenlere ait alt ve üst sınır değerleri matematiksel olarak belirlenmekte ve bir optimizasyon modeli oluşturulmaktadır. Çözümleme bölümünde ise Modelleme bölümündeki tüm faktörler göz önünde bulundurularak problemin çözümü gerçekleştirilmektedir.

Örnek bir optimizasyon problemi genel olarak Şekil 2.1' de gösterildiği gibi ifade edilmektedir (Keskintürk 2006).



<p>minimize <math>f(\mathbf{x})</math></p> <p>kısıtlar <math>g_k(\mathbf{x}) \leq 0</math></p> $x_{j,min} \leq x_j \leq x_{j,max} \quad j = 1, 2, 3, \dots, n$ <p>Burada;</p> <p><math>f(\mathbf{x})</math>: Amaç fonksiyonu</p> <p><math>g_k(\mathbf{x})</math>: Kısıtlar seti</p> <p><math>\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]</math>: Karar değişkenleri vektörü</p> <p><math>x_{j,min}</math> ve <math>x_{j,max}</math>: Değişkenlere ait alt sınır ve üst sınır değerleri</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Şekil 2.1:** Örnek bir optimizasyon problemi

Şekil 2.1' den de görüldüğü üzere, optimizasyon probleminde amaç, çözüm uzayı içerisinde, probleme ait tüm kısıtların sağlandığı en uygun çözüme ulaşmaktır.

## 2.1 Meta-Sezgisel Optimizasyon Algoritmaları

Optimizasyon problemleri deterministik ve stokastik teknikler kullanılarak çözülebilmektedir. Deterministik tekniklerin uygulanabilmesi için fonksiyonun türevlenebilir ve sürekli olması gerekmektedir. Fonksiyonun türevlenebilir olmadığı durumlarda ise stokastik teknikler kullanılmaktadır (Baskan ve diğ. 2009). Stokastik tekniklerde global optimum (yaklaşık global optimum) noktalara erişim rastgele araştırma yöntemleri ile gerçekleştirilmektedir. Bu yüzden, stokastik teknikler, optimizasyon problemlerinin çözümünde herhangi bir türev bilgisi gerektirmediği için, deterministik tekniklere kıyasla daha anlaşılabilir ve daha basittirler (Manjarres ve diğ. 2013). Basitlik ve anlaşılabilirlik düzeyleri yüksek olan stokastik teknikler kapsamında, bu güne kadar, birçok araştırmacı birçok farklı çözüm yaklaşımı geliştirmiş ve halen geliştirmeye devam etmektedir. Sayıları büyük bir hızla artan bu çözüm yaklaşımları, meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları olarak da adlandırılmaktadır.

Meta-sezgisel algoritmalar, herhangi bir amacı gerçekleştirmek veya hedefe varmak için çeşitli alternatif hareketlerden etkili olanlara karar vermek amacı ile tanımlanan kriterler veya bilgisayar metotlarıdır (Akyol ve Alataş 2012). Bu tip

algoritmaların çözüm uzayında optimum çözüme yakınsaması matematiksel olarak gösterilememektedir. Bu yüzden, global çözümü (optimum çözüm) garanti edememektedirler. Fakat, global çözüme yakın bir çözümü (yaklaşık optimum çözüm) garanti etmektedirler. Basitlik, etkinlik, esneklik, uygulama kolaylığı gibi özelliklerinden dolayı günlük hayatta karşılaşılan farklı optimizasyon problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılmaktadırlar.

Meta-sezgisel algoritmaların ana bileşenleri keşif ve sömürü' dür. Keşif, algoritmanın, çözüm uzayının farklı bölgelerine ulaşmasını sağlamaktadır. Sömürü ise verilen bölgedeki optimum çözümlerin aranmasını sağlamaktadır (Lozano ve Garcia-Martinez 2010). Bir optimizasyon probleminde, optimum çözümün elde edilebilmesi için bu bileşenlerin çok iyi dengelenmesi ve ayarlanması gerekmektedir. Optimizasyon problemlerinin birçoğunun konveks olmayan yapısından dolayı bu bileşenler arasındaki dengeyi sağlamak oldukça zordur. Bu yüzden, herhangi bir meta-sezgisel algoritmanın, farklı problemlerin çözümündeki performansı birbirinden farklı olabilmektedir. Bu durum, araştırmacıları, sürekli olarak yeni meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları geliştirmeye teşvik etmektedir (Dhiman ve Kumar 2017).

Meta-sezgisel algoritmalar ana çerçevede; evrim, fizik, sürü, biyocoğrafı ve doğa (çevre) tabanlı olmak üzere 5 farklı kategoride sınıflandırılmaktadır (Dhiman ve Kumar 2017; Kumar ve Bawa 2019). Evrim tabanlı algoritmalar, biyolojik evrimden esinlenen genel popülasyon tabanlı meta-sezgisel algoritmalarlardır. Bu tip algoritmalar, güçlü olan bireyin hayatta kalmaya devam ettiği zayıf olan bireyin ise elendiği doğal seçim teorisi göz önünde bulundurularak oluşturulmaktadır. GA ve Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA), en fazla bilinen ve kullanılan evrim tabanlı meta-sezgisel algoritmalarlardır. Fizik tabanlı meta-sezgisel algoritmalarda, arama araçları (arama etmenleri) arama uzayında yer çekimi kuvveti, elektromanyetik kuvvet, eylemsizlik kuvveti vb. gibi fizik kurallarına göre iletişim kurmakta ve ilerlemektedir. Tavlama Benzetimi Algoritması, Merkezi Kuvvet Optimizasyonu Algoritması ve Büyük Patlama-Büyük Kriz Algoritması fizik tabanlı algoritmalarından bazılarıdır. Sürü tabanlı algoritmalar, sosyal yaratıkların toplu hareketlerine dayalı olan meta-sezgisel algoritmalarlardır. Kolektif zekâ, sürüyü oluşturan her bir bireyin birbirleri ve çevreleri ile olan ilişkilerinden kaynaklanmaktadır. Sürü tabanlı meta-sezgisel algoritmalarından en popüler olanları Parçacık Sürü Optimizasyonu

Algoritması ve Karınca Kolonisi Optimizasyonu Algoritması' dır. Sürü tabanlı algoritmalar evrim tabanlı algoritmalara kıyasla daha az sayıda operatör içerdiği için, sürü tabanlı algoritmaların uygulamaları evrim tabanlı algoritmaların uygulamalarına kıyasla daha basittir (Kumar ve Bawa 2019). Biyocoğrafi tabanlı algoritmalar, deniz canlılarının ve bazı hayvanların yiyecek arama ve avlanma davranışları göz önünde bulundurularak geliştirilen meta-sezgisel algoritmalarlardır. Benekli Sırtlan Optimizasyonu Algoritması, Gri Kurt Optimizasyonu Algoritması biyocoğrafi tabanlı meta-sezgisel algoritmalarından bazılarıdır. Doğa tabanlı algoritmalar, kılavuzlu arama prosedürüne dayalıdır. Bu tip algoritmalarda, popülasyon daima doğadan esinlenmektedir. Bazı durumlarda, doğa tabanlı algoritma, ilham kaynağına bağlı olarak kimyasal ve biyolojik bir sistem olabilmektedir. Guguk Kuşu Arama Algoritması, Çiçek Tozlaşma Algoritması, Ateş Böceği Algoritması popüler doğa tabanlı meta-sezgisel algoritmalarından bazılarıdır. Şekil 2.2' de, meta-sezgisel algoritmaların sınıflandırması gösterilmektedir. Bununla birlikte, farklı sınıflara ait algoritmalarından bazı örnekler de detaylı olarak verilmektedir.



**Şekil 2.2:** Meta-sezgisel algoritmaların sınıflandırması

Şekil 2.2' den görüldüğü üzere, optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirilen birçok meta-sezgisel optimizasyon algoritması mevcuttur. Ayrıca, özellikle son on yıldır, algoritmaların çözüm performansını arttırmak için farklı iki meta-sezgisel algoritmanın birbirleriyle hibritlendiği (etkileştirildiği) yeni melez algoritmalar da geliştirilmiştir (Zachariadis ve diğ. 2009; Wang ve Guo 2013; Dhiman ve Kaur 2019). Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda, meta-sezgisel algoritmalar için gelişme, geliştirme ve yeniliklerin ilerleyen zamanlarda da devam edeceği kolayca söylenebilmektedir.

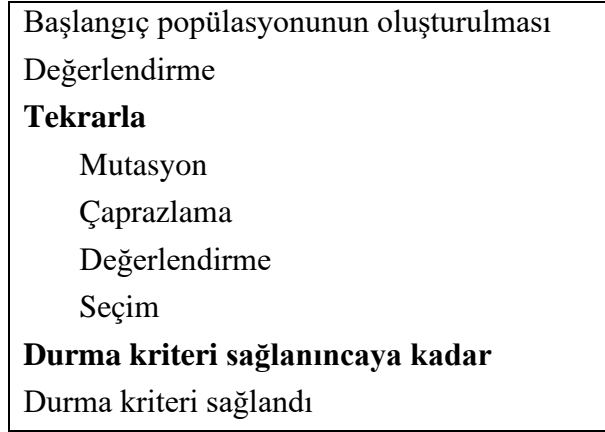
Literatürde, inşaat mühendisliği alanı ile ilgili optimizasyon problemlerinin yer aldığı çalışmalar incelendiğinde, bu çalışmaların önemli bir kısmında DGA' nın kullanıldığı görülmüştür (Gurarslan ve Karahan 2015; Deepika ve Suribabu 2015; Dogan ve Akgungor 2016; Korkmaz ve Akgungor 2017; Ramkumar ve Suribabu 2017). Söz konusu çalışmalar detaylı bir şekilde analiz edildiğinde ise DGA ile oldukça başarılı sonuçlar elde edilebildiği belirlenmiştir. Benzer şekilde, Murat ve Çakıcı (2015) tarafından yapılan çalışmada da, sinyalize bir kavşaktaki sinyal süreleri farklı trafik hacim senaryoları dikkate alınarak DGA, Armoni Arama Algoritması (AAA) ve PSO ile optimize edilmiş ve sonuç olarak, sinyal süresi optimizasyonu problemi için, en güçlü ve en güvenilir algoritmanın DGA olduğu görülmüştür (Çakıcı ve Murat 2015).

Bu tez çalışması kapsamında da izole sinyalize kavşaklardaki sinyal süreleri ve faz planının eşzamanlı optimizasyonu üzerine yoğunlaşıldığı için, optimizasyon sürecinde, literatürde sinyal süresi optimizasyonu ile ilgili daha önce yapılan çalışmalardan elde edilen olumlu sonuçlar da göz önünde bulundularak (Murat ve Çakıcı 2015; Akgüngör ve diğ. 2019; Baskan ve diğ. 2019), DGA' nın kullanılmasının uygun olacağına karar verilmiştir.

Çalışmanın bu bölümünde, son olarak, DGA ile ilgili genel bilgiler verilmiş ve söz konusu algoritmaya ait işlem adımları detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

### 2.1.1 Diferansiyel Gelişim Algoritması

1995 yılında Rainer Martin Storn ve Kenneth Price tarafından geliştirilen DGA, gerçek değerli optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan, özellikle sürekli verilerin söz konusu olduğu optimizasyon problemlerinde etkin sonuçlar sağlayabilen, işleyiş ve operatörleri itibariyle GA' ya benzeyen stokastik araştırmalara dayalı evrim tabanlı bir algoritmadır (Storn ve Price 1997; Mayer ve diğ. 2005; Keskin 2006; Khan ve diğ. 2014). DGA, diğer birçok meta-sezgisel algoritmaya kıyasla, hızlı, basit, kolayca kodlanabilir-kullanılabilir-değiştirilebilir ve hesaplama maliyeti açısından avantajlı olması nedeniyle birçok problemin çözümünde kullanılmış ve halen kullanılmaya devam etmektedir (Shiakolas ve diğ. 2005; Elci ve Ayvaz 2014; Başkan ve Ceylan 2014; Kamal ve İnel 2019). DGA' nın temel basamakları Şekil 2.3' de sunulmaktadır (Karaboğa 2014).



**Şekil 2.3:** DGA temel adımları (Karaboğa 2014)

Şekil 2.3' den de görüldüğü üzere, DGA' da oluşturulan başlangıç popülasyonu, mutasyon - çaprazlama ve seçim işlemleri uygulanarak, probleme ait en iyi değer elde edilmesi amacıyla, iterasyonlar boyunca algoritma durma kriteri sağlanıncaya kadar iyileştirilmektedir (Başkan 2019).

DGA' nın, genel yapısı itibariyle evrim tabanlı meta-sezgisel algoritmaların atası olarak kabul edilen GA' ya benzediği söylenebilmektedir. Fakat bazı noktalarda bu iki algoritma arasında bir takım farklılıklar bulunmaktadır. Örneğin, herhangi bir optimizasyon problemi, GA' da ikilik sayı dizileri ile kodlanarak çözülebilmeye rağmen, DGA' da onluk sayı dizileri (gerçek sayı dizileri) ile kodlanarak çözülmektedir (Tan ve diğ. 2020). Bununla birlikte, daha önce de belirtildiği üzere,

DGA' da da, GA' ya benzer şekilde mutasyon, çaprazlama ve seçim operatörleri kullanılmaktadır. Söz konusu operatörler, GA' da popülasyondaki bireylerin (kromozomların) tamamına sırasıyla uygulanmasına rağmen, DGA' da popülasyondaki tüm bireylere sırasıyla uygulanmamaktadır. Popülasyondaki her bir birey, popülasyondan rastgele seçilen 3 farklı bireyden mutasyon ve çaprazlama operatörleri kullanılarak elde edilen yeni bir birey ile karşılaştırılmakta ve amaç fonksiyonu bazında uygunluğu daha iyi olan birey, seçim operatörü kullanılarak seçilip bir sonraki jenerasyona aktarılmaktadır (Liu ve diğ. 2010).

DGA' nın işletilebilmesi için kullanıcı tarafından belirlenmesi gereken 4 farklı parametre bulunmaktadır. Bu parametreler: Popülasyon boyutu ( $p$ ), Mutasyon - Ölçekleme faktörü ( $F$ ), Çaprazlama oranı ( $CR$ ) ve Maksimum jenerasyon (iterasyon) sayısı ( $G_{max}$ )' dır. DGA ile bir optimizasyon probleminin çözümü, aşağıdaki işlem adımları sırasıyla takip edilerek gerçekleştirilmektedir:

### 1) Kontrol Parametrelerinin Belirlenmesi:

DGA' da popülasyon büyüklüğü sabit veya değişken olabilmektedir. Mutasyon ve çaprazlama operatörleri için rastgele seçilen 3 farklı birey de göz önünde bulundurulduğunda, popülasyonun büyüklüğünün ( $p$ ) 4' e eşit veya 4' den büyük olması gerekmektedir. Literatürde, Mutasyon-Ölçekleme faktörü ( $F$ ) için de 0 ile 2 arasında bir değer önerilmektedir. Daha önce yapılan bazı çalışmalar incelendiğinde, bu değer, genel olarak 0,5 ile 1 aralığında seçildiği görülmüştür. Çaprazlama oranı ( $CR$ ) da olasılığı temsil ettiği için 0 ile 1 arasında değişmekle birlikte, literatürdeki tavsiye edilen değeri 0,8 ile 1 aralığındadır (Karaboğa 2014). Algoritmanın durdurulması için gerekli olan maksimum jenerasyon sayısı ( $G_{max}$ ) da kullanıcı tarafından belirlenmekte olup optimizasyon probleminin karmaşık olup olmaması vb. durumlarına göre değişiklik gösterebilmektedir. Maksimum jenerasyon sayısı arttıkça, algoritmanın çözüm süresi de artmaktadır. Bazı durumlarda, optimizasyon probleminde yer alan değişkenlere ait kısıtlamalar söz konusu olabilmektedir. Böyle durumlarda, değişkenlere ait alt sınır ( $x_{j,min}$ ) ve üst sınır ( $x_{j,max}$ ) değerleri de, başlangıçta kullanıcı tarafından belirlenmektedir. Burada,  $j$  alt indisi probleme ait değişkenleri temsil etmektedir (Başkan ve Ceylan 2014; Gökçe 2014).

## 2) Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması:

DGA' da başlangıç popülasyonu  $p$  sayıda çözüm vektöründen oluşmakta ve bu çözüm vektörlerinin her biri kromozom olarak adlandırılmaktadır. Bununla birlikte, her bir çözüm vektörü de karar değişkenlerinden (genlerden) meydana gelmektedir. Algoritmanın  $p \times n$  boyutlu başlangıç popülasyonundaki  $(\mathbf{x}_{i,G})$   $i$  numaralı çözüm vektörü içinde bulunan  $j$  numaralı karar değişkeninin  $G=0$  iterasyonundaki başlangıç değeri Eşitlik 2.1 kullanılarak oluşturulmaktadır:

$$\forall_i \leq p \wedge \forall_j \leq n: x_{i,j,G=0} = x_{j,min} + rand(0,1) \times (x_{j,max} - x_{j,min}) \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1' de;

$G$ : Jenerasyon indisi

$x_{i,j,G=0}$ : Başlangıç jenerasyonunda (Jenerasyon  $G=0$ )  $i$  numaralı aday çözüm içerisinde bulunan  $j$  numaralı karar değişkeninin başlangıç değeri

$x_{j,max}$ :  $j$  numaralı karar değişkeninin üst sınır değeri

$x_{j,min}$ :  $j$  numaralı karar değişkeninin alt sınır değeri

$rand(0,1)$ : 0 ile 1 arasında rastgele üretilen sayı' dır.

Başlangıç popülasyonunun oluşturulmasının ardından mutasyon, çaprazlama ve seçim operatörleri  $G_{max}$  defa uygulanmakta ve son jenerasyondaki en iyi çözüm, problemin sonuç çözümü olarak belirlenmektedir.

## 3) Mutasyon İşleminin Gerçekleştirilmesi:

DGA' da, algoritmanın performansını geliştiren ve algoritmayı daha güçlü bir hale getiren operatör, mutasyon operatörüdür. Mutasyon operatörü ile mevcut kromozomun genleri üzerinde rastgele değişiklikler yapılmakta ve mevcut vektörleri doğru zamanda, doğru miktarda ve doğru yönde hareket ettirecek artışlar gerçekleştirilmektedir (Karaboğa 2014). DGA' da, mutasyon işleminin gerçekleştirilebilmesi için, mevcut kromozom dışında birbirlerinden farklı 3 kromozomun ( $r_1, r_2, r_3$  ve  $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i$ ) seçilmesi gerekmektedir. Mutasyon işleminde, öncelikli olarak, seçilen ilk kromozomdan ikinci kromozom çıkartılmakta

ve sonuç olarak elde edilen fark kromozomu daha önce belirlenen Mutasyon-Ölçekleme faktörü ( $F$ ) ile çarpılmaktadır. Bir sonraki aşamada, ağırlıklandırılmış fark kromozomu seçilen üçüncü kromozom ile toplanmakta ve çaprazlama işleminde kullanılacak olan yeni bir çözüm vektörü ( $\mathbf{v}_{i,G}$ ) elde edilmektedir. Mutasyon işleminin matematiksel ifadesi Eşitlik 2.2' de verilmektedir:

$$\mathbf{v}_{i,G} = \mathbf{x}_{r_3,G} + F \times (\mathbf{x}_{r_1,G} - \mathbf{x}_{r_2,G}) \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2' de;

$\mathbf{v}_{i,G}$ : Jenerasyon  $G$ ' de, mutasyon operatörü kullanılarak  $\mathbf{x}_{i,G}$  vektöründen elde edilen yeni bir çözüm vektörü

$r_k$ :  $[1, p]$  çözüm aralığında rastgele üretilmiş tamsayılar ( $k = 1, 2, 3$ )

$\mathbf{x}_{r_1,G}$ : Jenerasyon  $G$ ' de, mutasyon işlemi için rastgele seçilen birinci kromozoma ait çözüm vektörü

$\mathbf{x}_{r_2,G}$ : Jenerasyon  $G$ ' de, mutasyon işlemi için rastgele seçilen ikinci kromozoma ait çözüm vektörü

$\mathbf{x}_{r_3,G}$ : Jenerasyon  $G$ ' de, mutasyon işlemi için rastgele seçilen üçüncü kromozoma ait çözüm vektörü' dür.

#### 4) Çaprazlama İşleminin Gerçekleştirilmesi:

DGA' da, çaprazlama işleminin amacı, karar değişkenlerinden (genlerden) faydalanarak yeni çözüm vektörleri (kromozomlar) oluşturmak suretiyle problemin çözümünün bulunmasını sağlamaktır (Karaboğa 2014). Bu işlem gerçekleştirilirken, mutasyon sonucunda elde edilen çözüm vektörü ve jenerasyon  $G$ ' deki mevcut çözüm vektörü ( $\mathbf{x}_{i,G}$ ) kullanılarak,  $G+1$  jenerasyonuna aday, deneme vektörü ( $\mathbf{u}_{i,G}$ ) oluşturulmaktadır. Deneme kromozomu ( $\mathbf{u}_{i,G}$ )' na ait her bir gen  $CR$  olasılıkla mutasyon sonucu oluşan yeni çözüm vektörü ( $\mathbf{v}_{i,G}$ )' nden,  $(1-CR)$  olasılıkla ise mevcut çözüm vektörü ( $\mathbf{x}_{i,G}$ )' nden seçilmektedir. DGA' da, çaprazlama işlemine olasılık ( $CR$ ) ve  $(1-CR)$  katılarak, GA' da düzenli olarak gerçekleştirilen çaprazlamanın dışına çıkılmaktadır. Yani, GA' da çaprazlama işleminde eşit olasılık durumu mevcut iken, DGA' da  $CR$  olasılığı söz konusudur ve bu değer kullanıcı



tarafından belirlenmektedir (Keskintürk 2006). 0 ile 1 arasında üretilen rastgele sayı belirlenen  $CR$  değerinden küçük ise gen, mutasyon sonucunda oluşan yeni çözüm vektörü ( $\mathbf{v}_{i,G}$ )'nden seçilmektedir. Aksi durumda ise, mevcut vektör ( $\mathbf{x}_{i,G}$ )'den alınmaktadır. Böylelikle, belirlenen oranda genin mutasyon sonucu oluşan yeni kromozom'dan seçilmesi amaçlanmaktadır. Çaprazlama işlemi sonrasında elde edilen yeni çözüm vektöründeki değişkenler (genler) Eşitlik 2.3' de gösterildiği gibi belirlenmektedir:

$$u_{i,j,G} = \begin{cases} v_{i,j,G} & \text{eğer } rand(0,1) \leq CR \quad \vee \quad j = j_{rand} \\ x_{i,j,G} & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (2.3)$$

Eşitlik 2.3' de;

$u_{i,j,G}$ : Jenerasyon  $G+1$  için, çaprazlama işlemi sonrasında elde edilen yeni çözüm vektöründeki  $j$  değişkeni

$x_{i,j,G}$ :  $G$  jenerasyonundaki  $i$ . çözüm vektörünün  $j$ . karar değişkeni

$v_{i,j,G}$ :  $G$  jenerasyonunda mutasyon işlemi sonucu oluşturulan  $i$ . çözüm vektörünün  $j$ . karar değişkeni

$rand(0,1)$ : Mutasyon sonucu oluşturulan yeni kromozomdan veya mevcut kromozomdan hangisinden yapılacağını belirlemek amacıyla 0 ile 1 arasında üretilen rastgele sayı

$j_{rand}$ :  $[1, n]$  kapalı aralığında rastgele olarak üretilmiş üniform dağılıma sahip tam sayı'dır.

Buradaki  $j = j_{rand}$  şartı ile bir sonraki jenerasyon ( $G+1$ ) için oluşturulan çözüm vektörünün en az bir değişkeninin, mutasyon işlemi sonucunda oluşturulan yeni kromozomdan alınması garanti edilmektedir. Böylece, mutasyon ve çaprazlama operatörleri uygulanarak elde edilen yeni çözüm vektörünün mevcut vektörden farklı olması sağlanmaktadır.

## 5) Değerlendirme:

Değerlendirme aşamasında, mutasyon ve çaprazlama işlemlerinin ardından elde edilen yeni çözüm vektörüne ( $\mathbf{u}_{i,G}$ ) ait uygunluk değeri belirlenmektedir. Bu aşamada, deneme kromozomu ( $\mathbf{u}_{i,G}$ )'na ait değişkenlerin tümü ( $u_{i,j,G}$ ), optimizasyon probleminin amaç fonksiyonundaki ilgili yerlere yerleştirildikten sonra amaç fonksiyonunun değeri hesaplanmaktadır.

## 6) Seçim İşleminin Gerçekleştirilmesi:

Bu aşamada, yeni çözüm vektörünün (deneme kromozomunun) uygunluk değeri ile mevcut kromozomun uygunluk değeri birbirleri ile karşılaştırılmaktadır. Mevcut kromozomun uygunluğunun daha iyi olması durumunda mevcut kromozom en az bir jenerasyon daha popülasyonda kalmaktadır. Aksi durumda ise deneme kromozomu, popülasyonun yeni bireyi olarak bir sonraki jenerasyona aktarılmaktadır. Seçim işleminin matematiksel ifadesi Eşitlik 2.4' de gösterilmektedir:

$$\mathbf{x}_{i,G+1} = \begin{cases} \mathbf{u}_{i,G} & \text{eğer } f(\mathbf{u}_{i,G}) \leq f(\mathbf{x}_{i,G}) \\ \mathbf{x}_{i,G} & \text{diğer durumda} \end{cases} \quad (2.4)$$

Eşitlik 2.4' de;

$\mathbf{x}_{i,G}$ : Mevcut çözüm vektörü

$\mathbf{u}_{i,G}$ :  $G+1$  jenerasyonuna aday yeni çözüm vektörü

$f(\mathbf{x}_{i,G})$ : Mevcut çözüm vektörü için hesaplanan amaç fonksiyonu (uygunluk) değeri

$f(\mathbf{u}_{i,G})$ : Mutasyon ve çaprazlama sonucu oluşan yeni çözüm vektörü için hesaplanan amaç fonksiyonu (uygunluk) değeri

$\mathbf{x}_{i,G+1}$ : Seçim işlemi sonucunda, ( $G+1$ )' inci jenerasyona aktarılan çözüm vektörü (kromozom)' dür.

## 7) Algoritmanın Durdurulması:

DGA' da, mutasyon, çaprazlama, değerlendirme ve seçim operatörleri tekrarlanarak yeni jenerasyonlar oluşturulmaktadır. Böylece, söz konusu tekrarlı işlemler ile daha iyi uygunluk değerine sahip olan kromozomlar elde edilmekte ve

fonksiyonun optimum veya yaklaşık optimum değerine ulaşılmaya çalışılmaktadır. İteratif mutasyon, çaprazlama, değerlendirme ve seçim işlemlerin toplam tekrar sayısı ( $G_{max}$ ), daha önce de belirtildiği üzere, kullanıcı tarafından belirlenmekte olup  $G_{max}$  tekrar sayısına ulaşıldığında algoritma otomatik olarak durdurulmaktadır. Bununla birlikte, algoritmanın durdurulma kriteri, en kötü ve en iyi uygunluk değerleri arasındaki farkın çok düşük bir değere ( $10^{-6}$  vb.) ulaşması olarak da belirlenebilmektedir (Ali ve Törn 2004). Bu değer, kullanıcının tercihine bırakılmaktadır.

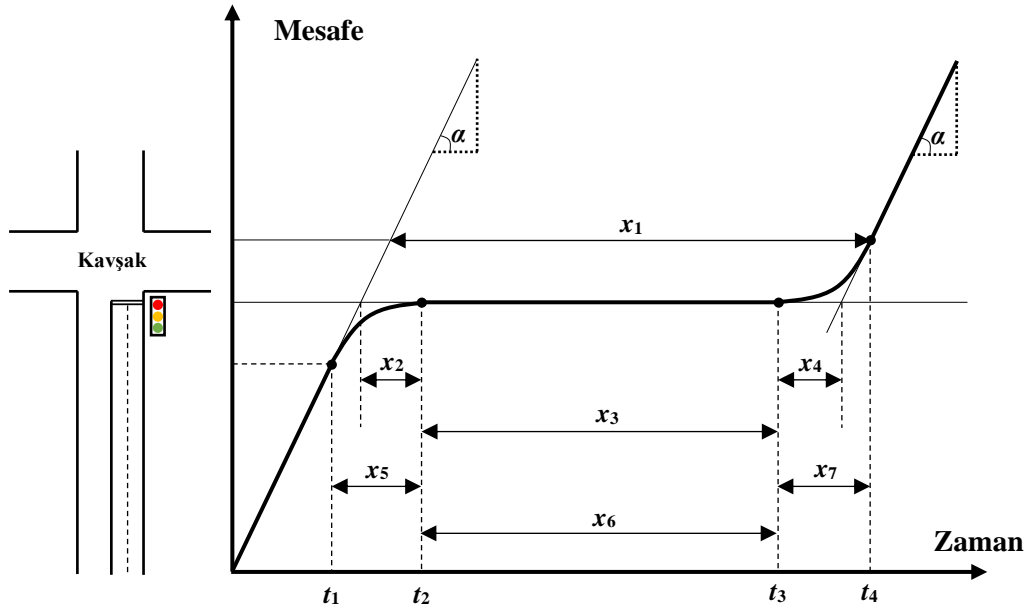
#### **8) Problemin Sonuçlandırılması:**

Algoritmanın sonlandırılmasının ardından, popülasyon içerisinde uygunluğu en iyi olan birey, sonuç çözüm vektörü olarak isimlendirilmektedir. Sonuç çözüm vektöründeki genlere ait sayısal değerler ise, mevcut optimizasyon problemi için, değişkenlerin optimum veya yaklaşık optimum değerlerini ifade etmektedir.

### 3. PERFORMANS PARAMETRESİ: GECİKME

Gecikme; sinyalize kavşakların yaklaşım kollarında bulunan taşıtların, kavşaktaki diğer taşıtlar, kavşak geometrisi ve sinyalizasyon sistemleri nedeniyle, kavşakta kaybettiği zaman olarak tanımlanmaktadır. Gecikme parametresi, yavaşlama - durma ve hızlanma gecikmesi olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır. Kavşağa yaklaşan taşıt sürücüsünün sinyalizasyon sisteminden dolayı hızını yavaşlatmaya başladığı andan itibaren, sinyalizasyon sistemi nedeni ile durmaya başladığı ana kadar geçen süre yavaşlama gecikmesi olarak tanımlanmaktadır. Taşıtların sinyalize kavşakta kırmızı sinyal süresince beklemesinden (durmaktan) dolayı kaybettiği zaman durma gecikmesi olarak isimlendirilirken, sinyal gösterimi kırmızıdan yeşile döndükten sonra taşıtların tekrar hızlanması için gereken süre de hızlanma gecikmesi olarak belirtilmektedir (Murat ve Çakıcı 2017).

Sinyalize bir kavşakta, sinyalizasyon sistemi nedeni ile beklemeye maruz kalan bir taşıta ait temsili Mesafe-Zaman grafiği Şekil 3.1’ de detaylı olarak sunulmaktadır (Darma ve diğ. 2005):



$\tan \alpha$ : İstenen seyir hızı	$x_1$ : Kontrol gecikmesi	$x_2$ : Yavaşlama gecikmesi
$x_3$ : Durma gecikmesi	$x_4$ : Hızlanma gecikmesi	$x_5$ : Yavaşlama süresi
$x_6$ : Durma süresi	$x_7$ : Hızlanma süresi	$t_1$ : Yavaşlama başlar
$t_2$ : Durma başlar	$t_3$ : Durma biter ve hızlanma başlar	$t_4$ : Hızlanma biter

Şekil 3.1: Sinyalize bir kavşakta beklemeye (durmaya) maruz kalan bir taşıta ait mesafe-zaman grafiği

Şekil 3.1' den de görüldüğü üzere, yavaşlama - durma ve hızlanma gecikmelerinin toplamına eşit olan kontrol gecikmesi, kavşakların işletim performanslarının belirlenmesinde kullanılan en önemli parametrelerden birisidir (Mousa 2002). Bu yüzden, literatürde, sinyalize kavşaklardaki gecikmenin ölçümü, modellemesi ve tahmini ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır.

Gecikme ölçümü ile ilgili çalışmalar genel olarak arazi gözlemlerini ve arazi çalışmalarını içermektedir. Gecikme modellemesi ise yaklaşık 60 yıldır birçok trafik mühendisi ve bilim insanı tarafından üzerinde yoğun şekilde çalışılan bir konudur (Webster 1958; HCM 2010). Webster, HCM ve Avustralya gecikme modelleri en çok kullanılan ve bilinen gecikme modelleridir (Murat 2006a). Oluşturulan modellerde gecikme parametresi, araziden gözlem yoluyla elde edilen verilerden (yeşil süre, devre süresi, doymun akım, trafik hacmi, akım oranı vb.) yararlanılarak, matematiksel olarak ifade edilmektedir. Modeller her ne kadar matematiksel temellere dayalı olarak oluşturulmuş olsalar da bazı durumlarda gerçeği yansıtabilme konusunda yetersiz kalabilmektedirler. Örneğin; Webster gecikme modeli, doymunluk derecesinin (talep/kapasite) 1,00' e yaklaştığı ve 1,00' den büyük olduğu durumlarda gerçekçi sonuçlar sağlayamamaktadır. Benzer şekilde, HCM ve Avustralya yöntemleri ile de doymun üstü durumlarda, aynı trafik durumları için aynı gecikme değerleri elde edilemeyebilmektedir (Akgungor 2008). Bununla birlikte, bu analitik yöntemler ile elde edilen gecikme değerleri ve gerçek hayatta araziden elde edilen gecikme değerleri arasında da farklılıklar görülebilmektedir. Bu durum, bölgeden bölgeye (ülkeden ülkeye) farklılık gösteren sürücü davranışı faktörünün, gecikme parametresi üzerinde oldukça önemli olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Bazı analitik modellerin yetersizliklerinden, bazılarının ise birbirleriyle ve/veya araziyle görülen uyumsuzluklarından dolayı, özellikle son 15-20 yıldır, birçok araştırmacı gecikmenin tahmini üzerine birçok çalışma yapmış ve halen daha yapmaya devam etmektedir (Dion ve diğ. 2004; Sekhar ve diğ. 2013). Farklı parametreler dikkate alınarak yapılan tahmin çalışmalarında yapay sinir ağları, kolay hesaplama yöntemleri, regresyon, BM vb. gibi farklı teknikler kullanılmıştır. Sonuç olarak, söz konusu teknikler ile sinyalize kavşaklardaki gecikmelerin tahmininde oldukça başarılı sonuçlar elde edilebileceği görülmüştür (Atalay 2004; Murat 2006b; Murat ve Baskan 2006; Martin ve diğ. 2016; Korkmaz ve Akgungor 2018).

HCM, sinyalize kavşakların hizmet düzeylerini kavşaktaki ortalama kontrol gecikmesinin bir fonksiyonu olarak belirtmektedir. Sinyalize kavşaklar için, ortalama kontrol gecikmesi ve hizmet düzeyi arasındaki ilişki Tablo 3.1’ de verilmektedir (HCM 2010).

**Tablo 3.1:** Sinyalize kavşaklar için ortalama kontrol gecikmesi ve hizmet düzeyi arasındaki ilişki (HCM 2010)

Hizmet Düzeyi	A	B	C	D	E	F
Ortalama Kontrol Gecikmesi (sn/ta)	$\leq 10$	10–20	20–35	35–55	55–80	$\geq 80$

Tablo 3.1’ den görüldüğü üzere, kavşaktaki ortalama kontrol gecikmesi arttıkça, kavşak hizmet düzeyi kötüleşmektedir. Bu yüzden, ortalama kontrol gecikmelerinin minimize edilmesi, trafik mühendisliğinin en önemli ve öncelikli konularından birisi olarak görülmektedir.

Düzgün ve standartlara uygun kavşak tasarımları ile birlikte yaklaşımlardaki ve hatta şeritlerdeki trafik hacimleri göz önünde bulundurularak yapılan en uygun sinyal süresi atamaları, ortalama kontrol gecikmelerinin azaltılmasında ve dolayısıyla kavşak performansının ve hizmet düzeyinin artırılmasında doğrudan bir etkiye sahiptir. Herhangi bir sinyalize kavşak için en uygun sinyal süreleri, kavşaktaki gecikmelerin minimum düzeye indirilebildiği sürelerdir. Bu sürelerin belirlenebilmesi için Webster, HCM, Avustralya modeli gibi analitik gecikme modellerinden faydalanılmaktadır. Bu üç model detaylı olarak incelendiğinde, Webster ve HCM gecikme modellerinin faza dayalı, Avustralya Gecikme modelinin ise harekete dayalı bir sinyal tasarımını amaçladığı görülmektedir (Webster 1958; HCM 2010; Akcelik 1998).

Bu tez çalışması kapsamında, sinyal süreleri ile birlikte faz planının da optimizasyonu hedeflendiği için, kavşak yaklaşımlarındaki trafik akımlarının birbirleriyle kesişme ve birbirlerine yaklaşma hareketleri, olası faz planlarının belirlenmesinde büyük bir önem arz etmektedir. Bu nedenle, oluşturulan üç kollu ve dört kollu sinyalize kavşak modellerindeki trafik akımlarının, faza dayalı sinyal tasarımından ziyade harekete dayalı sinyal tasarımı ile denetiminin daha uygun olacağına karar verilmiştir. Bu bağlamda, sinyal süresi ve faz planı optimizasyonu problemi Avustralya gecikme modeli göz önünde bulundurularak çözülmüştür. Bu

yüzden, bu çalışma kapsamında, Webster ve HCM gecikme modellerinin üzerinde durulmamış, Avustralya gecikme modeli üzerine yoğunlaşmıştır. Çalışmanın bu bölümünde, son olarak, Avustralya gecikme modeli detaylı olarak anlatılmaktadır.

### 3.1 Avustralya (Akçelik) Gecikme Modeli

Avustralya (Akçelik) gecikme bağıntısı ile bir hareket için toplam gecikmenin yaklaşık değeri Eşitlik 3.1 kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$TD = \frac{qC \times (1-\alpha)^2}{2 \times (1-y)} + N_o \beta \quad (3.1)$$

Eşitlik 3.1' de;

$TD$  : Toplam gecikme

$qC$  : Devre başına taşıt biriminden gelişlerin ortalama sayısı ( $q$ , saniye başına taşıt biriminden akım;  $C$ , saniye biriminden devre süresi)

$\alpha$  : Yeşil süre oranı ( $\alpha = g/C$ ;  $g$ , saniye biriminden etkin yeşil süre)

$y$  : Akım oranı ( $y = q/s$ ;  $s$ , saatlik taşıt biriminden doygun akım)

$N_o$  : Taşıt biriminden ortalama taşan kuyruk

$\beta$  : Doygunluk derecesi ( $\beta = q/Q$ )

$Q$  : Saniye başına taşıt biriminden kapasite' dir.

Eşitlik 3.1' de dikkat edilmesi gereken bir nokta bulunmaktadır. Gelen akım oranı kapasite altına düşene kadar ve kuyruklar sonraki devreler boyunca temizlenene kadar, taşan kuyruklar sürekli olarak artmaktadır. Avustralya (Akçelik) yönteminde, hem doygun altı ( $\beta < 1$ ) hem de doygun üstü ( $\beta > 1$ ) durumlardaki ortalama taşan kuyrukları tahmin etmek için, Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.3 kullanılmaktadır:

$$N_o = \left\{ \begin{array}{l} \frac{QT_f}{4} \left( z + \sqrt{z^2 + \frac{12(\beta - \beta_o)}{QT_f}} \right), \quad \beta \geq \beta_o \\ 0, \quad \beta < \beta_o \end{array} \right\} \quad (3.2)$$

$$x_o = 0.67 + \frac{sg}{600} \quad (3.3)$$

Eşitlik 3.2 ve Eşitlik 3.3' de;

$N_o$  : Taşıt biriminden ortalama taşan kuyruk

$T_f$  : Akım periyodu

$QT_f$  :  $T_f$  boyunca deşarj olabilen maksimum taşıt sayısı

$z$  :  $\beta - 1$  (Eğer  $\beta < 1$  ise  $z$  negatif değere sahiptir)

$\beta_o$  : Ortalama taşan kuyruğun yaklaşık olarak 0 olması altındaki doygunluk derecesi

$s$  : Saat başına taşıt biriminden doygun akım

$g$  : Saniye biriminden etkin yeşil süre

$sg$  : Devre başına taşıt cinsinden kapasite' dir.

Avustralya (Akçelik) gecikme modelinde, kavşak performans ölçütü olan ortalama kontrol gecikmesi ise Eşitlik 3.4 yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$d = \frac{TD}{q} \quad (3.4)$$

Eşitlik 3.4' de;

$d$  : Saniye başına taşıt biriminden ortalama kontrol gecikmesi' dir.



## 4. KAVŞAK MODELLERİ VE KAVŞAK DENETİM TİPLERİ

Çalışmanın bu bölümünde, öncelikli olarak, tez çalışması kapsamında yapılan analizlerde dikkate alınan üç kollu ve dört kollu sinyalize kavşak modellerinden bahsedilmiş ve bu modellere ait çeşitli bilgiler sunulmuştur. Daha sonra ise, oluşturulan üç kollu ve dört kollu sinyalize kavşak modellerinde uygulanan farklı kavşak denetim tipleri detaylı olarak anlatılmıştır.

### 4.1 Kavşak Modelleri

Kavşaklar, farklı yönlerden gelen trafik akımlarının kesiştiği, birleştiği/örüldüğü ve ayrıldığı karayolu kesimleridir (Çakıcı ve Murat 2015). Karayolu ağlarının kritik bölgeleri olmaları sebebiyle, çevre koşullarına en fazla uyumu gösterecek, kaza ihtimali – taşıt gecikmeleri – tesis bakım masrafları minimum olacak ve maksimum kapasiteyi sağlayacak şekilde projelendirilmelidirler (Murat 2007). Kavşakları farklı özelliklerini göz önünde bulundurarak farklı sınıflara ayırmak mümkündür. Bu özelliklerden birisi de kesişme düzlemidir. Kavşaklar, kesiştikleri düzlemin durumuna göre Eş düzey ve Farklı düzeyli kavşaklar olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.

Farklı düzeyli kavşaklarda, farklı kavşak yaklaşımlarındaki taşıtlar birbirleriyle kesişmemektedir. Bu yüzden, bu tip kavşaklarda trafik güvenliği oldukça yüksek düzeydedir. Farklı düzeyli kavşaklar trafik güvenliği açısından oldukça olumlu etkilere sahip olmalarına rağmen, yüksek maliyetli olmaları ve tasarımları için geniş bir alan gerektirmeleri sebebiyle çoğu zaman karar vericilerin öncelikli tercihi olmamaktadır (Tunç 2003). Bu yüzden, genel olarak, farklı düzeyli kavşaklara göre yapım-bakım-onarım maliyetleri daha düşük ve tasarımı daha kolay olan eş düzey kavşaklar tercih edilmektedir.

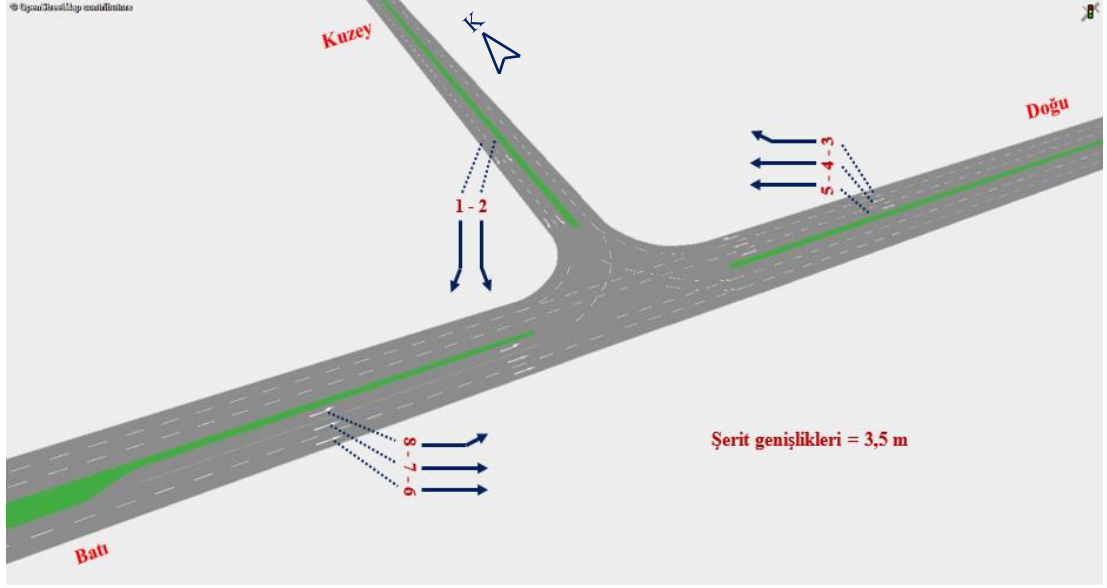
Eş düzey kavşaklar, farklı yönlerden gelen trafik akımlarının aynı düzlem üzerinde kesiştiği kavşaklardır. Bu tip kavşaklar daha çok, kavşak yaklaşımlarındaki trafik hacimlerinin çok yüksek olmadığı şehir içi ve şehirlerarası yol ağlarında

tasarlanmaktadır (Çakıcı ve Murat 2016). Trafik hacminin çok düşük olduğu eş düzey kavşaklardaki trafiğin denetimi, genel olarak, trafik işaretleri ve/veya trafik levhaları ile gerçekleştirilmektedir. Fakat kavşak yaklaşımlarındaki trafik hacimleri artıka, trafik işaret ve/veya trafik levhaları kavşakta trafik güvenliğinin sağlanması için yetersiz kalabilmektedir. Bu gibi durumlarda, kavşaktaki trafik güvenliğinin sağlanabilmesi için, genel olarak, sinyalizasyon sistemi ile denetim uygulamalarına başvurulmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, farklı kavşak denetim tiplerinin kavşak performansı üzerindeki etkilerinin araştırılması hedeflendiği için farklı düzeyli kavşaklara yer verilmemiş, yalnızca eş düzey kavşaklar üzerinde durulmuştur. Karayolu ağlarındaki eş düzey kavşaklar, genel olarak, üç veya dört yaklaşım kolundan meydana gelmektedir. Bazen bu sayının dörtten fazla olduğu görülse de, bu duruma sıklıkla rastlanmamaktadır. Bu yüzden, tez çalışması kapsamındaki analizler için, üç ve dört kollu iki farklı sinyalizasyon kavşak modelinin oluşturulmasının yeterli ve uygun olacağı düşünülmüştür.

#### **4.1.1 Üç Kollu Sinyalizasyon Kavşak Modeli**

Bu aşamada, öncelikli olarak, VISSIM simülasyon programında üç kollu bir sinyalizasyon kavşak modeli oluşturulmuştur. Söz konusu kavşak modeli Batı, Kuzey ve Doğu yaklaşım kollarından meydana gelmektedir. Batı yaklaşım kolunda 3 (1 sola dönüş cebi dâhil), Kuzey yaklaşım kolunda 2 ve Doğu yaklaşım kolunda 3 şerit bulunmaktadır. Modellemede, her bir şeridin genişliği 3,5 m olarak dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında, yaklaşımlardaki trafik akımları hareket bazlı değerlendirildiği için, üç kollu sinyalizasyon kavşak, bu durum göz önünde bulundurularak modellenmiştir. Modellenen üç kollu sinyalizasyon kavşağın görüntüsü ve söz konusu kavşağa ait bilgiler Şekil 4.1' de detaylı olarak sunulmaktadır.



