

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ARAÇ-YOL ETKİLEŞİMİ ORTAMINDA SİNYALİZE KAVŞAKLARDA KİŞİ
GECİKMESİNİ ENKÜÇÜKLEYEN BİR ALGORİTMA**

DOKTORA TEZİ

Abdullah KARADAĞ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

OCAK 2025

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ARAÇ-YOL ETKİLEŞİMİ ORTAMINDA SİNYALİZE KAVŞAKLARDA KİŞİ
GECİKMESİNİ ENKÜÇÜKLEYEN BİR ALGORİTMA**

DOKTORA TEZİ

**Abdullah KARADAĞ
(501112401)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat ERGÜN

OCAK 2025

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY★ GRADUATE SCHOOL

**AN ALGORITHM MINIMIZING PERSON DELAY IN ISOLATED
SIGNALIZED INTERSECTIONS IN VEHICLE-TO-INFRASTRUCTURE
ENVIRONMENT**



Ph.D. THESIS

**Abdullah KARADAĞ
(501112401)**

Department of Civil Engineering

Transportation Programme

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Murat ERGÜN

JANUARY 2025

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501112401 numaralı Doktora Öğrencisi Abdullah KARADAĞ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ARAÇ-YOL ETKİLEŞİMİ ORTAMINDA SİNYALİZE KAVŞAKLARDA KİŞİ GECİKMESİNİ ENKÜÇÜKLEYEN BİR ALGORİTMA” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Murat ERGÜN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mustafa Ersel KAMAŞAK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç.Dr. Hüseyin Onur TEZCAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Sırma YAVUZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ali Sercan KESTEN
Gebze Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **26 Mayıs 2023**

Savunma Tarihi : **31 Ocak 2025**





Eşime ve çocuklarıma,



ÖNSÖZ

Doktora çalışmam süresince beni her zaman destekleyen ve yaşadığım zorlukları aşmamda her daim yanımda olan tez danışmanım saygıdeğer hocam Doç. Dr. Murat ERGÜN'e çok teşekkür ederim. Tez çalışmamı, değerli katkılarıyla yönlendiren ve zenginleştiren tez izleme komitesi üyeleri değerli hocalarım Prof. Dr. Sırma YAVUZ ve Doç.Dr. Hüseyin Onur TEZCAN'a teşekkürlerimi sunarım. Tez kapsamında saha çalışması yaptığım Güngören Koska ve Beyoğlu Halıcıoğlu kavşaklarında, tez çalışması için ihtiyaç duyduğum verilerin toplanması konusundaki yardımlarından dolayı İSBAK A.Ş.'ye çok teşekkür ederim.

Doktora çalışmam süresince değerli görüşlerine sık sık başvurduğum ve desteğini benden esirgemeyen Prof. Dr. Yetiş Şazi MURAT, Prof. Dr. Halim CEYLAN, Dr. Fatih GÜNDÖĞAN ve Dr. Ali Rıza YILMAZ'a en kalbi teşekkürlerimi sunarım.

Yaşadığım tüm zorluklarda her zaman yanımda olarak beni destekleyen sevgili anneme, değerli babama ve biricik eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Son olarak, doktora süresince zaman zaman kendilerine kendilerine ayırmam gereken zamandan eksilttiğimi hissettiğim halde enerjileriyle beni sürekli diri tutan sevgili çocuklarıma teşekkür ederim.

Mayıs 2023

Abdullah KARADAĞ
(Biyomedikal Yüksek Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xvii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xix
ŞEKİL LİSTESİ.....	xxi
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Genel	1
1.2 Amaç	5
1.3 Tezin Yapısı	5
2. ARAÇ-YOL ETKİLEŞİMİ TEKNOLOJİSİ	7
3. TRAFİK SİNYALİZASYONU	9
3.1 Tarihçe.....	9
3.2 Sinyal Kontrol Yöntemleri.....	11
3.2