**Şekil 4.1:** Analizlerde kullanılan üç kollü sinyalize kavşak modeli

Şekil 4.1' den görüldüğü üzere, modellenen üç kollü kavşakta toplam 8 trafik akımı bulunmaktadır. Bu akımlara ilişkin şunlar söylenebilir:

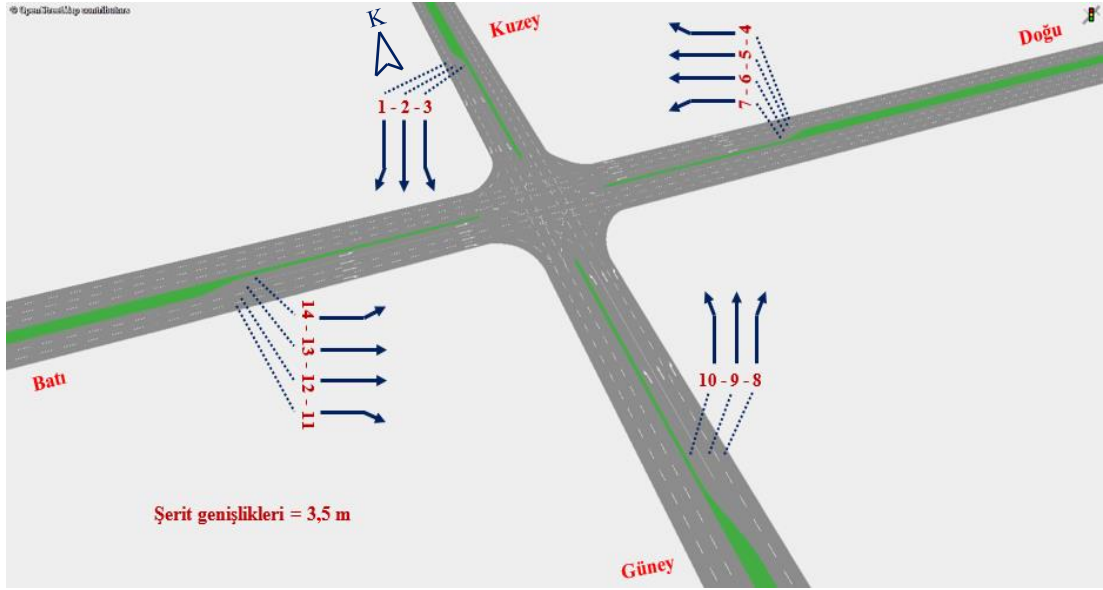
- 1 numaralı akım, Kuzey yaklaşım kolundan Batı yaklaşım koluna (sağa dönen)
- 2 numaralı akım, Kuzey yaklaşım kolundan Doğu yaklaşım koluna (sola dönen)
- 3 numaralı akım, Doğu yaklaşım kolundan Kuzey yaklaşım koluna (sağa dönen)
- 4 ve 5 numaralı akımlar, Doğu yaklaşım kolundan Batı yaklaşım koluna (düz giden)
- 6 ve 7 numaralı akımlar, Batı yaklaşım kolundan Doğu yaklaşım koluna (düz giden)
- 8 numaralı akım ise, Batı yaklaşım kolundan Kuzey yaklaşım koluna (sola dönen)

yönelen akımları göstermektedir.

#### 4.1.2 Dört Kollü Sinyalize Kavşak Modeli

Üç kollü sinyalize kavşak modellemesinin ardından, VISSIM simülasyon programında dört kollü bir sinyalize kavşak modeli oluşturulmuştur. Dört kollü model

Batı, Kuzey, Doğu ve Güney yaklaşım kollarından meydana gelmektedir. Batı yaklaşım kolunda 4 (1 sola dönüş cebi dâhil), Kuzey yaklaşım kolunda 3 (1 sola dönüş cebi dâhil), Doğu yaklaşım kolunda 4 (1 sola dönüş cebi dâhil), Güney yaklaşım kolunda ise 3 (1 sola dönüş cebi dâhil) şerit bulunmaktadır. Modellemede her bir şeridin genişliği 3,5 m olarak dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında, yaklaşımlardaki trafik akımları hareket bazlı değerlendirildiği için, dört kollu sinyalizasyon kavşak, bu durum göz önünde bulundurularak modellenmiştir. Modellenen dört kollu kavşağın görüntüsü ve bu kavşağa ait bilgiler Şekil 4.2’ de gösterilmektedir.



**Şekil 4.2:** Analizlerde kullanılan dört kollü sinyalizasyon kavşak modeli

Şekil 4.2’ den görüldüğü üzere, modellenen dört kollü kavşakta toplam 14 trafik akımı bulunmaktadır. Bu akımlara ilişkin şunlar söylenebilir:

- 1 numaralı akım, Kuzey yaklaşım kolundan Batı yaklaşım koluna (sağa dönen)
- 2 numaralı akım, Kuzey yaklaşım kolundan Güney yaklaşım koluna (düz giden)
- 3 numaralı akım, Kuzey yaklaşım kolundan Doğu yaklaşım koluna (sola dönen)
- 4 numaralı akım, Doğu yaklaşım kolundan Kuzey yaklaşım koluna (sağa dönen)
- 5 ve 6 numaralı akımlar, Doğu yaklaşım kolundan Batı yaklaşım koluna (düz giden)

- 7 numaralı akım, Doğu yaklaşım kolundan Güney yaklaşım koluna (sola dönen)
- 8 numaralı akım, Güney yaklaşım kolundan Doğu yaklaşım koluna (sağa dönen)
- 9 numaralı akım, Güney yaklaşım kolundan Kuzey yaklaşım koluna (düz giden)
- 10 numaralı akım, Güney yaklaşım kolundan Batı yaklaşım koluna (sola dönen)
- 11 numaralı akım, Batı yaklaşım kolundan Güney yaklaşım koluna (sağa dönen)
- 12 ve 13 numaralı akımlar, Batı yaklaşım kolundan Doğu yaklaşım koluna (düz giden)
- 14 numaralı akım ise Batı yaklaşım kolundan Kuzey yaklaşım koluna (sola dönen)

yönelen akımları göstermektedir.

## **4.2 Kavşak Denetim Tipleri**

Eş düzey kavşaklarda, trafik akımlarının farklı yönlü manevralarından (hareketlerinden) dolayı, trafik kazası, trafik sıkışıklığı, zaman kayıpları vb. gibi problemlerin görülme olasılığı oldukça yüksektir. Karayollarında günden güne artan taşıt sayıları bu problemlerin meydana gelme olasılığını daha da arttırmakta ve bu durum, söz konusu problemleri ortadan kaldırmak veya minimum düzeye indirmek için, bir takım önlemler alınmasını zorunlu hale getirmektedir. Durma ve park etme ile ilgili düzenlemeler, tek yön sistemlerinin oluşturulması, dönüş hareketlerinin yasaklanması, yatay ve düşey trafik işaretlerinin kullanılması gibi bir takım düzenlemeler kavşaklardaki trafik akımlarının güvenli ve düzenli bir şekilde hareketlerine devam edebilmesine imkân sağlayabilecek önemli adımlardan bazılarıdır. Fakat özellikle kavşak yaklaşımındaki trafik hacimlerinin yüksek olması durumunda, yalnızca bu düzenlemeler yetersiz kalabilmektedir. Şekil 4.3' de, trafik hacmi çok yüksek olan bir kavşağın sinyalizasyon sistemi ile denetlenmemesi durumunda, kavşakta meydana gelen trafik sıkışıklığı gösterilmektedir.



**Şekil 4.3:** Trafik hacmi çok yüksek olan bir kavşağın sinyalizasyon sistemi ile denetlenmemesi durumunda kavşakta meydana gelen trafik sıkışıklığı (Şanlıurfa)

Şekil 4.3' den görüldüğü üzere, trafik hacmi yüksek olan bir kavşağın sinyalizasyon sistemi ile denetlenmemesi durumunda kavşakta trafik sıkışıklığı meydana gelmekte ve kavşaktaki trafik güvenliği önemli düzeyde azalmaktadır. Bu yüzden, böyle durumlarda, kavşaktaki trafiğin sinyalizasyon sistemleri ile denetimi ve kontrolü bir zorunluluk haline gelmektedir.

Sinyalizasyon sistemleri, özellikle kavşaklarda, trafik akımlarının güvenli ve düzenli bir şekilde hareket etmesini sağlamak amacıyla kullanılan ışıklı trafik kontrol cihazlarıdır. Bu sistemlerin, karayollarında ilk defa 1920' li yıllarda kullanılmaya başlandığı göz önünde bulundurulduğunda, sinyalizasyon kavşak denetiminin yaklaşık yüz yıllık bir geçmişe sahip olduğunu söylemek mümkündür (Murat 2007). Geçen yüz yıllık süreçte, dünyadaki bilimsel ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak, sinyalizasyon sistemlerinin etkinliğinin artırılması üzerine birçok çalışma yapılmış ve bu sistemlerin, buldukları dönemin gereksinimlerini karşılayabilmeleri sağlanmaya çalışılmıştır. Böylece, trafik kazalarının ve trafik sıkışıklıklarının hemen hemen görülmediği, çok fazla zaman kayıplarının yaşanmadığı, güvenli-konforlu ve rahat bir yolculuğun gerçekleştirilebildiği, ekonomi ve çevre dostu kavşak denetim sistemlerinin oluşturulması hedeflenmiştir. Bu özelliklere sahip kavşak denetim sistemlerinin, yalnız ve ancak matematiksel temellere dayalı yaklaşımlar ile oluşturulabileceği unutulmamalıdır.

Sinyalize kavşaklardaki trafik akımlarının etkin bir şekilde yönetilmesinin öncelikli şartı, sinyalizasyon sistemleri için en uygun devre süresi, faz tasarımı ve faz sürelerinin belirlenmesidir (HCM 2010). Gelişigüzel ve kavşaktaki mevcut trafik koşulları dikkate alınmaksızın yapılan sinyal süresi atamaları ve rastgele seçilen faz planları, taşıtların kavşakta daha fazla zaman kaybetmesine sebep olmakta ve bu durum kavşak performansını olumsuz yönde etkilemektedir (Murat ve diğ. 2019).

Sinyalize kavşak denetimi, temel olarak, izole ve koordine sistemler olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilmektedir. İzole sistemler, yakınındaki diğer kavşaklarda bulunan sinyalizasyon sistemleri ile bağlantısı olmayan ve bu sistemler tarafından etkilenmeyen sistemlerdir. Koordine sistemler ise yakınındaki diğer kavşaklarda bulunan sinyalizasyon sistemleri ile etkileşimli olarak çalışan sistemlerdir. Bu çalışmada, yalnızca izole sinyalize kavşak denetim sistemleri üzerinde çalışılmıştır. İzole sistemler kapsamındaki denetim tipleri, her bir faz için yeşil süre paylaşımının farklı şekillerde oluşturulması yaklaşımına göre üç farklı şekilde sınıflandırılmaktadır: Optimum Sabit Zamanlı Denetim, Trafik Uyarmalı Denetim, Adaptif Denetim (Gundogan 2012).

Bu tez çalışması kapsamında oluşturulan üç ve dört kollu sinyalize kavşak modelleri de, üç farklı denetim tipi göz önünde bulundurularak yönetilmiştir. Böylece, farklı denetim tiplerinin kavşak performansı üzerindeki etkilerinin değerlendirilebilmesine olanak sağlanmıştır. Çalışma kapsamında ele alınan farklı denetim tipleri şunlardır:

- Optimum Sabit Zamanlı Denetim (OSZD)
- Trafik Uyarmalı Denetim (TUD)
- Sinyal Süresi ve Faz Optimizasyonu Tabanlı Denetim (SFOTD)

#### **4.2.1 Optimum Sabit Zamanlı Denetim (OSZD)**

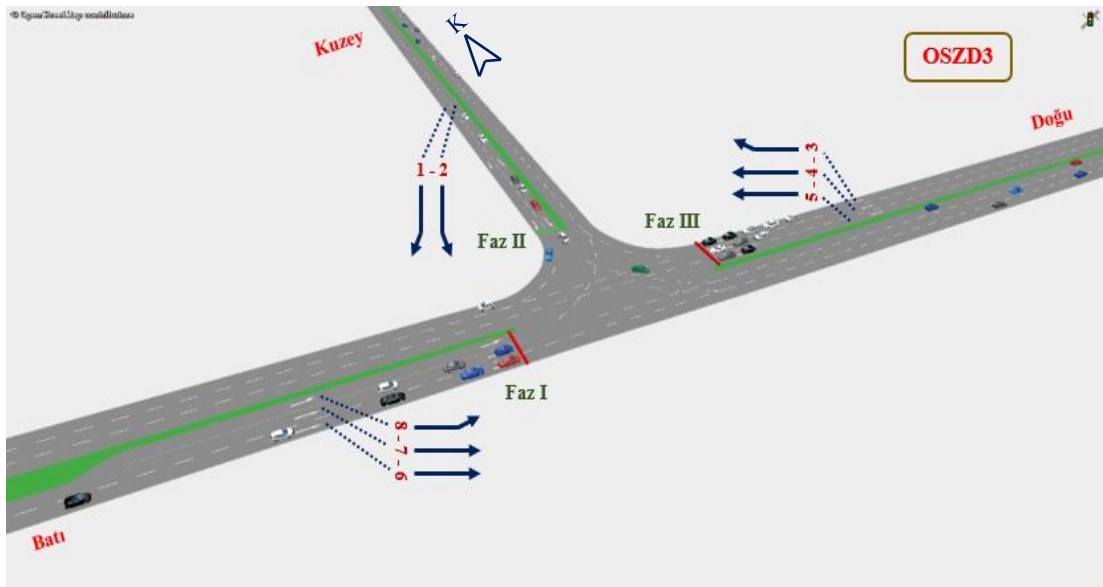
Sabit Zamanlı Denetim' de, faz planlarının seçimi ve sinyal sürelerinin ataması geçmiş trafik verileri göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmektedir. Bu tip denetimde, fazların sıralaması ve fazlara ait sinyal süreleri tüm devrelerde sabittir. Faz sıralamaları ve fazlara ait süreler trafik hacimlerindeki dalgalanmalara uyum

sağlayamamaktadır (Grether 2011). Faz sıralamaları ve faz süreleri için dinamik değişimler söz konusu değildir.

Bu çalışma kapsamında oluşturulan üç kollu kavşak modeli için üç fazlı, dört kollu kavşak modeli için ise dört fazlı denetim tekniği uygulanmıştır. Her iki kavşak modelinde de, her bir kavşak yaklaşımı için geçiş hakkının ayrı fazlarda sağlandığı varsayılmıştır. Analiz çalışmalarında kullanılacak olan üç kollu ve dört kollu sinyalizasyon kavşak modelleri için Optimum Sabit Zamanlı Denetim (OSZD3 – OSZD4) uygulamalarına ilişkin detaylara bu bölümde kapsamlı olarak yer verilmektedir.

#### 4.2.1.1 Üç ve Dört Kollu Sinyalizasyon Kavşak Modelleri için Optimum Sabit Zamanlı Denetim (OSZD3 – OSZD4)

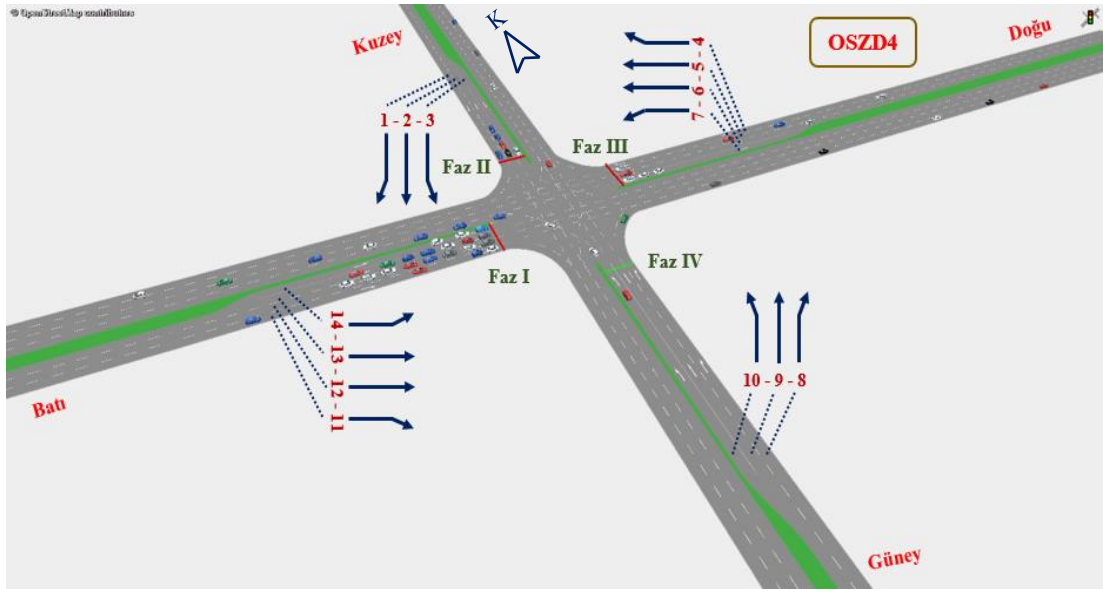
Optimum sabit zamanlı denetim uygulaması için, üç kollu sinyalizasyon kavşak modelinin 3 fazlı olarak işletildiği varsayılmıştır. Oluşturulan simülasyon modelinde, 6 - 7 ve 8 numaralı akımların bulunduğu Batı yaklaşım koluna 1. Fazda, 1 ve 2 numaralı akımların bulunduğu Kuzey yaklaşım koluna 2. Fazda, 3 - 4 ve 5 numaralı akımların bulunduğu Doğu yaklaşım koluna ise 3. Fazda geçiş hakkı sağlanmaktadır. Üç kollu sinyalizasyon kavşak modelinde optimum sabit zamanlı denetim uygulaması için akımlara ve fazlara ait bilgiler Şekil 4.4’ de gösterilmektedir.



Şekil 4.4: Üç kollu sinyalizasyon kavşak modelinde optimum sabit zamanlı denetim (OSZD3) uygulaması



Bununla birlikte, optimum sabit zamanlı denetim uygulaması için, dört kollu sinyalizasyon kavşak modelinin ise 4 fazlı olarak işletildiği varsayılmıştır. Oluşturulan simülasyon modelinde, 11 - 12 - 13 ve 14 numaralı akımların bulunduğu Batı yaklaşım koluna 1. Fazda, 1 - 2 ve 3 numaralı akımların bulunduğu Kuzey yaklaşım koluna 2. Fazda, 4 - 5 - 6 ve 7 numaralı akımların bulunduğu Doğu yaklaşım koluna 3. Fazda, 8 - 9 ve 10 numaralı akımların bulunduğu Güney yaklaşım koluna ise 4. Fazda geçiş hakkı sağlanmaktadır. Dört kollu sinyalizasyon kavşak modelinde optimum sabit zamanlı denetim uygulaması için akımlara ve fazlara ait bilgiler Şekil 4.5’ de gösterilmektedir.



**Şekil 4.5:** Dört kollü sinyalizasyon kavşak modelinde optimum sabit zamanlı denetim (OSZD4) uygulaması

Optimizasyon sürecinde, kavşaktaki ortalama taşıt gecikmesinin en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, öncelikli olarak, her iki kavşak modeli için, optimizasyon problemine ait amaç fonksiyonu, karar değişkenleri ve kısıtlar seti belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, kavşak yaklaşımlarındaki trafik akımları hareket bazlı değerlendirildiği için amaç fonksiyonu olarak Avustralya gecikme bağıntısı kullanılmıştır.

Fazlara ait yeşil sürelerin sinyalizasyon bir kavşağın performansı üzerinde doğrudan bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Bu yüzden, her bir faza ait yeşil süreler karar değişkenleri olarak belirlenmiştir. Daha önce yapılan birçok çalışmadan da görüldüğü üzere, fazlara ait yeşil süreler belirli bir aralıktadır (Liu ve Xu 2012; Dell’Orco ve diğ. 2014). Aksi takdirde, kavşak yaklaşımlarında bulunan taşıtlar daha fazla zaman

kayıplarına maruz kalabilmekte ve kavşaktaki ortalama taşıt gecikmesi önemli oranda artabilmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada da, her bir faz için yeşil sinyal süreleri minimum 7 saniye maksimum ise 45 saniye olacak şekilde sınırlandırılmıştır. (Murat ve Kikuchi 2007; Yuedong ve diğ. 2016) Bununla birlikte, doygun üstü trafik durumlarını da incelemek amacıyla, her bir şerit (akım) için doygunluk derecesi de maksimum 1,2 olacak şekilde sınırlandırılmıştır.

Üç kollu sinyalize kavşak modeline ilişkin, sinyal süresi optimizasyonu problemi için oluşturulan amaç fonksiyonu, karar değişkenleri ve kısıtlar seti Tablo 4.1’ de sunulmaktadır.

**Tablo 4.1:** OSZD3 için oluşturulan amaç fonksiyonu, karar değişkenleri ve kısıtlar seti

<b>Amaç Fonksiyonu</b> ( $k$ =Kavşaktaki toplam şerit sayısı)	$f = \min \left( d = \frac{\sum_{i=1}^k TD_i}{\sum_{i=1}^k q_i} \right)$	
<b>Karar Değişkenleri</b>	$g_1$	Faz I’ e ait yeşil süre ( $sn$ )
	$g_2$	Faz II’ ye ait yeşil süre ( $sn$ )
	$g_3$	Faz III’ e ait yeşil süre ( $sn$ )
<b>Kısıtlar Seti</b>	$7 \leq g_1 \leq 45$	
	$7 \leq g_2 \leq 45$	
	$7 \leq g_3 \leq 45$	
	$0 \leq \frac{q_1 \times C}{g_2 \times s_1} \leq 1,2$	$0 \leq \frac{q_2 \times C}{g_2 \times s_2} \leq 1,2$
	$0 \leq \frac{q_3 \times C}{g_3 \times s_3} \leq 1,2$	$0 \leq \frac{q_4 \times C}{g_3 \times s_4} \leq 1,2$
	$0 \leq \frac{q_5 \times C}{g_3 \times s_5} \leq 1,2$	$0 \leq \frac{q_6 \times C}{g_1 \times s_6} \leq 1,2$
	$0 \leq \frac{q_7 \times C}{g_1 \times s_7} \leq 1,2$	$0 \leq \frac{q_8 \times C}{g_1 \times s_8} \leq 1,2$

Tablo 4.1’ den görüldüğü üzere, üç kollu sinyalize kavşak modelindeki toplam karar değişkeni sayısı 3’ tür. Karar değişkenleri, fazlara ait yeşil süreleri temsil ettikleri için üç kollu sinyalize kavşak modelinde 3 adet yeşil süre kısıtı bulunmaktadır. Bununla birlikte, üç kollu kavşak modeli 8 şeritten oluştuğu için, toplam 8 adet doygunluk derecesi kısıtı bulunmaktadır. Bu bilgilere dayanarak, sinyal süresi optimizasyonu problemi için, üç kollu sinyalize kavşak modelinin toplam 3 adet karar değişkeni ve 11 adet kısıt içerdiğini söylemek mümkündür.

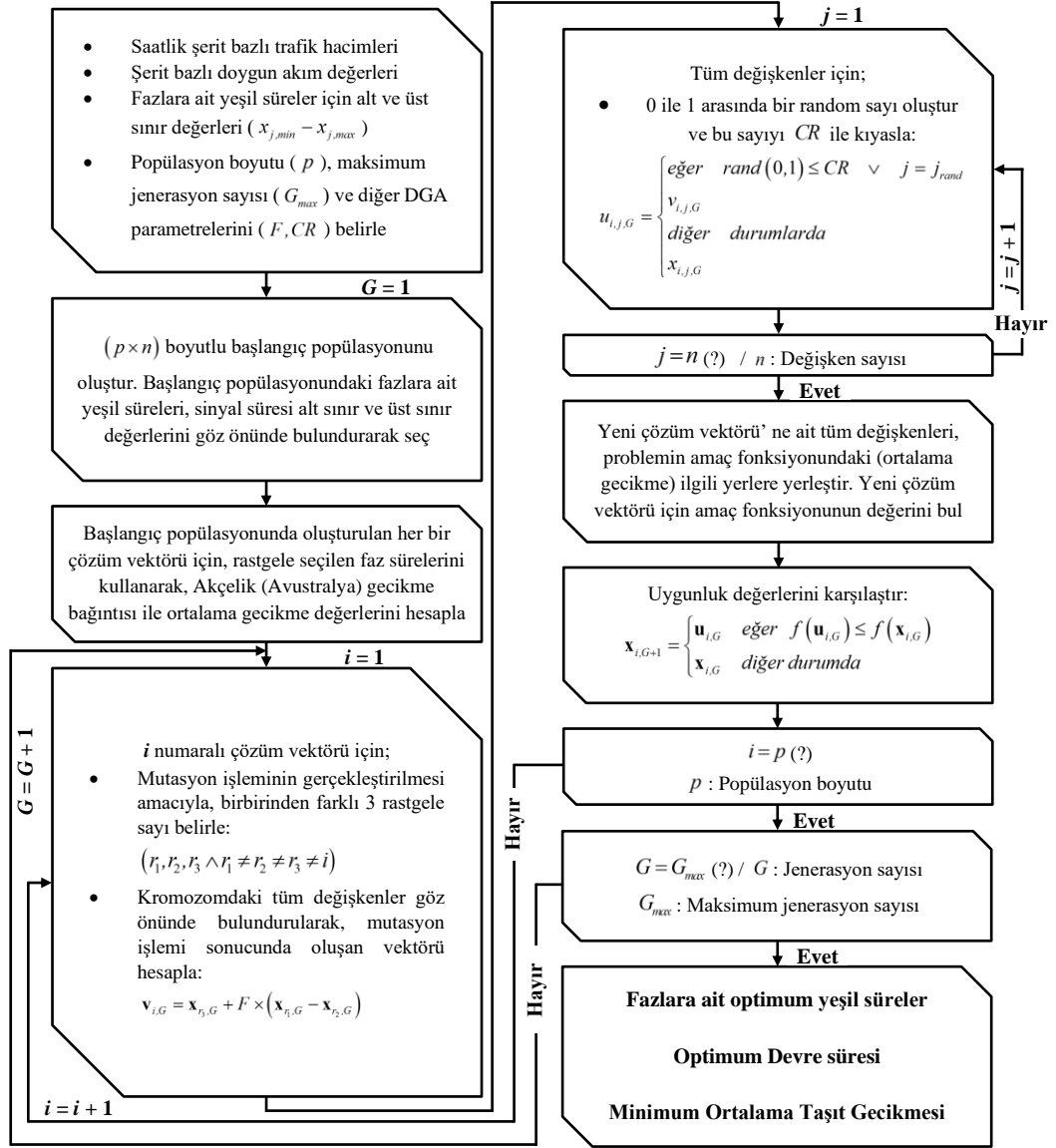
Dört kollu sinyalize kavşak modeline ilişkin, sinyal süresi optimizasyonu problemi için oluşturulan amaç fonksiyonu, karar değişkenleri ve kısıtlar seti Tablo 4.2’ de sunulmaktadır.

**Tablo 4.2:** OSZD4 için oluşturulan amaç fonksiyonu, karar değişkenleri ve kısıtlar seti

<b>Amaç Fonksiyonu</b> ( $k$ =Kavşaktaki toplam şerit sayısı)	$f = \min \left( d = \frac{\sum_{i=1}^k TD_i}{\sum_{i=1}^k q_i} \right)$	
<b>Karar Değişkenleri</b>	$g_1$	Faz I’ e ait yeşil süre ( $sn$ )
	$g_2$	Faz II’ ye ait yeşil süre ( $sn$ )
	$g_3$	Faz III’ e ait yeşil süre ( $sn$ )
	$g_4$	Faz IV’ e ait yeşil süre ( $sn$ )
<b>Kısıtlar</b>	$7 \leq g_1 \leq 45$	
	$7 \leq g_2 \leq 45$	
	$7 \leq g_3 \leq 45$	
	$7 \leq g_4 \leq 45$	
	$0 \leq \frac{q_1 \times C}{g_2 \times s_1} \leq 1,2$	$0 \leq \frac{q_2 \times C}{g_2 \times s_2} \leq 1,2$
	$0 \leq \frac{q_3 \times C}{g_2 \times s_3} \leq 1,2$	$0 \leq \frac{q_4 \times C}{g_3 \times s_4} \leq 1,2$
	$0 \leq \frac{q_5 \times C}{g_3 \times s_5} \leq 1,2$	$0 \leq \frac{q_6 \times C}{g_3 \times s_6} \leq 1,2$
	$0 \leq \frac{q_7 \times C}{g_3 \times s_7} \leq 1,2$	$0 \leq \frac{q_8 \times C}{g_4 \times s_8} \leq 1,2$
	$0 \leq \frac{q_9 \times C}{g_4 \times s_9} \leq 1,2$	$0 \leq \frac{q_{10} \times C}{g_4 \times s_{10}} \leq 1,2$
	$0 \leq \frac{q_{11} \times C}{g_1 \times s_{11}} \leq 1,2$	$0 \leq \frac{q_{12} \times C}{g_1 \times s_{12}} \leq 1,2$
	$0 \leq \frac{q_{13} \times C}{g_1 \times s_{13}} \leq 1,2$	$0 \leq \frac{q_{14} \times C}{g_1 \times s_{14}} \leq 1,2$

Tablo 4.2’ den görüldüğü üzere, dört kollu sinyalize kavşak modelindeki toplam karar değişkeni sayısı 4’ tür. Karar değişkenleri, fazlara ait yeşil süreleri temsil ettikleri için dört kollu sinyalize kavşak modelinde 4 adet yeşil süre kısıtı bulunmaktadır. Bununla birlikte, dört kollu kavşak modeli 14 şeritten oluştuğu için, toplam 14 adet doyumluk derecesi kısıtı bulunmaktadır. Bu bilgilere dayanarak, sinyal süresi optimizasyonu problemi için, dört kollu sinyalize kavşak modelinin toplam 4 adet karar değişkeni ve 18 adet kısıt içerdiğini söylemek mümkündür.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan analizlerde, şerit bazlı doygun akım değerinin, literatürde daha önce yapılan çalışmalarda elde edilen bulgulardan yararlanılarak, 1800 bo/sa/şe olarak kabul edilmesinin uygun olacağına karar verilmiştir (Potts ve diğ. 2007; HCM 2010; Çalışkanelli 2010; Shao ve diğ. 2011; Çetin ve Murat 2013; Doğan 2014). Üç kollu ve dört kollu sinyalizasyon kavşak modelleri için amaç fonksiyonu, karar değişkenleri ve kısıtlar setinin belirlenmesinin ardından, meta-sezgisel DGA kullanılarak MATLAB’ da sinyal süresi optimizasyonu programı hazırlanmıştır (Matlab R2013b). Program ile elde edilen sonuçlar MS Excel ortamında hazırlanan çalışma sayfasında test edilmiş ve programın oldukça güvenilir sonuçlar sağladığı görülmüştür. Optimizasyon programının akış diyagramı Şekil 4.6’ da detaylı olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.6: OSZD3 ve OSZD4 akış diyagramı

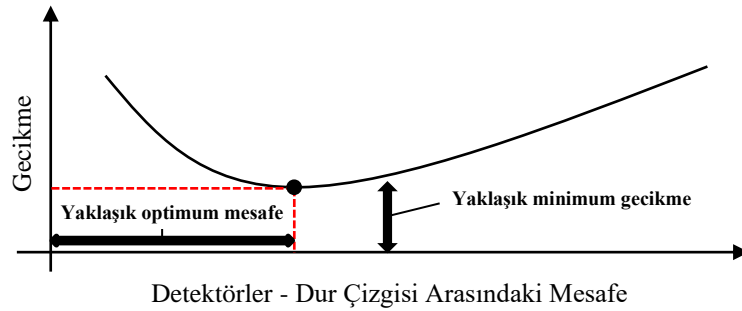
#### 4.2.2 Trafik Uyarmalı Denetim (TUD)

Trafik uyarmalı denetim kavşak yaklaşımlarında bulunan detektörlerden gelen verilere ve bilgilere dayalı olarak kavşaktaki trafiğin güvenli ve düzenli bir şekilde yönetilmesidir. Bu tip denetimde, kavşak yaklaşımlarına yerleştirilen detektörler vasıtası ile elde edilen taşıt geliş ve kuyruklanma verilerinin mevcut dinamiklerine göre yeşil ve kırmızı sinyal süreleri hakkında karar verilmektedir (Viti ve van Zuylen 2010). Yarı uyarmalı ve tam uyarmalı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Yarı uyarmalı denetimde kavşak yaklaşım kollarının yalnızca bir veya birkaçında detektörler bulunmaktadır. Bu tip denetimde, detektörler genel olarak saatlik trafik hacimlerinin çok düşük olduğu yaklaşım koluna veya kollarına yerleştirilmektedir. Böylece, uyarıcıdan uyarı alınmadıkça (tali yaklaşım kolunda/kollarında taşıt algılanmadıkça) geçiş hakkı daima ana akıma/akımlara ait olmaktadır. Detektörlerden uyarı alındığı takdirde ise geçiş hakkı diğer akıma/akımlara verilmektedir. Kavşak yaklaşım kollarının hepsinde detektör bulunması durumunda ise veri ve bilgi akışı tüm yaklaşım kollarından sağlanmaktadır. Veri ve bilgi akışının tüm yaklaşım kollarından sağlandığı ve kavşağın söz konusu veriler ışığında yönetildiği bu denetim şekli de tam uyarmalı olarak isimlendirilmektedir. Trafik uyarmalı denetimde, yeşil süreler ve dolayısıyla devre süreleri detektörler tarafından algılanan trafik taleplerine göre belirlenmektedir. Bu tip denetimde, faz sıralaması sabit veya değişken olabilmektedir. Bunun yanı sıra, eğer bir faza talep yok ise o faz atlanabilmektedir (Doğan 2014).

Trafik uyarmalı denetimde kavşağın etkin işletimi genel olarak şu faktörlere bağlıdır: Minimum yeşil süre, Kritik aralık, Detektör yerleşimi ve Maksimum yeşil süre (Bullen 1989). Bu yüzden, söz konusu faktörlerin mantıklı değerler seçilmesi kavşak performansının iyileştirilmesi ve geliştirilmesi bakımından büyük bir önem arz etmektedir (Akcelik 1994; Kim ve Courage 2003; Guo ve diğ. 2007; Jiang ve diğ. 2011; Wang ve diğ. 2018).

Bu çalışmada da sinyalizasyon kavşaklarının etkin bir şekilde işletilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, öncelikli olarak, üç kollu ve dört kollu sinyalizasyon kavşak modellerinde trafik uyarmalı denetim uygulaması için oluşturulacak olan algoritmalara ait kontrol parametreleri üzerinde çalışılmıştır. Söz konusu parametreler aşağıda belirtildiği gibi seçilmiştir:

- 1) **Kritik aralık:** TUD’ da kritik aralık; öndeki taşıtın arka tamponunun detektörü terkettiği zaman dilimi ile öndeki taşıtı takip eden taşıtın ön tamponunun detektör üzerinde bulunduğu zaman dilimi arasındaki fark olarak belirtilmektedir. Literatürde daha önce yapılan çalışmalarda, TUD uygulamaları için bu değer, genel olarak, 1,5 sn ile 4,5 sn arasında seçildiği görülmüştür (Bullen 1989; HCM 2010; Mathew 2014). Bu çalışmada, oluşturulan üç kollu ve dört kollu sinyalize kavşak modellerindeki yüksek trafik hacimleri de göz önünde bulundurularak minimum kritik aralık yaklaşık 2 saniye olarak seçilmiştir. Bu durumda, detektörler vasıtası ile belirlenen kritik aralık 2 saniyeyi geçmediği sürece o faza ait yeşil süre 2 saniye uzatılmaktadır.
- 2) **Detektör yerleşimleri:** Trafik uyarımlı denetim sistemleri için detektör yerleşimi ile ilgili net ve kesin bir bilgi bulunmamaktadır. Daha önce yapılan çalışmalardan, detektörlerin yerleşiminin trafik hacmi ile doğrudan ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır (Bullen 1989; HCM 2010; Mathew 2014). Ayrıca bu çalışmalarda detektörlerin, dur çizgisinin 15 ila 45 metre öncesine yerleştirildiği görülmektedir. Bu çalışmada da detektör yerleşimleri, analiz edilen her bir trafik senaryosu için deneme-yanılma yoluyla belirlenmiştir. Detektörlerin kavşak yaklaşımındaki dur çizgisine mesafesi ve ortalama gecikme arasında da Şekil 4.7’ deki gibi bir ilişki tespit edilmiştir. Elde edilen bu ilişki, literatürde yer alan çalışmalar ile doğrulanmıştır (Bullen 1989).



**Şekil 4.7:** Ortalama gecikme – detektörlerin dur çizgisine mesafesi arasındaki ilişki

- 3) **Minimum yeşil süre:** Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde, minimum yeşil sürenin 4 ila 5 saniye veya detektör mesafesine bağlı olarak, bu değerlerin yukarıda seçildiği görülmektedir (Bullen 1989; Mathew 2014). Özellikle kavşak yaklaşımlarındaki trafik hacimlerinin yüksek olduğu durumlarda, detektörlerin dur çizgisine olan mesafesi 45 metreye kadar çıkabileceği için, minimum yeşil sürenin 45 metre mesafedeki taşıtların kavşağı terk edebilmesine

imkân sağlayan bir değer seçilmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında, başlangıç hareket kaybı ve detektör ile dur çizgisi arasında depolanan taşıt sıra sayısı da dikkate alındığında, minimum yeşil sürelerin detektör mesafelerine bağlı olarak Tablo 4.3’ de sunulan değerler olarak kabul edilmesi uygun bulunmuştur.

**Tablo 4.3:** Detektör mesafesine bağlı minimum yeşil süreler

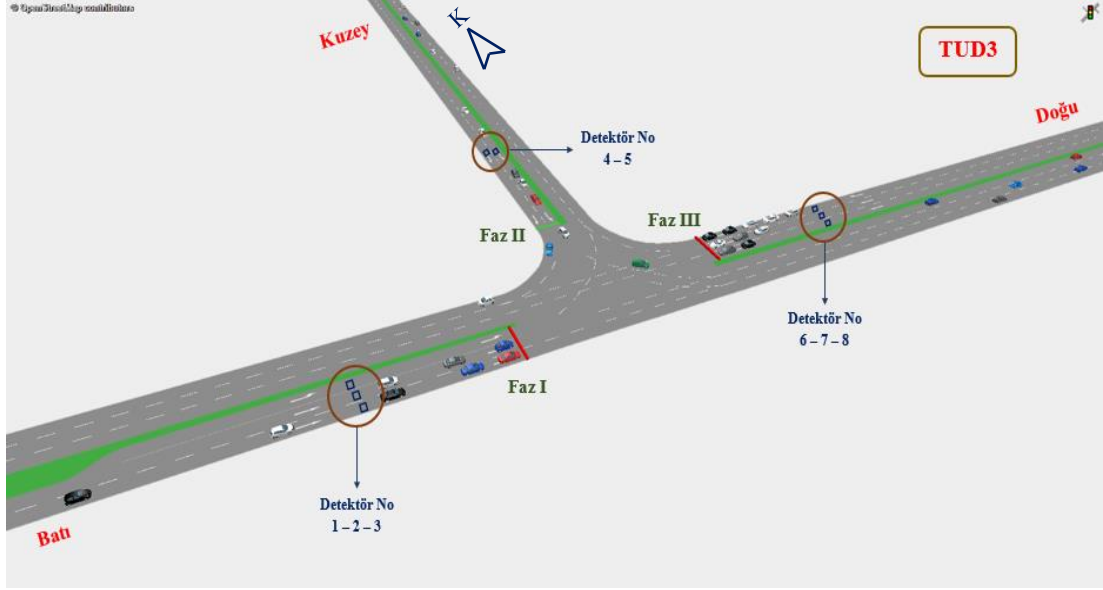
Detektör - Dur Çizgisi Arasındaki Mesafe (m)	Minimum Yeşil Süre (sn)
15	5
20	7
25	9
30	11
35	13
40	15
45	17

- 4) **Maksimum yeşil süre:** Trafik uyarmalı denetim sistemleri için maksimum yeşil süre, genel olarak, 45 ile 60 saniye arasında seçilmektedir (Doğan 2014). Bu çalışma kapsamında da, trafik uyarmalı denetim için her bir faza ait maksimum yeşil süre 60 saniye olarak dikkate alınmıştır.

Bir sonraki aşamada, VISSIM’ in VISVAP uygulaması kullanılarak üç kollu sinyalize kavşak modeli için TUD3, dört kollu sinyalize kavşak modeli için ise TUD4 kontrol algoritması geliştirilmiştir.

#### 4.2.2.1 Üç ve Dört Kollu Sinyalize Kavşak Modeli için Trafik Uyarmalı Denetim (TUD3 – TUD4)

Kontrol parametrelerine ilişkin çalışmaların ardından, öncelikli olarak, üç kollu sinyalize kavşak modeli için faz sıralamaları belirlenmiş ve kavşak yaklaşımlarındaki her bir şeride detektörler yerleştirilerek detektör numaralandırmaları yapılmıştır. Üç kollu sinyalize kavşak modelinde trafik uyarmalı denetim uygulaması için fazlara ve detektörlere ait bilgiler Şekil 4.8’ de detaylı olarak gösterilmektedir.

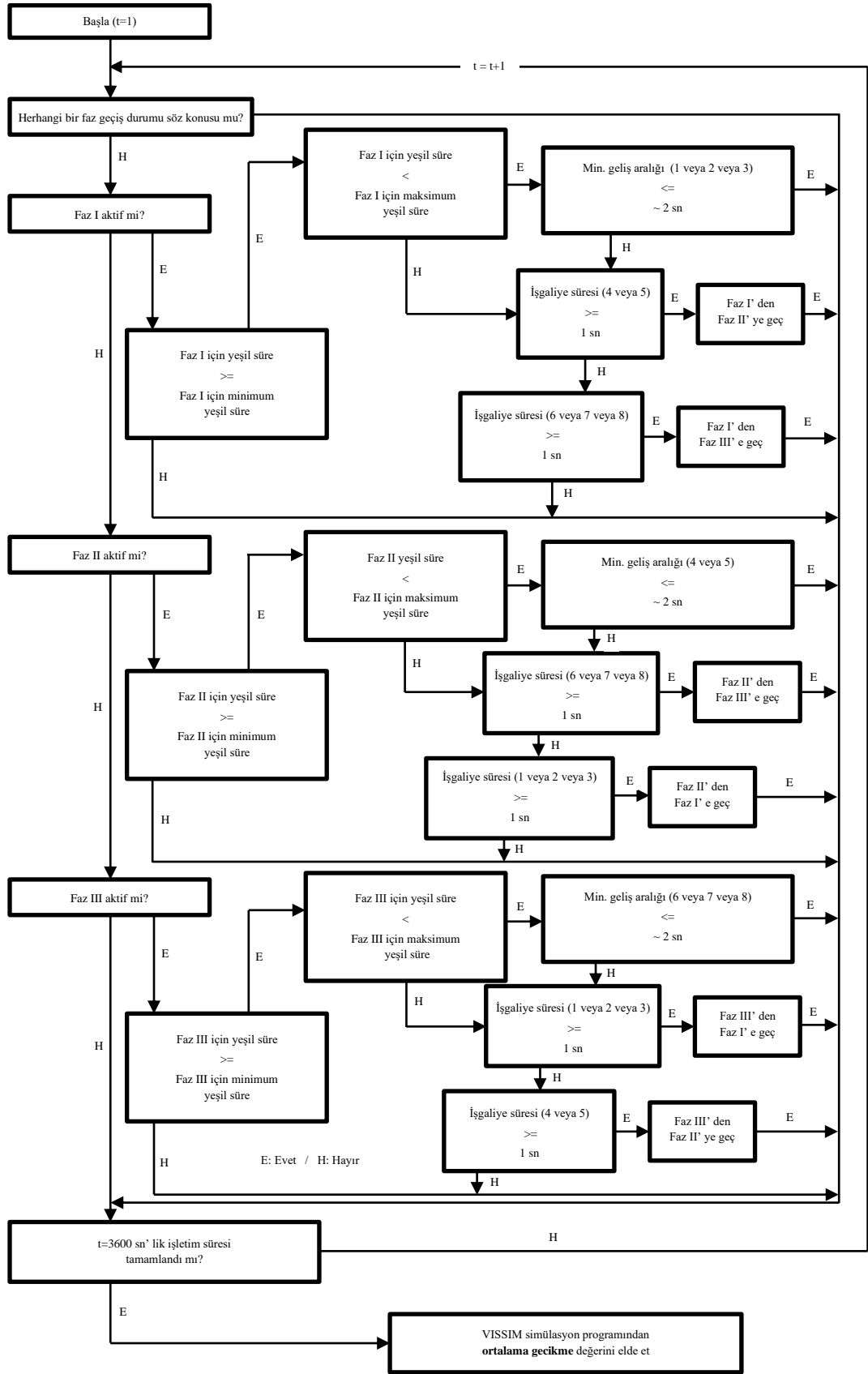


**Şekil 4.8:** Üç kollu sinyalizasyon kavşağında trafik uyarımlı denetim (TUD3) uygulaması

Şekil 4.8’ den de görüldüğü üzere, Batı yaklaşım koluna I. Fazda, Kuzey yaklaşım koluna II. Fazda, Doğu yaklaşım koluna ise III. Fazda geçiş hakkı sağlanmaktadır. Bununla birlikte, Batı yaklaşım koluna 1 - 2 ve 3 numaralı detektörler, Kuzey yaklaşım koluna 4 ve 5 numaralı detektörler, Doğu yaklaşım koluna ise 6 - 7 ve 8 numaralı detektörler yerleştirilmiş ve böylece tam uyarımlı bir trafik denetim sistemi oluşturulmuştur. Oluşturulan sistemde, detektörlerden işgaliye bilgisi/bilgileri alınmadığı durumlarda faz atlamaları gerçekleştirilebilmektedir (Faz I’ den Faz III’ e geçiş, Faz II’ den Faz I’ e geçiş vb. gibi).

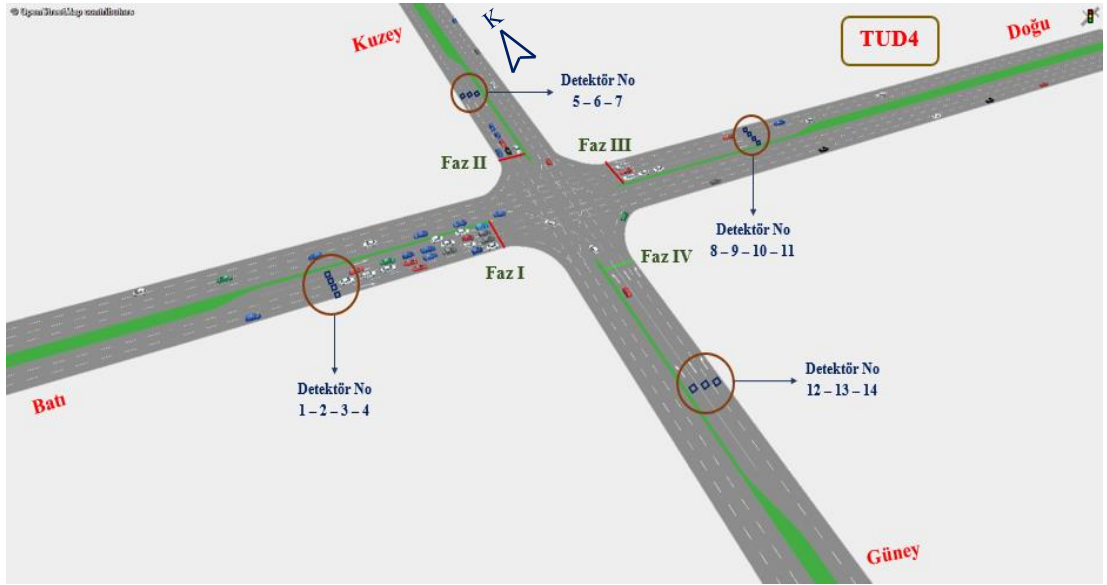
Üç kollu sinyalizasyon kavşağı için VAP (Vehicle Actuated Programming) mantığı ile oluşturulan TUD3 algoritması akış diyagramı Şekil 4.9’ da detaylı olarak sunulmaktadır.





Şekil 4.9: Üç kollu sinyalizasyon kavşak modeli için VAP mantığı ile oluşturulan TUD3 algoritması akış diyagramı

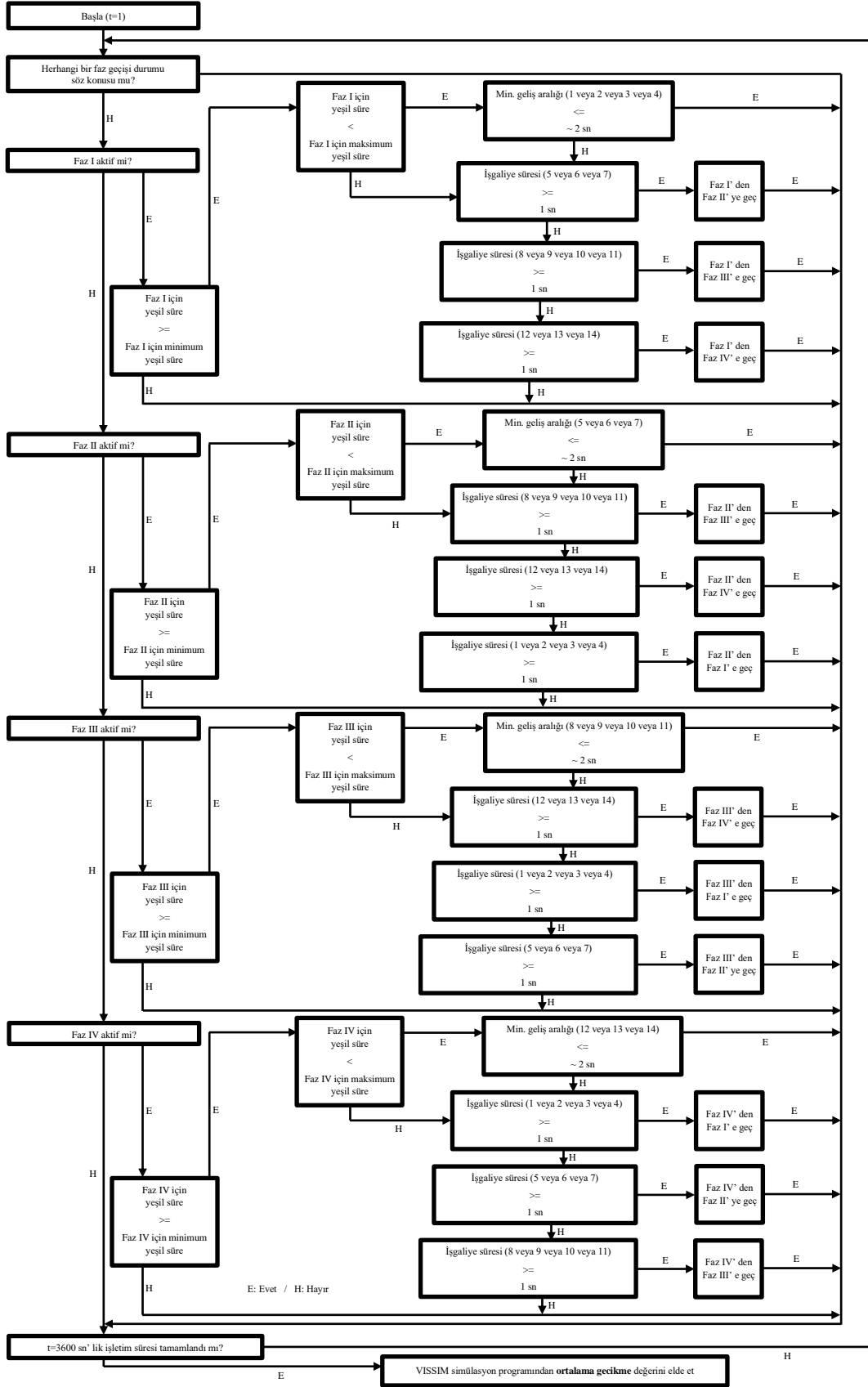
Üç Kollu sinyalize kavşak modeli için TUD3 algoritmasının oluşturulmasının ardından, dört kollu sinyalize kavşak modeli için trafik uyarmalı denetim uygulaması üzerinde çalışılmıştır. Bu bağlamda, öncelikli olarak, dört kollu sinyalize kavşak modeli için faz sıralamaları belirlenmiş ve kavşak yaklaşımlarındaki her bir şeride detektörler yerleştirilerek detektör numaralandırmaları yapılmıştır. Dört kollu sinyalize kavşak modelinde trafik uyarmalı denetim uygulaması için fazlara ve detektörlere ait bilgiler Şekil 4.10’ da detaylı olarak gösterilmektedir.



**Şekil 4.10:** Dört kollu sinyalize kavşak modelinde trafik uyarmalı denetim (TUD4) uygulaması

Şekil 4.10’ dan görüldüğü üzere, Batı yaklaşım koluna I. Fazda, Kuzey yaklaşım koluna II. Fazda, Doğu yaklaşım koluna III. Fazda, Güney yaklaşım koluna ise IV. Fazda geçiş hakkı sağlanmaktadır. Bununla birlikte, Batı yaklaşım koluna 1 - 2 - 3 ve 4 numaralı detektörler, Kuzey yaklaşım koluna 5 - 6 ve 7 numaralı detektörler, Doğu yaklaşım koluna 8 - 9 - 10 ve 11 numaralı detektörler, Güney yaklaşımına ise 12 - 13 ve 14 numaralı detektörler yerleştirilmiş ve böylece tam uyarmalı bir trafik denetim sistemi (TUD4) oluşturulmuştur. TUD4’ de de, TUD3’ e benzer şekilde, detektörlerden işgaliye bilgisi/bilgileri alınmadığı durumlarda faz atlamaları gerçekleştirilebilmektedir (Faz II’ den Faz IV’ e geçiş, Faz III’ den Faz I’ e geçiş vb.).

Dört kollu sinyalize kavşak modeli için VAP (Vehicle Actuated Programming) mantığı ile oluşturulan TUD4 algoritması akış diyagramı Şekil 4.11’ de detaylı olarak sunulmaktadır.



Şekil 4.11: Dört kollu sinyalize kavşak modeli için VAP mantığı ile oluşturulan TUD4 algoritması akış diyagramı

### 4.2.3 Sinyal Süresi ve Faz Optimizasyonu Tabanlı Denetim (SFOTD)

Adaptif denetim sistemlerinde, sinyal süreleri, kavşaktaki mevcut trafik durumuna göre sürekli olarak optimize edilmektedir. Bu tip sistemlerde, kavşaklardaki trafik durumu sürekli olarak izlenmekte ve sinyal parametreleri trafiğin durumuna göre güncellenmektedir. Özellikle SCATS ve SCOOT gibi adaptif denetim sistemleri, dünyadaki birçok ülkede uygulanmakta ve kavşakların performanslarının iyileştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Zhao ve Tian 2012). SCATS, SCOOT, MOTION gibi gerçek zamanlı gözlem verilerine ve tahminlere dayalı sinyal süre planları uygulayan stratejilerde optimizasyon süreci 5 ila 10 dakikalık süreçlerde tekrarlanabilmektedir. Bununla birlikte, yeni sinyal sürelerine geçiş bozukluklarından kaçınmak için, bu süreç 10 dakikadan daha fazla uygulanmamaktadır (Van Katwijk 2008).

Adaptif denetim sistemleri; bilgisayarlar, izleme ekipmanları, tahmin algoritmaları ve optimizasyon içerdiği için diğer denetim sistemlerine kıyasla daha farklı ve daha kapsamlıdır. Ayrıca, kavşak yaklaşımlarındaki trafik taleplerine bağlı olarak sinyal süreleri belirledikleri ve belirli periyodlarla (3 devre, 5 dk gibi) dinamik olarak değişen bir kontrol mekanizmasına sahip oldukları için, kavşakların hizmet düzeylerinin ve performanslarının artırılmasında önemli bir rol oynamaktadırlar. Literatürde yapılan birçok çalışmada, adaptif denetim sistemlerinin diğer denetim sistemlerine kıyasla daha üstün olduğu açıkça ortaya konulmuştur (Wolshon ve Taylor 1999; Vilarinho ve Tavares 2014; Thunig ve diğ. 2019).

Adaptif denetim sistemleri ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde, bu çalışmaların büyük bir çoğunluğunda, yalnızca sinyal sürelerinin dinamik olarak değiştirildiği (güncellendiği), faz planı esnekliğinin çok fazla göz önünde bulundurulmadığı görülmüştür. Bu çalışmada, literatürde daha önce yapılan çalışmalardan farklı olarak, sinyal sürelerinin yanı sıra faz planlarının esnekliğinin de dikkate alınması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında, üç kollu sinyalize kavşak modeli için SFOTD3, dört kollu sinyalize kavşak modeli için ise SFOTD4 kavşak denetim yaklaşımları geliştirilmiştir. SFOTD3 ve SFOTD4 yaklaşımlarında, hem sinyal süreleri hem de faz planı eşzamanlı olarak optimize edilmekte ve kavşaktaki sinyal süreleri ve faz planı belirli aralıklarla sürekli olarak güncellenmektedir.

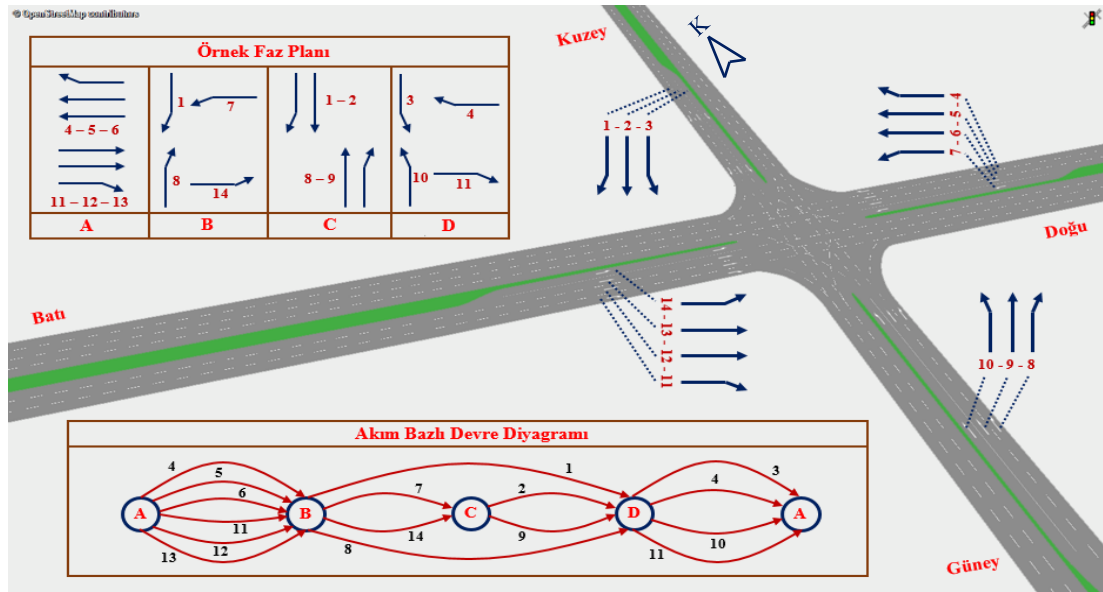


**Tablo 4.4:** Üç kollu sinyalizasyon kavşak modeli için tasarlanan olası faz planları

Plan No	Faz I Akımlar	Faz II Akımlar	Faz III Akımlar	Kesişme Sayısı	Yaklaşma Sayısı
1	6-7-8	3-4-5	1-2	0	0
2	1-3-6-7-8	3-4-5-6-7	1-2-3	0	1
3	3-6-7-8	3-4-5-6-7	1-2	0	1
4	1-6-7-8	3-4-5-6-7	1-2-3	0	0
5	3-4-5-6-7	1-6-7-8	1-2	0	0
6	1-6-7-8	1-2-3	3-4-5	0	0
7	6-7-8	1-3-4-5-6-7	1-2-3	0	1
8	1-6-7-8	1-3-4-5-6-7	1-2-3	0	1

Tablo 4.4 dikkatle incelendiğinde, üç kollu sinyalizasyon kavşak modeli için toplam 8 farklı faz planının oluşturulduğu görülmektedir. Oluşturulan faz planlarının her biri için trafik akımlarının kesişme sayısı 0'dır. Bu tez çalışması kapsamında, kesişme hareketine kıyasla güvenlik açısından daha az risk oluşturan yaklaşma hareketlerinin trafikteki gecikmelere etkisini incelemek amacıyla, yaklaşma sayısının maksimum 1'e eşit olduğu faz planları da olası faz planlarına dâhil edilmiştir.

Dört kollü kavşak modelinde uygulanan örnek faz planı ve akım bazlı devre diyagramı ise Şekil 4.13'de gösterilmektedir.



**Şekil 4.13:** Dört kollü sinyalizasyon kavşak modeli faz planı ve akım (hareket) bazlı devre diyagramı örneği

Çalışma kapsamında, dört kollu sinyalize kavşak modeli için de, optimizasyon sürecinin ilk aşamasında, modele ait en uygun faz planları belirlenmiştir. Bu aşamada, üç kollu modeldeki duruma benzer şekilde, yaklaşma sayılarının 1' e eşit olduğu faz planları da olası faz planlarına dâhil edilmiştir. Dört kollu sinyalize kavşak modeli için tasarlanan olası faz planları ile bu faz planlarındaki toplam kesişme ve yaklaşma hareketi sayıları Tablo 4.5' de sunulmaktadır.

**Tablo 4.5:** Dört kollu sinyalize kavşak modeli için tasarlanan olası faz planları

Plan No	Faz I Akımlar	Faz II Akımlar	Faz III Akımlar	Faz IV Akımlar	Kesişme Sayısı	Yaklaşma (Katılma) Sayısı
1	11-12-13-14	4-5-6-7	1-2-3	8-9-10	0	0
2	8-9-10-11	1-11-12-13-14	1-2-3-4	4-5-6-7-8	0	0
3	1-4-11-12-13-14	4-5-6-7-8	1-2-3-4	8-9-10-11	0	1
4	1-11-12-13-14	1-8-9-10-11	1-2-3-4	4-5-6-7-8	0	1
5	1-11-12-13-14	4-5-6-7-8-11	1-2-3-4	8-9-10-11	0	1
6	1-2-3-4-8	8-9-10-11	1-11-12-13-14	4-5-6-7-8	0	1
7	4-5-6-11-12-13	1-7-8-14	1-2-3-4	8-9-10-11	0	0
8	4-5-6-11-12-13	1-7-8-14	1-2-3-4-8	8-9-10-11	0	1
9	4-5-6-11-12-13	1-7-8-14	1-2-3-4	1-8-9-10-11	0	1
10	4-5-6-11-12-13	1-7-8-14	1-2-8-9	3-4-10-11	0	0
11	1-11-12-13-14	4-5-6-7-8	1-2-8-9	3-4-10-11	0	0
12	1-4-11-12-13-14	4-5-6-7-8	1-2-8-9	3-4-10-11	0	1
13	4-5-6-7-8-11	1-11-12-13-14	1-2-8-9	3-4-10-11	0	1
14	4-5-6-11-12-13	1-4-7-8-14	1-2-3-4	8-9-10-11	0	1
15	4-5-6-11-12-13	1-7-8-11-14	1-2-3-4	8-9-10-11	0	1
16	4-5-6-11-12-13	1-4-7-8-14	1-2-8-9	3-4-10-11	0	1
17	4-5-6-11-12-13	1-7-8-11-14	1-2-8-9	3-4-10-11	0	1
18	4-5-6-11-12-13	1-7-8-14	1-2-8-9	1-3-4-10-11	0	1
19	4-5-6-11-12-13	1-7-8-14	1-2-8-9	3-4-8-10-11	0	1
20	1-11-12-13-14	4-5-6-7-8	1-2-8-9	1-3-4-10-11	0	1
21	1-11-12-13-14	4-5-6-7-8	1-2-8-9	3-4-8-10-11	0	1

Tablo 4.5' den görüldüğü üzere, dört kollu sinyalize kavşak modeli için toplam 21 farklı faz planı oluşturulmuştur. Bu faz planlarının 5' inde yaklaşma sayısı 0' a, 16' sında ise yaklaşma sayısı 1' e eşittir.

#### 4.2.3.2 Üç ve Dört Kollu Sinyalize Kavşaklar için Optimizasyon Modelleri (SFOTD3 – SFOTD4)

Çalışmanın bu bölümünde, öncelikli olarak, ele alınan probleme ait amaç fonksiyonu, karar değişkenleri ve kısıtlar seti belirlenmiştir. SFOTD kavşağındaki ortalama gecikmelerin minimize edilmesine dayalı bir yaklaşım olduğu için, ortalama taşıt gecikmesi minimizasyonu amaç fonksiyonu olarak göz önünde bulundurulmuştur. Sinyal sürelerinin kavşak performansı üzerinde doğrudan etkin faktörler olduğu da göz önünde bulundurularak, fazlara ait yeşil sinyal süreleri karar değişkenleri olarak belirlenmiştir. Yeşil sinyal süreleri, OSZD’ de de belirtildiği üzere 7 saniye ile 45 saniye arasında sınırlandırılmıştır. Bununla birlikte, doymun üstü durumların da irdelenmesi amacıyla, her bir şeritteki doymunluk derecesi maksimum 1,2 olacak şekilde sınırlandırılmıştır. SFOTD3 yaklaşımı için oluşturulan amaç fonksiyonu, karar değişkenleri ve kısıtlar seti Tablo 4.6’ da sunulmaktadır.

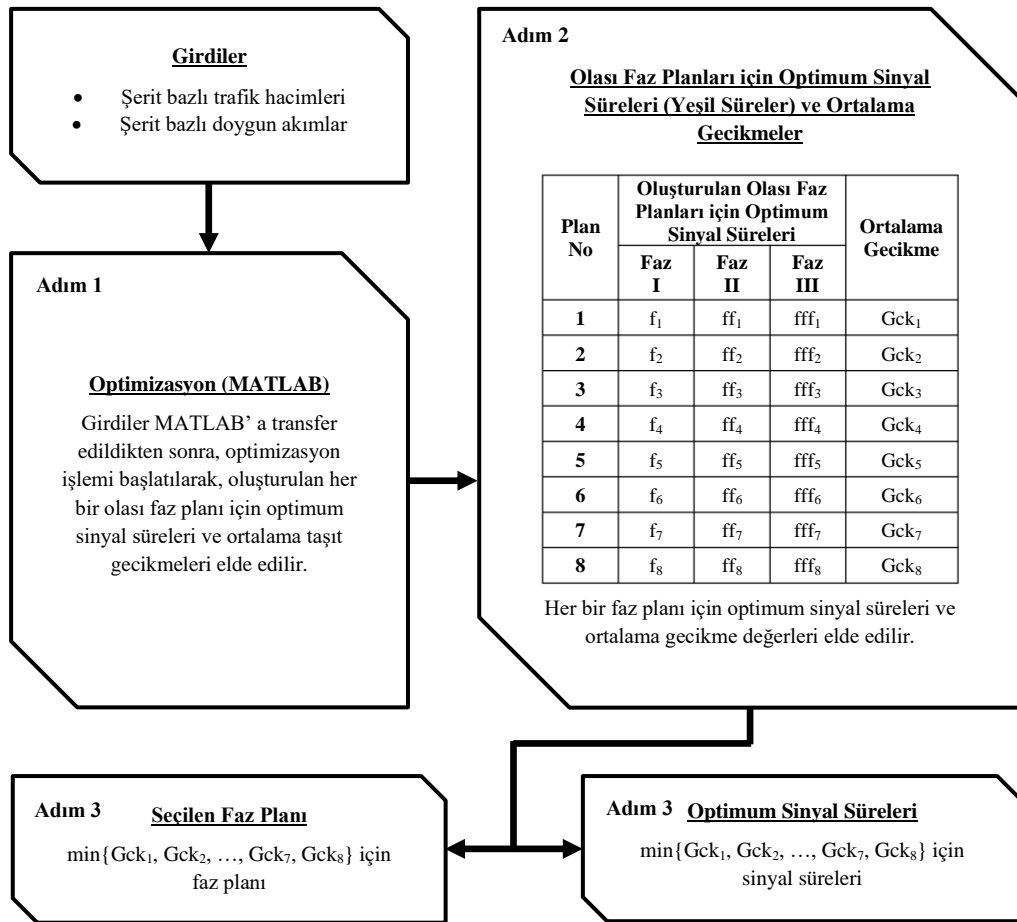
**Tablo 4.6:** SFOTD3 yaklaşımı için oluşturulan amaç fonksiyonu, karar değişkenleri ve kısıtlar seti

<b>Amaç Fonksiyonu</b> ( $k$ =Kavşağındaki toplam şerit sayısı)	$f = \min \left( d = \frac{\sum_{i=1}^k TD_i}{\sum_{i=1}^k q_i} \right)$	
<b>Karar Değişkenleri</b>	$g_1$	Faz I’ e ait yeşil süre ( $sn$ )
	$g_2$	Faz II’ ye ait yeşil süre ( $sn$ )
	$g_3$	Faz III’ e ait yeşil süre ( $sn$ )
<b>Kısıtlar Seti</b>	$7 \leq g_1 \leq 45$	
	$7 \leq g_2 \leq 45$	
	$7 \leq g_3 \leq 45$	
	$0 \leq \frac{q_1 \times C}{g_a \times s_1} \leq 1,2$	$0 \leq \frac{q_2 \times C}{g_b \times s_2} \leq 1,2$
	$0 \leq \frac{q_3 \times C}{g_c \times s_3} \leq 1,2$	$0 \leq \frac{q_4 \times C}{g_d \times s_4} \leq 1,2$
	$0 \leq \frac{q_5 \times C}{g_e \times s_5} \leq 1,2$	$0 \leq \frac{q_6 \times C}{g_f \times s_6} \leq 1,2$
	$0 \leq \frac{q_7 \times C}{g_g \times s_7} \leq 1,2$	$0 \leq \frac{q_8 \times C}{g_h \times s_8} \leq 1,2$
	<u>Örneğin 1 numaralı akıma ait yeşil süreler (<math>g_a</math>)</u>	
	Plan No 1 için: $g_3$	Plan No 7 için: $g_2 + g_3$
	Plan No 6 için: $g_1 + g_2$	Plan No 8 için: $g_1 + g_2 + g_3$



Tablo 4.6' dan görüldüğü üzere, SFOTD3 yaklaşımı için oluşturulan optimizasyon modelinde 3 adet karar değişkeni ve 11 adet kısıt bulunmaktadır. Bu kısıtlardan 3' ü fazlara ait yeşil süreler, 8' i ise her bir akım (şerit) için doygunluk derecesi ile ilgili kısıtlardır.

Üç kollu sinyalize kavşak modeli için, optimizasyon sürecinin ikinci adımında, Tablo 4.6' da gösterilen amaç fonksiyonu, karar değişkenleri ve kısıtlar seti kullanılarak, DGA' nın işlem adımlarına uygun bir şekilde, MATLAB' da sinyal süresi optimizasyonu programı yazılmıştır. Üç kollu sinyalize kavşak modeli için optimum faz planı ve sinyal sürelerinin seçim adımları Şekil 4.14' de gösterilmektedir.



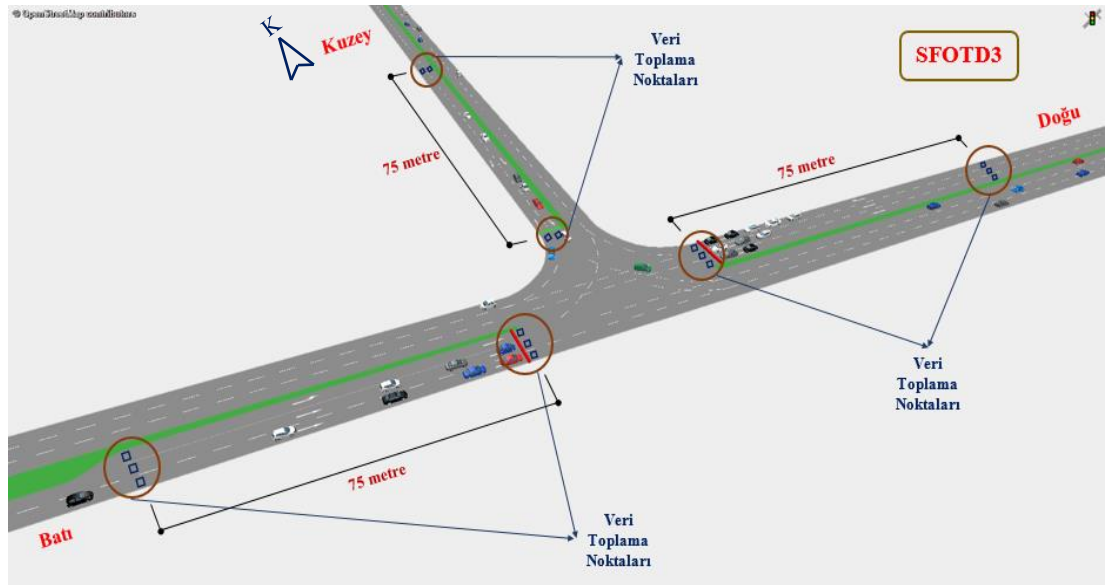
**Şekil 4.14:** Üç kollu sinyalize kavşak modeli için optimum faz planı ve sinyal sürelerinin seçim adımları

Şekil 4.14' de, sinyal süresi ve faz planı optimizasyonunun üç adımda gerçekleştirilebildiği görülmektedir. Birinci adımda, optimizasyon için kullanılacak olan şerit bazlı trafik hacimleri ve şerit bazlı doygun akım değerleri temin edilmektedir. İkinci adımda, söz konusu veriler MATLAB' da hazırlanan programa aktarılmaktadır ve oluşturulan 8 farklı faz planı (göz önünde bulundurulmuş yaklaşma

sayısı=0 ise, 4 farklı faz planı) için fazlara ait optimum sinyal süreleri ile ortalama taşıt gecikmeleri elde edilmektedir. Üçüncü adımda ise, minimum ortalama gecikmeyi sağlayan faz planı ve bu faz planı için fazlara ait sinyal süreleri belirlenmekte olup, en uygun faz planı seçimi ve en uygun sinyal süresi ataması işlemi tamamlanmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan SFOTD3 analizlerinde şerit bazlı trafik hacimleri, VISSIM simülasyon programından veri toplama noktaları (data collection points) yardımı ile elde edilmiştir. Ayrıca, şerit bazlı doygun akım değerleri OSZD' de belirtildiği üzere 1800 bo/sa/şe olarak alınmıştır. Fakat doygun akım değerlerinin araziden ölçülerek dikkate alınmasının daha doğru ve gerçekçi sonuçlar sağlayacağı unutulmamalıdır.

Şekil 4.15' de analizler için oluşturulan üç kollu sinyalize kavşak modelindeki veri toplama noktalarının yerleşimleri detaylı olarak gösterilmektedir.



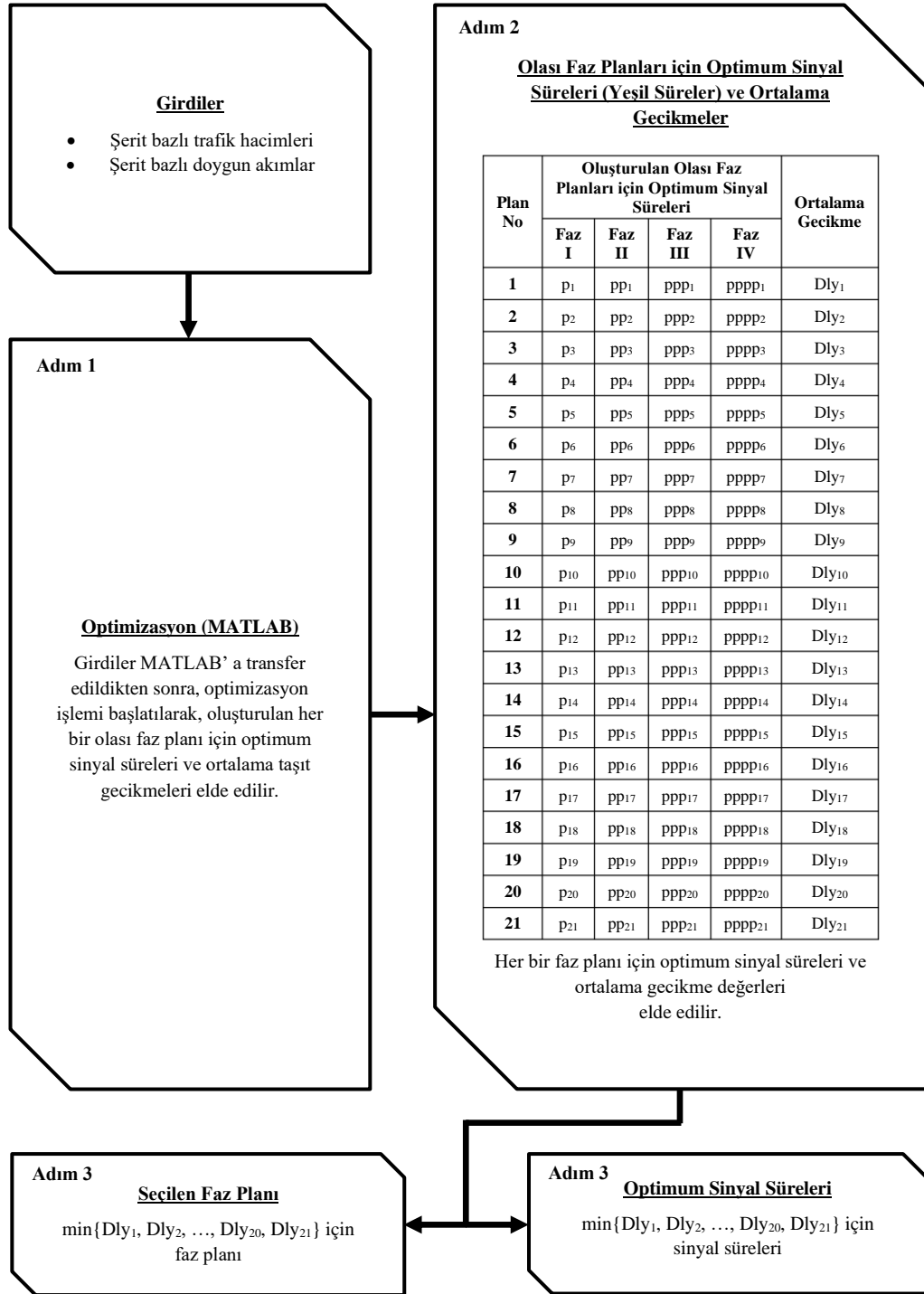
**Şekil 4.15:** SFOTD3 yaklaşımı için üç kollu sinyalize kavşak modelindeki veri toplama noktaları yerleşimi

Şekil 4.15' den görüldüğü üzere, VISSIM' den şerit bazlı saatlik trafik hacim verilerini elde etmek için kullanılan veri toplama noktaları, kavşak yaklaşımlarındaki tüm şeritlerde dur çizgisinin hemen sonrasına ve dur çizgisinden 75 metre önceki mesafeye yerleştirilmiştir.

Bir sonraki aşamada, SFOTD4 ile ilgili modelleme çalışmalarına başlanmıştır. Öncelikli olarak, SFOTD4 için de SFOTD3' e benzer şekilde, bir optimizasyon modeli



kullanılarak, DGA' nın işlem adımlarına uygun bir şekilde, MATLAB' da sinyal süresi optimizasyonu programı yazılmıştır. Dört kollu sinyalizasyon kavşak modeli için optimum faz planı ve sinyal sürelerinin seçim adımları Şekil 4.16' da gösterilmektedir.



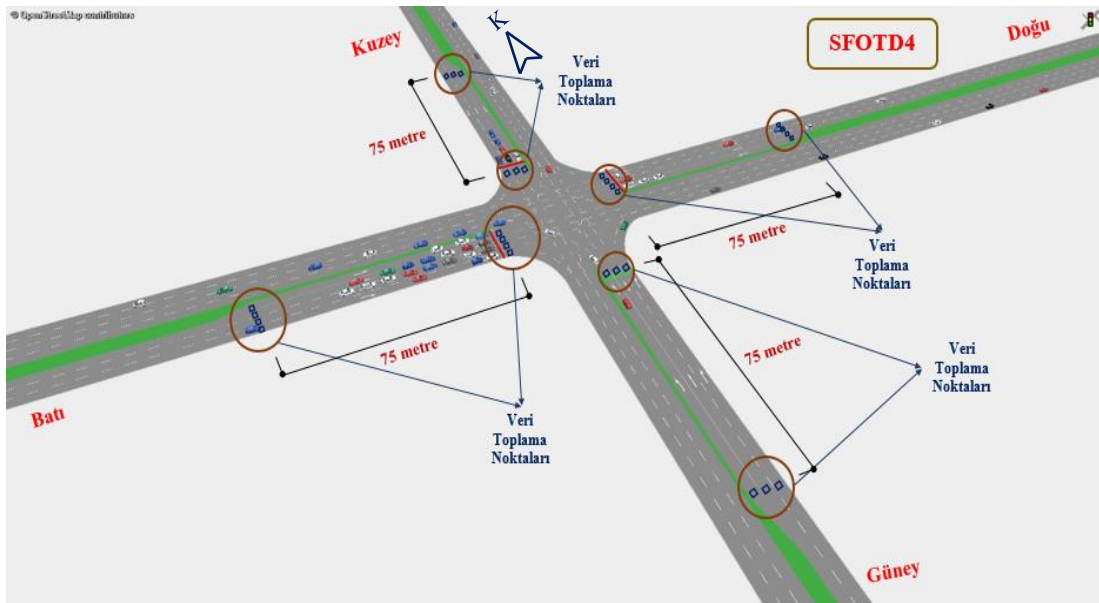
**Şekil 4.16:** Dört kollu sinyalizasyon kavşak modeli için optimum faz planı ve sinyal sürelerinin seçim adımları

Şekil 4.16' dan görüldüğü üzere, dört kollu sinyalizasyon kavşak modeli için en uygun sinyal süreleri ve faz planının seçim adımları, üç kollu modelde

uygulanan seçim adımlarına (Şekil 4.14) benzemektedir. Daha önce de belirtildiği üzere, üç kollu modelde toplam 8 farklı faz planı (yaklaşma sayısı=0 ise, 4 farklı faz planı) göz önünde bulundurulurken, dört kollu modelde bu sayı 21 (yaklaşma sayısı=0 ise, 5 farklı faz planı)' dir.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan SFOTD4 analizlerinde de, şerit bazlı trafik hacimleri, SFOTD3 analizlerine benzer şekilde, VISSIM simülasyon programından veri toplama noktaları (data collection points) yardımı ile elde edilmiştir. Tüm şeritler için doygun akım değerleri de daha önce belirtilen nedenlerden dolayı 1800 bo/sa/şe olarak alınmıştır.

Şekil 4.17' de analizler için oluşturulan dört kollu sinyalizasyon kavşak modelindeki veri toplama noktalarının yerleşimleri detaylı olarak gösterilmektedir.



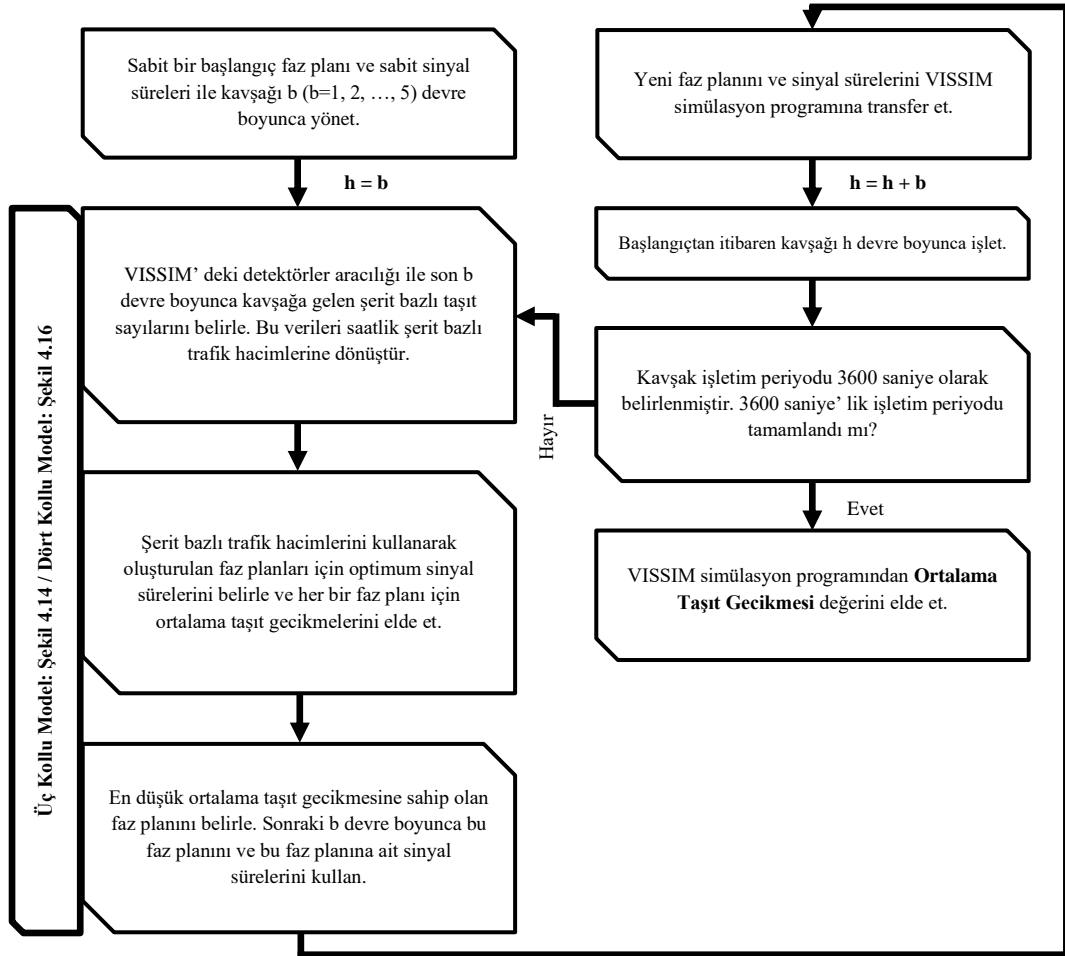
**Şekil 4.17:** SFOTD4 yaklaşımı için dört kollü sinyalizasyon kavşak modelindeki veri toplama noktaları yerleşimi

Şekil 4.17' den, dört kollü sinyalizasyon kavşak modelinde de veri toplama noktalarının, üç kollü modele benzer şekilde tüm şeritlerde, dur çizgisinin hemen sonrasına ve dur çizgisinden 75 metre önceki mesafeye yerleştirildiği görülmektedir.

Üç kollü ve dört kollü sinyalizasyon kavşaklar için optimizasyon modellerinin oluşturulmasının ardından, bu bölümde son olarak, SFOTD3 ve SFOTD4 yaklaşımlarının genel işleyiş adımları detaylı olarak anlatılmıştır.

### 4.2.3.3 SFOTD3 ve SFOTD4 Yaklaşımlarının Genel İşleyişi

Daha önce de belirtildiği üzere, SFOTD3 ve SFOTD4 yaklaşımlarında faz planı ve fazlara ait sinyal süreleri, şerit bazlı trafik hacimleri göz önünde bulundurularak, her b devrede bir periyodik olarak değiştirilmektedir. Bu sayede kavşak performansının artırılması ve kavşak hizmet düzeyinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. SFOTD3 ve SFOTD4 yaklaşımlarının genel işleyişini Şekil 4.18’deki gibi özetlemek mümkündür:



Şekil 4.18: SFOTD3 ve SFOTD4' ün akış diyagramı

Şekil 4.18 dikkatle incelendiğinde, b değerinin net bir şekilde belirtilmediği görülmektedir. Bu değer belirlenmesi aşamasında, çeşitli analizler ve istatistiksel çalışmalar yapılmıştır. b' nin 1'e, 2' ye, 3' e ve 5' e eşit olması durumları ayrı ayrı analiz edilmiş ve değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, b' nin 1' e ve 2' ye eşit olması durumunda trafik tahminlerinde sapmaların meydana gelebileceği ve bu durumun kavşak performansını olumsuz etkilediği görülmüştür. b=3 ve b=5 olması durumunda

ise performans açısından benzer sonuçlara ulaşılabileceği belirlenmiştir. Bu aşamada en uygun b değerinin belirlenmesi amacıyla, analizlerde kullanılan 25 trafik senaryosu için,  $b=3$  ve  $b=5$  olması durumları SPSS programında ayrı ayrı analiz edilmiştir (Kalaycı 2006). Yapılan analizler sonucunda, b' nin 5 devre olarak alınması durumunda daha düşük ortalama gecikmelerin elde edilebileceği görülmüştür. Bu yüzden, bu tez kapsamındaki analiz çalışmalarında, kavşaktaki denetim sisteminin sinyal süreleri ve faz planına her 5 devrede bir müdahale edilmiştir. b değerinin belirlenmesi için yapılan istatistiksel çalışmalar Ek A' da detaylı olarak sunulmuştur.

## 5. ANALİZLER

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında yapılan analizlere ve bu analizlerden elde edilen sonuçlara yer verilmiştir. İçeriklerindeki ve amaçlarındaki farklılıklar sebebiyle, söz konusu analizler, üç alt başlıkta sunulmuştur:

- Birinci alt başlıkta, Bölüm IV’ de detaylı olarak anlatılan TUD4 algoritmasının etkinliğinin test edilebilmesi amacıyla yapılan analizlere ait bir takım bilgiler verilmiş ve bu analizlere ait karşılaştırmalı sonuçlar gösterilmiştir. Daha sonra, elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.
- İkinci alt başlıkta, IV. Bölümde gösterilen üç kollu sinyalize kavşak modeli (Şekil 4.1) kullanılarak 42 adet trafik senaryosu oluşturulmuş ve oluşturulan her bir senaryo, farklı kavşak denetim tipleri OSZD3, TUD3 ve SFOTD3 uygulanarak ayrı ayrı analiz edilmiştir. Böylece, bu tez çalışması kapsamında amaçlanan SFOTD3’ ün, sinyalize kavşak denetimindeki başarımı üzerine bir değerlendirme yapılmaya çalışılmıştır.
- Üçüncü alt başlıkta ise, IV. Bölümde gösterilen dört kollu sinyalize kavşak modeli (Şekil 4.2) kullanılarak 42 adet trafik senaryosu oluşturulmuş ve oluşturulan her bir senaryo, farklı kavşak denetim tipleri OSZD4, TUD4 ve SFOTD4 uygulanarak ayrı ayrı analiz edilmiştir. Böylece, bu tez çalışması kapsamında amaçlanan SFOTD4’ ün, sinyalize kavşak denetimindeki başarımı üzerine bir değerlendirme yapılmaya çalışılmıştır.

### 5.1 TUD4 Algoritmasının Etkinliğinin Test Edilmesi

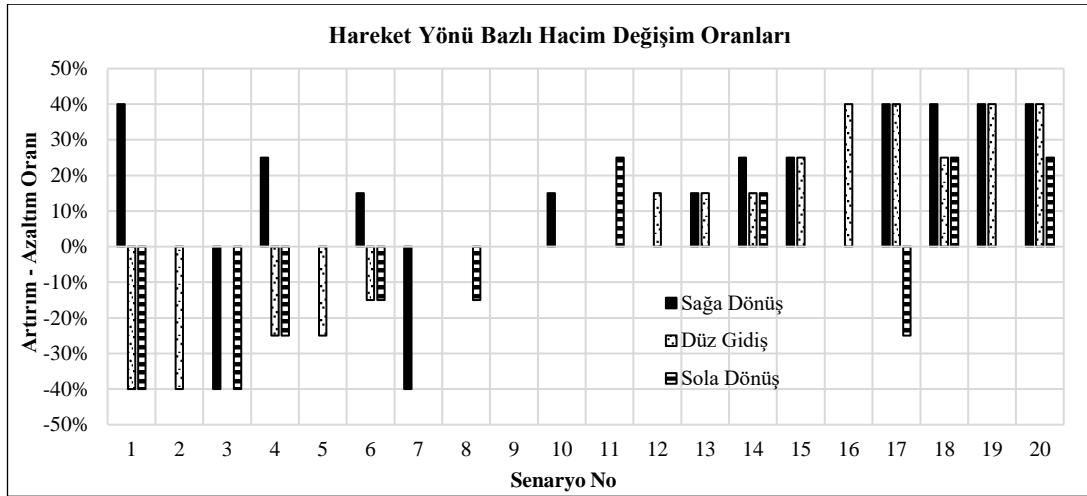
Çalışmanın bu bölümünde, öncelikli olarak, dört kollu sinyalize kavşak modeli göz önünde bulundurularak (Şekil 4.2), analiz çalışmaları için referans bir trafik hacim matrisi oluşturulmuştur. Hareket yönü bazlı referans trafik hacimleri Tablo 5.1’ de sunulmaktadır.



**Tablo 5.1:** TUD4' ün etkinliğinin test edilmesi için oluşturulan referans trafik hacim matrisi

Hacimler (ta/sa)					Oranlar				
Yaklaşım Kolu (B-V)	Batı	Kuzey	Doğu	Güney	Yaklaşım Kolu (B-V)	Batı	Kuzey	Doğu	Güney
Batı	-	200	700	100	Batı	-	0,200	0,700	0,100
Kuzey	150	-	100	150	Kuzey	0,375	-	0,250	0,375
Doğu	600	100	-	150	Doğu	0,706	0,118	-	0,176
Güney	200	250	200	-	Güney	0,308	0,384	0,308	
Batı Yaklaşım Kolu: 1000 ta/sa Kuzey Yaklaşım Kolu: 400 ta/sa Doğu Yaklaşım Kolu: 850 ta/sa Güney Yaklaşım Kolu: 650 ta/sa					<b>Kavşak Toplam Hacmi: 2900 ta/sa</b>				

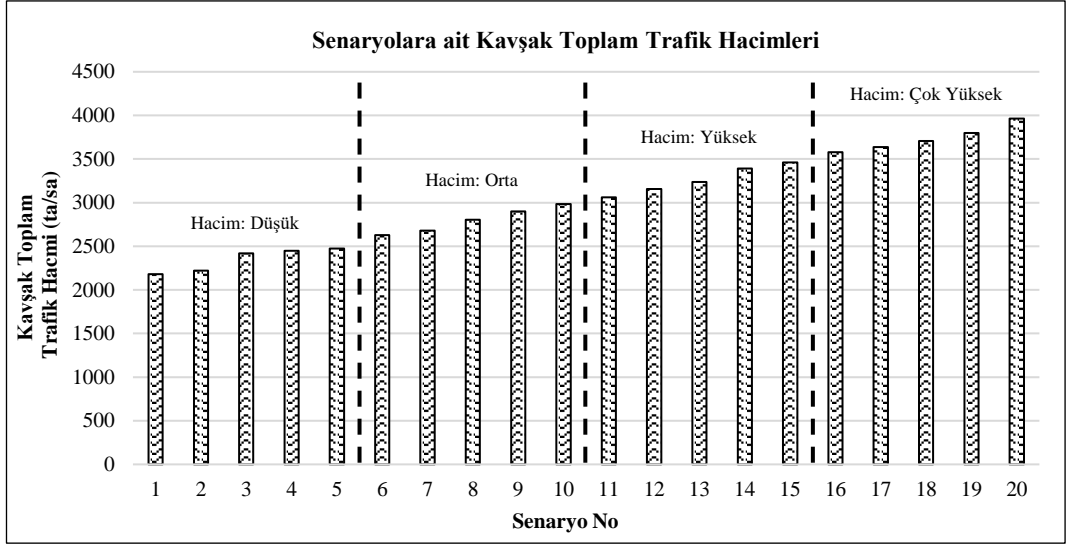
Bir sonraki aşamada, farklı senaryoların analizleri için, Tablo 5.1' de verilen referans trafik hacim matrisi göz önünde bulundurularak, hacimlerde artırma - azaltmalar yapılmış ve 20 adet trafik hacim senaryosu oluşturulmuştur. Oluşturulan senaryolar için hareket yönü bazlı, hacimdeki artırım - azaltım oranları Şekil 5.1' de gösterilmektedir.



**Şekil 5.1:** TUD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan senaryolar için hareket yönü bazlı hacim değişim oranları

Şekil 5.1' den görüldüğü üzere, senaryo numarası arttıkça, hareket yönü bazlı trafik hacimleri de genel olarak artmıştır. Bu yüzden, senaryo numarası arttıkça kavşak toplam trafik hacmi de artış göstermiştir. Böylelikle, çalışma kapsamında, geniş bir trafik hacim aralığının analiz edilmesi imkânı elde edilebilmiştir. Tüm senaryolar için, hareket yönü bazlı trafik hacimleri Ek B' de detaylı olarak verilmektedir. Şekil 5.2' de

ise, hacimlerde gerçekleştirilen artırım ve azaltımlar sonucu oluşan kavşak toplam trafik hacimleri grafiksel olarak gösterilmektedir.



**Şekil 5.2:** TUD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 20 trafik hacim senaryosu için kavşak toplam trafik hacimleri

Şekil 5.2' den görüldüğü üzere, oluşturulan 20 senaryo kavşaktaki toplam trafik hacminin düşük, orta, yüksek ve çok yüksek olması durumlarına göre 4'e ayrılmış ve böylece TUD4 modelinin başarımı farklı trafik koşulları açısından değerlendirilebilmiştir. Kavşaktaki toplam trafik hacminin; 2000-2500 ta/sa arasında olması durumunda hacim düşük, 2500-3000 ta/sa olması durumunda hacim orta, 3000-3500 ta/sa olması durumunda hacim yüksek, 3500-4000 ta/sa olması durumunda ise hacim çok yüksek olarak kabul edilmiştir.

Analizler için senaryoların oluşturulmasının ardından, öncelikli olarak, çalışma kapsamında göz önünde bulundurulmuş dört kollu sinyalizasyon kavşağının, OSZD4 yaklaşımı ile yönetildiği varsayılmıştır. Tablo 5.2' de, dört kollu sinyalizasyon kavşak modelinin OSZD4 yaklaşımı ile yönetilmesi durumunda, her bir senaryo için elde edilen optimum sinyal süreleri ve ortalama taşıt gecikmeleri detaylı olarak sunulmaktadır.

**Tablo 5.2:** TUD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 20 trafik hacim senaryosu için OSZD4' ün uygulanması durumunda elde edilen optimum sinyal süreleri ve ortalama taşıt gecikmeleri

Talep	Senaryo No	Faz I (sn)	Faz II (sn)	Faz III (sn)	Faz IV (sn)	Devre Süresi (sn)	Ortalama Taşıt Gecikmesi (sn/ta)
Düşük	1	10	9	9	12	60	25,00
	2	9	7	8	9	53	20,82
	3	19	8	16	13	76	33,25
	4	13	9	11	11	64	26,89
	5	12	7	10	9	58	23,60
Orta	6	14	8	12	11	65	28,32
	7	19	8	16	13	76	32,84
	8	19	9	17	13	78	33,30
	9 (Referans)	19	9	16	13	77	33,20
	10	18	9	16	13	76	34,51
Yüksek	11	19	9	17	14	79	34,00
	12	25	11	22	17	95	43,82
	13	24	11	21	17	93	44,63
	14	25	12	22	18	97	45,55
	15	31	14	27	22	114	55,59
Çok Yüksek	16	45	19	39	31	154	78,83
	17	45	20	39	31	155	82,37
	18	31	15	27	22	115	57,56
	19	45	20	39	31	155	81,21
	20	45	20	39	31	155	80,26
Faz I: Batı / Faz II: Kuzey / Faz III: Doğu / Faz IV: Güney - Sarı Süreler: 2+2 sn / Ortak Kırmızı Süre: 1 sn							

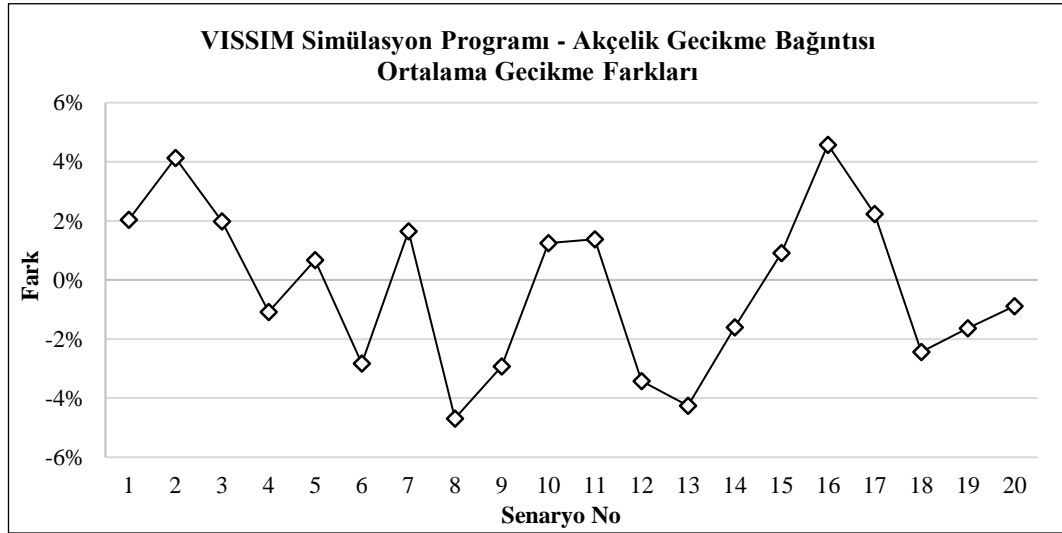
Tablo 5.2' de verilen sinyal süreleri ve ortalama taşıt gecikmesi değerlerinin elde edilmesinin ardından, her bir senaryo için, yaklaşım kollarına ait trafik hacimleri VISSIM simülasyon programına aktarılmıştır. Bu aşamada dikkat edilmesi gereken bir başka husus da Akçelik bağıntısı (MATLAB' da hazırlanan optimizasyon programı) ile elde edilen performans sonuçlarının VISSIM ile elde edilen performans sonuçlarına benzetilmesidir. Her bir senaryo için, VISSIM' den de, Tablo 5.2' de gösterilen ortalama gecikme değerlerine yakın değerlerin elde edilmesi öncelikli amaç olmalıdır. Bu bağlamda, kavşak yaklaşım kollarının 100' er metre öncesinden itibaren bir değerlendirme alanı oluşturulmuş ve sürücü davranışları ile ilgili bir takım düzenlemeler (güveli takip mesafeleri, güvenlik katsayıları, takip aralıkları vb.) yapılarak VISSIM ile elde edilen sonuçlar Akçelik bağıntısı ile elde edilen sonuçlara benzetilmeye çalışılmıştır. Bu aşamada, deneme-yanılma yöntemine başvurulmuş ve sonuç olarak, oluşturulan 20 trafik hacim senaryosu için, VISSIM' den elde edilen ortalama gecikmelerin Akçelik bağıntısı ile elde edilen ortalama gecikmelere oldukça

benzer olduğu görülmüştür. Senaryolar için, Akçelik bağıntısı ve VISSIM ile elde edilen ortalama gecikme değerleri Tablo 5.3’ de verilmektedir.

**Tablo 5.3:** TUD4’ ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 20 trafik hacim senaryosu için OSZD4’ ün uygulanması durumunda, Akçelik gecikme bağıntısı ve VISSIM ile elde edilen ortalama gecikme değerleri

Hacim	Senaryo No	Akçelik (sn/ta)	VISSIM (sn/ta)	Hacim	Senaryo No	Akçelik (sn/ta)	VISSIM (sn/ta)
Düşük	1	25,00	25,51	Yüksek	11	34,00	34,47
	2	20,82	21,68		12	43,82	42,32
	3	33,25	33,91		13	44,63	42,73
	4	26,89	26,60		14	45,55	44,82
	5	23,60	23,76		15	55,59	56,10
Orta	6	28,32	27,52	Çok Yüksek	16	78,83	82,44
	7	32,84	33,38		17	82,37	84,21
	8	33,30	31,74		18	57,56	56,16
	9	33,20	32,23		19	81,21	79,88
	10	34,51	34,94		20	80,26	79,55

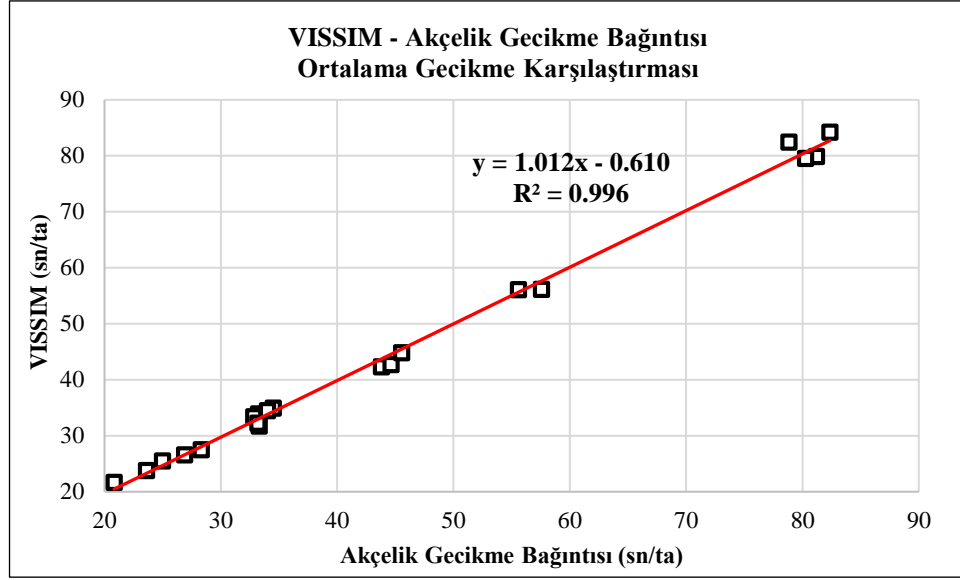
Akçelik ile VISSIM sonuçları arasındaki farklar Şekil 5.3’ de gösterilmektedir.



**Şekil 5.3:** TUD4’ ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 20 trafik hacim senaryosu için OSZD4’ ün uygulanması durumunda, Akçelik bağıntısı ve VISSIM gecikme sonuçları arasındaki farklar

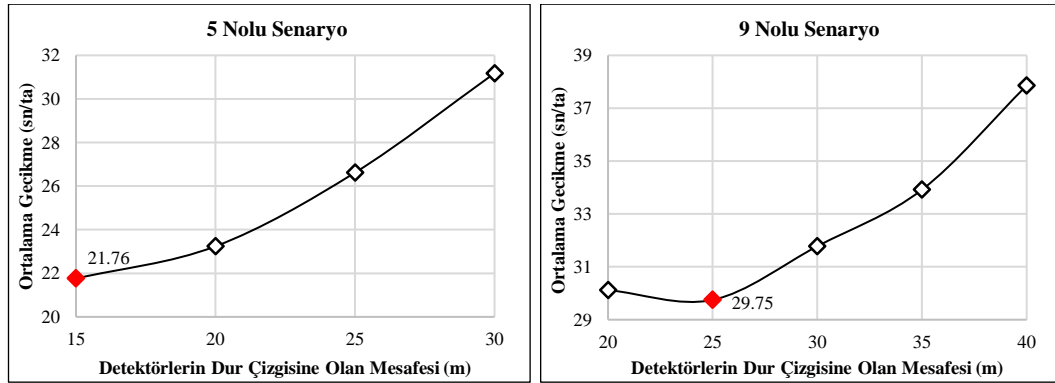
Şekil 5.3’ den görüldüğü üzere, her bir senaryo için, VISSIM simülasyon programı ve Akçelik gecikme bağıntısı ile elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri farkı genel olarak %5’ in altındadır. Bu durum, modelin, VISSIM simülasyon programına iyi derecede yansıtılabildiğinin bir göstergesi olarak belirtilebilir. Şekil 5.4’ de

senaryolar için, Akçelik gecikme bağıntısı ve VISSIM ile elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri grafiksel olarak gösterilmektedir.

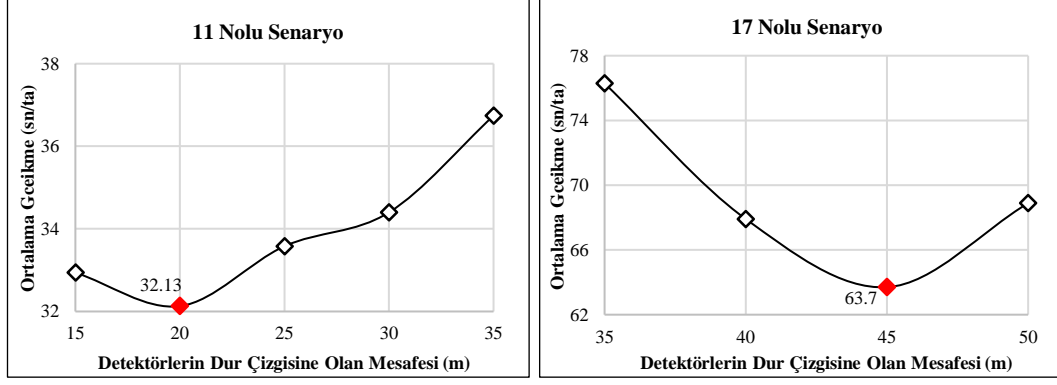


**Şekil 5.4:** TUD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 20 trafik hacim senaryosu için OSZD4' ün uygulanması durumunda, Akçelik gecikme bağıntısı ve VISSIM ortalama gecikme karşılaştırması

Analitik sonuçların VISSIM' de elde edilen sonuçlara benzetilmesinin ardından, TUD4 algoritması, senaryolar üzerinde test edilmiştir. Bu aşamada öncelikli olarak, oluşturulan her bir senaryo için en uygun detektör yerleşiminin belirlenmesi çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca, IV. bölümünde detaylı olarak bahsedilen TUD sistemi için kontrol parametrelerinin seçimleri, tüm senaryolarda aynı şekilde gerçekleştirilmiştir. Bazı senaryolar için, detektör yerleşimine yönelik çalışmalar sonucunda elde edilen ortalama gecikmeler Şekil 5.5 ve Şekil 5.6' da gösterilmektedir.



**Şekil 5.5:** TUD4 ' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan bazı senaryolar için, detektör yerleşiminin ortalama taşıt gecikmesi üzerindeki etkisi



**Şekil 5.6:** TUD4 ' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan bazı senaryolar için, detektör yerleşiminin ortalama taşıt gecikmesi üzerindeki etkisi (devam)

Şekil 5.5 ve Şekil 5.6' dan görüldüğü üzere, en uygun detektör yerleşimlerinin tespit edilebilmesi için kapsamlı bir çalışma yapılmıştır. Detektörlerin dur çizgisine olan mesafeleri 15 metre ve 45 metre aralığında artırılıp azaltılarak en uygun mesafenin belirlenmesi amaçlanmıştır. 5' er metrelik mesafe farkları oluşturularak yapılan analizler sonucunda, minimum ortalama gecikmenin sağlandığı mesafe, detektör yerleşiminin en uygun olduğu mesafe olarak göz önünde bulundurulmuştur. Tüm senaryolar için, yapılan analizler sonucunda elde edilen yaklaşık optimum detektör yerleşimleri Tablo 5.4'de verilmektedir.

**Tablo 5.4:** TUD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 20 trafik hacim senaryosu için yaklaşık optimum detektör yerleşimleri

Senaryo No	Detektörlerin Dur Çizgisine Olan Mesafesi (m)				Senaryo No	Detektörlerin Dur Çizgisine Olan Mesafesi (m)			
	Batı Y. K.	Kuzey Y. K.	Doğu Y. K.	Güney Y. K.		Batı Y. K.	Kuzey Y. K.	Doğu Y. K.	Güney Y. K.
1	15	15	15	15	11	20	20	20	20
2	15	15	15	15	12	30	30	30	30
3	15	15	15	15	13	30	30	30	30
4	15	15	15	15	14	35	35	35	35
5	15	15	15	15	15	45	45	45	45
6	15	15	15	15	16	45	45	45	45
7	20	20	20	20	17	45	45	45	45
8	20	20	20	20	18	45	45	45	45
9	25	25	25	25	19	45	45	45	45
10	20	20	20	20	20	45	45	45	45

Tablo 5.4 dikkatle incelendiğinde, gecikme minimizasyonu için, kavşaktaki toplam trafik hacmi arttıkça detektörlerin dur çizgisine olan mesafesinin de arttığı görülmektedir. Hacimlerin düşük ve orta olması durumunda en uygun mesafe 15 m. ile 25 m. aralığında değişmekte iken, yüksek ve çok yüksek olması durumunda mesafeler genel olarak 30 m. ile 45 m. aralığındadır.

TUD' un başarımı, özellikle kavşak yaklaşımlarındaki trafik taleplerinde dalgalanma görüldüğü durumlarda ve yaklaşımlardaki trafik taleplerindeki farkın çok fazla olduğu durumlarda daha belirgin bir şekilde artış göstermektedir (Çakıcı ve Murat 2019a; Cakici ve Murat 2019b). Çalışmanın bu bölümünde de, kavşak yaklaşım kollarındaki trafik taleplerinde dalgalanma olması durumunda TUD4' ün başarımının incelenmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda, 20 trafik hacim senaryosu için, talepte dalgalanmanın meydana geldiği zaman dilimleri ve bu dalgalanmaların nicelikleri üzerine örnek durumlar oluşturulmuştur. Söz konusu örnek durumlar Tablo 5.5' de detaylı olarak sunulmaktadır.

**Tablo 5.5:** Talepte dalgalanmaların meydana geldiği zaman dilimleri ve dalgalanmaların nicelikleri üzerine oluşturulan örnek durumlar

Senaryo No	Dalgalanmaların Meydana Geldiği Zaman Dilimleri ve Dalgalanmaların Nicelikleri
1	Batı yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %44' ünün 15. ve 30. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır.
2	Batı yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %33' ünün 10. ve 20. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır. Güney yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %50' sinin 30. ve 50. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır.
3	Doğu yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %60' ının 12. ve 36. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır.
4	Batı yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %56' sının 8. ve 30. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır. Doğu yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %56' sının 8. ve 30. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır.
5	Kuzey yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %33' ünün 30. ve 40. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır. Güney yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %33' ünün 30. ve 40. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır.
6	Batı yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %33' ünün 20. ve 33. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır. Batı yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %28' inin 47. ve 60. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır. Kuzey yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %22' sinin 20. ve 27. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır. Kuzey yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %22' sinin 40. ve 47. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır. Doğu yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %50' sinin 13. ve 33. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır.
7	Batı yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %67' sinin 30. ve 50. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır. Doğu yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %42' sinin 30. ve 40 dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır. Güney yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %50' sinin 10. ve 30. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır.
8	Batı yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %38' inin 30. ve 45. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır. Kuzey yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %38' inin 30. ve 45. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır. Doğu yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %50' sinin 45. ve 60. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır. Güney yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %38' inin 45. ve 60. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır.
9	Batı yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %50' sinin 30. ve 50. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır. Doğu yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %50' sinin 30. ve 50. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır.
10	Batı yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %50' sinin 20. ve 40. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır. Güney yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %50' sinin 40. ve 60. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır.
11	Kuzey yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %67' sinin 40. ve 60. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır. Doğu yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %75' inin 10. ve 40. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır.
12	Batı yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %50' sinin 20. ve 40. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır. Doğu yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %50' sinin 40. ve 60. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır.
13	Batı yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %42' sinin 5. ve 15. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır. Güney yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %33' ünün 15. ve 25. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır. Güney yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %33' ünün 40. ve 50. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır.
14	Kuzey yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %50' sinin 40. ve 60. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır. Güney yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %67' sinin 10. ve 30. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır.
15	Batı yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %38' inin 15. ve 30. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır.
16	Batı yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %33' ünün 5. ve 10. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır.
17	Kuzey yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %56' sının 30. ve 45. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır. Güney yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %38' inin 8. ve 23. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır.
18	Kuzey yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %67' sinin 40. ve 60. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır. Güney yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %50' sinin 10. ve 30. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır.
19	Kuzey yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %44' ünün 7. ve 20. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır. Güney yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %33' ünün 33. ve 47. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır.
20	Doğu yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %50' sinin 15. ve 30. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır.

Analiz Süresi = 60 dakika

Tablo 5.5’ de, her bir senaryo için, 60 dakikalık analiz periyodu boyunca, farklı kavşak yaklaşımlarındaki dalgalanmaların meydana geldiği zaman dilimleri ve söz konusu dalgalanmaların nicelikleri görülebilmektedir. Örneğin; Senaryo 6 için, 60 dakikalık periyod boyunca Batı ve Kuzey yaklaşım kolunda 2, Doğu yaklaşım kolunda ise 1 defa talepte dalgalanma meydana geldiği varsayılmıştır. Dalgalanmaların meydana geldiği zaman dilimleri ve bu dalgalanmaların nicelikleri ile ilgili olarak şunlar söylenebilir:

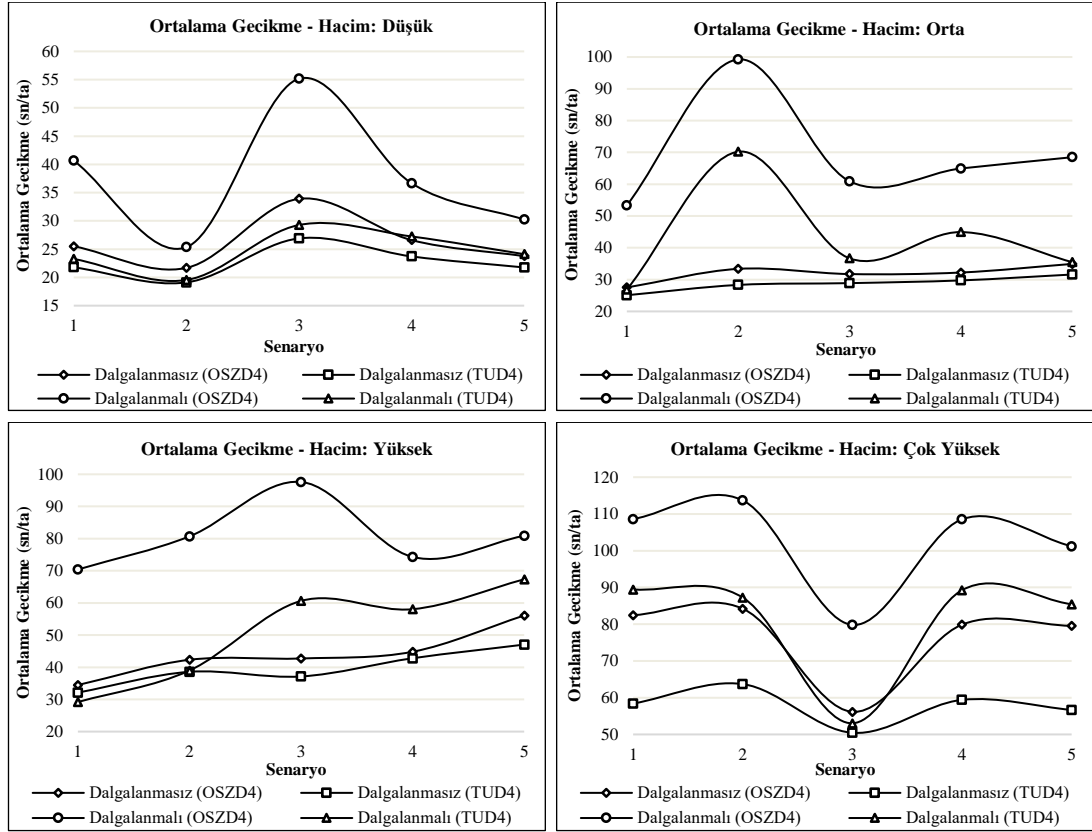
- Batı yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %33’ ünün 20. ve 33. dakikalar arasında, yaklaşık %28’ inin ise 47. ve 60. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır.
- Kuzey yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %22’ sinin 20. ve 27. dakikalar arasında, yine %22’ sinin de 40. ve 47. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır.
- Doğu yaklaşım kolundaki taşıtların yaklaşık %50’ sinin 13. ve 33. dakikalar arasında geldiği varsayılmıştır.

Tüm senaryolar için, yaklaşık optimum detektör yerleşimlerinin belirlenmesinin ve taleplerde dalgalanmaların meydana geldiği zaman dilimleri ile bu dalgalanmaların nicelikleri üzerine örnek durumların oluşturulmasının ardından, TUD4’ ün etkinliğini test etmek amacıyla, her bir senaryo 4 farklı şekilde ayrı ayrı analiz edilmiştir. Analizlerde göz önünde bulundurulmuş 4 farklı durumu şu şekilde özetlemek mümkündür:

- 1. Dalgalanmasız (OSZD4):** Birinci durumda, trafik taleplerinde dalgalanma söz konusu değildir. Her bir senaryo, MATLAB’ da hazırlanan sinyal süresi optimizasyonu yazılımı ile elde edilen optimum sinyal süreleri baz alınarak VISSIM’ de analiz edilmiştir.
- 2. Dalgalanmasız (TUD4):** İkinci durumda da talepte dalgalanma söz konusu değildir. Her bir senaryo, TUD4 baz alınarak VISSIM’ de analiz edilmiştir.
- 3. Dalgalanmalı (OSZD4):** Üçüncü durumda, her bir senaryo için, trafik taleplerinde dalgalanma olması durumunda OSZD4 sisteminin başarımının incelenmesi hedeflenmiştir.
- 4. Dalgalanmalı (TUD4):** Dördüncü durumda da, her bir senaryo için, trafik taleplerinde dalgalanma olması durumunda TUD4 sisteminin başarımının incelenmesi hedeflenmiştir.



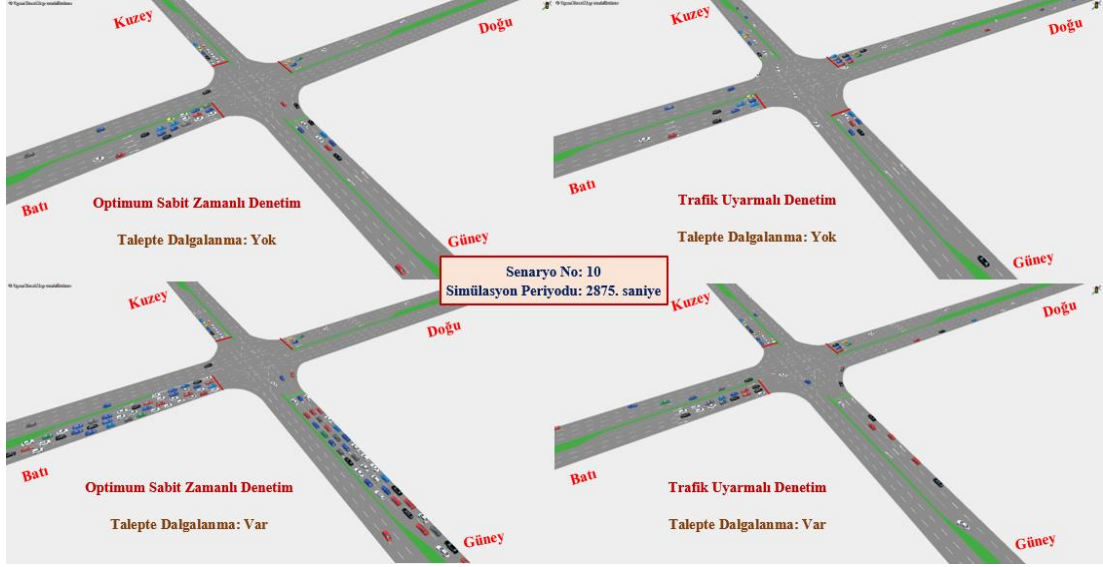
4 farklı durum göz önünde bulundurularak yapılan analizler sonucunda, her bir senaryo için elde edilen ortalama gecikme değerleri Şekil 5.7’ de grafiksel olarak gösterilmektedir.



**Şekil 5.7:** TUD4’ ün etkinliğinin test edilmesi için yapılan analizlerden elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri

Şekil 5.7’ den de görüldüğü üzere, özellikle kavşak yaklaşım kollarındaki trafik taleplerinde dalgalanma görüldüğü durumlarda, OSZD4’ ün etkinliği azalmıştır. Buradan, TUD4 uygulaması ile kavşaktaki ortalama taşıt gecikmelerinin önemli oranlarda azaltılabileceği açıkça görülmektedir. Bununla birlikte, kavşak yaklaşım kollarındaki trafik taleplerinde dalgalanma görülmediği durumlarda da, TUD4 uygulamasının kavşak denetiminde oldukça başarılı sonuçlar sağlayabileceği belirlenmiştir.

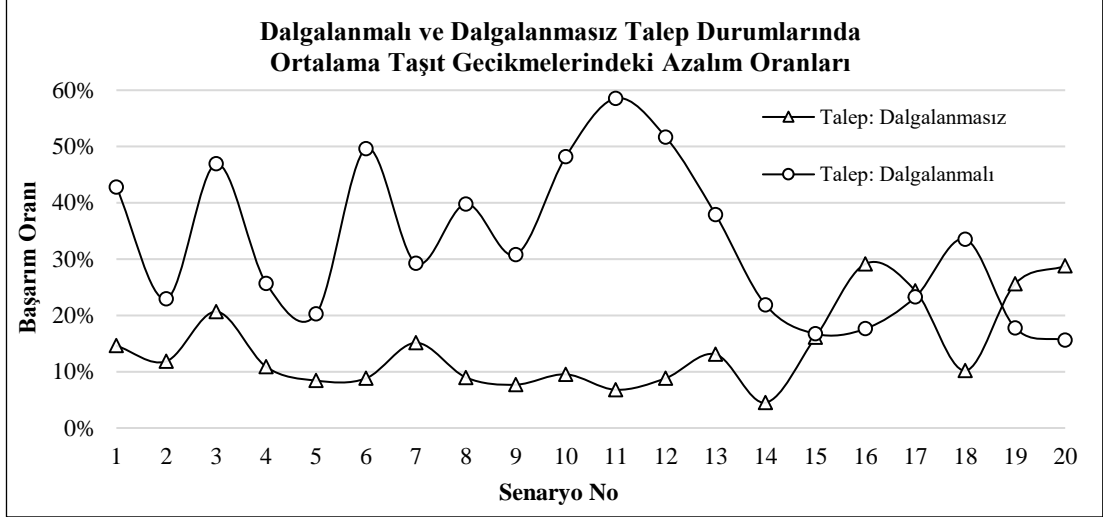
Örnek olarak, 10 numaralı senaryo için, kavşak yaklaşım kollarındaki trafik taleplerinde dalgalanma görülüp görülmemesi durumlarında, OSZD4 ve TUD4 uygulanması halinde, aynı simülasyon periyodunda VISSIM simülasyon programından elde edilen kavşak görüntülerinden kesitler Şekil 5.8’ de gösterilmektedir.



**Şekil 5.8:** TUD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla yapılan 10 numaralı senaryoya ait analizler için VISSIM' den elde edilen simülasyon görüntüleri

10 numaralı senaryo için trafik taleplerindeki dalgalanmalar Batı yaklaşım kolunda 20. ve 40. dakikalar arasında, Güney yaklaşım kolunda ise 40. ve 60. dakikalar arasında gerçekleşmektedir (Tablo 5.5). Bu yüzden, taleplerdeki dalgalanmaların da görülebilmesi amacıyla simülasyon görüntüleri, simülasyonun 47. dakikasında alınmıştır (2875 sn.). VISSIM' den alınan görüntülerden görüldüğü üzere, modellenen kavşakta OSZD4 uygulanması durumunda, talepte dalgalanmanın meydana geldiği kavşak yaklaşımlarında aşırı derecede kuyruklanmalar oluşmaktadır. Kavşakta, OSZD4 yerine TUD4 uygulanması durumunda ise talepte dalgalanmaların meydana geldiği kavşak yaklaşımlarındaki kuyruklanmaların önemli düzeyde azaltılabileceği açıkça görülmektedir. Ayrıca, talepte dalgalanma görülmemesi durumunda, yine aynı şekilde TUD4, OSZD4' e kıyasla daha avantajlı olmasına rağmen, elde edilen başarımlar oranları düşüktür. Şekil 5.8' den de görüldüğü üzere, talepte dalgalanma durumu söz konusu değil iken, hem OSZD4 hem de TUD4 uygulanması durumunda kavşak yaklaşımlarında aşırı derecede bir kuyruklanma oluşmamıştır. Fakat kuyruklanmaların, OSZD4 uygulanması durumunda, TUD4 uygulanması durumuna kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, VISSIM' den alınan görüntülerin elde edilen sonuçları destekler nitelikte olduğu söylenebilir.

Oluşturulan 20 trafik hacim senaryosu için, taleplerde dalgalanma görülüp görülmemesi durumlarında, OSZD4 yerine TUD4 uygulanması durumunda elde edilen başarımlar oranları Şekil 5.9' da sunulmaktadır.



**Şekil 5.9:** TUD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 20 trafik hacim senaryosu için OSZD4 yerine TUD4 uygulanması durumunda elde edilen başarımlar oranları

Şekil 5.9 dikkatle incelendiğinde, şu sonuçlara ulaşmak mümkündür:

- Talebin düşük, orta, yüksek ve dalgalanmalı olması durumlarında ortalama taşıt gecikmesi bazında elde edilen başarımlar oranları %20 ve %60 aralığındadır.
- Talebin çok yüksek ve dalgalanmalı olması durumunda ise başarımlar oranlarının %15' lere kadar azaldığı görülmektedir. Bu durum, çok yüksek ve dalgalanmalı talep durumlarında, TUD4' ün etkinliğinin azaldığını göstermektedir.
- Talebin düşük, orta, yüksek ve dalgalanmasız olması durumlarında ortalama taşıt gecikmesi bazında elde edilen başarımlar oranları %5 ve %20 aralığındadır.
- Talebin çok yüksek ve dalgalanmasız olması durumunda başarımlar oranlarının %30' lara kadar arttığı görülmektedir. Bu durum, çok yüksek ve dalgalanmasız talep durumlarında, TUD4' ün etkin çalışan bir sistem olduğunu göstermektedir.

Örnek senaryolar için, taleplerde dalgalanma olup olmaması durumları ayrı ayrı incelendiğinde ise şunlar söylenebilir:

- Talepte dalgalanma söz konusu değil ise, OSZD4 yerine TUD4 uygulanması durumunda ortalama taşıt gecikmesi bazında elde edilen başarımlar oranları; minimum %4,5; maksimum %29,2 ve ortalama %14,2' dir.

- Talepte dalgalanma söz konusu ise, OSZD4 yerine TUD4 uygulanması durumunda ortalama taşıt gecikmesi bazında elde edilen başarımlar oranları; minimum %15,6; maksimum %58,55 ve ortalama %32,5' dir.

Elde edilen sonuçlardan da görülebileceği üzere, oluşturulan senaryolar için, talepte dalgalanma olması durumunda, TUD4' ün etkinliği daha belirgin ortaya çıkmıştır. Talebin dalgalanmalı olması durumunda, ortalama taşıt gecikmesi performans kriteri için elde edilen başarımlar oranları, talebin dalgalanmasız olduğu duruma kıyasla yaklaşık 2,5 - 3 kat artış göstermiştir.

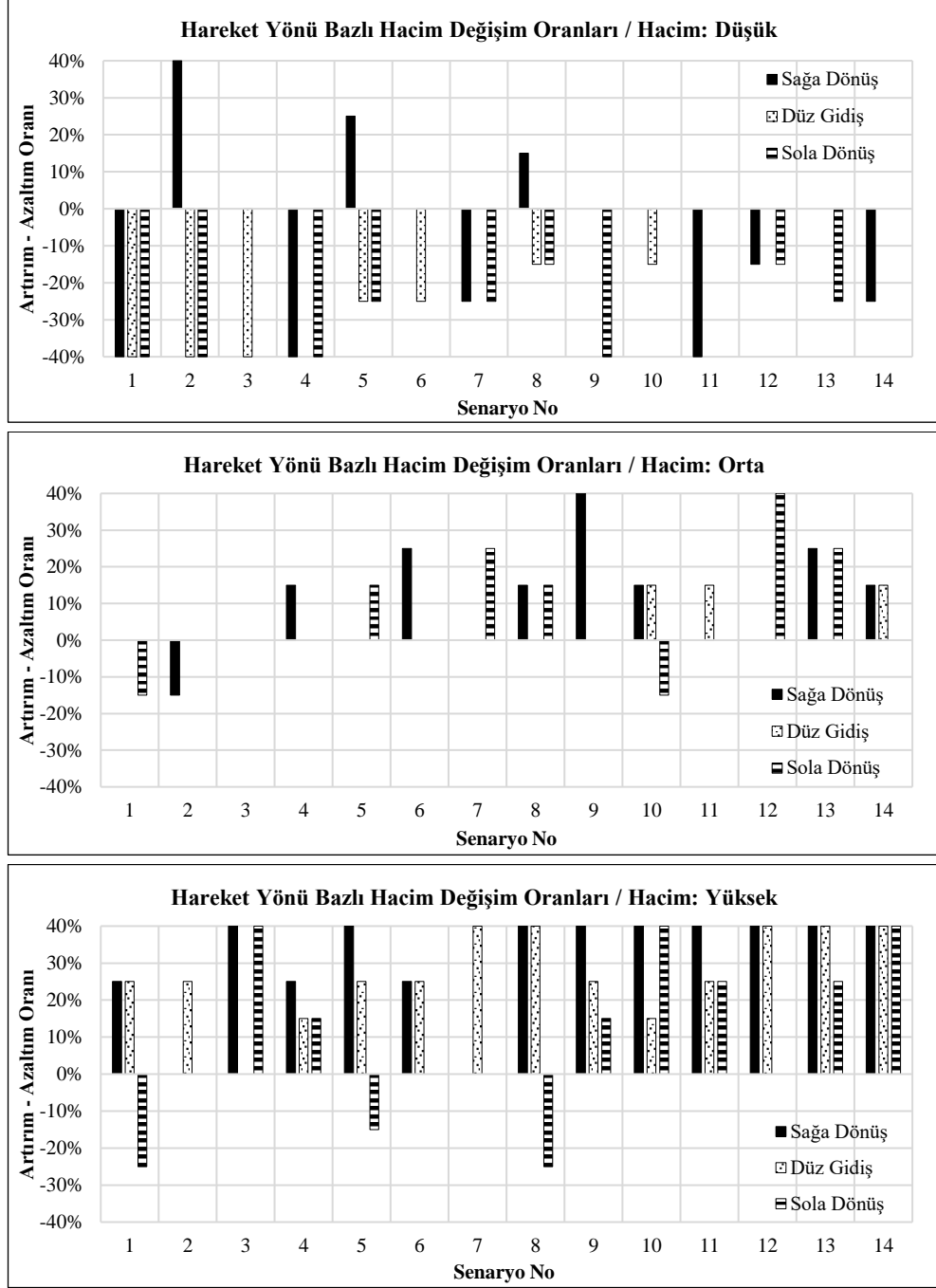
## 5.2 SFOTD3' ün Etkinliğinin Test Edilmesi

Çalışmanın bu bölümünde, öncelikli olarak, üç kollu sinyalize kavşak modeli göz önünde bulundurularak (Şekil 4.1), analiz çalışmaları için referans bir trafik hacim matrisi oluşturulmuştur. Hareket yönü bazlı referans trafik hacim matrisi Tablo 5.6' da detaylı olarak sunulmaktadır.

**Tablo 5.6:** SFOTD3' ün etkinliğinin test edilmesi için oluşturulan referans trafik hacim matrisi

Hacimler (ta/sa)				Oranlar			
Yaklaşım Kolu (B-V)	Batı	Kuzey	Doğu	Yaklaşım Kolu (B-V)	Batı	Kuzey	Doğu
Batı	-	300	850	Batı	-	0,261	0,739
Kuzey	250	-	350	Kuzey	0,417	-	0,583
Doğu	750	250	-	Doğu	0,750	0,250	-
Batı Yaklaşım Kolu: 1150 ta/sa Kuzey Yaklaşım Kolu: 600 ta/sa Doğu Yaklaşım Kolu: 1000 ta/sa				Kavşak Toplam Hacmi: 2750 ta/sa			

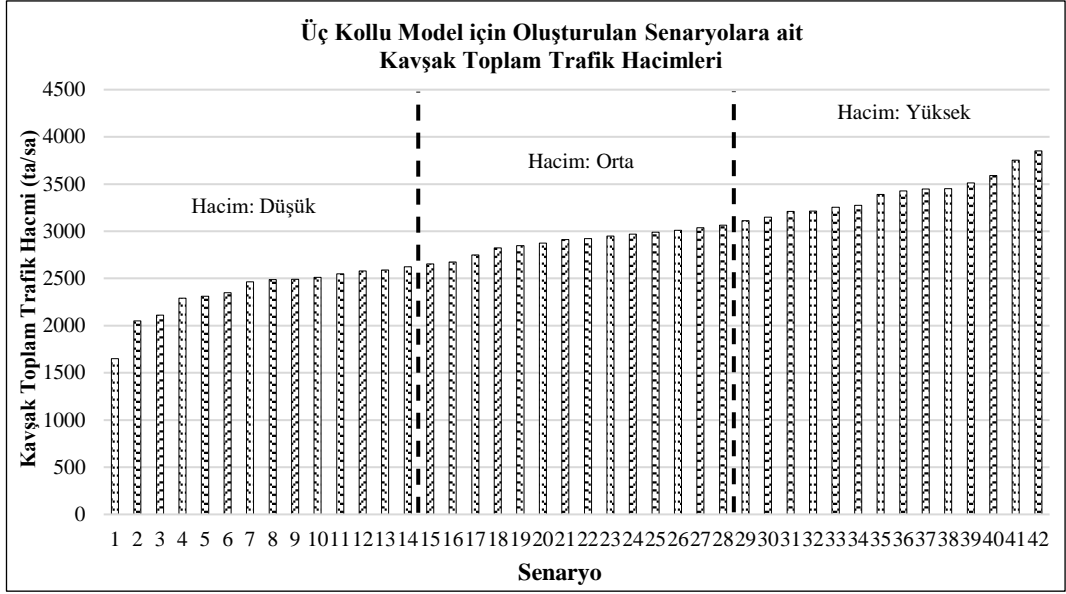
Bir sonraki aşamada, farklı senaryoların analizleri için, Tablo 5.5' de verilen referans trafik hacim matrisi göz önünde bulundurularak, hacimlerde arttırma - azaltmalar yapılmış ve toplam 42 adet trafik hacim senaryosu oluşturulmuştur. Oluşturulan senaryolar kavşaktaki toplam trafik hacimlerinin düşük, orta ve yüksek olması durumları göz önünde bulundurularak 3 gruba ayrılmıştır. Hacimlerin düşük, orta ve yüksek olması durumları için, hacimlerdeki hareket yönü bazlı artırım ve azaltım oranları Şekil 5.10' da gösterilmektedir.



**Şekil 5.10:** SFOTD3' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan senaryolar için hacimlerdeki hareket yönü bazlı artırım ve azaltım oranları

Şekil 5.10' dan görüldüğü üzere, düşük – orta ve yüksek hacim durumlarının hepsinde de senaryo numarası arttıkça hareket yönü bazlı trafik hacimleri de genel olarak artmıştır. Bu nedenle, senaryo numarası arttıkça kavşak toplam trafik hacimleri de artış göstermiştir. Böylelikle, çalışma kapsamında, geniş bir hacim aralığının (1650 ta/sa ile 3850 ta/sa) analiz edilmesi imkanı elde edilebilmiştir. Tüm senaryolar için, hareket yönü bazlı trafik hacimleri Ek C' de detaylı olarak verilmektedir.

Şekil 5.11’ de, hacimlerde gerçekleştirilen artırım ve azaltımlar sonucu oluşan kavşak toplam trafik hacimleri grafiksel olarak gösterilmektedir.



**Şekil 5.11:** SFOTD3’ ün etkinliğinin test edilmesi için oluşturulan senaryolara ait kavşak toplam trafik hacimleri

Şekil 5.11’ den görüldüğü üzere, kavşaktaki toplam trafik hacminin; 1650-2650 ta/sa arasında olması durumunda hacim düşük, 2650-3100 ta/sa olması durumunda hacim orta ve 3100-3850 ta/sa olması durumunda ise hacim yüksek olarak kabul edilmiştir.

Analizler için senaryoların oluşturulmasının ardından, öncelikli olarak, çalışma kapsamında göz önünde bulundurulmuş olan üç kollu sinyalizasyon kavşağın, OSZD3 yaklaşımı ile yönetildiği varsayılmıştır. Tablo 5.7’ de, üç kollu sinyalizasyon kavşak modelinin OSZD3 yaklaşımı ile yönetilmesi durumunda, her bir senaryo için elde edilen optimum sinyal süreleri ve ortalama taşıt gecikmeleri detaylı olarak sunulmaktadır.

**Tablo 5.7:** SFOTD3' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 42 trafik hacim senaryosu için OSZD3' ün uygulanması durumunda elde edilen optimum sinyal süreleri ve ortalama taşıt gecikmeleri

Talep	Senaryo No	Faz I (sn)	Faz II (sn)	Faz III (sn)	Devre Süresi (sn)	Ortalama Taşıt Gecikmesi (sn/ta)
Düşük	1	8	7	7	37	13,43
	2	10	12	12	49	19,52
	3	11	12	9	47	17,76
	4	19	9	17	60	21,60
	5	13	12	12	52	19,40
	6	13	13	12	53	19,96
	7	19	11	17	62	24,06
	8	15	12	13	55	21,32
	9	19	11	17	62	23,47
	10	16	14	14	59	22,94
	11	21	16	18	70	28,88
	12	19	13	17	64	25,78
	13	19	12	17	63	24,48
	14	20	16	18	69	28,74
Orta	1	19	13	17	64	25,77
	2	20	16	18	69	28,66
	3	20	16	18	69	28,59
	4	20	16	18	69	28,57
	5	21	19	19	74	31,84
	6	20	16	18	69	28,91
	7	23	22	20	80	34,48
	8	21	19	19	74	31,75
	9	21	17	19	72	30,18
	10	26	16	23	80	33,38
	11	26	18	23	82	36,35
	12	26	27	22	90	39,61
	13	23	22	20	80	34,35
	14	27	19	24	85	36,42
Yüksek	1	31	18	28	92	40,00
	2	33	21	29	98	43,42
	3	25	26	22	88	39,83
	4	29	23	26	93	40,91
	5	33	21	29	98	43,80
	6	34	22	30	101	44,06
	7	45	26	40	126	59,03
	8	45	26	40	126	59,10
	9	35	26	31	107	50,02
	10	33	31	29	108	50,98
	11	38	30	34	117	54,45
	12	45	27	40	127	62,14
	13	45	32	40	132	79,77
	14	45	35	40	135	98,49

Faz I: Batı / Faz II: Kuzey / Faz III: Doğu - Sarı Süreler: 2+2 sn / Ortak Kırmızı Süre: 1 sn

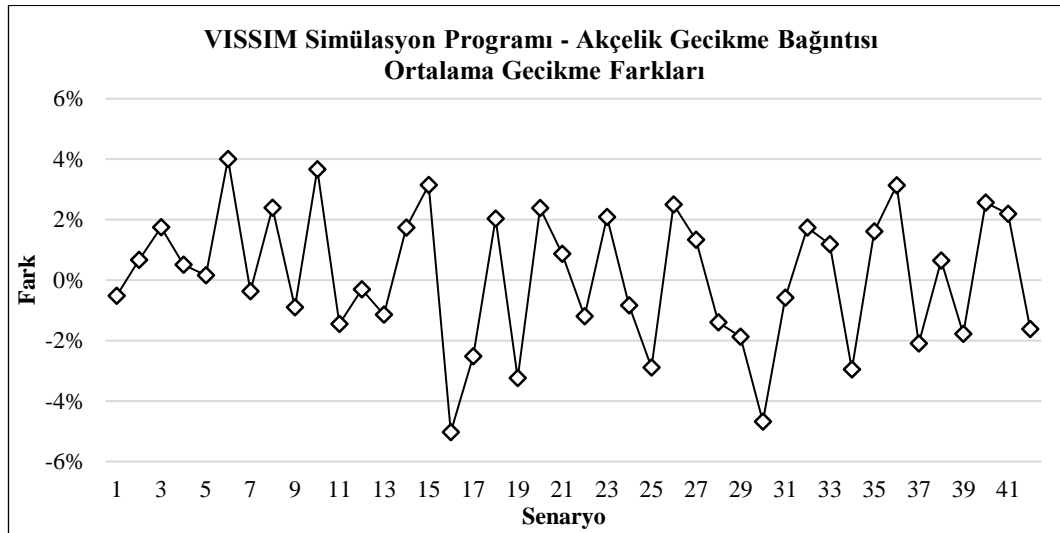
Tablo 5.7' de verilen sinyal süreleri ve ortalama taşıt gecikmesi değerlerinin elde edilmesinin ardından, her bir senaryo için, yaklaşım kollarına ait trafik hacimleri VISSIM simülasyon programına aktarılmıştır. Daha sonra, analizlerin birinci bölümünde detaylı olarak anlatılan benzetme çalışmaları yapılarak VISSIM' den elde edilen sonuçlar Akçelik bağıntısı ile elde edilen sonuçlara benzetilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak, oluşturulan 42 trafik senaryosu için, VISSIM' den elde edilen ortalama gecikmelerin Akçelik bağıntısı ile elde edilen ortalama gecikmelere oldukça benzer

olduğu görülmüştür. Senaryolar için, Akçelik bağıntısı ve VISSIM ile elde edilen ortalama gecikme değerleri Tablo 5.8’ de verilmektedir.

**Tablo 5.8:** SFOTD3’ ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 42 trafik hacim senaryosu için OSZD3’ ün uygulanması durumunda, Akçelik gecikme bağıntısı ve VISSIM ile elde edilen ortalama gecikme değerleri

Hacim: Düşük			Hacim: Orta			Hacim: Yüksek		
Senaryo No	Akçelik (sn/ta)	VISSIM (sn/ta)	Senaryo No	Akçelik (sn/ta)	VISSIM (sn/ta)	Senaryo No	Akçelik (sn/ta)	VISSIM (sn/ta)
1	13,43	13,36	1	25,77	26,58	1	40,00	39,25
2	19,52	19,65	2	28,66	27,22	2	43,42	41,39
3	17,76	18,07	3	28,59	27,87	3	39,83	39,60
4	21,60	21,71	4	28,57	29,15	4	40,91	41,62
5	19,40	19,43	5	31,84	30,81	5	43,80	44,32
6	19,96	20,76	6	28,91	29,60	6	44,06	42,76
7	24,06	23,97	7	34,48	34,78	7	59,03	59,98
8	21,32	21,83	8	31,75	31,37	8	59,10	60,95
9	23,47	23,26	9	30,18	30,81	9	50,02	48,97
10	22,94	23,78	10	33,38	33,10	10	50,98	51,31
11	28,88	28,46	11	36,35	35,30	11	54,45	53,48
12	25,78	25,70	12	39,61	40,60	12	62,14	63,73
13	24,48	24,20	13	34,35	34,81	13	79,77	81,52
14	28,74	29,24	14	36,42	35,91	14	98,49	96,90

Sonuçlar arasındaki farklar yüzdesel olarak Şekil 5.12’ de gösterilmektedir.

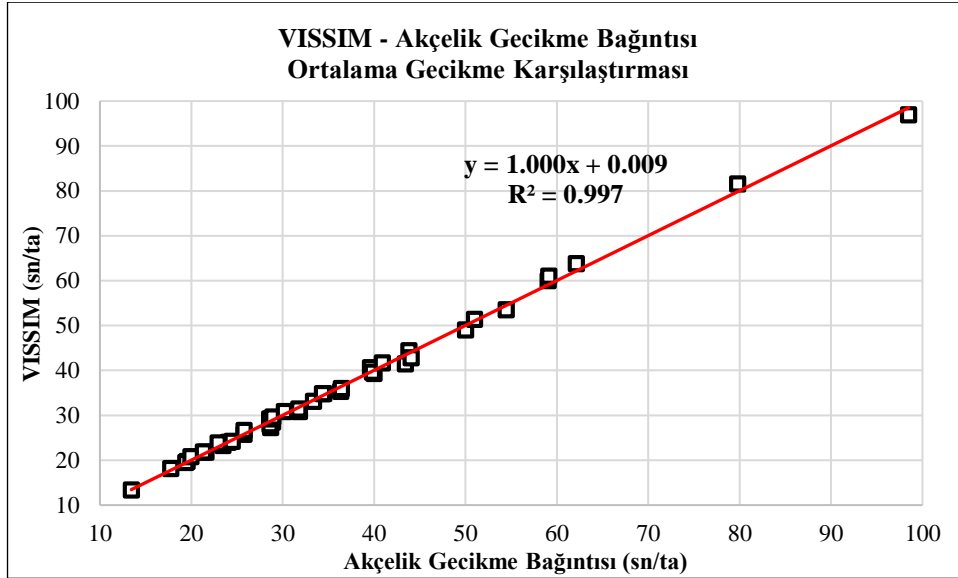


**Şekil 5.12:** SFOTD3’ ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 42 trafik hacim senaryosu için OSZD3’ ün uygulanması durumunda, Akçelik bağıntısı ve VISSIM gecikme sonuçları arasındaki farklar

Şekil 5.12’ den görüldüğü üzere, her bir trafik hacim senaryosu için, VISSIM simülasyon programı ve Akçelik gecikme bağıntısı ile elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri farkı genel olarak %5’ in altındadır. Bu durum, modelin, VISSIM

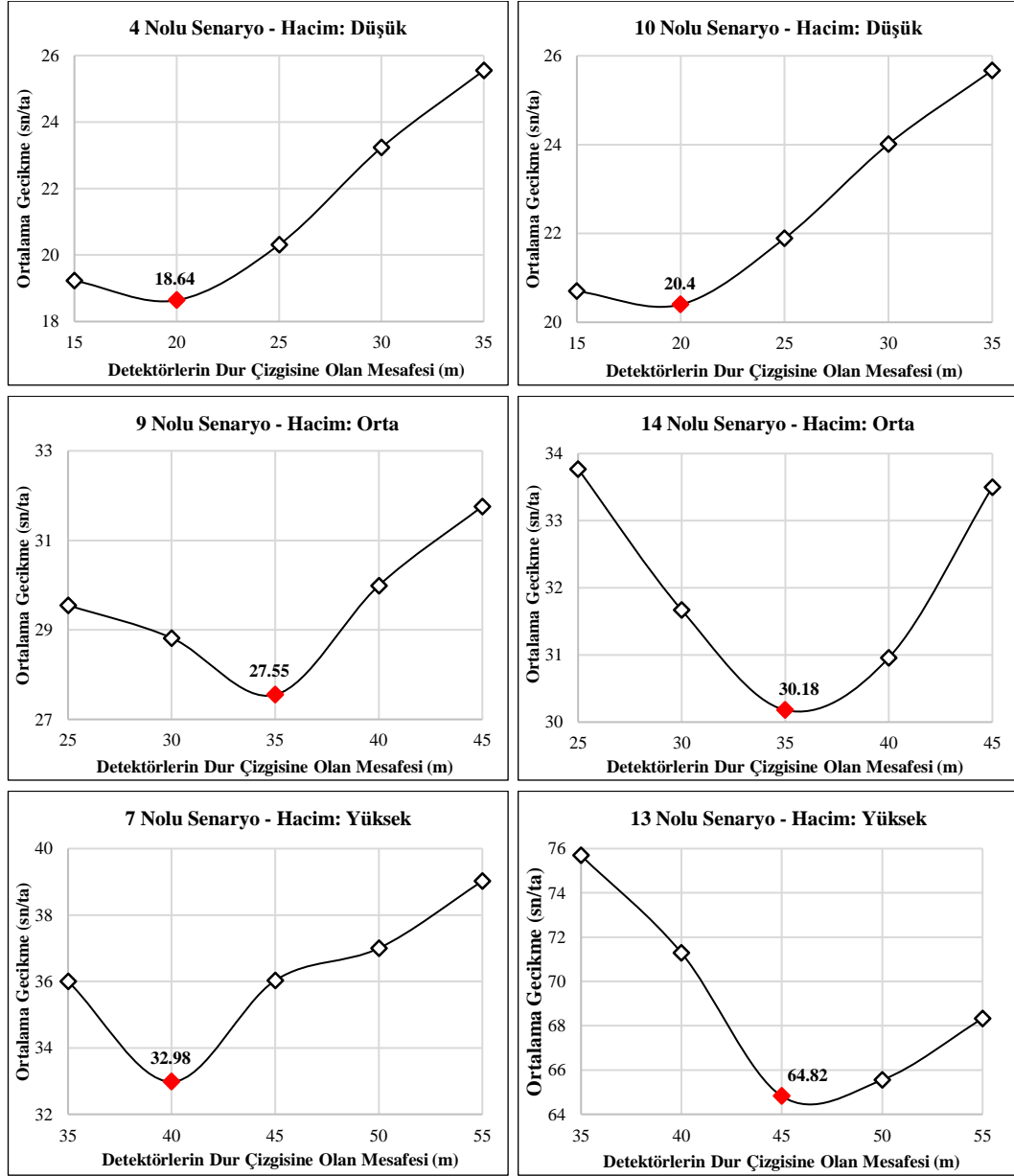


simülasyon programına iyi derecede yansıtılabildiğinin bir göstergesi olarak belirtilebilir. Şekil 5.13’ de senaryolar için, Akçelik gecikme bağıntısı ve VISSIM ile elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri grafiksel olarak gösterilmektedir.



**Şekil 5.13:** SFOTD3’ ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 42 trafik hacim senaryosu için OSZD3’ ün uygulanması durumunda, Akçelik gecikme bağıntısı ve VISSIM ortalama gecikme karşılaştırması

VISSIM’ de elde edilen sonuçların analitik sonuçlara benzetilmesinin ardından, aynı trafik senaryoları, TUD3 uygulaması göz önünde bulundurularak analiz edilmiştir. Bu aşamada öncelikli olarak, oluşturulan her bir senaryo için en uygun detektör yerleşiminin belirlenmesi çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca, IV. bölümünde detaylı olarak bahsedilen TUD için kontrol parametrelerinin seçimleri, tüm senaryolarda aynı şekilde gerçekleştirilmiştir. Hacimlerin düşük, orta ve yüksek olması durumlarında, bazı senaryolar için, detektör yerleşimine yönelik yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen ortalama gecikmeler Şekil 5.14’ de grafiksel olarak gösterilmektedir.



**Şekil 5.14:** Üç kollu sinyalizasyon kavşak modelinde hacimlerin düşük, orta ve yüksek olması durumlarında, bazı senaryolar için detektör yerleşimlerinin ortalama taşıt gecikmesi üzerindeki etkisi

Şekil 5.14’ den görüldüğü üzere, en uygun detektör yerleşimlerinin tespit edilebilmesi için kapsamlı bir çalışma yapılmıştır. Detektörlerin dur çizgisine olan mesafeleri 15 metre ve 45 metre aralığında artırılıp azaltılarak (deneme-yanılma yolu ile) en uygun mesafenin belirlenmesi amaçlanmıştır. 5’ er metrelik mesafe farkları oluşturularak yapılan analizler sonucunda, minimum ortalama gecikmenin sağlandığı mesafe, detektör yerleşiminin en uygun olduğu mesafe olarak göz önünde bulundurulmuştur. Tüm senaryolar için, yapılan analizler sonucunda elde edilen yaklaşık optimum detektör yerleşimleri Tablo 5.9’da verilmektedir.

**Tablo 5.9:** SFOTD3' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 42 trafik hacim senaryosu için TUD3 uygulanması durumunda yaklaşık optimum detektör yerleşimleri

Hacim: Düşük				Hacim: Orta				Hacim: Yüksek			
Senaryo No	Detektörlerin Dur Çizgisine Olan Mesafesi (m)			Senaryo No	Detektörlerin Dur Çizgisine Olan Mesafesi (m)			Senaryo No	Detektörlerin Dur Çizgisine Olan Mesafesi (m)		
	Batı Y. K.	Kuzey Y. K.	Doğu Y. K.		Batı Y. K.	Kuzey Y. K.	Doğu Y. K.		Batı Y. K.	Kuzey Y. K.	Doğu Y. K.
1	15	15	15	1	20	20	20	1	40	40	40
2	15	15	15	2	20	20	20	2	40	40	40
3	15	15	15	3	20	20	20	3	40	40	40
4	20	20	20	4	20	20	20	4	40	40	40
5	15	15	15	5	25	25	25	5	40	40	40
6	15	15	15	6	25	25	25	6	40	40	40
7	20	20	20	7	30	30	30	7	40	40	40
8	20	20	20	8	30	30	30	8	40	40	40
9	20	20	20	9	35	35	35	9	45	45	45
10	20	20	20	10	35	35	35	10	45	45	45
11	20	20	20	11	35	35	35	11	45	45	45
12	20	20	20	12	35	35	35	12	45	45	45
13	20	20	20	13	35	35	35	13	45	45	45
14	25	25	25	14	35	35	35	14	45	45	45

Tablo 5.9 dikkatle incelendiğinde, gecikme minimizasyonu için, kavşaktaki toplam trafik hacmi arttıkça detektörlerin dur çizgisine olan mesafesinin de arttığı görülmektedir. Bununla birlikte, en uygun mesafelerin; talebin düşük olması durumunda 15 m. ile 25 m., talebin orta olması durumunda 20 m. ile 35 m., talebin yüksek olması durumunda ise 40 metre ile 45 metre aralığında değiştiği söylenebilir.

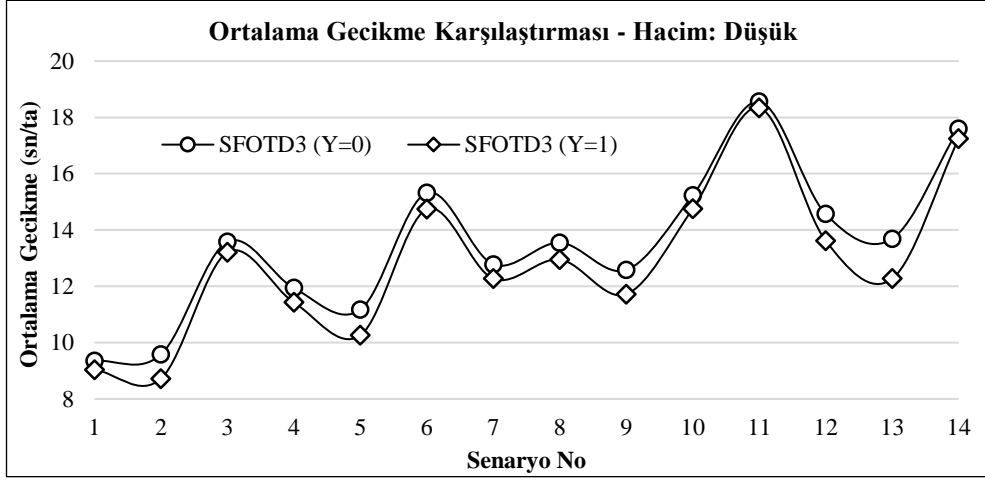
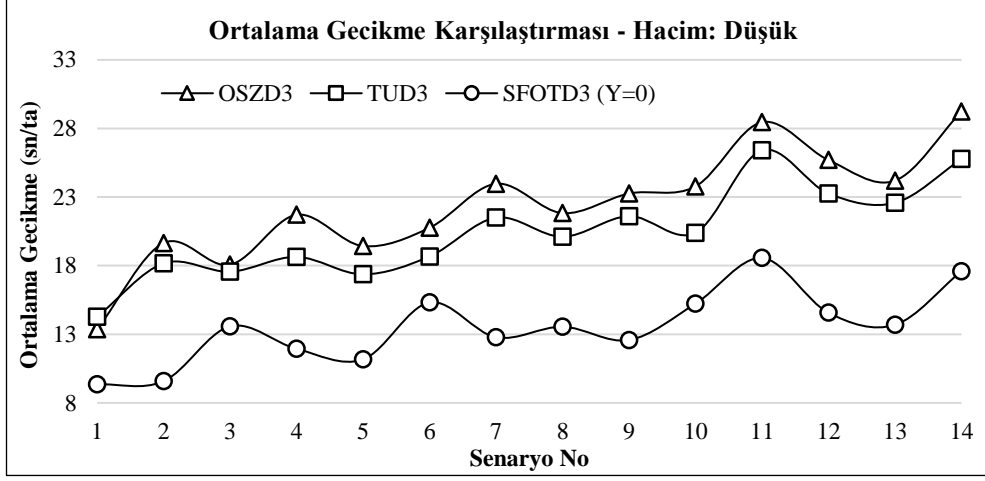
Oluşturulan tüm senaryolar için yaklaşık optimum detektör yerleşimlerinin belirlenmesinin ardından, 4 farklı denetim tipi (Optimum Sabit Zamanlı Denetim – OSZD3, Trafik Uyarımlı Denetim – TUD3, Sinyal Süresi ve Faz Optimizasyonu Tabanlı Denetim / Yaklaşma=0 – SFOTD3 / Y=0, Sinyal Süresi ve Faz Optimizasyonu Tabanlı Denetim / Yaklaşma=1 – SFOTD3 / Y=1), hacimlerin düşük – orta ve yüksek olması durumlarına göre ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Söz konusu 4 farklı denetim tipini şu şekilde özetlemek mümkündür:

- 1. Optimum Sabit Zamanlı Denetim (OSZD3):** Bu durumda, çalışma kapsamında oluşturulan 42 trafik senaryosu, MATLAB' da hazırlanan sinyal süresi optimizasyonu yazılımı ile elde edilen optimum yeşil süreler ve devre süreleri baz alınarak VISSIM' de analiz edilmiştir.

- 2. Trafik Uyarımalı Denetim (TUD3):** Bu durumda, modellenen üç kollu sinyalizasyon kavşak IV. Bölümde detaylı olarak açıklanan TUD3 algoritması kullanılarak yönetilmiştir. Her bir senaryo için farklı bir VISSIM dosyası oluşturulmuş ve deneme-yanılma yoluyla yaklaşık optimum detektör mesafeleri tespit edilmiştir. Daha sonra ise, VISSIM programı vasıtasıyla tüm senaryolar için ortalama gecikme değerleri elde edilmiştir.
- 3. Sinyal Süresi ve Faz Optimizasyonu Tabanlı Denetim / Yaklaşma=0 (SFOTD3 / Y=0):** Bu durumda, modellenen üç kollu sinyalizasyon kavşak, IV. Bölümde detaylı olarak açıklanan SFOTD3 uygulanarak yönetilmiştir. Denetim aşamasında, yalnızca yaklaşma (katılma) sayılarının 0 olduğu faz planları dikkate alınmış ve kavşak denetimi bu şekilde gerçekleştirilmiştir. VISSIM’de yapılan 3600 sn’lik analizlerin ardından her bir senaryo için ortalama gecikme değerleri elde edilmiştir.
- 4. Sinyal Süresi ve Faz Optimizasyonu Tabanlı Denetim / Yaklaşma=1 (SFOTD3 / Y=1):** Bu durumda da, modellenen üç kollu sinyalizasyon kavşak, IV. Bölümde detaylı olarak açıklanan SFOTD3 uygulanarak yönetilmiştir. SFOTD3 / Y=0’den farklı olarak, denetim aşamasında toplam yaklaşma (katılma) sayılarının 1’e eşit olduğu faz planları da dikkate alınmış ve kavşak denetimi bu şekilde gerçekleştirilmiştir. VISSIM’de yapılan 3600 sn’lik analizlerin ardından her bir senaryo için ortalama gecikme değerleri elde edilmiştir.

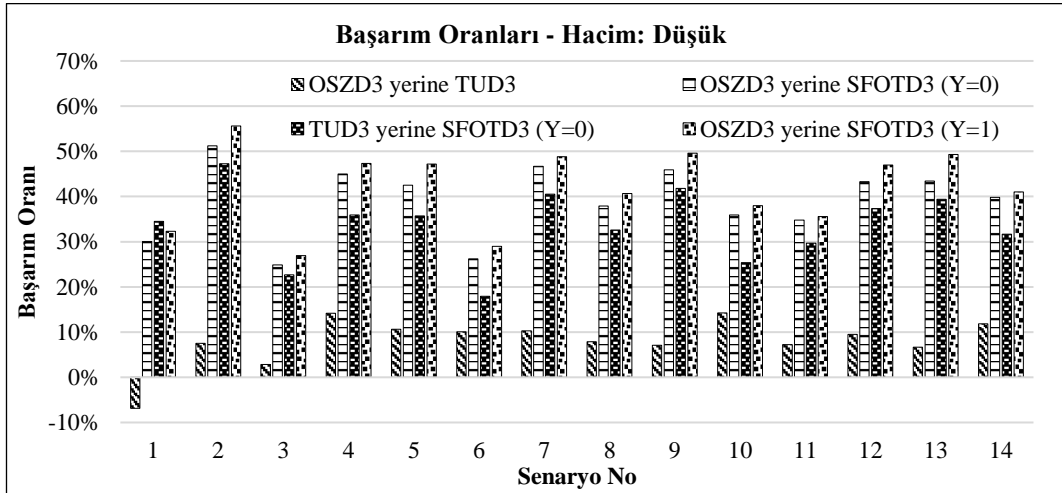
Yukarıda detaylı olarak açıklanan 4 farklı denetim tipi göz önünde bulundurularak yapılan analizler sonucunda, kavşaktaki trafik hacimlerinin düşük, orta ve yüksek olması durumlarında elde edilen sonuçlar ayrı ayrı değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.

Kavşak yaklaşımlarındaki trafik hacimlerinin düşük olması durumunda VISSIM’den elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri Şekil 5.15’de grafiksel olarak sunulmaktadır.



**Şekil 5.15:** Hacimlerin düşük olması durumunda, SFOTD3' ün etkinliğinin test edilmesi için yapılan analizlerden elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri

Kavşak yaklaşımlarındaki trafik hacimlerinin düşük olduğu senaryolar için elde edilen başarımlar Şekil 5.16' da gösterilmektedir.



**Şekil 5.16:** Üç kollu sinyalizasyon kavşak modeli için hacimlerin düşük olması durumunda elde edilen senaryo bazlı başarımlar

Şekil 5.16 dikkatle incelendiğinde, aşağıdaki verilen sonuçlara ulaşmak mümkündür:

- Hacimler düşük iken, optimum sabit zamanlı denetim (OSZD3) yerine trafik uyarmalı denetim (TUD3) uygulanması durumunda;

Minimum: -%6,9;

Maksimum: %14,2;

Ortalama: %8,1

oranında gecikme azalımı sağlanabilmiştir.

- Hacimler düşük iken, optimum sabit zamanlı denetim (OSZD3) yerine sinyal süresi ve faz optimizasyonu tabanlı denetim / yaklaşma=0 (SFOTD3 / Y=0) uygulanması durumunda;

Minimum: %24,8;

Maksimum: %51,2;

Ortalama: %39,1;

oranında gecikme azalımı sağlanabilmiştir.

- Hacimler düşük iken, trafik uyarmalı denetim (TUD3) yerine sinyal süresi ve faz optimizasyonu tabanlı denetim / yaklaşma=0 (SFOTD3 / Y=0) uygulanması durumunda;

Minimum: %17,9;

Maksimum: %47,3;

Ortalama: %33,8

oranında gecikme azalımı sağlanabilmiştir.

- Hacimler düşük iken, optimum sabit zamanlı denetim (OSZD3) yerine sinyal süresi ve faz optimizasyonu tabanlı denetim / yaklaşma=1 (SFOTD3 / Y=1) uygulanması durumunda;

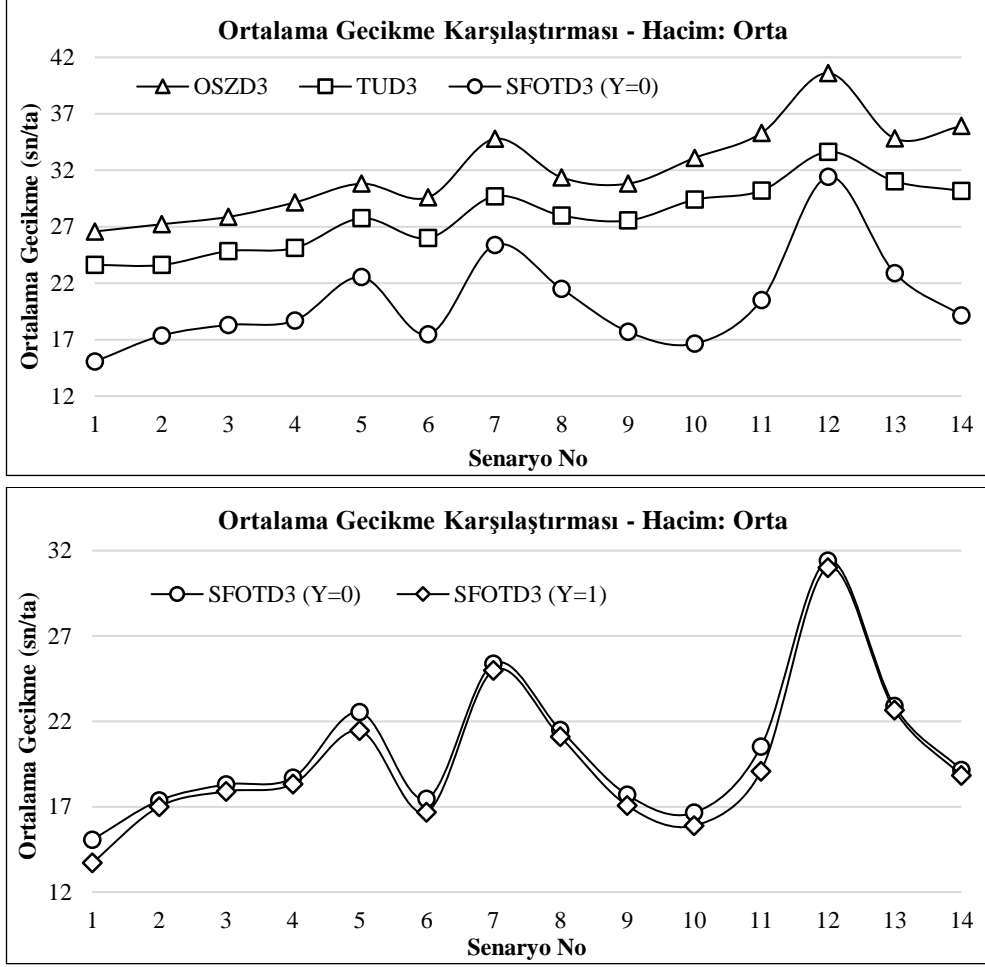
Minimum: %26,9;

Maksimum: %55,6;

Ortalama: %42,0

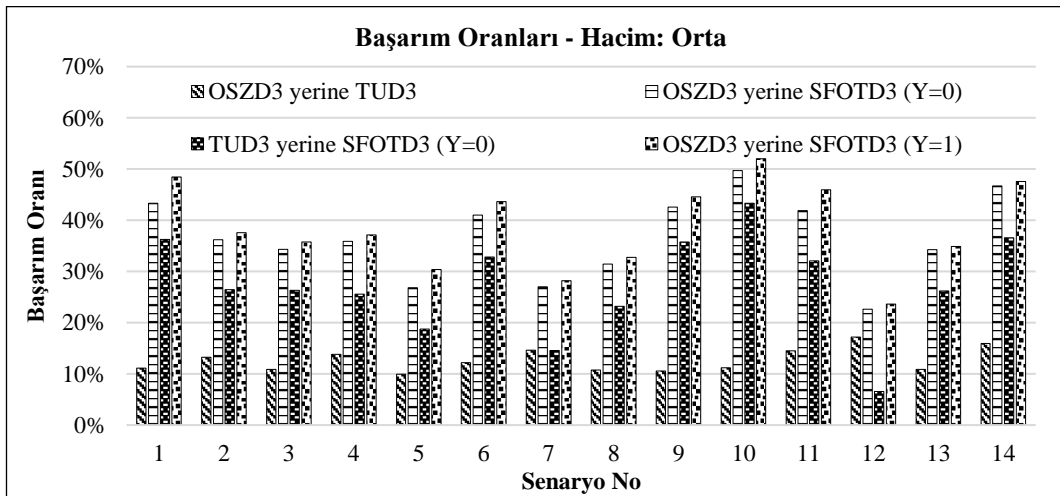
oranında gecikme azalımı sağlanabilmiştir.

Kavşak yaklaşım kollarındaki trafik hacimlerinin orta düzeyli olması durumunda VISSIM simülasyon programından elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri ise Şekil 5.17' de sunulmaktadır.



Şekil 5.17: Hacimlerin orta olması durumunda, SFOTD3' ün etkinliğinin test edilmesi için yapılan analizlerden elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri

Kavşak yaklaşımlarındaki trafik hacimlerinin orta düzeyde olduğu senaryolar için elde edilen başarımlar Şekil 5.18' de gösterilmektedir.



Şekil 5.18: Üç kollu sinyalizasyon kavşak modeli için hacimlerin orta olması durumunda elde edilen senaryo bazlı başarımlar

Şekil 5.18 dikkatle incelendiğinde, aşağıdaki verilen sonuçlara ulaşmak mümkündür:

- Hacimler orta iken, optimum sabit zamanlı denetim (OSZD3) yerine trafik uyarmalı denetim (TUD3) uygulanması durumunda;

Minimum: %9,9;

Maksimum: %17,2;

Ortalama: %12,6

oranında gecikme azalımı sağlanabilmektedir.

- Hacimler orta iken, optimum sabit zamanlı denetim (OSZD3) yerine sinyal süresi ve faz optimizasyonu tabanlı denetim / yaklaşma=0 (SFOTD3 / Y=0) uygulanması durumunda;

Minimum: %22,6;

Maksimum: %49,7;

Ortalama: %36,7

oranında gecikme azalımı sağlanabilmektedir.

- Hacimler orta iken, trafik uyarmalı denetim (TUD3) yerine sinyal süresi ve faz optimizasyonu tabanlı denetim / yaklaşma=0 (SFOTD3 / Y=0) uygulanması durumunda;

Minimum: %6,5;

Maksimum: %43,3;

Ortalama: %27,5

oranında gecikme azalımı sağlanabilmektedir.

- Hacimler orta iken, optimum sabit zamanlı denetim (OSZD3) yerine sinyal süresi ve faz optimizasyonu tabanlı denetim / yaklaşma=1 (SFOTD3 / Y=1) uygulanması durumunda;

Minimum: %23,6;

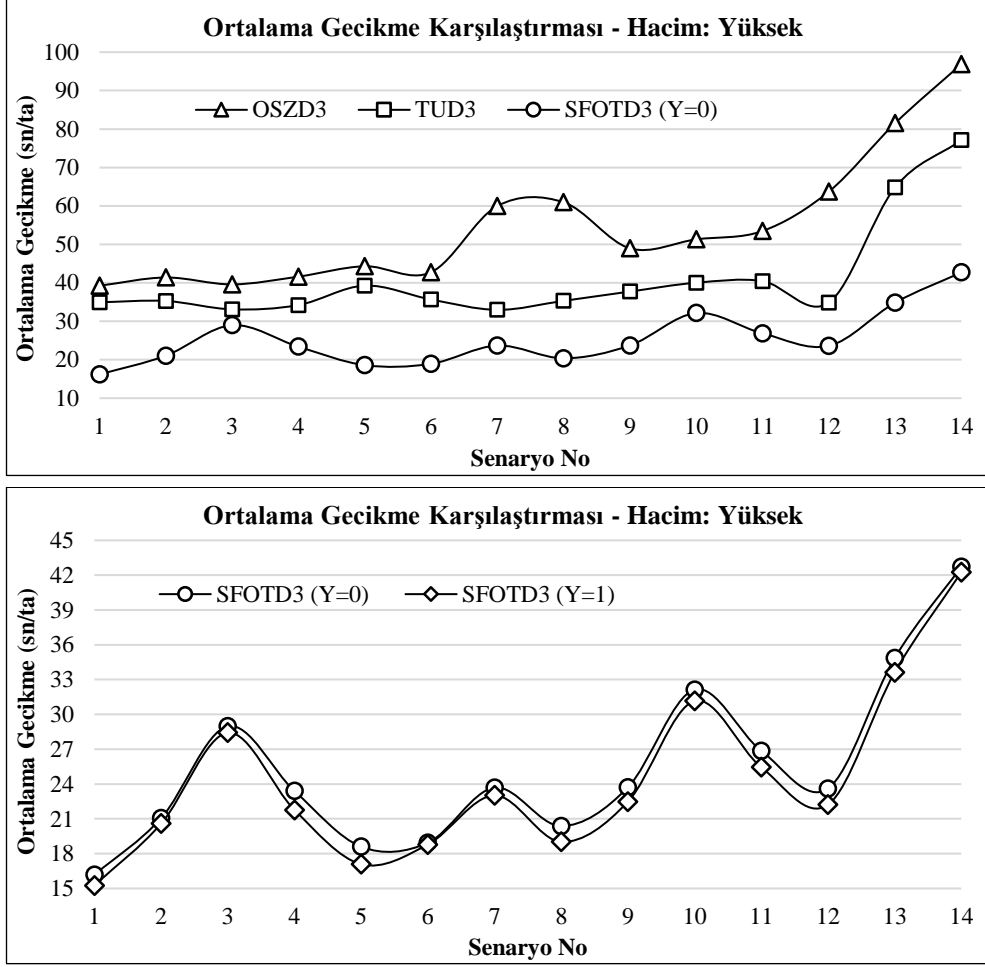
Maksimum: %52,0;

Ortalama: %37,7

oranında gecikme azalımı sağlanabilmektedir.

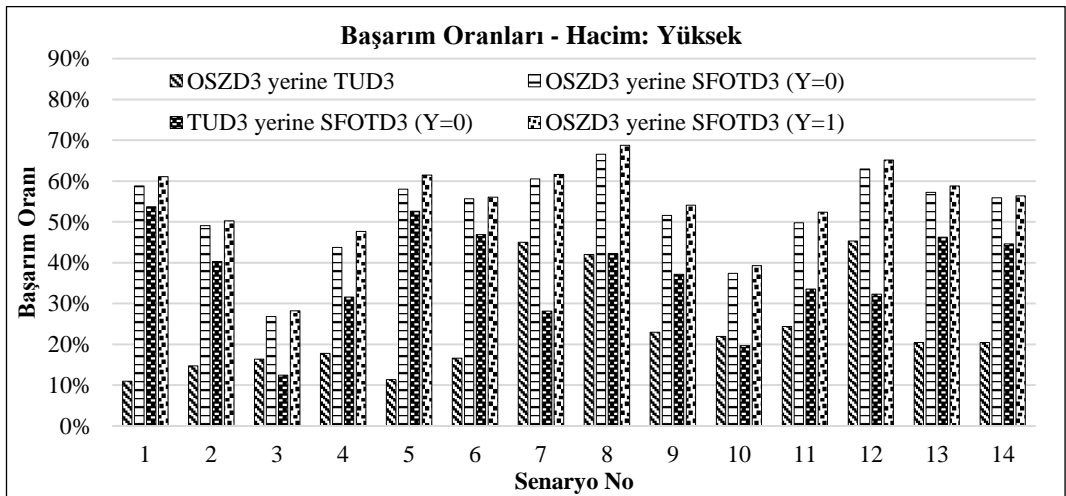
Kavşak yaklaşım kollarındaki trafik hacimlerinin yüksek olması durumunda VISSIM simülasyon programından elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri ise Şekil 5.19' da sunulmaktadır.





**Şekil 5.19:** Hacimlerin yüksek olması durumunda, SFOTD3' ün etkinliğinin test edilmesi için yapılan analizlerden elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri

Kavşak yaklaşımlarındaki trafik hacimlerinin yüksek olduğu senaryolar için elde edilen başarımlar Şekil 5.20' de gösterilmektedir.



**Şekil 5.20:** Üç kollu sinyalizasyon kavşak modeli için hacimlerin yüksek olması durumunda elde edilen senaryo bazlı başarımları

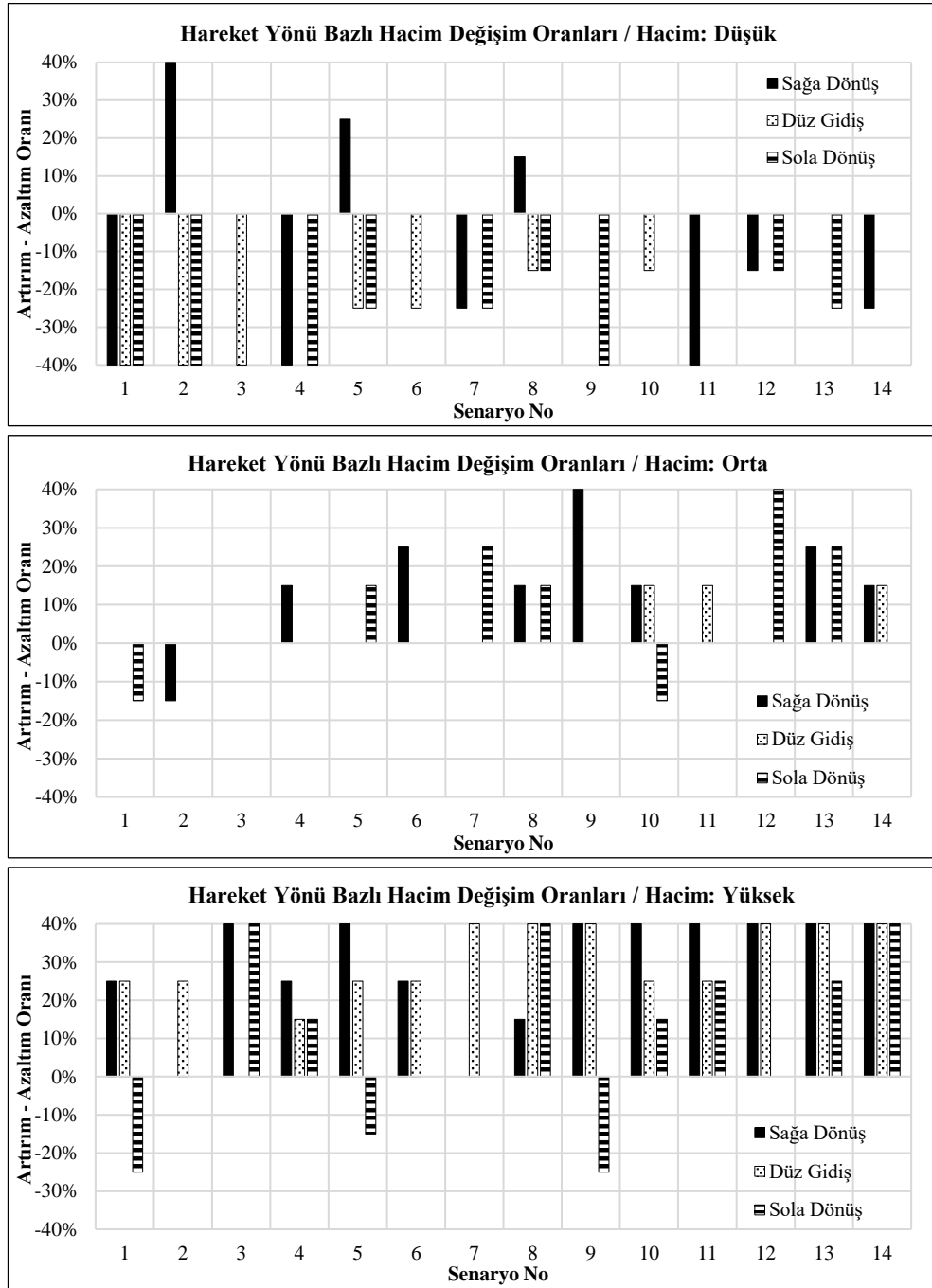
Şekil 5.20 dikkatle incelendiğinde, aşağıdaki verilen sonuçlara ulaşmak mümkündür:

- Hacimler yüksek iken, optimum sabit zamanlı denetim (OSZD3) yerine trafik uyarmalı denetim (TUD3) uygulanması durumunda;  
Minimum: %11,0;  
Maksimum: %45,3;  
Ortalama: %23,6  
oranında gecikme azalımı sağlanabilmiştir.
- Hacimler yüksek iken, optimum sabit zamanlı denetim (OSZD3) yerine sinyal süresi ve faz optimizasyonu tabanlı denetim / yaklaşma=0 (SFOTD3 / Y=0) uygulanması durumunda;  
Minimum: %26,8;  
Maksimum: %66,8;  
Ortalama: %52,4  
oranında gecikme azalımı sağlanabilmiştir.
- Hacimler yüksek iken, trafik uyarmalı denetim (TUD3) yerine sinyal süresi ve faz optimizasyonu tabanlı denetim / yaklaşma=0 (SFOTD3 / Y=0) uygulanması durumunda;  
Minimum: %12,5;  
Maksimum: %53,7;  
Ortalama: %37,3  
oranında gecikme azalımı sağlanabilmiştir.
- Hacimler yüksek iken, optimum sabit zamanlı denetim (OSZD3) yerine sinyal süresi ve faz optimizasyonu tabanlı denetim / yaklaşma=1 (SFOTD3 / Y=1) uygulanması durumunda;  
Minimum: %28,2,  
Maksimum: %68,8,  
Ortalama: %54,4  
oranında gecikme azalımı sağlanabilmiştir.

Elde edilen karşılaştırma sonuçlarından da görüldüğü üzere (Şekil 5.16 – Şekil 5.18 – Şekil 5.20), SFOTD3 yaklaşımı, kavşaktaki ortalama taşıt gecikmelerinin azaltılmasında oldukça etkin bir yaklaşımdır.

### 5.3 SFOTD4' ün Etkinliğinin Test Edilmesi

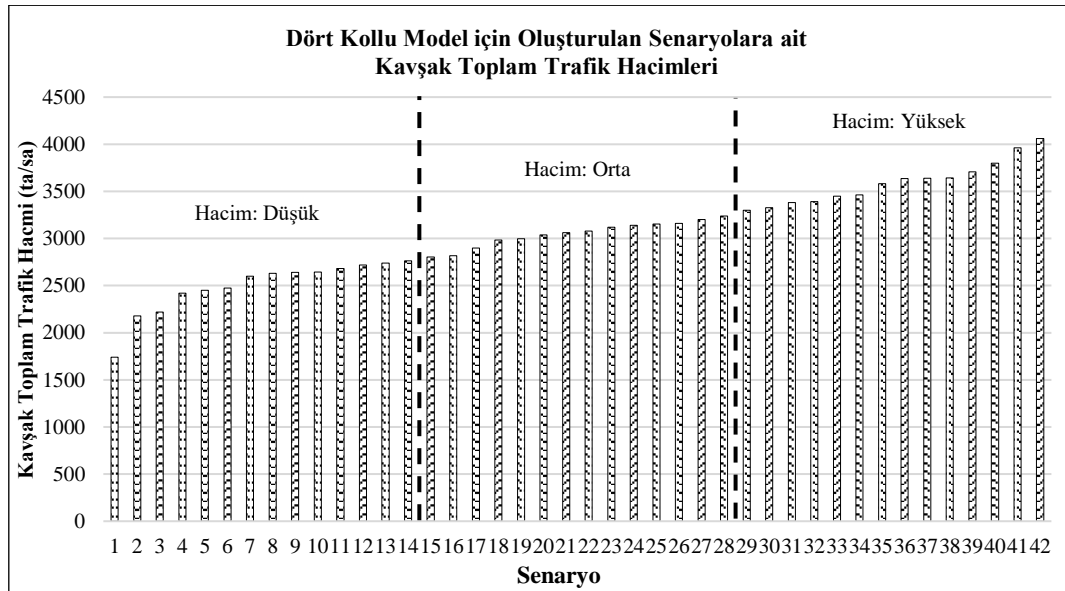
Çalışmanın bu bölümdeki analizler için de, Tablo 5.1' de verilen referans trafik hacim matrisi kullanılmıştır. Şerit bazlı trafik hacimlerinde artırma - azaltmalar yapılarak toplam 42 adet trafik hacim senaryosu oluşturulmuştur. Her bir senaryo için, hareket yönü bazlı artırım ve azaltım oranları Şekil 5.21' de gösterilmektedir.



Şekil 5.21: SFOTD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan senaryolar için hacimlerdeki hareket yönü bazlı artırım ve azaltım oranları

Şekil 5.21’ den görüldüğü üzere, düşük – orta ve yüksek trafik hacmi durumlarının hepsinde de senaryo numarası arttıkça hareket yönü bazlı trafik hacimleri de genel olarak artmıştır. Dolayısıyla, senaryo numarası arttıkça kavşak toplam trafik hacimleri de artış göstermiştir. Böylelikle, SFOTD4’ ün etkinliğinin belirlenebilmesi için yapılan analizlerde de, geniş bir hacim aralığının (1740 ta/sa ile 4060 ta/sa) değerlendirilebilmesi imkanı elde edilebilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde oluşturulan tüm senaryolar için, hareket yönü bazlı trafik hacimleri Ek D’ de detaylı olarak verilmektedir.

Şekil 5.22’ de, tüm senaryolar için, şerit bazlı trafik hacimlerinde gerçekleştirilen artırım ve azaltımlar sonucunda oluşan kavşak toplam trafik hacimleri grafiksel olarak gösterilmektedir.



**Şekil 5.22:** SFOTD4’ ün etkinliğinin test edilmesi için oluşturulan senaryolara ait kavşak toplam trafik hacimleri

Şekil 5.22’ den görüldüğü üzere, kavşaktaki toplam trafik hacminin; 1700-2800 ta/sa arasında olması durumunda hacim düşük, 2800-3300 ta/sa olması durumunda hacim orta ve 3300-4100 ta/sa olması durumunda ise hacim yüksek olarak kabul edilmiştir.

Analizler için senaryoların oluşturulmasının ardından, öncelikli olarak, çalışma kapsamında göz önünde bulundurulmuş dört kollu sinyalizasyon kavşağının, OSZD4 ile yönetildiği varsayılmıştır. Tablo 5.10’ da, dört kollu sinyalizasyon kavşak modelinin

OSZD4 ile yönetilmesi durumunda, her bir senaryo için elde edilen optimum sinyal süreleri ve ortalama taşıt gecikmeleri detaylı olarak sunulmaktadır.

**Tablo 5.10:** SFOTD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 42 trafik hacim senaryosu için OSZD4' ün uygulanması durumunda elde edilen optimum sinyal süreleri ve ortalama taşıt gecikmeleri

Talep	Senaryo No	Faz I (sn)	Faz II (sn)	Faz III (sn)	Faz IV (sn)	Devre Süresi (sn)	Ortalama Taşıt Gecikmesi (sn/ta)
Düşük	1	9	7	8	7	51	19,76
	2	10	9	9	12	60	25,00
	3	9	7	8	9	53	20,82
	4	19	8	16	13	76	33,25
	5	13	9	11	11	64	26,89
	6	12	7	10	9	58	23,60
	7	19	8	16	13	76	32,94
	8	14	8	12	11	65	28,32
	9	19	9	17	13	78	33,55
	10	14	7	12	10	63	26,46
	11	19	8	16	13	76	32,84
	12	19	8	16	13	76	32,79
	13	19	9	17	13	78	33,39
	14	19	8	16	13	76	32,74
Orta	1	19	9	17	13	78	33,30
	2	19	8	16	13	76	32,68
	3	19	9	16	13	77	33,20
	4	18	9	16	13	76	34,51
	5	18	8	16	13	75	33,53
	6	19	10	17	14	80	35,94
	7	19	9	17	14	79	34,00
	8	18	9	16	13	76	34,73
	9	21	12	18	16	87	38,84
	10	26	12	22	18	98	44,89
	11	25	11	22	17	95	43,82
	12	19	9	17	15	80	35,16
	13	19	10	17	15	81	36,36
	14	24	11	21	17	93	44,63
Yüksek	1	31	14	27	22	114	56,26
	2	30	13	26	21	110	54,22
	3	21	12	18	17	88	39,53
	4	25	12	22	18	97	45,55
	5	33	16	28	23	120	58,43
	6	31	14	27	22	114	55,59
	7	45	19	39	31	154	78,83
	8	27	14	23	20	104	48,75
	9	45	20	39	31	155	82,37
	10	31	15	27	22	115	57,63
	11	31	15	27	22	115	57,56
	12	45	20	39	31	155	81,21
	13	45	20	39	31	155	80,26
	14	45	20	39	31	155	80,17

Faz I: Batı / Faz II: Kuzey / Faz III: Doğu / Faz IV: Güney - Sarı Süreler: 2+2 sn / Ortak Kırmızı: 1 sn

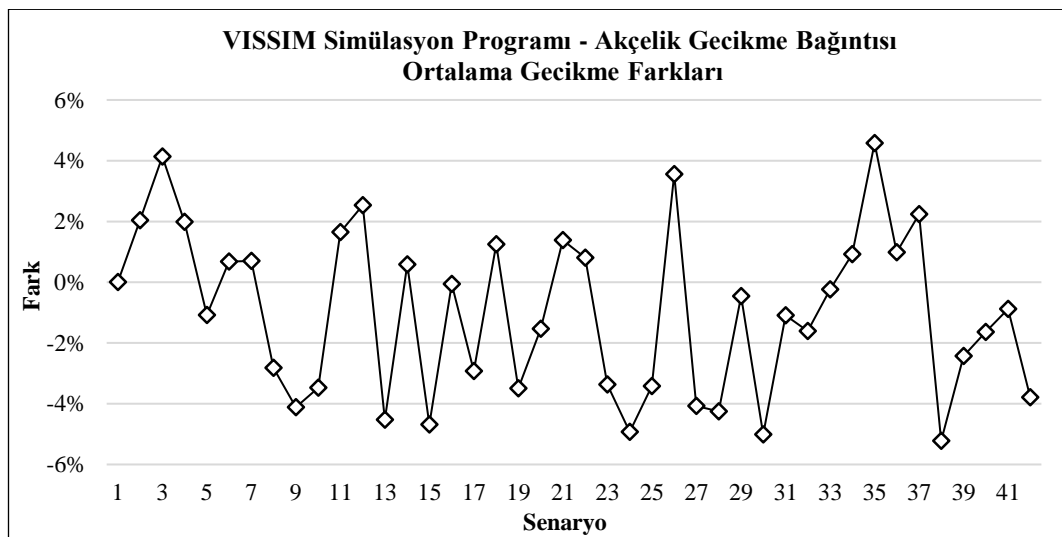
Tablo 5.10' da verilen sinyal süreleri ve ortalama taşıt gecikmesi değerlerinin elde edilmesinin ardından, her bir senaryo için, yaklaşım kollarına ait trafik hacimleri VISSIM simülasyon programına aktarılmıştır. Daha sonra, analizlerin birinci bölümünde detaylı olarak anlatılan benzetme çalışmaları yapılarak VISSIM' den elde

edilen sonuçlar Akçelik bağıntısı ile elde edilen sonuçlara benzetilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak, oluşturulan 42 trafik hacim senaryosu için, VISSIM’ den elde edilen ortalama gecikmeler ile Akçelik bağıntısı ile elde edilen ortalama gecikmelerin birbirlerine benzer olduğu görülmüştür. Tüm senaryolar için, Akçelik bağıntısı ve VISSIM ile elde edilen ortalama gecikme değerleri Tablo 5.11’ de sunulmaktadır.

**Tablo 5.11:** SFOTD4’ ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 42 trafik hacim senaryosu için OSZD4’ ün uygulanması durumunda, Akçelik gecikme bağıntısı ve VISSIM ile elde edilen ortalama gecikme değerleri

Hacim: Düşük			Hacim: Orta			Hacim: Yüksek		
Senaryo No	Akçelik (sn/ta)	VISSIM (sn/ta)	Senaryo No	Akçelik (sn/ta)	VISSIM (sn/ta)	Senaryo No	Akçelik (sn/ta)	VISSIM (sn/ta)
1	19,76	19,76	1	33,30	31,74	1	56,26	56,00
2	25,00	25,51	2	32,68	32,66	2	54,22	51,50
3	20,82	21,68	3	33,20	32,23	3	39,53	39,10
4	33,25	33,91	4	34,51	34,94	4	45,55	44,82
5	26,89	26,60	5	33,53	32,36	5	58,43	58,29
6	23,60	23,76	6	35,94	35,39	6	55,59	56,10
7	32,94	33,17	7	34,00	34,47	7	78,83	82,44
8	28,32	27,52	8	34,73	35,01	8	48,75	49,23
9	33,55	32,17	9	38,84	37,53	9	82,37	84,21
10	26,46	25,54	10	44,89	42,68	10	57,63	54,62
11	32,84	33,38	11	43,82	42,32	11	57,56	56,16
12	32,79	33,62	12	35,16	36,41	12	81,21	79,88
13	33,39	31,88	13	36,36	34,88	13	80,26	79,55
14	32,74	32,93	14	44,63	42,73	14	80,17	77,13

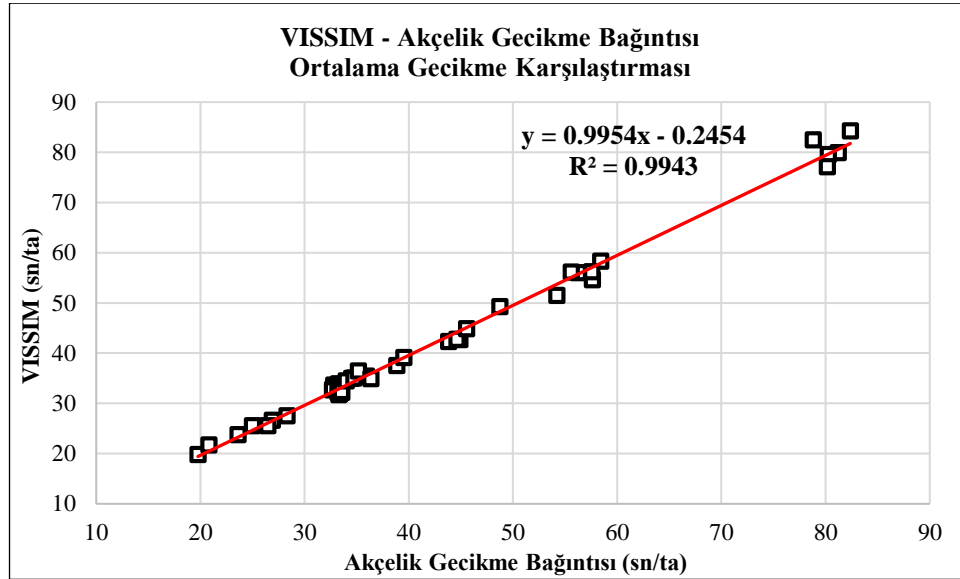
Akçelik bağıntısı ve VISSIM ile elde edilen ortalama gecikme değerleri arasındaki farklar yüzdesel olarak Şekil 5.23’ de gösterilmektedir.



**Şekil 5.23:** SFOTD4’ ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 42 trafik hacim senaryosu için OSZD4’ ün uygulanması durumunda, Akçelik bağıntısı ve VISSIM gecikme sonuçları arasındaki farklar

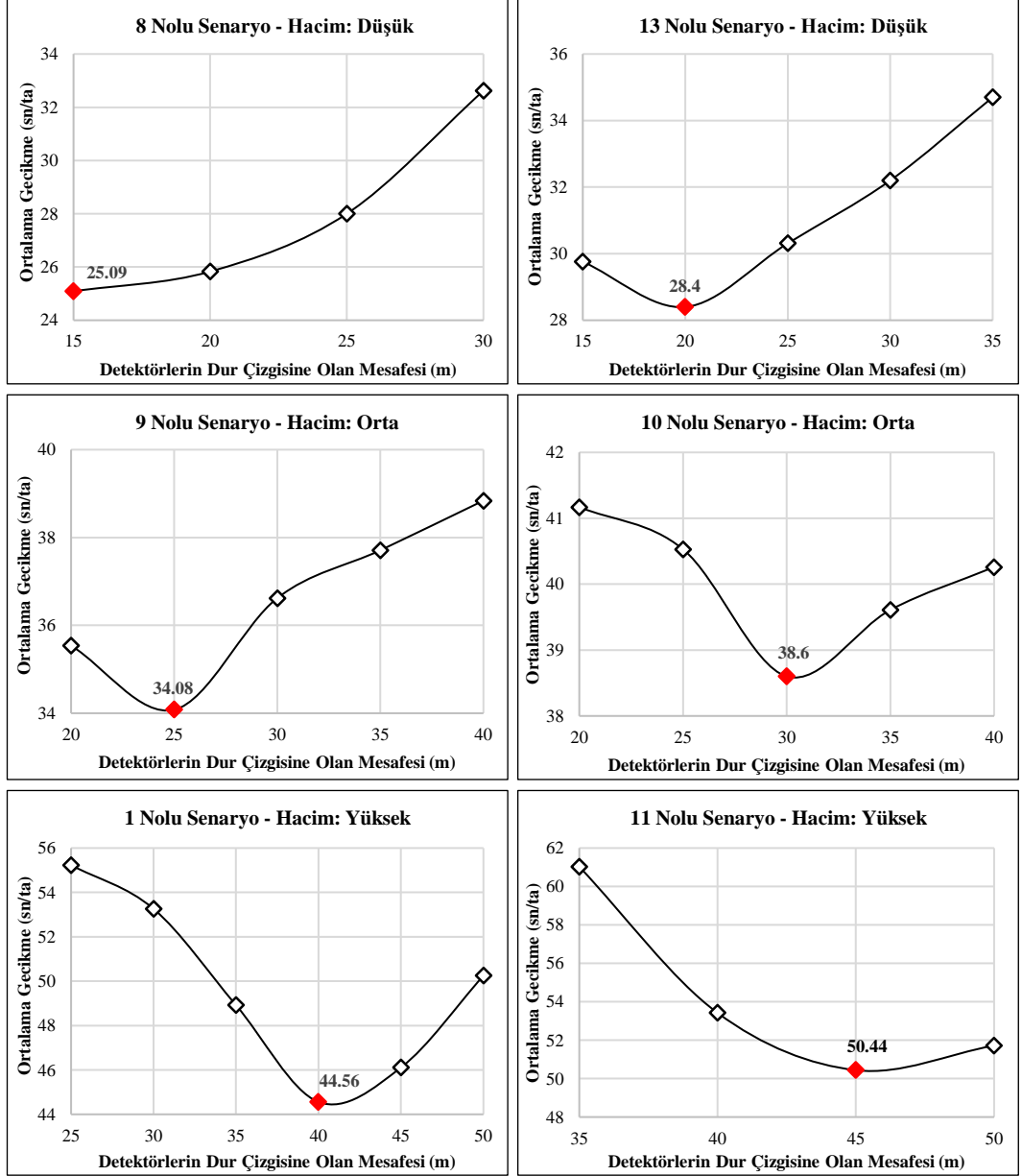
Şekil 5.23' den görüldüğü üzere, her bir senaryo için, VISSIM simülasyon programı ve Akçelik gecikme bağıntısı ile elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri farkı genel olarak %5' in altındadır. Bu durum, modelin, VISSIM simülasyon programına iyi derecede yansıtılabildiğinin bir göstergesidir.

Şekil 5.24' de senaryolar için, Akçelik gecikme bağıntısı ve VISSIM ile elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri grafiksel olarak gösterilmektedir.



**Şekil 5.24:** SFOTD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 42 trafik hacim senaryosu için OSZD4' ün uygulanması durumunda, Akçelik gecikme bağıntısı ve VISSIM ortalama gecikme karşılaştırması

VISSIM' de elde edilen sonuçların analitik sonuçlara benzetilmesinin ardından, aynı trafik senaryoları, TUD4 uygulaması göz önünde bulundurularak analiz edilmiştir. Bu aşamada, öncelikli olarak, oluşturulan her bir senaryo için en uygun detektör yerleşimleri belirlenmiştir. Hacimlerin düşük, orta ve yüksek olması durumlarında, bazı senaryolar için, detektör yerleşimine yönelik yapılan çalışmalar sonucunda elde edilen ortalama gecikmeler Şekil 5.25' de grafiksel olarak gösterilmektedir.



**Şekil 5.25:** Dört kollu sinyalizе kavşak modelinde hacimlerin düşük, orta ve yüksek olması durumlarında, bazı senaryolar için detektör yerleşimlerinin ortalama taşıt gecikmesi üzerindeki etkisi

Şekil 5.25' den görüldüğü üzere, en uygun detektör yerleşimlerinin tespit edilebilmesi için kapsamlı bir çalışma yapılmıştır. Bu aşamada, bir önceki bölümde detaylı olarak anlatılan deneme-yanılma yöntemi uygulanarak detektörlerin dur çizgisine olan en uygun mesafeleri belirlenmiştir.

Oluşturulan tüm trafik hacim senaryoları için, deneme-yanılma çalışmaları sonucunda elde edilen yaklaşık optimum detektör yerleşimleri Tablo 5.12'de verilmektedir.



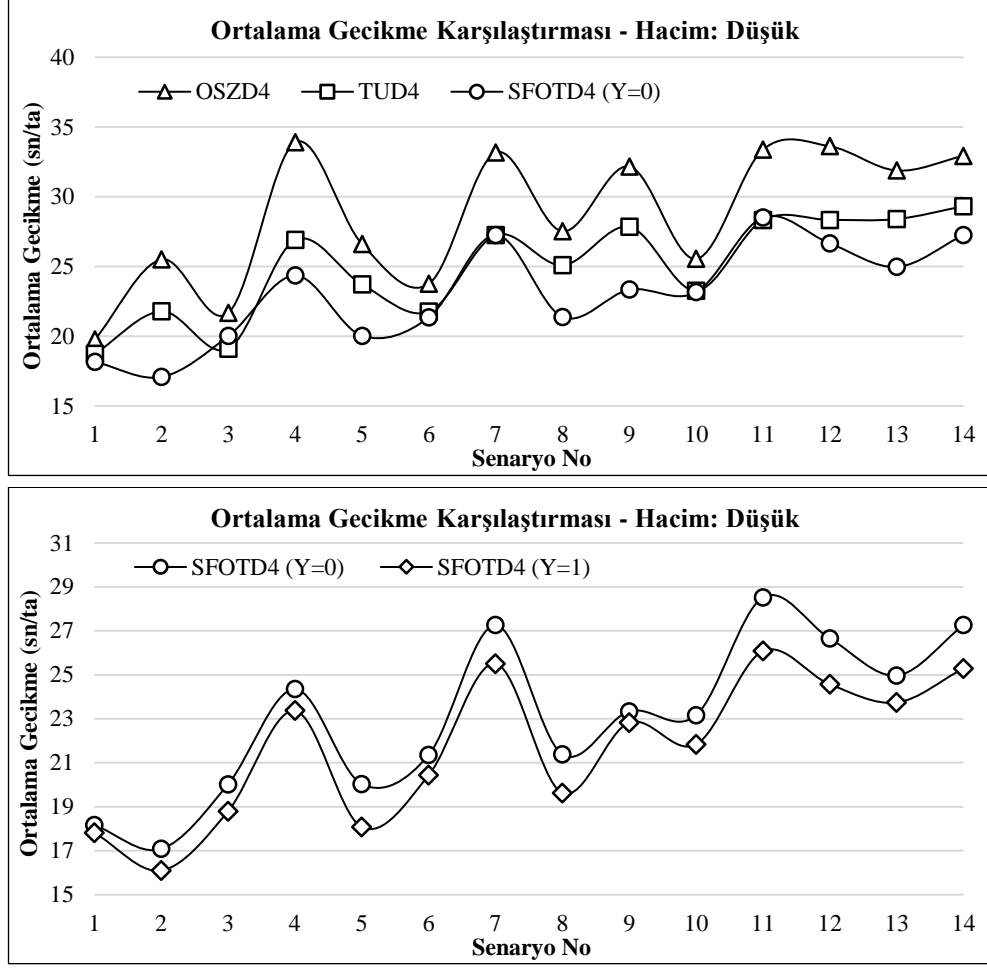
**Tablo 5.12:** SFOTD4' ün etkinliğinin test edilmesi amacıyla oluşturulan 42 trafik hacim senaryosu için TUD4 uygulanması durumunda yaklaşık optimum detektör yerleşimleri

Hacim: Düşük					Hacim: Orta					Hacim: Yüksek				
Senaryo No	Detektörlerin Dur Çizgisine Olan Mesafesi (m)				Senaryo No	Detektörlerin Dur Çizgisine Olan Mesafesi (m)				Senaryo No	Detektörlerin Dur Çizgisine Olan Mesafesi (m)			
	Batı Y. K.	Kuzey Y. K.	Doğu Y. K.	Güney Y. K.		Batı Y. K.	Kuzey Y. K.	Doğu Y. K.	Güney Y. K.		Batı Y. K.	Kuzey Y. K.	Doğu Y. K.	Güney Y. K.
1	15	15	15	15	1	20	20	20	20	1	40	40	40	40
2	15	15	15	15	2	20	20	20	20	2	45	45	45	45
3	15	15	15	15	3	25	25	25	25	3	35	35	35	35
4	15	15	15	15	4	20	20	20	20	4	35	35	35	35
5	15	15	15	15	5	20	20	20	20	5	45	45	45	45
6	15	15	15	15	6	30	30	30	30	6	45	45	45	45
7	20	20	20	20	7	20	20	20	20	7	45	45	45	45
8	15	15	15	15	8	25	25	25	25	8	40	40	40	40
9	20	20	20	20	9	25	25	25	25	9	45	45	45	45
10	15	15	15	15	10	30	30	30	30	10	40	40	40	40
11	20	20	20	20	11	30	30	30	30	11	45	45	45	45
12	20	20	20	20	12	25	25	25	25	12	45	45	45	45
13	20	20	20	20	13	25	25	25	25	13	45	45	45	45
14	20	20	20	20	14	30	30	30	30	14	45	45	45	45

Tablo 5.13 dikkatle incelendiğinde, en uygun mesafelerin; talebin düşük olması durumunda 15 m. ile 20 m., talebin orta olması durumunda 20 m. ile 30 m., talebin yüksek olması durumunda ise 35 metre ile 45 metre aralığında değiştiği söylenebilir.

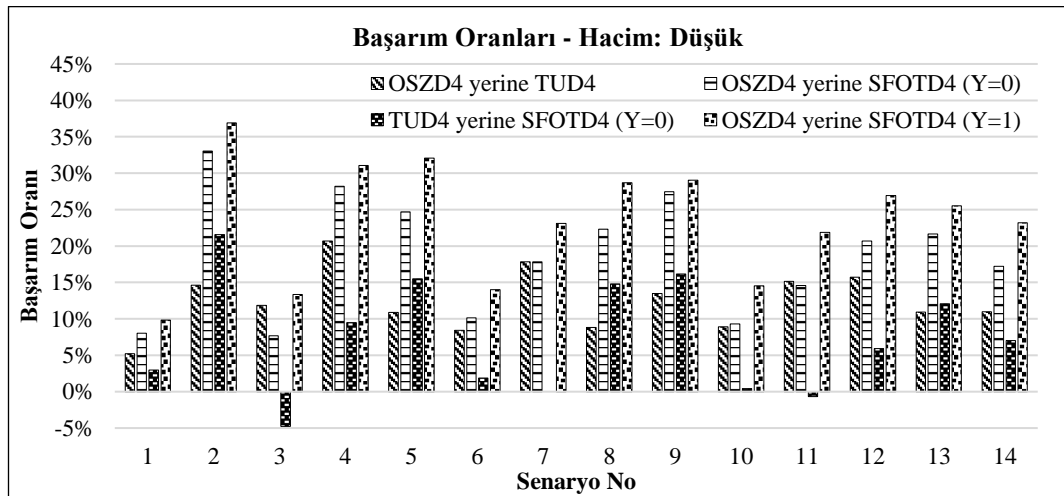
Oluşturulan tüm senaryolar için yaklaşık optimum detektör yerleşimlerinin belirlenmesinin ardından, 4 farklı denetim tipi (Optimum Sabit Zamanlı Denetim – **OSZD4**, Trafik Uyarımlı Denetim – **TUD4**, Sinyal Süresi ve Faz Optimizasyonu Tabanlı Denetim / Yaklaşma=0 – **SFOTD4 / Y=0**, Sinyal Süresi ve Faz Optimizasyonu Tabanlı Denetim / Yaklaşma=1 – **SFOTD4 / Y=1**), talebin düşük – orta ve yüksek olması durumlarına göre ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

Kavşak yaklaşımlarındaki trafik hacimlerinin düşük olması durumunda VISSIM' den elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri Şekil 5.26' da grafiksel olarak sunulmaktadır.



**Şekil 5.26:** Hacimlerin düşük olması durumunda, SFOTD4' ün etkinliğinin test edilmesi için yapılan analizlerden elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri

Kavşak yaklaşımlarındaki trafik hacimlerinin düşük olduğu senaryolar için elde edilen başarımlar Şekil 5.27' de gösterilmektedir.



**Şekil 5.27:** Dört kollü sinyalizasyon kavşak modeli için hacimlerin düşük olması durumunda elde edilen senaryo bazlı başarımlar

Şekil 5.27 dikkatle incelendiğinde, aşağıdaki verilen sonuçlara ulaşmak mümkündür:

- Hacimler düşük iken, optimum sabit zamanlı denetim (OSZD4) yerine trafik uyarmalı denetim (TUD4) uygulanması durumunda;

Minimum: %5,2;

Maksimum: %20,7;

Ortalama: %12,4

oranında gecikme azalımı sağlanabilmektedir.

- Hacimler düşük iken, optimum sabit zamanlı denetim (OSZD4) yerine sinyal süresi ve faz optimizasyonu tabanlı denetim / yaklaşma=0 (SFOTD4 / Y=0) uygulanması durumunda;

Minimum: %7,7;

Maksimum: %33,0;

Ortalama: %18,8

oranında gecikme azalımı sağlanabilmektedir.

- Hacimler düşük iken, trafik uyarmalı denetim (TUD4) yerine sinyal süresi ve faz optimizasyonu tabanlı denetim / yaklaşma=0 (SFOTD4 / Y=0) uygulanması durumunda;

Minimum: -%4,8;

Maksimum: %21,6;

Ortalama: %7,3

oranında gecikme azalımı sağlanabilmektedir.

- Hacimler düşük iken, optimum sabit zamanlı denetim (OSZD4) yerine sinyal süresi ve faz optimizasyonu tabanlı denetim / yaklaşma=1 (SFOTD4 / Y=1) uygulanması durumunda;

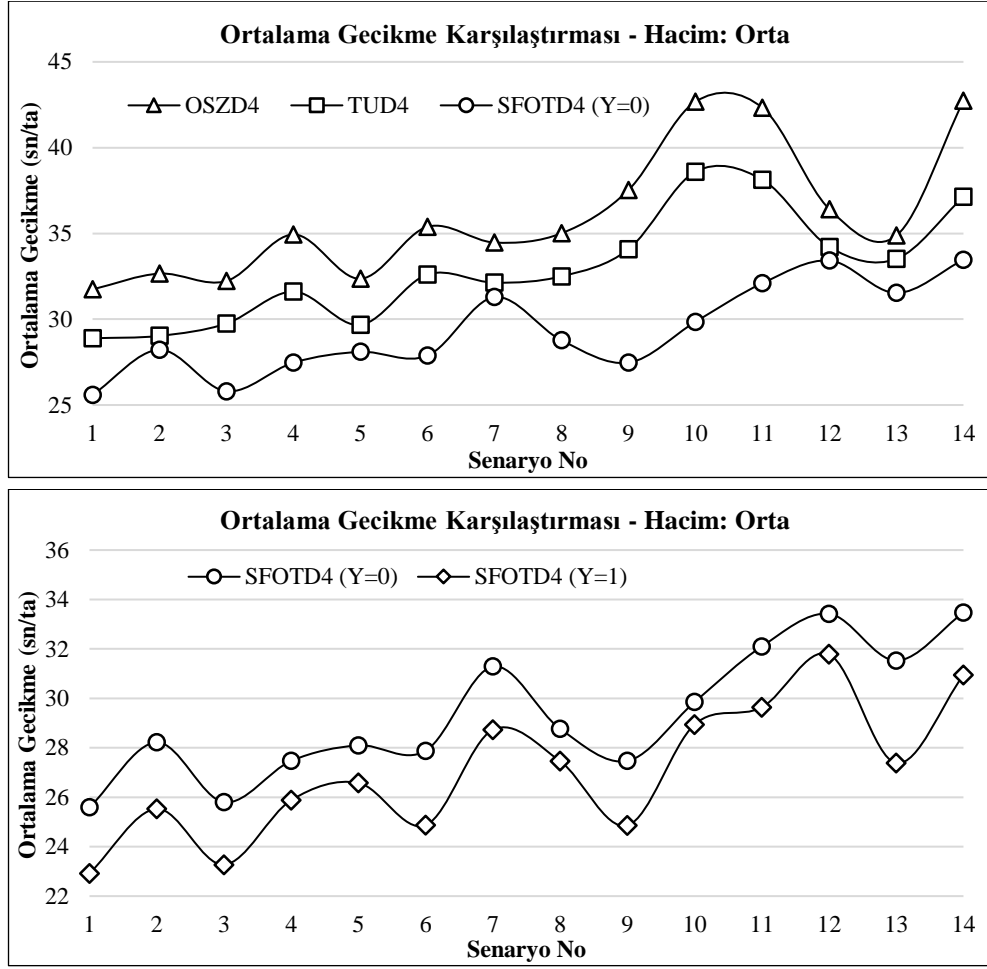
Minimum: %9,8;

Maksimum: %36,9;

Ortalama: %23,6

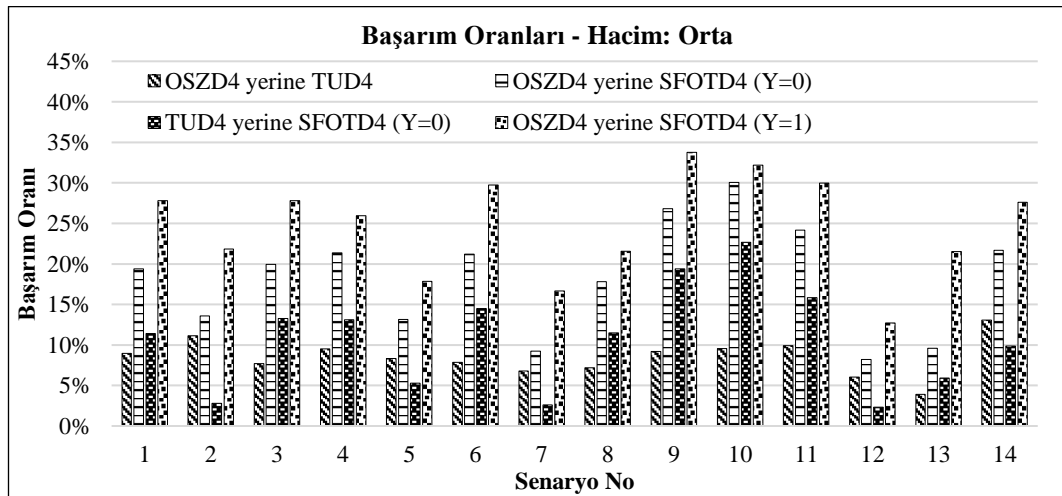
oranında gecikme azalımı sağlanabilmektedir.

Kavşak yaklaşım kollarındaki trafik hacimlerinin orta düzeyli olması durumunda VISSIM simülasyon programından elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri ise Şekil 5.28' de sunulmaktadır.



Şekil 5.28: Hacimlerin orta olması durumunda, SFOTD4' ün etkinliğinin test edilmesi için yapılan analizlerden elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri

Kavşak yaklaşımlarındaki trafik hacimlerinin orta düzeyde olduğu senaryolar için elde edilen başarımlar Şekil 5.29' da gösterilmektedir.



Şekil 5.29: Dört kollü sinyalizasyon kavşak modeli için hacimlerin orta olması durumunda elde edilen senaryo bazlı başarımlar

Şekil 5.29 dikkatle incelendiğinde, aşağıdaki verilen sonuçlara ulaşmak mümkündür:

- Hacimler orta iken, optimum sabit zamanlı denetim (OSZD4) yerine trafik uyarmalı denetim (TUD4) uygulanması durumunda;

Minimum: %3,9;

Maksimum: %13,1;

Ortalama: %8,5

oranında gecikme azalımı sağlanabilmiştir.

- Hacimler orta iken, optimum sabit zamanlı denetim (OSZD4) yerine sinyal süresi ve faz optimizasyonu tabanlı denetim / yaklaşma=0 (SFOTD4 / Y=0) uygulanması durumunda;

Minimum: %8,2;

Maksimum: %30,1;

Ortalama: %18,3

oranında gecikme azalımı sağlanabilmiştir.

- Hacimler orta iken, trafik uyarmalı denetim (TUD4) yerine sinyal süresi ve faz optimizasyonu tabanlı denetim / yaklaşma=0 (SFOTD4 / Y=0) uygulanması durumunda;

Minimum: %2,3;

Maksimum: %22,7;

Ortalama: %10,7

oranında gecikme azalımı sağlanabilmiştir.

- Hacimler orta iken, optimum sabit zamanlı denetim (OSZD4) yerine sinyal süresi ve faz optimizasyonu tabanlı denetim / yaklaşma=1 (SFOTD4 / Y=1) uygulanması durumunda;

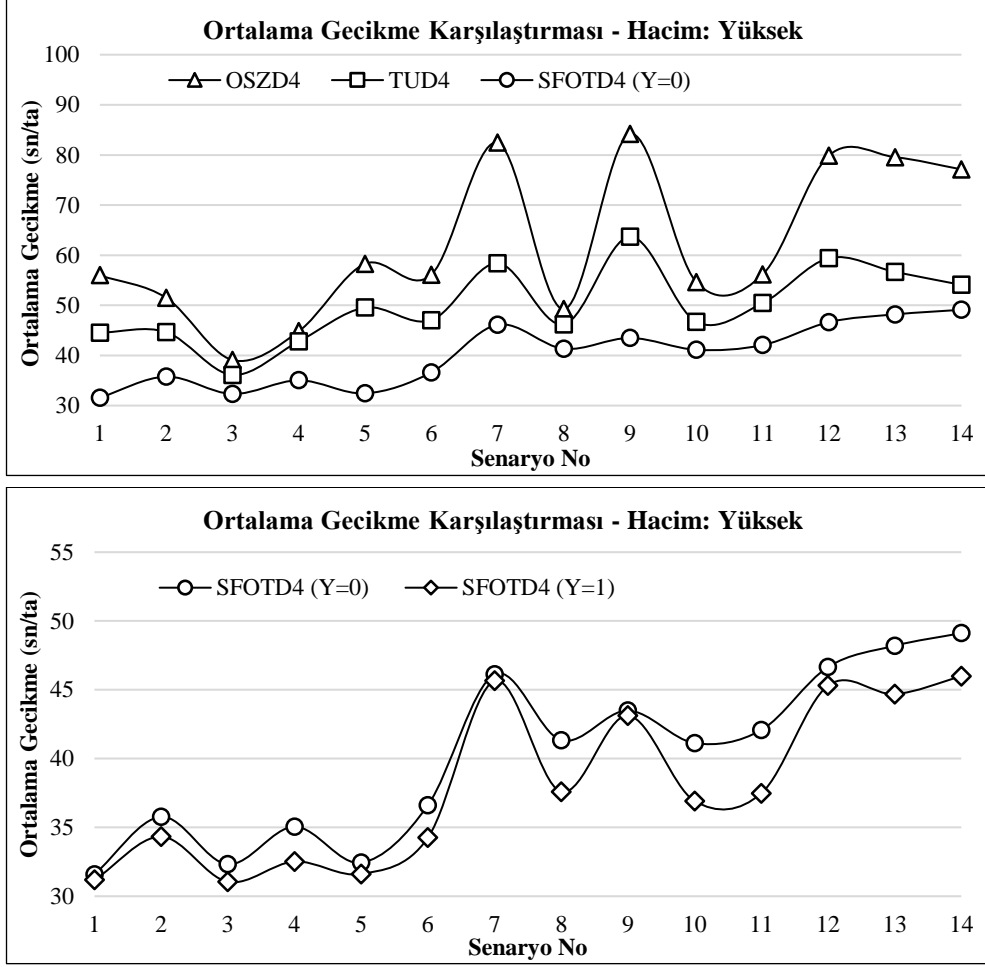
Minimum: %12,7;

Maksimum: %33,8;

Ortalama: %23,8

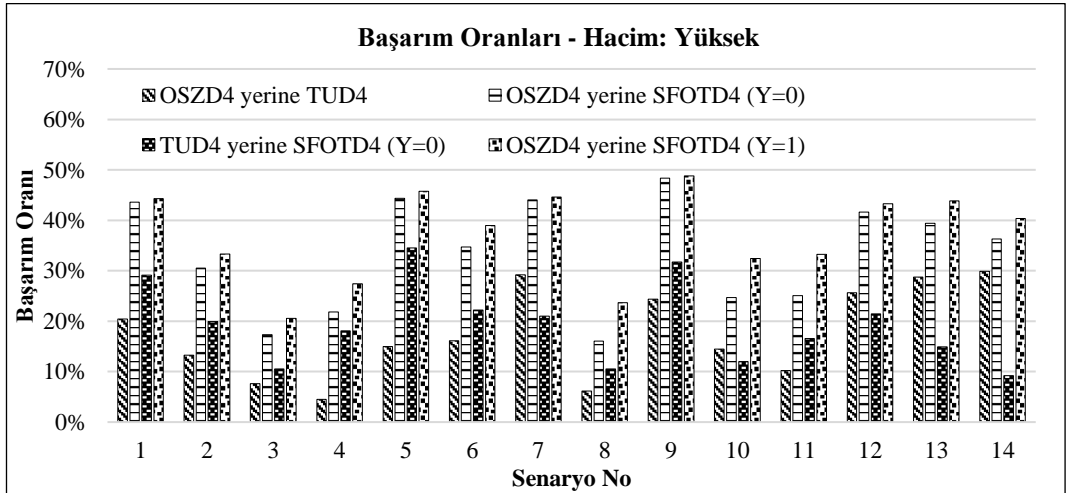
oranında gecikme azalımı sağlanabilmiştir.

Kavşak yaklaşım kollarındaki trafik hacimlerinin yüksek olması durumunda VISSIM simülasyon programından elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri ise Şekil 5.30' da sunulmaktadır.



**Şekil 5.30:** Hacimlerin yüksek olması durumunda, SFOTD4' ün etkinliğinin test edilmesi için yapılan analizlerden elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri

Kavşak yaklaşımlarındaki trafik hacimlerinin yüksek olduğu senaryolar için elde edilen başarımlar Şekil 5.31' de gösterilmektedir.



**Şekil 5.31:** Dört kollu sinyalizasyon kavşak modeli için hacimlerin yüksek olması durumunda elde edilen senaryo bazlı başarımları

Şekil 5.31 dikkatle incelendiğinde, aşağıdaki verilen sonuçlara ulaşmak mümkündür:

- Hacimler yüksek iken, optimum sabit zamanlı denetim (OSZD4) yerine trafik uyarmalı denetim (TUD4) uygulanması durumunda;  
Minimum: %4,5;  
Maksimum: %29,9;  
Ortalama: %17,5  
oranında gecikme azalımı sağlanabilmektedir.
- Hacimler yüksek iken, optimum sabit zamanlı denetim (OSZD4) yerine sinyal süresi ve faz optimizasyonu tabanlı denetim / yaklaşma=0 (SFOTD4 / Y=0) uygulanması durumunda;  
Minimum: %16,0;  
Maksimum: %48,4;  
Ortalama: %33,4  
oranında gecikme azalımı sağlanabilmektedir.
- Hacimler yüksek iken, trafik uyarmalı denetim (TUD4) yerine sinyal süresi ve faz optimizasyonu tabanlı denetim / yaklaşma=0 (SFOTD4 / Y=0) uygulanması durumunda;  
Minimum: %9,2;  
Maksimum: %34,5;  
Ortalama: %19,4  
oranında gecikme azalımı sağlanabilmektedir.
- Hacimler yüksek iken, optimum sabit zamanlı denetim (OSZD4) yerine sinyal süresi ve faz optimizasyonu tabanlı denetim / yaklaşma=1 (SFOTD4 / Y=1) uygulanması durumunda;  
Minimum: %20,6;  
Maksimum: %48,8;  
Ortalama: %35,7  
oranında gecikme azalımı sağlanabilmektedir.

Elde edilen karşılaştırma sonuçlarından, (Şekil 5.27 – Şekil 5.29 – Şekil 5.31), SFOTD4 yaklaşımının, ortalama taşıt gecikmelerinin azaltılmasında oldukça etkin bir yaklaşım olduğu görülmüştür.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

### 6.1 Sonuçlar

Bu çalışmanın analizler bölümü üç alt başlıktan oluştuğu için, bu bölümde her bir alt başlık ayrı ayrı değerlendirilmiş ve yorumlanmıştır.

Birinci alt başlıkta, çalışma kapsamında oluşturulan dört kollu sinyalize kavşak modeli için geliştirilen TUD4 algoritmasının etkinliğinin test edilebilmesi amacıyla yapılan analizlere ait sonuçlar bulunmaktadır. Bu bölümde, söz konusu denetim sisteminin etkinliği, talepte dalgalanmalar görülüp görülmemesi durumları göz önünde bulundurularak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçları genel olarak şu şekilde özetlemek mümkündür:

- Talepte dalgalanma görülmemesi durumunda, TUD4 ile OSZD4' e kıyasla daha düşük gecikme değerleri elde edilmiştir. Özellikle hacimlerin çok yüksek olması durumunda ortalama gecikme bazlı başarımların artış gösterdiği görülmektedir. Bu durumun temel nedenlerinden birisi, OSZD4 için uygulanan maksimum yeşil süre kısıtının, TUD4 için uygulanan maksimum yeşil süre kısıtından daha az olmasıdır. TUD4' de maksimum yeşil süre uzunluğunun arttırılması, özellikle hacimlerin çok yüksek olduğu yaklaşım kollarındaki taşıtların kavşağı daha az zaman kaybederek terk edebilmesine imkân sağlamıştır. Böylece, kavşaktaki ortalama gecikmeler önemli düzeyde azaltılabilmektedir.
- Talepte dalgalanma görülmesi durumunda, OSZD4' ün etkinliği azalmakta ve kavşaktaki ortalama taşıt gecikmelerinde büyük artışlar meydana gelmektedir. Özellikle hacimlerin düşük, orta ve yüksek olduğu durumlarda TUD4 ile ortalama taşıt gecikmeleri önemli oranlarda azaltılabilmektedir. Talebin çok yüksek ve dalgalanmalı olduğu durumlarda ise başarımlarında azalmalar görülmüştür. Bu durumun nedeni, dalgalanmalı trafik talebine bağlı olarak, farklı kavşak yaklaşımlarının maksimum yeşil süre kullanımının artmasıdır. Maksimum yeşil süre kullanımının sıklığı gecikme artışını tetikleyen bir etken olarak belirlenmiştir.
- Örnek senaryolar için, trafik taleplerinde dalgalanma görülmediği durumlarda, OSZD4 yerine TUD4 uygulaması ile ortalama taşıt gecikmeleri minimum **%4,51**; maksimum **%29,16** ve ortalama **%14,20** oranında azaltılabilmektedir. Bununla



birlikte, talepte dalgalanma görüldüğü durumlarda ise OSZD4 yerine TUD4 uygulaması ile ortalama taşıt gecikmeleri minimum **%15,58**; maksimum **%58,55** ve ortalama **%32,54** oranında azaltılabilmektedir. Söz konusu veriler ışığında, talepte dalgalanma görülmesi durumunda, talepte dalgalanma görülmemesi durumuna kıyasla, başarı oranlarının yaklaşık **2,5 – 3** kat artış gösterdiği söylenebilir.

- Trafik taleplerinde dalgalanma görülmediği durumlarda, OSZD4 yerine TUD4 uygulaması ile yalnızca **5** senaryonun hizmet düzeyi iyileştirilebilmiştir. Talepte dalgalanma görülmesi durumunda ise bu sayı **14**' e çıkmıştır. Senaryo bazlı hizmet düzeyi karşılaştırmaları Ek E'de detaylı olarak sunulmaktadır.

Elde edilen sonuçlar, TUD4' ün trafik taleplerindeki dalgalanmalara etkin bir şekilde uyum sağlayabildiğini göstermiştir. Bununla birlikte, farklı hesaplama yaklaşımları ile TUD4' ün performansının daha da arttırılabileceği düşünülmektedir.

İkinci alt başlıkta, çalışma kapsamında oluşturulan üç kollu sinyalizasyon kavşak modeli göz önünde bulundurularak geliştirilen SFOTD3' ün etkinliğinin test edilebilmesi amacıyla gerçekleştirilen analizlere ve bu analizlerin sonuçlarına yer verilmiştir. Bu bölümde, öncelikli olarak, referans bir trafik hacim matrisi göz önünde bulundurularak, kavşak toplam trafik hacimlerinin birbirinden farklı olduğu (1650 ta/sa ile 3850 ta/sa aralığında) 42 trafik hacim senaryosu oluşturulmuştur. Daha sonra, oluşturulan senaryolar kavşaktaki toplam trafik hacimlerinin düşük, orta ve yüksek olması durumlarına göre; OSZD3, TUD3 ve ayrıca SFOTD3 uygulanarak ayrı ayrı analiz edilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen bulguları şu şekilde özetlemek mümkündür:

- Oluşturulan senaryolar için, OSZD3 yerine TUD3 uygulanması durumunda minimum **-%6,89**; maksimum **%45,30**; ortalama ise **%14,77** gecikme azalımı sağlanmıştır. Ayrıca, **13** senaryonun (yaklaşık **%31**) hizmet düzeyi iyileştirilebilmiştir. Bununla birlikte, OSZD3 yerine SFOTD3 / Y=0 uygulanması durumunda ise minimum **%22,61**; maksimum **%66,56**; ortalama **%42,75** gecikme azalımı sağlanabilmiştir. Bu durumda, hizmet düzeyi iyileştirilebilen senaryo sayısı da **36** (yaklaşık **%86**)' dir. Senaryo bazlı hizmet düzeyi karşılaştırmaları Ek F' de detaylı olarak sunulmaktadır.
- Oluşturulan senaryolar için, TUD3 yerine SFOTD3 / Y=0 uygulanması durumunda minimum **%6,54**; maksimum **%53,71**; ortalama **%32,82** gecikme

azalımı sağlanmıştır. Ayrıca, **28** senaryonun (yaklaşık **%67**) hizmet düzeyi iyileştirilebilmiştir. Bununla birlikte, OSZD3 yerine SFOTD3 / Y=1 uygulanması durumunda ise minimum **%23,65**; maksimum **%68,79**; ortalama **%45,05** gecikme azalımı sağlanabilmiştir. Bu durumda, hizmet düzeyi iyileştirilebilen senaryo sayısı da **36** (yaklaşık **%86**)' dir. Senaryo bazlı hizmet düzeyi karşılaştırmaları Ek F' de detaylı olarak sunulmaktadır.

- Analizler sonucu elde edilen başarımlarından da görüldüğü üzere, yaklaşma sayısının 1' e eşit olması durumunda kavşaktaki ortalama taşıt gecikmeleri daha fazla azaltılabilmektedir. Bu durumda, SFOTD3 / Y=1' in, SFOTD3 / Y=0' a kıyasla performans açısından daha başarılı olduğu söylenebilir. Fakat SFOTD3 / Y=1 trafik güvenliği bağlamında daha fazla olumsuzluk içermektedir.
- Özellikle hacimlerin çok yüksek olması durumunda TUD3 ile elde edilen başarımlarının artış gösterdiği görülmektedir. Bu durumun en önemli nedeni OSZD3 için uygulanan maksimum yeşil süre kısıtının, TUD3 için uygulanan maksimum yeşil süre kısıtından daha az olmasıdır. TUD3' de maksimum yeşil süre uzunluğunun artırılması, özellikle hacimlerin çok yüksek olduğu yaklaşım kollarındaki taşıtların kavşağı daha az zaman kaybederek terk edebilmesine imkân sağlamıştır. Böylece, ortalama gecikmeler önemli düzeyde azaltılabilmektedir.
- OSZD3 uygulaması için, kavşak yaklaşımlarındaki sola dönüş taleplerinin arttırıldığı durumlarda (Talep Orta: 7 ve 12 numaralı senaryo; Talep Yüksek: 3 ve 10 numaralı senaryolar), kavşaktaki ortalama gecikmelerde önemli düzeyde artışlar görülmüştür. Bu yüzden, kavşak yaklaşımlarındaki sola dönüş hacimlerinin yüksek olduğu durumlarda, SFOTD3 uygulamaları ile elde edilen başarımları düşüktür. Sonuç olarak, kavşak yaklaşımlarındaki sola dönüş oranları arttıkça, SFOTD3 yaklaşımının etkinliğinin azaldığı söylenebilir.

Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü üzere, SFOTD3, üç kollu sinyalize kavşaktaki ortalama taşıt gecikmelerini azaltmak için oldukça etkin bir yaklaşımdır.

Üçüncü alt başlıkta, çalışma kapsamında oluşturulan dört kollu sinyalize kavşak modeli göz önünde bulundurularak geliştirilen SFOTD4' ün etkinliğinin test edilebilmesi amacıyla gerçekleştirilen analizlere ve bu analizlerin sonuçlarına yer verilmiştir. Bu bölümde de, öncelikli olarak, referans bir trafik hacim matrisi göz önünde bulundurularak, kavşak toplam trafik hacimlerinin birbirinden farklı olduğu

(1740 ta/sa ile 4060 ta/sa aralığında) 42 trafik senaryosu oluşturulmuştur. Daha sonra, tüm senaryolar kavşaktaki toplam trafik hacimlerinin düşük, orta ve yüksek olması durumlarına göre; OSZD4, TUD4 ve SFOTD4 uygulanarak ayrı ayrı analiz edilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen bulguları şu şekilde özetlemek mümkündür:

- Oluşturulan senaryolar için, OSZD4 yerine TUD4 uygulanması durumunda minimum **%3,90**; maksimum **%29,88**; ortalama ise **%12,81** gecikme azalımı sağlanmıştır. Ayrıca, **12** senaryonun (yaklaşık **%29**) hizmet düzeyi iyileştirilebilmiştir. Bununla birlikte, OSZD4 yerine SFOTD4 / Y=0 uygulanması durumunda ise minimum **%7,66**; maksimum **%48,36**; ortalama **%23,50** gecikme azalımı sağlanabilmiştir. Bu durumda, hizmet düzeyi iyileştirilebilen senaryo sayısı da **18** (yaklaşık **%43**)' dir. Senaryo bazlı hizmet düzeyi karşılaştırmaları Ek G' de detaylı olarak sunulmaktadır.
- Oluşturulan senaryolar için, TUD4 yerine SFOTD4 / Y=0 uygulanması durumunda minimum **-%4,76**; maksimum **%34,53**; ortalama **%12,49** gecikme azalımı sağlanmıştır. Ayrıca, **11** senaryonun (yaklaşık **%26**) hizmet düzeyi iyileştirilebilmiştir. Bununla birlikte, OSZD4 yerine SFOTD4 / Y=1 uygulanması durumunda ise minimum **%9,82**; maksimum **%48,78**; ortalama **%28,51** gecikme azalımı sağlanabilmiştir. Bu durumda, hizmet düzeyi iyileştirilebilen senaryo sayısı da **23** (yaklaşık **%55**)' dür. Senaryo bazlı hizmet düzeyi karşılaştırmaları Ek G' de detaylı olarak sunulmaktadır.
- Analizler sonucu elde edilen başarımlarından da görüldüğü üzere, yaklaşma sayısının 1' e eşit olması durumunda ortalama taşıt gecikmeleri daha fazla azaltılabilmektedir. Bu durumda, SFOTD4 / Y=1' in SFOTD4 / Y=0' a kıyasla performans açısından daha başarılı olduğu söylenebilir. Fakat SFOTD4 / Y=1 trafik güvenliği bağlamında daha fazla olumsuzluk içermektedir.
- Özellikle hacimlerin çok yüksek olması durumunda TUD4 ile elde edilen başarımlarının artış gösterdiği görülmektedir. Bu durumun en önemli nedeni OSZD4 için uygulanan maksimum yeşil süre kısıtının, TUD4 için uygulanan maksimum yeşil süre kısıtından daha az olmasıdır. TUD4' de maksimum yeşil süre uzunluğunun arttırılması, özellikle hacimlerin çok yüksek olduğu yaklaşım kollarındaki taşıtların kavşağı daha az zaman kaybederek terk edebilmesine imkân sağlamıştır. Böylece, kavşaktaki ortalama gecikmeler önemli düzeyde azaltılabilmektedir.

- Kavşaktaki hacimler düşük olduğunda, OSZD4 yerine SFOTD4 / Y=0 uygulanması durumunda, 3 – 6 ve 10 numaralı senaryolar için başarımlarının %10' un altında veya %10' a yakın olduğu görülmektedir. 3 – 6 ve 10 numaralı senaryolara ait şerit bazlı akım bilgileri incelendiğinde, bu senaryoların tümünde ana yaklaşımlardaki düz giden taşıt sayılarının azaltılması durumu söz konusudur. Dolayısıyla böyle durumlarda, kavşak yaklaşımlarındaki dönen taşıt oranları artmaktadır. Dönen taşıt oranındaki artışın başarımlarını azalttığı söylenebilir.
- Kavşaktaki hacimler orta olduğunda, OSZD4 yerine SFOTD4 / Y=0 uygulanması durumunda, 7 – 12 ve 13 numaralı senaryolar için başarımlarının %10' un altında veya %10' a yakın olduğu görülmektedir. 7 – 12 ve 13 numaralı senaryolara ait hareket yönü bazlı akım bilgileri incelendiğinde, bu senaryoların tümünde sola dönüş oranlarının artırılması durumu söz konusudur. Bu sebeple, özellikle sola dönüş oranlarının artması durumunda başarımlarının azaldığı söylenebilir.
- Kavşaktaki hacimler yüksek olduğunda, OSZD4 yerine SFOTD4 / Y=0 uygulanması durumunda, 3 ve 8 numaralı senaryolar için başarımlarının yaklaşık %15 civarında olduğu görülmektedir. 3 ve 8 numaralı senaryolara ait hareket yönü bazlı akım bilgileri incelendiğinde, bu iki senaryoda da sola dönüş oranlarının artırılması durumu söz konusudur. Bu yüzden, hacimlerin yüksek olması durumunda elde edilen analiz sonuçlarının, hacimlerin düşük ve orta olması durumunda elde edilen analiz sonuçlarını destekler nitelikte olduğu söylenebilir.

Elde edilen sonuçlardan, SFOTD4' ün, dört kollu sinyalizasyon kavşaktaki ortalama taşıt gecikmelerini azaltmak için oldukça etkin bir yaklaşım olduğu görülmektedir.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizlerin tamamı göz önünde bulundurularak elde edilen sonuçlar ve bulgular ise şu şekilde sıralanabilir:

- Oluşturulan senaryolar için, OSZD3 ve OSZD4 uygulanması durumunda, kavşak yaklaşımlarındaki trafik hacimleri arttıkça hem fazlara ait yeşil süreler hem de devre süreleri genel olarak artış göstermiştir.
- Kavşak yaklaşımlarındaki trafik hacimleri arttıkça, her üç denetim tipi için de, genel olarak, ortalama taşıt gecikmelerinin arttığı söylenebilir.
- Oluşturulan senaryolar için, TUD3 ve TUD4' ün uygulanması durumunda kavşak yaklaşımlarındaki trafik hacimleri arttıkça detektörlerin dur çizgisine olan mesafeleri de genel olarak artış göstermiştir. En uygun mesafelerin; hacimlerin

düşük olması durumunda 15 metre ile 25 metre, hacimlerin orta olması durumunda 20 metre ile 35 metre, hacimlerin yüksek olması durumunda ise 35 metre ile 45 metre arasında değiştiği söylenebilir.

- Hem üç hem de dört kollu sinyalize kavşak modelleri için yapılan analizlerin sonuçlarından görüldüğü üzere, TUD3 ve TUD4 yaklaşımları ile OSZD3 ve OSZD4' e kıyasla daha iyi performans değerleri elde edilebilmiştir. Bununla birlikte, SFOTD3 ve SFOTD4 yaklaşımları ile de diğer iki farklı denetim (OSZD3 ve OSZD4, TUD3 ve TUD4) yaklaşımına kıyasla daha iyi performans değerlerinin elde edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.
- Literatürdeki çalışmaların birçoğunda, genel olarak, sinyal süresi optimizasyonu problemi üzerinde durulmuştur. Fakat bu çalışmada, SFOTD3-SFOTD4 yaklaşımı ile sinyal sürelerinin yanı sıra faz planlarının da optimize edilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar, faz optimizasyonunun sinyalize kavşaktaki gecikmeleri azaltmaya ve kavşak performansını arttırmaya önemli oranda yardımcı olabileceğini açık bir şekilde göstermiştir.
- Sinyal süresi ve faz optimizasyonu çalışmaları için, faza dayalı yaklaşımlardan ziyade harekete dayalı yaklaşımın tercih edilmesinin, sürdürülebilir sinyalize kavşak denetimi için dikkate değer düzeyde avantajlar sağlayabileceği düşünülmektedir.
- Analiz sonuçları dikkatle incelendiğinde, SFOTD3 yaklaşımı ile elde edilen başarı oranlarının SFOTD4 yaklaşımı ile elde edilen başarı oranlarından daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeninin yaklaşım kolu sayısındaki artış olduğu tespit edilmiştir. Kavşaktaki yaklaşım kolu sayısı arttıkça faz sayısı ve karışıklık noktası sayısı da artacağı için elde edilen başarı oranlarının azalması beklenmektedir.
- Bu çalışmada, sinyal sürelerinin yanı sıra faz optimizasyonu da gerçekleştirildiği için, kavşak yaklaşımlarındaki trafik akımları hareket bazlı (movement-related) olarak dikkate alınmıştır. Bu sebeple, yaklaşım kollarındaki şeritlerde karma trafik akımı durumları söz konusu değildir. Kavşak yaklaşımlarındaki her bir şerit, şerit işaretlemeleri gerçekleştirilerek, farklı yönlü trafik akımlarına ayrılmıştır. Analizler için SFOTD3 ve SFOTD4 yaklaşımları ile elde edilen başarı oranları göz önünde bulundurulduğunda, şerit işaretlemelerinin ve düzenli şerit kullanımının sinyalize kavşak performansı üzerinde önemli etkilere sahip olduğu belirlenmiştir.

- Analiz sonuçlarından da görüldüğü üzere, SFOTD3 ve SFOTD4 için, bir sinyal devresi boyunca 1 adet yaklaşma hareketine izin verilmesi ile kavşaktaki ortalama taşıt gecikmeleri önemli oranlarda azaltılabilmektedir. Bu durum, kavşak performansının artırılmasında etkin bir rol oynamasına rağmen, kavşaktaki trafik güvenliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu yüzden, SFOTD3 / Y=1 ve SFOTD4 / Y=1' in, özellikle sürücü bilgisi ve kültürünün düşük olduğu yerlerde uygulanmasının, trafik güvenliği bağlamında bir takım problemlere sebep olabileceği düşünülmektedir.

## 6.2 Öneriler

Bu çalışmada, farklı denetim tiplerinin sinyalize kavşakların performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ve bulgular dikkatle incelendiğinde, çalışmanın geliştirilmeye açık olan birçok yönünün bulunduğu söylenebilir. Bu bağlamda, daha sonraki süreçte yapılması planlanan çalışmalarda, aşağıda belirtilen hususlar da göz önünde bulundurularak çalışmanın niteliğinin artırılması hedeflenmektedir:

- SFOTD3 ve SFOTD4 yaklaşımlarında sinyal süreleri ve faz planları son 5 sinyal devresindeki hareket bazlı trafik akımlarının saatlik değerleri göz önünde bulundurularak optimize edilmiştir. Bu aşamada, gerçek zamanlı trafik tahmini üzerine yapılacak olan bir çalışma ile çok daha doğru ve gerçekçi trafik akım değerlerinin elde edilebilmesi mümkün olabilecektir. Dolayısıyla, bu durumda, sinyalize kavşakların performansının daha fazla artırılabilmesi düşünülmektedir.
- Yayaların trafikte oldukça önemli bir yere sahip olduğu bilinmektedir. Özellikle yaya yoğunluğunun çok fazla olduğu sinyalize kavşaklarda, yaya hareketlerinin sürekliliğinin ve düzenliliğinin sağlanabilmesi için sinyal denetim sistemlerinin tasarımında yaya faktörünün de göz önünde bulundurulması oldukça önemlidir. Bu çalışmada, yayaların etkisi göz önünde bulundurulmamıştır. Fakat daha sonraki çalışmalarda, yayalar için ayrılan sinyal fazlarının dikkate alınması ve yayaların kavşak performansı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi hedeflenmektedir.
- Şehir içi ve şehirlerarası yol ağlarında, genel olarak, üç veya dört yaklaşım koluna sahip olan kavşaklara rastlanmaktadır. Bu yüzden, bu çalışma kapsamında

geliştirilen TUD ile SFOTD yaklaşımları yalnızca üç ve dört kollu sinyalize kavşak modelleri üzerinde uygulanmıştır. Fakat yol ağlarında, bazen, dörtten fazla yaklaşım koluna sahip olan kavşaklar da görülebilmektedir. Gelecek çalışmalarda, farklı tipte ve farklı geometrik özelliklere sahip olan kavşak modelleri göz önünde bulundurularak, bu kavşak modelleri için yeni SFOTD modelleri geliştirilebilir. Böylece, SFOTD modellerinin uygulanabilirliği artırılabilir.

- Bu çalışma kapsamında, SFOTD3 ve SFOTD4 yaklaşımlarında sinyal süreleri ve faz planları DGA kullanılarak optimize edilmiştir. Gelecek çalışmalarda, analizler için yeni, güçlü ve hızlı çözüm algoritmaları kullanılarak problem çözüm sürecinin daha da hızlandırılabilceği düşünülmektedir.
- Bilindiği üzere, kavşak yaklaşımlarındaki ağır taşıt oranı arttıkça kavşaktaki ortalama taşıt gecikmeleri de artış göstermektedir. Bu tez çalışması kapsamında yapılan analizlerde, taşıt olarak, yalnızca otomobil (birim otomobil) göz önünde bulundurulmuş olup ağır taşıtlar (kamyon, otobüs vb.) ihmal edilmiştir. Bu yüzden, ağır taşıtların kavşaktaki ortalama taşıt gecikmesi üzerindeki etkileri nicel olarak analiz edilememiştir. Daha sonra yapılacak olan çalışmalarda, otomobiller ile birlikte ağır taşıtların da dikkate alınması planlanmaktadır. Böylece, ağır taşıtların ortalama taşıt gecikmesi üzerindeki etkileri analiz edilip değerlendirilebilir.

## 7. KAYNAKLAR

Aavani, P., Sawant, M. K., Sawant, S. and Deshmukh, R. S., “A Review on Adaptive Traffic Controls Systems”, *Int J Latest Eng Man Res*, 2 (1), 52-57, (2017).

Abdelghaffar, H. M., Yang, H. and Rakha, H. A., “Isolated Traffic Signal Control using Nash Bargaining Optimization”, *Global J Res Eng B*, 16 (1), 1-11, (2016).

Adebiyi, R. F., Abubilal, K. A., Mu’azu, M. B. and Adebiyi, B. H., “Development and Simulation of Adaptive Traffic Light Controller using Artificial Bee Colony Algorithm”, *Int J Intell Syst Appl*, 10 (8), 68-74, (2018).

Akcelik, R., “Estimation of Green Times and Cycle Time for Vehicle Actuated Signals”, *Transport Res Rec*, no. 1457, 63-72, (1994).

Akcelik, R., *Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis*, Australian Road Research Board, Research Report ARR No. 123, (1998).

Akgungor, A. P., “A New Delay Parameter Dependent on Variable Analysis Periods at Signalized Intersections, Part 1: Model Development”, *Transport-Vilnius*, 23 (1), 31-36, (2008).

Akgüngör, A. P., Yılmaz, Ö., Korkmaz, E., Doğan, E., “Meta-Sezgisel Yöntemlerle Sabit Zamanlı Sinyalize Kavşaklar için Optimum Devre Süresi Modeli”, *El-Cezeri Fen Müh Der*, 6 (2), 259-269, (2019).

Akyol, S. ve Alataş, B., “Güncel Sürü Zekası Optimizasyon Algoritmaları”, *NEVÜ Fen Bil Enst Der*, 1, 36-50, (2012).

Ali, M. M. and Törn, A., “Population Set-Based Global Optimization Algorithms: Some Modifications and Numerical Studies”, *Comput Oper Res*, 31, 1703-1725, (2004).

Aljaafreh, A. and Al-Oudat, N., “Optimized Timing Parameters for Real-Time Adaptive Traffic Signal Controller”, *2014 UKSim-AMSS 16<sup>th</sup> International Conference on Computer Modelling and Simulation*, Cambridge – United Kingdom, 243-246, (2014).

Angulo, E., Romero, F. P., Garcia, R., Serrano-Guerrero, J. and Olivas, J. A., “An Adaptive Approach to Enhanced Traffic Signal Optimization by using Soft-Computing Techniques”, *Expert Syst Appl*, 38, 2235-2247, (2011).



Anonim, İBB' nin 2019 Bütçesi 23 Milyar 800 Milyon Lira, (29 Aralık 2019), Web adresi: <https://www.cnnturk.com/ekonomi/ibbnin-2019-butcesi-23-milyar-800-milyon-lira>, (2018a).

Anonim, Büyükşehir' e 6 Milyarlık Bütçe, (29 Aralık 2019), Web adresi: <https://www.izmir.bel.tr/tr/Haberler/buyuksehire-6-milyarlik-butce/39204/156>, (2018b).

Anonim, Bursa' da Ulaşım Yatırımları Hız Kesmiyor, (29 Aralık 2019), Web adresi: <http://www.bursadabugun.com/haber/bursa-da-ulasim-yatirimlari-hiz-kesmiyor-1112928.html>, (2019a).

Anonim, Ulaşım Yatırımları Hız Kesmiyor, (29 Aralık 2019), Web adresi: <https://www.kayseri.bel.tr/haberler/ulasim-yatirimlari-hiz-kesmiyor>, (2019b).

Anonim, Büyükşehir Ulaşım Sorunlarını Çözecek Projesini Tanıttı, (29 Aralık 2019), Web adresi: <https://gantep.bel.tr/haber/buyuksehir-ulasim-sorunlarini-cozecek-projesini-tanitti-4340.html>, (2019c).

Araghi, S., Khosravi, A. and Creighton, D., “A Review on Computational Intelligence Methods for Controlling Traffic Signal Timing”, *Expert Syst Appl*, 42, 1538-1550, (2015a).

Araghi, S., Khosravi, A. and Creighton, D., “Intelligent Cuckoo Search Optimized Traffic Signal Controllers for Multi-Intersection Network”, *Expert Syst Appl*, 42, 4422-4431, (2015b).

Atalay, A., “Sinyalize Kavşaklarda Gecikme Tahmininde Yapay Zeka Yöntemi ile Farklı Yöntemlerin Karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilimdalı, Erzurum, (2004).

Baskan, O., Haldenbilen, S., Ceylan, H. and Ceylan, H., “A New Solution Algorithm for Improving Performance of Ant Colony Optimization”, *Appl Math Comput*, 211, 75-84, (2009).

Baskan, O. and Ozan, C., “Determining Optimum Configuration of One-Way and Two-Way Streets Using Shortest Path Travel Costs Based On Results of Traffic Assignment”, *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg*, 24 (6), 1087-1092, (2018).

Baskan, O., “A Multiobjective Bilevel Programming Model for Environmentally Friendly Traffic Signal Timings”, *Adv Civ Eng*, Article ID: 1638618, 1-13, (2019).

Baskan, O., Ceylan, H. and Ozan, C., “A Simultaneous Solution for Reserve Capacity Maximization and Delay Minimization Problems in Signalized Road Networks”, *J Adv Transport*, Article ID: 6203137, 1-18, (2019).

Başkan, Ö. and Ceylan, H., “Ulaşım Ağ Tasarımı Problemlerinin Çözümünde Diferansiyel Gelişim Algoritması Tabanlı Çözüm Yaklaşımları”, *Pamukkale Univ Muh Bilim Derg*, 20 (9), 324-331, (2014).

Bullen, A. G. R., “Effects of Actuated Signal Settings and Detector Placement on Vehicle Delay”, *Transport Res Rec*, no. 1244, 32-38, (1989).

Cakici, Z. and Murat, Y. S., “A Differential Evolution Algorithm based Traffic Control Model for Signalized Intersections”, *Adv Civ Eng*, Article ID: 7360939, 1-16, (2019b).

Castro, G. B., Hirakawa, A. W. and Martini, J. S. C., “Adaptive Traffic Signal Control Based on Bio-Neural Network”, *Procedia Comput Sci*, 109C, 1182-1187, (2017).

Chen, X., Osorio, C., Marsico, M., Talas, M., Gao, J. and Zhang, S., “Simulation-based Adaptive Traffic Signal Control Algorithm”, *Transport Res Rec*, no. 4140, 1-21, (2015).

Chen, P., Zhu, Z. and Lu, G., “An Adaptive Control Method for Arterial Signal Coordination Based on Deep Reinforcement Learning”, *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, Auckland – New Zealand, 3553-3558, (2019).

Chen, S. and Sun, D., “An Improved Adaptive Signal Control Method for Isolated Signalized Intersection Based on Dynamic Programming”, *IEEE Intel Transp Sy*, 8 (4), 4-14, (2016).

Chentoufi, M. A. and Ellaia, R., “A Hybrid Particle Swarm Optimization and Tabu Search Algorithm for Adaptive Traffic Signal Timing Optimization”, *IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions*, Marrakech – Morocco, 25-30, (2018).

Çakıcı, Z. ve Murat, Y. Ş., “Sinyalize Dönel Kavşakların Performanslarının Farklı Senaryolar Altında İncelenmesi”, *11. Ulaştırma Kongresi*, İstanbul – Türkiye, 105-116, (2015).

Çakıcı, Z. ve Murat, Y. Ş., “Sinyalize Dönel Kavşaklar için Hesap Yöntemi Önerisi ve Performans Analizi”, *Tek Dergi*, 27 (4), 7569-7592, (2016).

Çakıcı, Z. ve Murat, Y. Ş., “Trafik Uyarımalı Sinyalizasyon Sistemleri ile İzole Sinyalize Kavşak Denetimi”, *13. Ulaştırma Kongresi*, Erzurum – Türkiye, 291-304, (2019a).

Çalışkanelli, S. P., “Sinyalizasyon Sistemlerinden Ayrılan Araçların Takip Aralığı Dağılımının İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ulaştırma Anabilimdalı, İzmir, (2010).

Çetin, M. ve Murat, Y. Ş. “Doğun Akım Belirlenmesinde Sürücü Davranışına Bağlı Bir Matematik Yaklaşım”, *Tek Dergi*, 24 (117), 6399-6414, (2013).

Dabiri, S. and Abbas, M., “Arterial Traffic Signal Optimization Using Particle Swarm Optimization in an Integrated VISSIM-MATLAB Simulation Environment”, *2016 IEEE 19<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Transportation Systems*, Rio de Janeiro – Brazil, 766-771, (2016).

Darma, Y., Karim, M. R., Mohamad, J. and Abdullah, S., “Control Delay Variability at Signalized Intersection Based On HCM Method”, *Eastern Asia Society for Transportation Studies Conference 2005*, Bangkok – Thailand, 945-958, (2005).

Deepika, R. and Suribabu, C. R., “Optimal Design of Gravity Dam using Differential Evolution Algorithm”, *Int J Optim Civil Eng*, 5 (3), 255-266, (2015).

Dell’ Orco, M., Baskan, O. and Marinelli, M., “Artificial Bee Colony-Based Algorithm for Optimising Traffic Signal Timings”, (eds: V. Snášel, P. Krömer, M. Köppen and G. Schaefer), *Soft Computing in Industrial Applications*, Berlin / Heidelberg: Springer, 327-337, (2014).

Dhiman, G. and Kumar, V., “Spotted Hyena Optimizer: A Novel Bio-inspired based Metaheuristic Technique for Engineering Applications”, *Adv Eng Softw*, 114, 48-70, (2017).

Dhiman, G. and Kaur, A., “A Hybrid Algorithm Based On Particle Swarm and Spotted Hyena Optimizer for Global Optimization”, (eds: J. C. Bansal, K. N. Das, A. Nagar, K. Deep and A. K. Ojha), *Soft Computing for Problem Solving*, 816, Singapore: Springer, 599-615, (2019).

Dion, F., Rakha, H. and Kang, Y. S., “Comparison of Delay Estimates at Under-Saturated and Over-Saturated Pre-Timed Signalized Intersections”, *Transport Res B-Meth*, 38 (2), 99-122, (2004).

Doğan, E., “Optimize Edilmiş Bulanık Mantık Yöntemi ile İzole Sinyalize Kavşak Kontrolü”, Doktora Tezi, *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İnşaat Mühendisliği Anabilimdalı, Kırıkkale, (2014).

Dogan, E. and Akgungor, A. P., “Optimizing A Fuzzy Logic Traffic Signal Controller via The Differential Evolution Algorithm under Different Traffic Scenarios”, *Simul-T Soc Mod Sim*, 92 (11), 1013-1023, (2016).

Dujardin, Y., Vanderpooten, D. and Boillot, F., “A Multi Objective Interactive System for Adaptive Traffic Control”, *Eur J Oper Res*, 244, 601-610, (2015).

Elci, A. and Ayvaz, M. T., “Differential-Evolution Algorithm Based Optimization for the Site Selection of Groundwater Production Wells with the Consideration of the Vulnerability Concept”, *J Hydrol*, 511, 736-749, (2014).

Gökçe, Ş., “Su Dağıtım Şebekelerinde Ek Klorlama Planlarının Simülasyon Optimizasyon Modelleri Kullanılarak Belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İnşaat Mühendisliği Anabilimdalı, Denizli, (2014).

Grether, C., Bischoff, J. and Nagel, K., “Traffic Actuated Signal Control: Simulation of The User Benefits in a Big Event Real World Scenario”, *2<sup>nd</sup> International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems*, Leuven – Belgium, 1-4, (2011).

Gundogan, F., “Simplified Traffic Responsive Signal Control Method for Developing Large Cities”, Ph.D Thesis, Graz University of Technology, Graz, (2012).

Gundogan, F., Karagoz, Z., Kocyigit, N., Karadag, A., Ceylan, H. and Murat, Y. S., “An Evolution of Adaptive Traffic Control System in Istanbul, Turkey”, *J Traffic Logist Eng*, 2 (3), 198-201, (2014).

Guo, W., Yu, Z., He, Z. and Zheng, S., “Traffic-Actuated Signal Control based on Dynamic Optimal Maximum Green Time”, *International Conference on Transportation Engineering 2007 (ICTE 2007)*, Chengdu – China, 582-587, (2007).

Gurarslan, G. and Karahan, H., “Solving Inverse Problems of Groundwater-Pollution-Source Identification using a Differential Evolution Algorithm”, *Hydrogeol J*, 23 (6), 1109-1119, (2015).

Gülgeç, İ., *Ulaşım Planlaması*, Ankara: Özsan Matbaacılık Sanayi ve Ltd. Şti., (1998).

Hadı, M. A. and Wallace, C. E., “Optimization of Signal Phasing and Timing Using Cauchy Simulated Annealing”, *Transport Res Rec*, no. 1456, 64-71, (1994).

Highway Capacity Manual 2010, National Research Council, Washington, D. C., (2010).

Jia, H., Lin, Y., Luo, Q., Li, Y. and Miao, H., “Multi-Objective Optimization of Urban Road Intersection Signal Timing Based on Particle Swarm Optimization Algorithm”, *Adv Mech Eng*, 11 (4), 1-9, (2019).

Jiang, X., Qiu, Y. and Ruan, S., “An Approach to Optimize the Settings of Actuated Signals”, *J Mod Transp*, 19 (1), 68-74, (2011).

Jin, J. and Ma, X., “Adaptive Group-based Signal Control by Reinforcement Learning”, *Transp Res Proc*, 10, 207-216, (2015).

Kalaycı, Ş., *SPSS Uygulamalı Çok Değişkenli İstatistik Teknikleri*, Ankara: Asil Yayın Dağıtım Ltd. Şti., (2006).

Kamal, M. and İnel, M., “Optimum Design of Reinforced Concrete Continuous Foundation Using Differential Evolution Algorithm”, *Arab J Sci Eng*, 44, 8401-8415, (2019).

Karaboğa, D., *Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları*, Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık Tic. Ltd. Şti., (2014).

Keskintürk, T., “Diferansiyel Gelişim Algoritması”, *İTİCÜ Fen Bil Enst Der*, 9, 85-99, (2006).

Khalighi, F., “A Real-Time Signal Control System to Minimize Emissions at Isolated Intersections”, M.Sc Thesis, University of Massachusetts, (2015).

Khan, S. U., Qureshi, I. M., Zaman, F., Shoaib, B., Naveed, A. and Basit, A., “Correction of Faulty Sensors in Phased Array Radars Using Symmetrical Sensor Failure Technique and Cultural Algorithm with Differential Evolution”, *Sci World J*, Article ID: 852539, 1-10, (2014).

Kılınçaslan, T., *Kentsel Ulaşım*, İstanbul: NİNOVA Yayıncılık Tic. Ltd. Şti., (2012).

Kim, J. T. and Courage, K. G., “Evaluation and Design of Maximum Green Time Settings for Traffic-Actuated Control”, *Transport Res Rec*, no. 3606, 246-255, (2003).

Koltovska, D. and Bombol, K., “Intelligent Agent Based Traffic Signal Control on Isolated Intersections”, *TEM J*, 3 (3), 216-222, (2014).

Korkmaz, E. and Akgungor, A. P., “Delay Estimation Models for Signalized Intersections using Differential Evolution Algorithm”, *J Eng Res-Kuwait*, 5 (3), 16-29, (2017).

Korkmaz, E. and Akgungor, A. P., “Comparison of Artificial Bee Colony and Flower Pollination Algorithms in Vehicle Delay Models at Signalized Intersections”, *Neural Comput Appl*, 1-17, (2018).

- Kumar, A. and Bawa, S., “Generalized Ant Colony Optimizer: Swarm-based Meta-Heuristic Algorithm for Cloud Services Execution”, *Computing*, 101 (11), 1609-1632, (2019).
- Jin, J. and Ma, X., “Implementation and Optimization of Group-based Signal Control in Traffic Simulation”, *2014 IEEE 17<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Transportation Systems*, Qindao – China, 2517-2522, (2014).
- Lee, J., Abdulhai, B., Shalaby, A. and Chung, E. H., “Real-Time Optimization for Adaptive Traffic Signal Control using Genetic Algorithms”, *J Intell Transport S*, 9 (3), 111-122, ,(2005).
- Li, H. and Prevedouros, P. D., “Traffic Adaptive Control for Oversaturated Isolated Intersections: Model Development and Simulation Testing”, *J Transp Eng-ASCE*, 130 (5), 594-601, (2004).
- Li, Z., Shahidehpour, M., Bahramirad, S. and Khodaei, A., “Optimizing Traffic Signal Settings in Smart Cities”, *IEEE T Smart Grid*, 8 (5), 2382-2393, (2017).
- Linkenheld, J. S., Benekohal, R. F. and Garret, J. H., “Knowledge-Based System for Design of Signalized Intersections”, *J Transp Eng-ASCE*, 118, 241-257, (1992).
- Liu, H., Cai, Z. and Wang, Y., “Hybridizing Particle Swarm Optimization with Differential Evolution for Constrained Numerical and Engineering Optimization”, *Appl Soft Comput*, 10 (2), 629-640, (2010).
- Liu, Q. and Xu, J., “Traffic Signal Timing Optimization for Isolated Intersections Based on Differential Evolution Bacteria Foraging Algorithm”, *Procedia Soc Behav Sci*, 43, 210-215, (2012).
- Lozano, M. and Garcia-Martinez, C., “Hybrid Metaheuristics with Evolutionary Algorithms Specializing in Intensification and Diversification: Overview and Progress Report”, *Comput Oper Res*, 37, 481-497, (2010).
- Ma, X., Jin, J. and Lei, W., “Multi-Criteria Analysis of Optimal Signal Plans using Microscopic Traffic Models”, *Transport Res D-Tr E*, 32, 1-14, (2014).
- Manandhar, B. and Joshi, B., “Adaptive Traffic Light Control with Statistical Multiplexing Technique and Particle Swarm Optimization in Smart Cities”, *IEEE 3<sup>rd</sup> International Conference on Computing, Communication and Security*, Kathmandu – Nepal, 210-217, (2018).

Manjarres, D., Landa-Torres, I., Gil-Lopez, S., Del-Ser, J., Bilbao, M. N., Salcedo-Sanz, S. and Geem, Z. W., “A Survey on Applications of The Harmony Search Algorithm”, *Eng Appl Artif Intel*, 26, 1818-1831, (2013).

Martin, S., Romana, M. G. and Santos, M., “Fuzzy Model of Vehicle Delay to Determine The Level of Service of Two-Lane Roads”, *Expert Syst Appl*, 54, 48-60, (2016).

MATLAB R2013b, Mathworks, (2013).

Matei, L., Dumitru, I., Racila, L. and Vinatoru, M., “Adaptive Traffic Signal Control on a National Road Intersection”, *Appl Mech Mater*, 882, 455-460, (2016).

Mathew, T. V., “Vehicle Actuated Signals”, *Lecture Notes in Transportation System Engineering*, Chapter 39, (2014).

Mayer, D. G., Kinghorn, B. P. and Archer, A. A., “Differential Evolution – An Easy and Efficient Evolutionary Algorithm for Model Optimisation”, *Agr Syst*, 83, 315-328, (2005).

McKenny, D. and White, T., “Distributed and Adaptive Traffic Signal Control Within a Realistic Traffic Simulation”, *Eng Appl Artif Intel*, 26, 574-583, (2012).

Mirchandani, P. and Head, L., “A Real-Time Traffic Signal Control System: Architecture, Algorithms, and Analysis”, *Transport Res C-Emer*, 9, 415-432, (2001).

Mohajerpoor, R., Saberi, M. and Ramezani, M., “Analytical Derivation of the Optimal Traffic Signal Timing: Minimizing Delay Variability and Spillback Probability for Undersaturated Intersections”, *Transport Res B-Meth*, 119, 45-68, (2019).

Mousa, R. M., “Analysis and Modeling of Measured Delays at Isolated Signalized Intersections”, *J Transp Eng-ASCE*, 128 (4), 347-354, (2002).

Murat, Y. Ş., “Sinyalize Kavşaklardaki Taşıt Gecikmelerinin Bulanık Mantık ile Modellenmesi”, *Tek Dergi*, 17 (3), 3903-3916, (2006a).

Murat, Y. S. “Comparison of Fuzzy Logic and Artificial Neural Networks Approach in Vehicle Delay Modeling”, *Transport Res C-Emer*, 14 (5), 316-334, (2006b).

Murat, Y. S. and Baskan, O., “Modeling Vehicle Delays at Signalized Junctions: Artificial Neural Networks Approach”, *J Sci Ind Res India*, 65, 558-564, (2006).

Murat, Y. Ş., *Trafik Mühendisliği Ders Notları*, Denizli – Türkiye, 2007.

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”, *Transport Res Rec*, no. 2024, 82-91, (2007).

Murat, Y.Ş. ve Çakıcı, Z., “Sezgisel Optimizasyon Algoritmalarının Taşıt Gecikmesi Problemi Üzerine Uygulaması”, *7. Kentsel Altyapı Sempozyumu*, Trabzon – Türkiye, 615-625, (2015).

Murat, Y. Ş. ve Çakıcı, Z., “Sinyalize Kavşaklarda Durma Gecikmesi ve Kontrol Gecikmesi Arasındaki İlişkinin İncelenmesi”, *12. Ulaştırma Kongresi*, Adana – Türkiye, 13-24, (2017).

Murat, Y. S., Cakici, Z. and Tian, Z., “A Signal Timing Assignment Proposal for Urban Multilane Signalized Roundabouts”, *Gradevinar*, 71 (2), 113-124, (2019).

Odeh, S. M., Mora, A. M., Moreno, M. N. and Merelo, J. J., “A Hybrid Fuzzy Genetic Algorithm for an Adaptive Traffic Signal System”, *Adv Fuzzy Syst*, Article ID: 378156, 1-11, (2015).

Potts, I. B., Ringert, J. F., Bauer, K. M., Zegeer, J. D., Harwood, D. W. and Gilmore, D. K., “Relationship of Lane Width to Saturation Flow Rate on Urban and Suburban Signalized Intersection Approaches”, *Transport Res Rec*, no. 2027, 45-51, (2007).

Ramkumar, P. and Suribabu, C. R., “Optimal Design of Plane Truss Structures using Differential Evolution Algorithm”, *Jordan J Civil Eng*, 11 (1), 91-102, (2017).

Rezzai, M., Dachry, W., Moutaouakkil, F. and Medromi, H., “Designing an Intelligent System for Traffic Management”, *J Commun Comput*, 12, 123-127, (2015).

Samadi, S., Rad, A. P., Kazemi, F. M. and Jafarian, H., “Performance Evaluation of Intelligent Adaptive Traffic Control Systems: A Case Study”, *Open J Transp Technol*, 2, 248-259, (2012).

Sekhar, C. R., Raj, P., Parida, P. and Gangopadhyay, S., “Estimation of Delay and Fuel Loss during Idling of Vehicles at Signalized Intersection in Ahmedabad”, *Procedia Soc Behav Sci*, 104, 1178-1187, (2013).

Shao, C., Rong, J. and Liu, X., “Study on The Saturation Flow Rate and Its Influence Factors at Signalized Intersections in China”, *Procedia Soc Behav Sci*, 16, 504-514, (2011).

Shiakolas, P. S., Koladiye, D. and Kebrle, J., “On the Optimum Synthesis of Six-Bar Linkages Using Differential Evolution and The Geometric Centroid of Precision Positions Technique”, *Mech Mach Theory*, 40, 319-335, (2005).



Shinde, S. M., “Adaptive Traffic Light Control System”, *IEEE 1<sup>st</sup> International Conference on Intelligent Systems and Information Management*, Aurangabad – India, 300-306, (2017).

Shoufeng, L., Ximin, L. and Shiqiang, D., “Q-Learning for Adaptive Traffic Signal Control Based on Delay Minimization Strategy”, *2008 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, Sanya – China, 687-691, (2008).

Stevanovic, A., Martin, P. T. and Stevanovic, J., “VisSim-based Genetic Algorithm Optimization of Signal Timings”, *Transport Res Rec*, no. 2035, 59-68, (2007).

Storn, R. and Price, K., “Differential Evolution a Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces”, *J Global Optim*, 11, 341-359, (1997).

Studer, L., Ketabdari, M. and Marchionni, G., “Analysis of Adaptive Traffic Control Systems Design of a Decision Support System for Better Choices”, *J Civil Environ Eng*, 5 (6), 1-10, (2015).

Şahin, İ., “Ulaştırma Planlaması ve Yatırımları Sorunsalı İstanbul’ un Yaka Geçişleri Örneği”, *11. Ulaştırma Kongresi*, İstanbul – Türkiye, 13-25, (2015).

Şen, Z., *Genetik Algoritmalar ve En İyileme Yöntemleri*, İstanbul: Özener Matbaacılık, (2004).

Şensoy, A. T., Kaymaz, İ. ve Ertaş, Ü., “Kallus Stabilizasyonu’ nda Optimum Vida Konfigürasyonunun Belirlenmesi”, *SDÜ Fen Bil Enst Der*, 18, 135-146, (2014).

Tan, E., Sadak, D. ve Ayvaz, M. T., “Kanalizasyon Sistemlerinin Diferansiyel Evrim Algoritması Kullanılarak Optimum Tasarımı”, *Tek Dergi*, 31 (5), (baskıda), (2020).

Thunig, T., Kuhnel, N. And Nagel, K., “Adaptive Traffic Signal Control for Real World Scenarios in Agent-Based Transport Simulations”, *Transp Res Proc*, 37, 481-488, (2019).

Tian, D., Wei, Y., Zhou, J., Zheng, K., Duan, X., Wang, Y., Wang, W., Hui, R. and Guo, P., “Swarm Intelligence Inspired Adaptive Traffic Control for Traffic Networks”, *International Conference on Industrial Networks and Intelligent Systems*, Da Nang – Vietnam, 3-13, (2018).

Touhbi, S., Babram, M. A., Nguyen-Huu, T., Marilleau, N., Hbid, M. L., Cambier, C. and Stinckwich, S., “Adaptive Traffic Signal Control: Exploring Reward Definition for Reinforcement Learning”, *Procedia Comput Sci*, 190C, 513-520, (2017).

- Tunç, A., *Trafik Mühendisliği ve Uygulamaları*, Ankara: Asil Yayın Dağıtım Ltd. Şti., (2003).
- Türkay, M., *Optimizasyon Modelleri ve Çözüm Metodları*, (29 Aralık 2019), Web adresi: <http://home.ku.edu.tr/~mturkay/indr501/Optimizasyon.pdf>, (2016).
- Van Katwijk, R. T., “Multi-Agent Look-Ahead Traffic Adaptive Control”, Ph.D Thesis, Technische Universiteit Delft, Delft, (2008).
- Vilarinho, C. and Tavares, J. P., “Real-Time Traffic Signal Settings at an Isolated Signal Control Intersection”, *Transp Res Proc*, 3, 1021-1030, (2014).
- Vilarinho, C., Tavares, J. P. and Rossetti, R. J. F., “Design of a Multi-Agent System for Real-Time Traffic Control”, *IEEE Intell Syst*, 31 (4), 68-80, (2016).
- Viti, F., van Zuylen, H. J., “A Probabilistic Model for Traffic at Actuated Control Signals”, *Transport Res C-Emer*, 18, 299-310, (2010).
- Wang, G. and Guo, L., “A Novel Hybrid Bat Algorithm with Harmony Search for Global Numerical Optimization”, *J Appl Math*, Article ID: 696491, 1-21, (2013).
- Wang, L., Hayes, C. C. and Penner, R. R., “Automated Phase Design and Timing Adjustment for Signal Phase Design”, *Appl Intell*, 15, 41-55, (2001).
- Wang, X. B., Yin, K. and Liu, H., “Vehicle Actuated Signal Performance Under General Traffic at an Isolated Intersection”, *Transport Res C-Emer*, 95, 582-598, (2018).
- Webster, F. V. *Traffic Signal Settings Report*, Michigan University: H.M. Stationery Office, (1958).
- Wolshon, B. and Taylor, W.C., “Analysis of Intersection Delay under Real-Time Adaptive Signal Control”, *Transport Res C-Emer*, 7, 53-72, (1999).
- Wong, C. K. and Wong, S. C., “Lane-based Optimization of Signal Timings for Isolated Junctions”, *Transport Res B-Meth*, 37, 63-84, (2003).
- Wu, S., Bi, Y., Wang, G., Ma, Y., Lu, M. and Xu, K., “Adaptive Fuzzy Logic Traffic Signal Control Based on Cuckoo Search Algorithm”, *International Symposium for Intelligent Transportation and Smart City (ITASC) 2019*, Singapore – Singapore, 107-117, (2019).

Yasar, M., “Optimization of Reservoir Operation Using Cuckoo Search Algorithm: Example of Adiguzel Dam, Denizli, Turkey”, *Math Probl Eng*, Article ID: 1316038, (2016).

Yayla, N., *Karayolu Mühendisliği*, İstanbul: Birsen Yayınevi Ltd. Şti., (2008).

Yu, D., Tian, X., Xing, X. and Gao, S., “Signal Timing Optimization Based on Fuzzy Compromise Programming for Isolated Signalized Intersection”, *Math Probl Eng*, Article ID: 1682394, 1-12, (2016).

Yuedong, Z., Wei, F. and Chenchen, Q., “A PSO based Signal Timing Optimization Approach of Phase Combination”, *International Conference on Civil, Transportation and Environment 2016 (ICCTE 2016)*, Guangzhou – China, 314-319, (2016).

Yulianto, B. and Sutanto, B., “Adaptive Traffic Signal Control for Mixed Traffic Conditions”, *1<sup>st</sup> International Conference on Engineering Technology and Industrial Application*, Surakarta – Indonesia, 111-116, (2014).

Zachariadis, E. E., Tarantilis, C. D. and Kiranoudis, C. T., “A Hybrid Metaheuristic Algorithm for The Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick-Up Service”, *Expert Syst Appl*, 36, 1070-1081, (2009).

Zhai, C., Luo, F., Liu, Y. and Xu, J., “Adaptive Control of Isolated Intersections Based on Sequential Signal Stage Optimisation”, *P I Civil Eng-Transp*, 1-12, (2018).

Zhao, D., Dai, Y. and Zhang, Z., “Computational Intelligence in Urban Traffic Signal Control: A Survey”, *IEEE T Syst Man Cy C*, 42 (4), 485-494, (2012).

Zhao, Y. and Tian, Z., “An Overview of The Usage of Adaptive Signal Control System in The United States of America”, *Appl Mech Mater*, 178-181, 2591-2598, (2012).

Zheng, X., Recker, W. and Chu, L., “Optimization of Control Parameters for Adaptive Traffic – Actuated Signal Control”, *J Intell Transport S*, 14 (2), 95-108, (2010).

# **EKLER**

## 8. EKLER

### EK A: b Değerinin Belirlenmesi için Yapılan İstatistik Çalışmaları

En uygun b değerinin belirlenmesi amacıyla, analizlerde kullanılan 25 trafik senaryosu için, b=3 ve b=5 olması durumları SPSS programında ayrı ayrı analiz edilmiştir. b' nin 3 devre ve 5 devre alınması durumunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri Tablo A.1' de sunulmaktadır.

**Tablo A.1:** En uygun “b” değerinin belirlenmesi için yapılan analizler sonucunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri

Örnek No	Talep	Senaryo No	Ortalama Taşıt Gecikmesi (sn/ta)		
			OSZD4	SFOTD4 / Y=0 (b=3 devre)	SFOTD4 / Y=0 (b=5 devre)
1	Düşük	1	19,76	18,97	18,17
2	Düşük	2	25,51	17,32	17,08
3	Düşük	3	21,68	19,99	20,02
4	Düşük	4	33,91	23,50	24,35
5	Düşük	5	26,60	19,92	20,03
6	Düşük	6	23,76	22,57	21,35
7	Düşük	7	33,17	26,88	27,26
8	Düşük	8	27,52	22,76	21,38
9	Düşük	9	32,17	23,92	23,34
10	Düşük	10	25,54	24,70	23,16
11	Düşük	11	33,38	29,96	28,52
12	Düşük	12	33,62	26,81	26,66
13	Düşük	13	31,88	25,10	24,97
14	Düşük	14	32,93	29,04	27,26
15	Orta	1	31,74	26,49	25,59
16	Orta	2	32,66	27,55	28,52
17	Orta	3	32,23	26,64	25,80
18	Orta	8	35,01	30,09	28,77
19	Orta	11	42,32	32,25	32,10
20	Orta	13	34,88	31,74	31,53
21	Yüksek	2	51,50	35,38	35,77
22	Yüksek	3	39,10	33,37	32,32
23	Yüksek	4	44,82	34,97	35,05
24	Yüksek	7	82,44	45,59	46,12
25	Yüksek	11	56,16	41,44	42,08

Tablo A.1' den de görüldüğü üzere, analiz edilen trafik senaryoları için, b=3 devre ve b=5 devre olması durumunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri birbirlerine oldukça benzerdir. Bu yüzden, n' nin en uygun değerinin belirlenebilmesi için istatistiksel testlere başvurulmuştur. Bu aşamada, öncelikli olarak, SPSS programı

**EK A: b Değerinin Belirlenmesi için Yapılan İstatistik Çalışmaları (Devamı)**

vasıtası ile test verilerinin normal dağılıma uyup uymadıkları belirlenmiştir. Dağılım testi sonuçları Tablo A.2’ de detaylı olarak gösterilmektedir.

**Tablo A.2:** Dağılım testi sonuçları

Case Processing Summary						
	Cases					
	Valid		Missing		Total	
	N	Percent	N	Percent	N	Percent
ucdevre	25	100,0%	0	0,0%	25	100,0%
besdevre	25	100,0%	0	0,0%	25	100,0%

Descriptives				
		Statistic	Std. Error	
ucdevre	Mean	27,8780	1,35897	
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	25,0732	
		Upper Bound	30,6828	
	5% Trimmed Mean	27,5083		
	Median	26,8100		
	Variance	46,170		
	Std. Deviation	6,79487		
	Minimum	17,32		
	Maximum	45,59		
	Range	28,27		
	Interquartile Range	8,86		
	<b>Skewness</b>	<b>,836</b>	,464	
	<b>Kurtosis</b>	<b>,812</b>	,902	
besdevre	Mean	27,4880	1,40918	
	95% Confidence Interval for Mean	Lower Bound	24,5796	
		Upper Bound	30,3964	
	5% Trimmed Mean	27,0639		
	Median	26,6600		
	Variance	49,645		
	Std. Deviation	7,04591		
	Minimum	17,08		
	Maximum	46,12		
	Range	29,04		
	Interquartile Range	9,55		
	<b>Skewness</b>	<b>,961</b>	,464	
	<b>Kurtosis</b>	<b>1,019</b>	,902	

Tests of Normality						
	Kolmogorov-Smirnov <sup>a</sup>			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
ucdevre	,119	25	,200*	,953	25	<b>,290</b>
besdevre	,148	25	,166	,940	25	<b>,145</b>

\*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

## EK A: b Değerinin Belirlenmesi için Yapılan İstatistik Çalışmaları (Devamı)

Tablo A.2' den görüldüğü üzere, verilerin normal dağılıma uygun olup olmadığını belirlemek için kullanılan en önemli istatistiksel testlerden birisi de Shapiro-Wilk testidir. Shapiro-Wilk testi, güçlü bir dağılım testidir ve Kolmogorov-Smirnov dağılım testine göre daha fazla tercih edilmektedir. Bu yüzden, bu çalışmada, verilerin normal dağılıma uygun olup olmadığını tespit etmek amacıyla Shapiro-Wilk testi kullanılmıştır. Dağılım testi için oluşturulan hipotezleri şu şekilde belirtmek mümkündür: 1)  $H_0$ : Veriler normal dağılıma uygundur (Eğer anlamlılık düzeyi  $> 0.05$ ); 2)  $H_a$ : Veriler normal dağılıma uygun değildir (Eğer anlamlılık düzeyi  $< 0.05$ ).

Veri setleri için, anlamlılık düzeyleri 0.05' den büyük ise  $H_0$  hipotezi kabul edilmekte ve verilerin normal dağılıma uygun olarak dağıldığı belirtilmektedir. Tablo A.2' de verilen SPSS analizleri sonuçları dikkatle incelendiğinde, her iki veri seti için, anlamlılık düzeyinin 0.05' den büyük ve bunun yanı sıra çarpıklık ve basıklık katsayılarının -1.50 ile +1.50 arasında olduğu görülmektedir. Bu veriler ışığında, her iki veri setinin de normal dağılıma uygun bir dağılım gösterdiği söylenebilmektedir.

Bir sonraki aşamada, b=3 devre ve b=5 devre arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığın bulunup bulunmadığının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında incelenen veri setleri normal dağılıma uygun olduğu için, bu aşamada, iki grup arasında anlamlı bir farklılığın bulunup bulunmadığını belirlemek amacıyla Paired-t testi uygulanmıştır. Paired-t testi sonuçları Tablo A.3' de verilmektedir.

**Tablo A.3:** Paired-t testi sonuçları

Paired Samples Statistics					
	Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean	
Pair 1	ucdevre	27,8780	25	6,79487	1,35897
	besdevre	27,4880	25	7,04591	1,40918

Paired Samples Correlations			
	N	Correlation	Sig.
Pair 1	ucdevre & besdevre	,994	,000

Paired Samples Test									
		Paired Differences				t	df	Sig. (2-tailed)	
		Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
					Lower				Upper
Pair 1	ucdevre - besdevre	,3900	,80037	,16007	,05962	,72038	2,436	24	,023

### **EK A: b Değerinin Belirlenmesi için Yapılan İstatistik Çalışmaları (Devamı)**

Tablo A.3' den, anlamlılık düzeyinin 0.05' den küçük olduğu görülmektedir. Bu sonuçtan yola çıkarak, b=3 devre ve b=5 devre arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılığın bulunduğu söylenebilir. 25 adet örneklem (trafik senaryosu) için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, b=5 devre baz alınarak yapılan analiz sonuçlarının ortalamasının (ortalama gecikmenin) b=3 devre baz alınarak yapılan analiz sonuçlarının ortalamasından daha düşük çıktığı görülmektedir. Bununla birlikte, incelenen 25 adet test verisinin 16' sında b=5 devre, 9' unda ise b=3 devre baz alınarak elde edilen ortalama gecikmelerin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, istatistiksel olarak da b=3 devre ve b=5 devre arasında anlamlı bir farklılığın olduğu tespit edilmiş ve b=5 devre baz alınarak yapılan analizler ile daha düşük ortalama gecikmelerin elde edilebileceğine karar verilmiştir. Bu yüzden, sinyal süresi ve faz optimizasyonu tabanlı denetim (SFOTD)' de, sinyal süreleri ve faz planının her 5 devrede bir (**b=5**) güncellenmesi uygun bulunmuştur.



**EK B:** TUD4' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Hareket Yönü Bazlı Trafik Hacimleri

**Tablo B.1:** Kavşak yaklaşımlarındaki taleplerin düşük ve orta olması durumlarında hareket yönü bazlı trafik hacimleri

Talep	Senaryo No	Yaklaşım Kolu (B - V)	Trafik Hacimleri (ta/sa)				Toplam Trafik Hacmi (ta/sa)
			Batı	Kuzey	Doğu	Güney	
Düşük	1	Batı	-	120	420	140	2180
		Kuzey	210	-	60	90	
		Doğu	360	140	-	90	
		Güney	120	150	280	-	
	2	Batı	-	200	420	100	2220
		Kuzey	150	-	100	90	
		Doğu	360	100	-	150	
		Güney	200	150	200	-	
	3	Batı	-	120	700	60	2420
		Kuzey	90	-	60	150	
		Doğu	600	60	-	90	
		Güney	120	250	120	-	
	4	Batı	-	150	525	125	2450
		Kuzey	188	-	75	113	
		Doğu	450	125	-	113	
		Güney	150	188	250	-	
	5	Batı	-	200	525	100	2475
		Kuzey	150	-	100	113	
		Doğu	450	100	-	150	
		Güney	200	188	200	-	
Orta	6	Batı	-	170	595	115	2630
		Kuzey	173	-	85	128	
		Doğu	510	115	-	128	
		Güney	170	213	230	-	
	7	Batı	-	200	700	60	2680
		Kuzey	90	-	100	150	
		Doğu	600	60	-	150	
		Güney	200	250	120	-	
	8	Batı	-	170	700	100	2803
		Kuzey	150	-	85	150	
		Doğu	600	100	-	128	
		Güney	170	250	200	-	
	9	Batı	-	200	700	100	2900
		Kuzey	150	-	100	150	
		Doğu	600	100	-	150	
		Güney	200	250	200	-	
	10	Batı	-	200	700	115	2983
		Kuzey	173	-	100	150	
		Doğu	600	115	-	150	
		Güney	200	250	230	-	

**EK B:** TUD4' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Hareket Yönü Bazlı Trafik Hacimleri (Devamı)

**Tablo B.2:** Kavşak yaklaşımlarındaki taleplerin yüksek ve çok yüksek olması durumlarında hareket yönü bazlı trafik hacimleri

Talep	Senaryo No	Yaklaşım Kolu (B - V)	Trafik Hacimleri (ta/sa)				Toplam Trafik Hacmi (ta/sa)
			Batı	Kuzey	Doğu	Güney	
Yüksek	11	Batı	-	250	700	100	3063
		Kuzey	150	-	125	150	
		Doğu	600	100	-	188	
		Güney	250	250	200	-	
	12	Batı	-	200	805	100	3155
		Kuzey	150	-	100	173	
		Doğu	690	100	-	150	
		Güney	200	288	200	-	
	13	Batı	-	200	805	115	3238
		Kuzey	173	-	100	173	
		Doğu	690	115	-	150	
		Güney	200	288	230	-	
	14	Batı	-	230	805	125	3390
		Kuzey	188	-	115	173	
		Doğu	690	125	-	173	
		Güney	230	288	250	-	
15	Batı	-	200	875	125	3463	
	Kuzey	188	-	100	188		
	Doğu	750	125	-	150		
	Güney	200	313	250	-		
Çok Yüksek	16	Batı	-	200	980	100	3580
		Kuzey	150	-	100	210	
		Doğu	840	100	-	150	
		Güney	200	350	200	-	
	17	Batı	-	150	980	140	3638
		Kuzey	210	-	75	210	
		Doğu	840	140	-	113	
		Güney	150	350	280	-	
	18	Batı	-	250	875	140	3708
		Kuzey	210	-	125	188	
		Doğu	750	140	-	188	
		Güney	250	313	280	-	
	19	Batı	-	200	980	140	3800
		Kuzey	210	-	100	210	
		Doğu	840	140	-	150	
		Güney	200	350	280	-	
20	Batı	-	250	980	140	3963	
	Kuzey	210	-	125	210		
	Doğu	840	140	-	188		
	Güney	250	350	280	-		

**EK C: SFOTD3' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Hareket Yönü Bazlı Trafik Hacimleri**

**Tablo C.1:** Kavşak yaklaşımlarındaki taleplerin düşük olması durumunda hareket yönü bazlı trafik hacimleri

Talep	Senaryo No	Yaklaşım Kolu (B - V)	Trafik Hacimleri (ta/sa)			Toplam Trafik Hacmi (ta/sa)
			Batı	Kuzey	Doğu	
Düşük	1	Batı	-	180	510	1650
		Kuzey	150	-	210	
		Doğu	450	150	-	
	2	Batı	-	180	510	2050
		Kuzey	350	-	210	
		Doğu	450	350	-	
	3	Batı	-	300	510	2110
		Kuzey	250	-	350	
		Doğu	450	250	-	
	4	Batı	-	180	850	2290
		Kuzey	150	-	210	
		Doğu	750	150	-	
	5	Batı	-	225	638	2313
		Kuzey	313	-	263	
Doğu		563	313	-		
6	Batı	-	300	638	2350	
	Kuzey	250	-	350		
	Doğu	563	250	-		
7	Batı	-	225	850	2463	
	Kuzey	188	-	263		
	Doğu	750	188	-		
8	Batı	-	255	723	2488	
	Kuzey	288	-	298		
	Doğu	638	288	-		
9	Batı	-	180	850	2490	
	Kuzey	250	-	210		
	Doğu	750	250	-		
10	Batı	-	300	723	2510	
	Kuzey	250	-	350		
	Doğu	638	250	-		
11	Batı	-	300	850	2550	
	Kuzey	150	-	350		
	Doğu	750	150	-		
12	Batı	-	255	850	2578	
	Kuzey	213	-	298		
	Doğu	750	213	-		
13	Batı	-	225	850	2588	
	Kuzey	250	-	263		
	Doğu	750	250	-		
14	Batı	-	300	850	2625	
	Kuzey	188	-	350		
	Doğu	750	188	-		

**EK C: SFOTD3' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Hareket Yönü Bazlı Trafik Hacimleri (Devamı)**

**Tablo C.2:** Kavşak yaklaşımlarındaki taleplerin orta olması durumunda hareket yönü bazlı trafik hacimleri

Talep	Senaryo No	Yaklaşım Kolu (B - V)	Trafik Hacimleri (ta/sa)			Toplam Trafik Hacmi (ta/sa)
			Batı	Kuzey	Doğu	
Orta	1	Batı	-	255	850	2653
		Kuzey	250	-	298	
		Doğu	750	250	-	
	2	Batı	-	300	850	2675
		Kuzey	213	-	350	
		Doğu	750	213	-	
	3 Referans	Batı	-	300	850	2750
		Kuzey	250	-	350	
		Doğu	750	250	-	
	4	Batı	-	300	850	2825
		Kuzey	288	-	350	
		Doğu	750	288	-	
	5	Batı	-	345	850	2848
		Kuzey	250	-	403	
Doğu		750	250	-		
6	Batı	-	300	850	2875	
	Kuzey	313	-	350		
	Doğu	750	313	-		
7	Batı	-	375	850	2913	
	Kuzey	250	-	438		
	Doğu	750	250	-		
8	Batı	-	345	850	2923	
	Kuzey	288	-	403		
	Doğu	750	288	-		
9	Batı	-	300	850	2950	
	Kuzey	350	-	350		
	Doğu	750	350	-		
10	Batı	-	255	978	2968	
	Kuzey	288	-	298		
	Doğu	863	288	-		
11	Batı	-	300	978	2990	
	Kuzey	250	-	350		
	Doğu	863	250	-		
12	Batı	-	420	850	3010	
	Kuzey	250	-	490		
	Doğu	750	250	-		
13	Batı	-	375	850	3038	
	Kuzey	313	-	438		
	Doğu	750	313	-		
14	Batı	-	300	978	3065	
	Kuzey	288	-	350		
	Doğu	863	288	-		

**EK C: SFOTD3' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Hareket Yönü Bazlı Trafik Hacimleri (Devamı)**

**Tablo C.3:** Kavşak yaklaşımlarındaki taleplerin yüksek olması durumunda hareket yönü bazlı trafik hacimleri

Talep	Senaryo No	Yaklaşım Kolu (B - V)	Trafik Hacimleri (ta/sa)			Toplam Trafik Hacmi (ta/sa)
			Batı	Kuzey	Doğu	
Yüksek	1	Batı	-	225	1063	3113
		Kuzey	313	-	263	
		Doğu	938	313	-	
	2	Batı	-	300	1063	3150
		Kuzey	250	-	350	
		Doğu	938	250	-	
	3	Batı	-	420	850	3210
		Kuzey	350	-	490	
		Doğu	750	350	-	
	4	Batı	-	345	978	3213
		Kuzey	313	-	403	
		Doğu	863	313	-	
	5	Batı	-	255	1063	3253
		Kuzey	350	-	298	
Doğu		938	350	-		
6	Batı	-	300	1063	3275	
	Kuzey	313	-	350		
	Doğu	938	313	-		
7	Batı	-	300	1190	3390	
	Kuzey	250	-	350		
	Doğu	1050	250	-		
8	Batı	-	225	1190	3428	
	Kuzey	350	-	263		
	Doğu	1050	350	-		
9	Batı	-	345	1063	3448	
	Kuzey	350	-	403		
	Doğu	938	350	-		
10	Batı	-	420	978	3450	
	Kuzey	350	-	490		
	Doğu	863	350	-		
11	Batı	-	375	1063	3513	
	Kuzey	350	-	438		
	Doğu	938	350	-		
12	Batı	-	300	1190	3590	
	Kuzey	350	-	350		
	Doğu	1050	350	-		
13	Batı	-	375	1190	3753	
	Kuzey	350	-	438		
	Doğu	1050	350	-		
14	Batı	-	420	1190	3850	
	Kuzey	350	-	490		
	Doğu	1050	350	-		

**EK D: SFOTD4' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Hareket Yönü Bazlı Trafik Hacimleri**

**Tablo D.1:** Kavşak yaklaşımlarındaki taleplerin düşük olması durumunda hareket yönü bazlı trafik hacimleri

Talep	Senaryo No	Yaklaşım Kolu (B - V)	Trafik Hacimleri (ta/sa)				Toplam Trafik Hacmi (ta/sa)
			Batı	Kuzey	Doğu	Güney	
Düşük	1	Batı	-	120	420	60	1740
		Kuzey	90	-	60	90	
		Doğu	360	60	-	90	
		Güney	120	150	120	-	
	2	Batı	-	120	420	140	2180
		Kuzey	210	-	60	90	
		Doğu	360	140	-	90	
		Güney	120	150	280	-	
	3	Batı	-	200	420	100	2220
		Kuzey	150	-	100	90	
		Doğu	360	100	-	150	
		Güney	200	150	200	-	
	4	Batı	-	120	700	60	2420
		Kuzey	90	-	60	150	
		Doğu	600	60	-	90	
		Güney	120	250	120	-	
	5	Batı	-	150	525	125	2450
		Kuzey	188	-	75	113	
		Doğu	450	125	-	113	
		Güney	150	188	250	-	
	6	Batı	-	200	525	100	2475
		Kuzey	150	-	100	113	
		Doğu	450	100	-	150	
		Güney	200	188	200	-	
	7	Batı	-	150	700	75	2600
		Kuzey	113	-	75	150	
		Doğu	600	75	-	113	
		Güney	150	250	150	-	
8	Batı	-	170	595	115	2630	
	Kuzey	173	-	85	128		
	Doğu	510	115	-	128		
	Güney	170	213	230	-		
9	Batı	-	120	700	100	2640	
	Kuzey	150	-	60	150		
	Doğu	600	100	-	90		
	Güney	120	250	200	-		
10	Batı	-	200	595	100	2645	
	Kuzey	150	-	100	128		
	Doğu	510	100	-	150		
	Güney	200	213	200	-		
11	Batı	-	200	700	60	2680	
	Kuzey	90	-	100	150		
	Doğu	600	60	-	150		
	Güney	200	250	120	-		
12	Batı	-	170	700	85	2720	
	Kuzey	128	-	85	150		
	Doğu	600	85	-	128		
	Güney	170	250	170	-		
13	Batı	-	150	700	100	2738	
	Kuzey	150	-	75	150		
	Doğu	600	100	-	113		
	Güney	150	250	200	-		
14	Batı	-	200	700	75	2763	
	Kuzey	113	-	100	150		
	Doğu	600	75	-	150		
	Güney	200	250	150	-		

**EK D: SFOTD4' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Hareket Yönü Bazlı Trafik Hacimleri (Devamı)**

**Tablo D.2:** Kavşak yaklaşımlarındaki taleplerin orta olması durumunda hareket yönü bazlı trafik hacimleri

Talep	Senaryo No	Yaklaşım Kolu (B - V)	Trafik Hacimleri (ta/sa)				Toplam Trafik Hacmi (ta/sa)
			Batı	Kuzey	Doğu	Güney	
Orta	1	Batı	-	170	700	100	2803
		Kuzey	150	-	85	150	
		Doğu	600	100	-	128	
		Güney	170	250	200	-	
	2	Batı	-	200	700	85	2818
		Kuzey	128	-	100	150	
		Doğu	600	85	-	150	
		Güney	200	250	170	-	
	3	Batı	-	200	700	100	2900
		Kuzey	150	-	100	150	
		Doğu	600	100	-	150	
		Güney	200	250	200	-	
	4	Batı	-	200	700	115	2983
		Kuzey	173	-	100	150	
		Doğu	600	115	-	150	
		Güney	200	250	230	-	
	5	Batı	-	230	700	100	2998
		Kuzey	150	-	115	150	
		Doğu	600	100	-	173	
		Güney	230	250	200	-	
	6	Batı	-	200	700	125	3038
		Kuzey	188	-	100	150	
		Doğu	600	125	-	150	
		Güney	200	250	250	-	
	7	Batı	-	250	700	100	3063
		Kuzey	150	-	125	150	
		Doğu	600	100	-	188	
		Güney	250	250	200	-	
8	Batı	-	230	700	115	3080	
	Kuzey	173	-	115	150		
	Doğu	600	115	-	173		
	Güney	230	250	230	-		
9	Batı	-	200	700	140	3120	
	Kuzey	210	-	100	150		
	Doğu	600	140	-	150		
	Güney	200	250	280	-		
10	Batı	-	170	805	115	3140	
	Kuzey	173	-	85	173		
	Doğu	690	115	-	128		
	Güney	170	288	230	-		
11	Batı	-	200	805	100	3155	
	Kuzey	150	-	100	173		
	Doğu	690	100	-	150		
	Güney	200	288	200	-		
12	Batı	-	280	700	100	3160	
	Kuzey	150	-	140	150		
	Doğu	600	100	-	210		
	Güney	280	250	200	-		
13	Batı	-	250	700	125	3200	
	Kuzey	188	-	125	150		
	Doğu	600	125	-	188		
	Güney	250	250	250	-		
14	Batı	-	200	805	115	3238	
	Kuzey	173	-	100	173		
	Doğu	690	115	-	150		
	Güney	200	288	230	-		

**EK D: SFOTD4' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Hareket Yönü Bazlı Trafik Hacimleri (Devamı)**

**Tablo D.3:** Kavşak yaklaşımlarındaki taleplerin yüksek olması durumunda hareket yönü bazlı trafik hacimleri

Talep	Senaryo No	Yaklaşım Kolu (B - V)	Trafik Hacimleri (ta/sa)				Toplam Trafik Hacmi (ta/sa)
			Batı	Kuzey	Doğu	Güney	
Yüksek	1	Batı	-	150	875	125	3300
		Kuzey	188	-	75	188	
		Doğu	750	125	-	113	
		Güney	150	313	250	-	
	2	Batı	-	200	875	100	3325
		Kuzey	150	-	100	188	
		Doğu	750	100	-	150	
		Güney	200	313	200	-	
	3	Batı	-	280	700	140	3380
		Kuzey	210	-	140	150	
		Doğu	600	140	-	210	
		Güney	280	250	280	-	
	4	Batı	-	230	805	125	3390
		Kuzey	188	-	115	173	
Doğu		690	125	-	173		
Güney		230	288	250	-		
5	Batı	-	170	875	140	3448	
	Kuzey	210	-	85	188		
	Doğu	750	140	-	128		
	Güney	170	313	280	-		
6	Batı	-	200	875	125	3463	
	Kuzey	188	-	100	188		
	Doğu	750	125	-	150		
	Güney	200	313	250	-		
7	Batı	-	200	980	100	3580	
	Kuzey	150	-	100	210		
	Doğu	840	100	-	150		
	Güney	200	350	200	-		
8	Batı	-	280	805	140	3635	
	Kuzey	210	-	140	173		
	Doğu	690	140	-	210		
	Güney	280	288	280	-		
9	Batı	-	150	980	140	3638	
	Kuzey	210	-	75	210		
	Doğu	840	140	-	113		
	Güney	150	350	280	-		
10	Batı	-	230	875	140	3643	
	Kuzey	210	-	115	188		
	Doğu	750	140	-	173		
	Güney	230	313	280	-		
11	Batı	-	250	875	140	3708	
	Kuzey	210	-	125	188		
	Doğu	750	140	-	188		
	Güney	250	313	280	-		
12	Batı	-	200	980	140	3800	
	Kuzey	210	-	100	210		
	Doğu	840	140	-	150		
	Güney	200	350	280	-		
13	Batı	-	250	980	140	3963	
	Kuzey	210	-	125	210		
	Doğu	840	140	-	188		
	Güney	250	350	280	-		
14	Batı	-	280	980	140	4060	
	Kuzey	210	-	140	210		
	Doğu	840	140	-	210		
	Güney	280	350	280	-		



**EK E:** TUD4' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Farklı Denetim Tiplerinin Uygulanması Durumunda Elde Edilen Ortalama Taşıt Gecikmeleri ve Hizmet Düzeyleri

**Tablo E.1:** Trafik taleplerinde dalgalanma görülmesi ve görülmemesi durumlarında elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri ve hizmet düzeyleri

Talepte Dalgalanma	Talep	Senaryo No	Ortalama Gecikme (sn/ta) OSZD4	Ortalama Gecikme (sn/ta) TUD4	Hizmet Düzeyi OSZD4	Hizmet Düzeyi TUD4	Hizmet Düzeyi Değişti mi?
Yok	Düşük	1	25,51	21,78	C	C	×
		2	21,68	19,11	C	B	✓
		3	33,91	26,90	C	C	×
		4	26,60	23,71	C	C	×
		5	23,76	21,76	C	C	×
	Orta	6	27,52	25,09	C	C	×
		7	33,38	28,33	C	C	×
		8	31,74	28,89	C	C	×
		9	32,23	29,75	C	C	×
		10	34,94	31,61	C	C	×
	Yüksek	11	34,47	32,13	C	C	×
		12	42,32	38,58	D	D	×
		13	42,73	37,14	D	D	×
		14	44,82	42,80	D	D	×
		15	56,10	47,05	E	D	✓
	Çok Yüksek	16	82,44	58,40	F	E	✓
		17	84,21	63,70	F	E	✓
		18	56,16	50,44	E	D	✓
		19	79,88	59,41	E	E	×
		20	79,55	56,66	E	E	×
Var	Düşük	1	40,68	23,27	D	C	✓
		2	25,35	19,54	C	B	✓
		3	55,16	29,27	E	C	✓
		4	36,66	27,24	D	C	✓
		5	30,23	24,11	C	C	×
	Orta	6	53,34	26,87	D	C	✓
		7	99,25	70,23	F	E	✓
		8	60,92	36,68	E	D	✓
		9	64,95	44,95	E	D	✓
		10	68,50	35,48	E	D	✓
	Yüksek	11	70,40	29,18	E	C	✓
		12	80,70	38,99	F	D	✓
		13	97,63	60,63	F	E	✓
		14	74,30	58,05	E	E	×
		15	80,89	67,36	F	E	✓
	Çok Yüksek	16	108,61	89,46	F	F	×
		17	113,68	87,24	F	F	×
		18	79,81	53,04	E	D	✓
		19	108,54	89,25	F	F	×
		20	101,20	85,43	F	F	×

× : Hizmet düzeyi değişmedi ya da kötüleşti

✓ : Hizmet düzeyi iyileşti

**EK F: SFOTD3' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Farklı Denetim Tiplerinin Uygulanması Durumunda Elde Edilen Ortalama Taşıt Gecikmeleri ve Hizmet Düzeyleri**

**Tablo F.1:** Oluşturulan senaryolar için OSZD3 yerine TUD3 uygulanması durumunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri ve hizmet düzeyleri

Talep	Senaryo No	Ortalama Gecikme (sn/ta) OSZD3	Ortalama Gecikme (sn/ta) TUD3	Hizmet Düzeyi OSZD3	Hizmet Düzeyi TUD3	Hizmet Düzeyi Değişti mi?
Düşük	1	13,36	14,28	B	B	×
	2	19,65	18,17	B	B	×
	3	18,07	17,56	B	B	×
	4	21,71	18,64	C	B	✓
	5	19,43	17,37	B	B	×
	6	20,76	18,67	C	B	✓
	7	23,97	21,50	C	C	×
	8	21,83	20,11	C	C	×
	9	23,26	21,61	C	C	×
	10	23,78	20,40	C	C	×
	11	28,46	26,41	C	C	×
	12	25,70	23,26	C	C	×
	13	24,20	22,58	C	C	×
	14	29,24	25,77	C	C	×
Orta	1	26,58	23,62	C	C	×
	2	27,22	23,61	C	C	×
	3	27,87	24,84	C	C	×
	4	29,15	25,12	C	C	×
	5	30,81	27,75	C	C	×
	6	29,60	26,00	C	C	×
	7	34,78	29,70	C	C	×
	8	31,37	27,99	C	C	×
	9	30,81	27,55	C	C	×
	10	33,10	29,39	C	C	×
	11	35,30	30,19	D	C	✓
	12	40,60	33,62	D	C	✓
	13	34,81	31,02	C	C	×
	14	35,91	30,18	D	C	✓
Yüksek	1	39,25	34,95	D	C	✓
	2	41,39	35,28	D	D	×
	3	39,60	33,11	D	C	✓
	4	41,62	34,22	D	C	✓
	5	44,32	39,28	D	D	×
	6	42,76	35,67	D	D	×
	7	59,98	32,98	E	C	✓
	8	60,95	35,32	E	D	✓
	9	48,97	37,73	D	D	×
	10	51,31	40,03	D	D	×
	11	53,48	40,45	D	D	×
	12	63,73	34,86	E	C	✓
	13	81,52	64,82	F	E	✓
	14	96,90	77,11	F	E	✓

×

✓

**EK F: SFOTD3' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Farklı Denetim Tiplerinin Uygulanması Durumunda Elde Edilen Ortalama Taşıt Gecikmeleri ve Hizmet Düzeyleri (Devamı)**

**Tablo F.2:** Oluşturulan senaryolar için OSZD3 yerine SFOTD3 / Y=0 uygulanması durumunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri ve hizmet düzeyleri

Talep	Senaryo No	Ortalama Gecikme (sn/ta) OSZD3	Ortalama Gecikme (sn/ta) SFOTD3 / Y=0	Hizmet Düzeyi OSZD3	Hizmet Düzeyi SFOTD3 / Y=0	Hizmet Düzeyi Değişti mi?
Düşük	1	13,36	9,35	B	A	✓
	2	19,65	9,58	B	A	✓
	3	18,07	13,58	B	B	×
	4	21,71	11,94	C	B	✓
	5	19,43	11,17	B	B	×
	6	20,76	15,32	C	B	✓
	7	23,97	12,78	C	B	✓
	8	21,83	13,55	C	B	✓
	9	23,26	12,58	C	B	✓
	10	23,78	15,23	C	B	✓
	11	28,46	18,56	C	B	✓
	12	25,70	14,57	C	B	✓
	13	24,20	13,69	C	B	✓
	14	29,24	17,60	C	B	✓
Orta	1	26,58	15,06	C	B	✓
	2	27,22	17,36	C	B	✓
	3	27,87	18,30	C	B	✓
	4	29,15	18,69	C	B	✓
	5	30,81	22,54	C	C	×
	6	29,60	17,46	C	B	✓
	7	34,78	25,38	C	C	×
	8	31,37	21,50	C	C	×
	9	30,81	17,70	C	B	✓
	10	33,10	16,65	C	B	✓
	11	35,30	20,51	D	C	✓
	12	40,60	31,42	D	C	✓
	13	34,81	22,89	C	C	×
	14	35,91	19,15	D	B	✓
Yüksek	1	39,25	16,18	D	B	✓
	2	41,39	21,06	D	C	✓
	3	39,60	28,98	D	C	✓
	4	41,62	23,40	D	C	✓
	5	44,32	18,60	D	B	✓
	6	42,76	18,94	D	B	✓
	7	59,98	23,69	E	C	✓
	8	60,95	20,38	E	C	✓
	9	48,97	23,72	D	C	✓
	10	51,31	32,14	D	C	✓
	11	53,48	26,87	D	C	✓
	12	63,73	23,61	E	C	✓
	13	81,52	34,85	F	C	✓
	14	96,90	42,72	F	D	✓

×

✓

**EK F: SFOTD3' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Farklı Denetim Tiplerinin Uygulanması Durumunda Elde Edilen Ortalama Taşıt Gecikmeleri ve Hizmet Düzeyleri (Devamı)**

**Tablo F.3: Oluşturulan senaryolar için TUD3 yerine SFOTD3 / Y=0 uygulanması durumunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri ve hizmet düzeyleri**

Talep	Senaryo No	Ortalama Gecikme (sn/ta) TUD3	Ortalama Gecikme (sn/ta) SFOTD3 / Y=0	Hizmet Düzeyi TUD3	Hizmet Düzeyi SFOTD3 / Y=0	Hizmet Düzeyi Değişti mi?
Düşük	1	14,28	9,35	B	A	✓
	2	18,17	9,58	B	A	✓
	3	17,56	13,58	B	B	×
	4	18,64	11,94	B	B	×
	5	17,37	11,17	B	B	×
	6	18,67	15,32	B	B	×
	7	21,50	12,78	C	B	✓
	8	20,11	13,55	C	B	✓
	9	21,61	12,58	C	B	✓
	10	20,40	15,23	C	B	✓
	11	26,41	18,56	C	B	✓
	12	23,26	14,57	C	B	✓
	13	22,58	13,69	C	B	✓
	14	25,77	17,60	C	B	✓
Orta	1	23,62	15,06	C	B	✓
	2	23,61	17,36	C	B	✓
	3	24,84	18,30	C	B	✓
	4	25,12	18,69	C	B	✓
	5	27,75	22,54	C	C	×
	6	26,00	17,46	C	B	✓
	7	29,70	25,38	C	C	×
	8	27,99	21,50	C	C	×
	9	27,55	17,70	C	B	✓
	10	29,39	16,65	C	B	✓
	11	30,19	20,51	C	C	×
	12	33,62	31,42	C	C	×
	13	31,02	22,89	C	C	×
	14	30,18	19,15	C	B	✓
Yüksek	1	34,95	16,18	C	B	✓
	2	35,28	21,06	D	C	✓
	3	33,11	28,98	C	C	×
	4	34,22	23,40	C	C	×
	5	39,28	18,60	D	B	✓
	6	35,67	18,94	D	B	✓
	7	32,98	23,69	C	C	×
	8	35,32	20,38	D	C	✓
	9	37,73	23,72	D	C	✓
	10	40,03	32,14	D	C	✓
	11	40,45	26,87	D	C	✓
	12	34,86	23,61	C	C	×
	13	64,82	34,85	E	C	✓
	14	77,11	42,72	E	D	✓

×

✓

**EK F: SFOTD3' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Farklı Denetim Tiplerinin Uygulanması Durumunda Elde Edilen Ortalama Taşıt Gecikmeleri ve Hizmet Düzeyleri (Devamı)**

**Tablo F.4:** Oluşturulan senaryolar için OSZD3 yerine SFOTD3 / Y=1 uygulanması durumunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri ve hizmet düzeyleri

Talep	Senaryo No	Ortalama Gecikme (sn/ta) OSZD3	Ortalama Gecikme (sn/ta) SFOTD3 / Y=1	Hizmet Düzeyi OSZD3	Hizmet Düzeyi SFOTD3 / Y=1	Hizmet Düzeyi Değişti mi?
Düşük	1	13,36	9,04	B	A	✓
	2	19,65	8,72	B	A	✓
	3	18,07	13,21	B	B	×
	4	21,71	11,43	C	B	✓
	5	19,43	10,26	B	B	×
	6	20,76	14,74	C	B	✓
	7	23,97	12,27	C	B	✓
	8	21,83	12,95	C	B	✓
	9	23,26	11,72	C	B	✓
	10	23,78	14,75	C	B	✓
	11	28,46	18,34	C	B	✓
	12	25,70	13,62	C	B	✓
	13	24,20	12,27	C	B	✓
	14	29,24	17,24	C	B	✓
Orta	1	26,58	13,71	C	B	✓
	2	27,22	17,00	C	B	✓
	3	27,87	17,90	C	B	✓
	4	29,15	18,32	C	B	✓
	5	30,81	21,45	C	C	×
	6	29,60	16,68	C	B	✓
	7	34,78	24,98	C	C	×
	8	31,37	21,09	C	C	×
	9	30,81	17,07	C	B	✓
	10	33,10	15,89	C	B	✓
	11	35,30	19,08	D	B	✓
	12	40,60	31,00	D	C	✓
	13	34,81	22,66	C	C	×
	14	35,91	18,82	D	B	✓
Yüksek	1	39,25	15,26	D	B	✓
	2	41,39	20,59	D	C	✓
	3	39,60	28,42	D	C	✓
	4	41,62	21,77	D	C	✓
	5	44,32	17,09	D	B	✓
	6	42,76	18,79	D	B	✓
	7	59,98	23,02	E	C	✓
	8	60,95	19,02	E	B	✓
	9	48,97	22,48	D	C	✓
	10	51,31	31,16	D	C	✓
	11	53,48	25,45	D	C	✓
	12	63,73	22,22	E	C	✓
	13	81,52	33,61	F	C	✓
	14	96,90	42,25	F	D	✓

×

✓

**EK G: SFOTD4' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Farklı Denetim Tiplerinin Uygulanması Durumunda Elde Edilen Ortalama Taşıt Gecikmeleri ve Hizmet Düzeyleri**

**Tablo G.1:** Oluşturulan senaryolar için OSZD4 yerine TUD4 uygulanması durumunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri ve hizmet düzeyleri

Talep	Senaryo No	Ortalama Gecikme (sn/ta) OSZD4	Ortalama Gecikme (sn/ta) TUD4	Hizmet Düzeyi OSZD4	Hizmet Düzeyi TUD4	Hizmet Düzeyi Değişti mi?
Düşük	1	19,76	18,73	B	B	×
	2	25,51	21,78	C	C	×
	3	21,68	19,11	C	B	✓
	4	33,91	26,90	C	C	×
	5	26,60	23,71	C	C	×
	6	23,76	21,76	C	C	×
	7	33,17	27,26	C	C	×
	8	27,52	25,09	C	C	×
	9	32,17	27,84	C	C	×
	10	25,54	23,26	C	C	×
	11	33,38	28,33	C	C	×
	12	33,62	28,34	C	C	×
	13	31,88	28,40	C	C	×
	14	32,93	29,32	C	C	×
Orta	1	31,74	28,89	C	C	×
	2	32,66	29,03	C	C	×
	3	32,23	29,75	C	C	×
	4	34,94	31,61	C	C	×
	5	32,36	29,67	C	C	×
	6	35,39	32,61	D	C	✓
	7	34,47	32,13	C	C	×
	8	35,01	32,50	D	C	✓
	9	37,53	34,08	D	C	✓
	10	42,68	38,60	D	D	×
	11	42,32	38,13	D	D	×
	12	36,41	34,21	D	C	✓
	13	34,88	33,52	C	C	×
	14	42,73	37,14	D	D	×
Yüksek	1	56,00	44,56	E	D	✓
	2	51,50	44,66	D	D	×
	3	39,10	36,13	D	D	×
	4	44,82	42,80	D	D	×
	5	58,29	49,55	E	D	✓
	6	56,10	47,05	E	D	✓
	7	82,44	58,40	F	E	✓
	8	49,23	46,21	D	D	×
	9	84,21	63,70	F	E	✓
	10	54,62	46,72	D	D	×
	11	56,16	50,44	E	D	✓
	12	79,88	59,41	E	E	×
	13	79,55	56,66	E	E	×
	14	77,13	54,08	E	D	✓

×

✓

**EK G: SFOTD4' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Farklı Denetim Tiplerinin Uygulanması Durumunda Elde Edilen Ortalama Taşıt Gecikmeleri ve Hizmet Düzeyleri (Devamı)**

**Tablo G.2:** Oluşturulan senaryolar için OSZD4 yerine SFOTD4 / Y=0 uygulanması durumunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri ve hizmet düzeyleri

Talep	Senaryo No	Ortalama Gecikme (sn/ta) OSZD4	Ortalama Gecikme (sn/ta) SFOTD4 / Y=0	Hizmet Düzeyi OSZD4	Hizmet Düzeyi SFOTD4 / Y=0	Hizmet Düzeyi Değişti mi?
Düşük	1	19,76	18,17	B	B	×
	2	25,51	17,08	C	B	✓
	3	21,68	20,02	C	C	×
	4	33,91	24,35	C	C	×
	5	26,60	20,03	C	C	×
	6	23,76	21,35	C	C	×
	7	33,17	27,26	C	C	×
	8	27,52	21,38	C	C	×
	9	32,17	23,34	C	C	×
	10	25,54	23,16	C	C	×
	11	33,38	28,52	C	C	×
	12	33,62	26,66	C	C	×
	13	31,88	24,97	C	C	×
	14	32,93	27,26	C	C	×
Orta	1	31,74	25,59	C	C	×
	2	32,66	28,22	C	C	×
	3	32,23	25,80	C	C	×
	4	34,94	27,47	C	C	×
	5	32,36	28,10	C	C	×
	6	35,39	27,88	D	C	✓
	7	34,47	31,29	C	C	×
	8	35,01	28,77	D	C	✓
	9	37,53	27,47	D	C	✓
	10	42,68	29,85	D	C	✓
	11	42,32	32,10	D	C	✓
	12	36,41	33,42	D	C	✓
	13	34,88	31,53	C	C	×
	14	42,73	33,47	D	C	✓
Yüksek	1	56,00	31,59	E	C	✓
	2	51,50	35,77	D	D	×
	3	39,10	32,32	D	C	✓
	4	44,82	35,05	D	D	×
	5	58,29	32,44	E	C	✓
	6	56,10	36,61	E	D	✓
	7	82,44	46,12	F	D	✓
	8	49,23	41,34	D	D	×
	9	84,21	43,49	F	D	✓
	10	54,62	41,13	D	D	×
	11	56,16	42,08	E	D	✓
	12	79,88	46,65	E	D	✓
	13	79,55	48,20	E	D	✓
	14	77,13	49,12	E	D	✓

×

✓

**EK G: SFOTD4' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Farklı Denetim Tiplerinin Uygulanması Durumunda Elde Edilen Ortalama Taşıt Gecikmeleri ve Hizmet Düzeyleri (Devamı)**

**Tablo G.3:** Oluşturulan senaryolar için TUD4 yerine SFOTD4 / Y=0 uygulanması durumunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri ve hizmet düzeyleri

Talep	Senaryo No	Ortalama Gecikme (sn/ta) TUD4	Ortalama Gecikme (sn/ta) SFOTD4 / Y=0	Hizmet Düzeyi TUD4	Hizmet Düzeyi SFOTD4 / Y=0	Hizmet Düzeyi Değişti mi?
Düşük	1	18,73	18,17	B	B	×
	2	21,78	17,08	C	B	✓
	3	19,11	20,02	B	C	×
	4	26,90	24,35	C	C	×
	5	23,71	20,03	C	C	×
	6	21,76	21,35	C	C	×
	7	27,26	27,26	C	C	×
	8	25,09	21,38	C	C	×
	9	27,84	23,34	C	C	×
	10	23,26	23,16	C	C	×
	11	28,33	28,52	C	C	×
	12	28,34	26,66	C	C	×
	13	28,40	24,97	C	C	×
	14	29,32	27,26	C	C	×
Orta	1	28,89	25,59	C	C	×
	2	29,03	28,22	C	C	×
	3	29,75	25,80	C	C	×
	4	31,61	27,47	C	C	×
	5	29,67	28,10	C	C	×
	6	32,61	27,88	C	C	×
	7	32,13	31,29	C	C	×
	8	32,50	28,77	C	C	×
	9	34,08	27,47	C	C	×
	10	38,60	29,85	D	C	✓
	11	38,13	32,10	D	C	✓
	12	34,21	33,42	C	C	×
	13	33,52	31,53	C	C	×
	14	37,14	33,47	D	C	✓
Yüksek	1	44,56	31,59	D	C	✓
	2	44,66	35,77	D	D	×
	3	36,13	32,32	D	C	✓
	4	42,80	35,05	D	D	×
	5	49,55	32,44	D	C	✓
	6	47,05	36,61	D	D	×
	7	58,40	46,12	E	D	✓
	8	46,21	41,34	D	D	×
	9	63,70	43,49	E	D	✓
	10	46,72	41,13	D	D	×
	11	50,44	42,08	D	D	×
	12	59,41	46,65	E	D	✓
	13	56,66	48,20	E	D	✓
	14	54,08	49,12	D	D	×

×

✓



**EK G: SFOTD4' ün Etkinliğinin Test Edilmesinde Kullanılan Senaryolar için Farklı Denetim Tiplerinin Uygulanması Durumunda Elde Edilen Ortalama Taşıt Gecikmeleri ve Hizmet Düzeyleri (Devamı)**

**Tablo G.4:** Oluşturulan senaryolar için OSZD4 yerine SFOTD4 / Y=1 uygulanması durumunda elde edilen ortalama taşıt gecikmeleri ve hizmet düzeyleri

Talep	Senaryo No	Ortalama Gecikme (sn/ta) OSZD4	Ortalama Gecikme (sn/ta) SFOTD4 / Y=1	Hizmet Düzeyi OSZD4	Hizmet Düzeyi SFOTD4 / Y=1	Hizmet Düzeyi Değişti mi?
Düşük	1	19,76	17,82	B	B	×
	2	25,51	16,10	C	B	✓
	3	21,68	18,79	C	B	✓
	4	33,91	23,37	C	C	×
	5	26,60	18,07	C	B	✓
	6	23,76	20,43	C	C	×
	7	33,17	25,51	C	C	×
	8	27,52	19,62	C	B	✓
	9	32,17	22,83	C	C	×
	10	25,54	21,83	C	C	×
	11	33,38	26,08	C	C	×
	12	33,62	24,57	C	C	×
	13	31,88	23,74	C	C	×
	14	32,93	25,29	C	C	×
Orta	1	31,74	22,92	C	C	×
	2	32,66	25,53	C	C	×
	3	32,23	23,27	C	C	×
	4	34,94	25,88	C	C	×
	5	32,36	26,58	C	C	×
	6	35,39	24,87	D	C	✓
	7	34,47	28,73	C	C	×
	8	35,01	27,46	D	C	✓
	9	37,53	24,86	D	C	✓
	10	42,68	28,94	D	C	✓
	11	42,32	29,64	D	C	✓
	12	36,41	31,78	D	C	✓
	13	34,88	27,38	C	C	×
	14	42,73	30,94	D	C	✓
Yüksek	1	56,00	31,18	E	C	✓
	2	51,50	34,33	D	C	✓
	3	39,10	31,05	D	C	✓
	4	44,82	32,52	D	C	✓
	5	58,29	31,62	E	C	✓
	6	56,10	34,25	E	C	✓
	7	82,44	45,65	F	D	✓
	8	49,23	37,59	D	D	×
	9	84,21	43,13	F	D	✓
	10	54,62	36,92	D	D	×
	11	56,16	37,48	E	D	✓
	12	79,88	45,30	E	D	✓
	13	79,55	44,69	E	D	✓
	14	77,13	45,98	E	D	✓

×

✓

## 9. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	: Ziya ÇAKICI
Doğum Yeri ve Tarihi	: Demirci/MANİSA - 01.10.1988
Lisans Üniversite	: Manisa Celal Bayar Üniversitesi (MCBÜ)
Y. Lisans Üniversite	: Pamukkale Üniversitesi (PAÜ)
Elektronik posta	: ziyacakici@bayburt.edu.tr
İletişim Adresi	: Bayburt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Dede Korkut Kampüsü – Merkez/BAYBURT

### Yayın Listesi

#### **SCI-E Kapsamındaki Dergilerde Yayınlanan Makaleler: (3)**

- **Cakici, Z.** & Murat, Y. S., “A Differential Evolution Algorithm-Based Traffic Control Model for Signalized Intersections”, *Advances in Civil Engineering*, 2019, Article ID: 7360939, 1-16, (2019).
- Murat, Y. S., **Cakici, Z.** & Tian, Z., “A Signal Timing Assignment Proposal for Urban Multi Lane Staged Controlled Signalized Roundabouts”, *GRADEVINAR*, 71 (2), 13-124, (2019).
- **Çakıcı, Z.** & Murat, Y. Ş., “Sinyalize Dönel Kavşaklar için Hesap Yöntemi Önerisi ve Performans Analizi”, *İMO Teknik Dergi*, 27 (4), 7569-7592, (2016).

#### **Uluslararası Yaynevleri Tarafından Yayınlanan Kitap Bölümleri: (3)**

- Murat, Y. S. & **Cakici, Z.**, “Comparative Analysis of Public Transport Users’ Perception Targeting Sustainable Transportation”, *Engineering Tools and*

*Solutions for Sustainable Transportation Planning*, 76-98, ISBN: 9781522521167, DOI: 10.4018/978-1-5225-2116-7.ch004, IGI Global Publishing, (2017).

- Murat, Y. S., Arslan, T., **Cakici, Z.** & Akcam, C., “Analytical Hierarchy Process (AHP) based Decision Support System for Urban Intersections”, *Using Decision Support Systems for Transportation Planning Efficiency*, 203-222, ISBN: 9781466686489, DOI: 10.4018/978-1-4666-8648-9.ch008, IGI Global Publishing, (2016).
- Murat, Y. S., **Cakici, Z.** & Yaslan, G., “Use of Fuzzy Logic Traffic Signal Control Approach as Dual Lane Ramp Metering Model for Freeways”, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 223, 339-349, ISBN: 978-3-319-00929-2, Springer, (2014).

### **SCI-E Kapsamı Dışındaki Uluslararası Dergilerde Yayınlanan Makaleler: (3)**

- Murat, Y. S. & **Cakici, Z.**, “An Integration of Different Computing Approaches in Traffic Safety Analysis”, *Transportation Research Procedia*, 22, 265-274, (2017).
- Murat, Y. S. & **Cakici, Z.**, “An Investigation of Observation Periods on Vehicle Delay Measurement”, *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*, 3 (11), 6079-6083, (2016).
- Murat, Y. S., Kutluhan, S. & **Cakici, Z.**, “Investigation of Cyclic Vehicle Queue and Delay Relationship for Isolated Signalized Intersection”, *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 111 (5), 252-261, (2014).

### **Ulusal Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler: (1)**

- Murat, Y. Ş. & **Çakıcı, Z.**, “Trafik İşaretlerinin Bilinirliği Üzerine Bir Araştırma: Denizli Örneği”, *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 6 (1), 21-30, (2017).

### **Uluslararası Kongrelerde Sunulan Bildiriler: (7)**

- **Cakici, Z.**, Murat, Y. S. & Aydin, M. M., "An Empirical Model for the Estimation of Fuel Consumption at Signalized Intersections ", *3<sup>rd</sup> International Conference on Advanced Engineering Technologies*, September 19-21, Bayburt-Turkey, 1000-1010, (2019). (Tam metin bildiri)

- Aydin, M. M. & **Cakici, Z.**, "Effective Parameters on Total Waiting Times of Intercity Buses at Bus Terminals", *3<sup>rd</sup> International Conference on Advanced Engineering Technologies*, September 19-21, Bayburt-Turkey, 1039-1048, (2019). (Tam metin bildiri)
- **Cakici, Z.** & Murat, Y. S., "The Optimization of Traffic Signal Timing with Meta-Heuristic Differential Evolution Algorithm", *1<sup>st</sup> International Intelligent Transportation Systems Conference*, April 19-21, Bandırma-Turkey, 73-76, (2018). (Özet bildiri)
- Murat, Y. S., **Cakici, Z.** & Akcam, C., "An Analytical Hierarchy Process (AHP) based Decision Support System for Intersection Type Selection", *11<sup>th</sup> International Congress on Advances in Civil Engineering*, October 21-25, Istanbul -Turkey, 363, (2014). (Özet bildiri)
- Murat, Y. S. & **Cakici, Z.**, "Statistical Analysis of Vehicle Delay Measurements Considering Different Time Durations", *1<sup>st</sup> International Civil Engineering & Architecture Symposium for Academicians (ICESA-2014)*, May 17-20, Antalya-Turkey, 75-80, (2014). (Tam metin bildiri)
- Murat, Y. S., Kutluhan, S. & **Cakici, Z.**, "Comparison of Fuzzy C-Means and K-Means Clustering Approaches in Spatial Analysis of Traffic Accidents", *4<sup>th</sup> International Conference on Mathematical and Computational Applications*, June 11-13, Manisa-Turkey, 316-325, (2013). (Tam metin bildiri)
- Murat, Y. S., Kutluhan, S. & **Cakici, Z.**, "Re-arrangement of Traffic Signal Timings by Cyclic Vehicle Queue Profile", *2<sup>nd</sup> International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering (BCCCE)*, May 23-25, Tirana-Albania, 1052-1060, (2013). (Tam metin bildiri)

#### **Ulusal Kongrelerde Sunulan Bildiriler: (5)**

- **Çakıcı, Z.**, & Murat, Y. Ş., "Trafik Uyarmalı Sinyalizasyon Sistemleri ile İzole Sinyalize Kavşak Denetimi ", *13. Ulaştırma Kongresi*, 10-12 Ekim, Erzurum-Türkiye, 291-304, (2019). (Tam metin bildiri)
- Murat, Y. Ş. & **Çakıcı, Z.**, "Sinyalize Kavşaklarda Durma Gecikmesi ve Kontrol Gecikmesi Arasındaki İlişkinin İncelenmesi", *12. Ulaştırma Kongresi*, 24-26 Mayıs, Adana-Türkiye, 13-24, (2017). (Tam metin bildiri)

- Murat, Y. Ş. & **Çakıcı, Z.**, “Sezgisel Optimizasyon Algoritmalarının Taşıt Gecikmesi Problemi Üzerine Uygulaması”, *7. Kentsel Altyapı Sempozyumu*, 13-14 Kasım, Trabzon-Türkiye, 615-625, (2015). (Tam metin bildiri)
- **Çakıcı, Z.** & Murat, Y. Ş., “Sinyalize Dönel Kavşakların Performanslarının Farklı Senaryolar Altında İncelenmesi”, *11. Ulaştırma Kongresi*, 27-29 Mayıs, İstanbul-Türkiye, 105-116, (2015). (Tam metin bildiri)
- Murat, Y. Ş., **Çakıcı, Z.** & Demir, M. B., “Bulanık Mantık Yaklaşımı ile Yuvarlakada Kavşakların Kısmi Denetimi”, *İnşaat Mühendisliği’nde 100. Yıl Teknik Kongresi-Yıldız Teknik Üniversitesi*, 22-24 Kasım, İstanbul-Türkiye, YTU-177, (2012). (Tam metin bildiri)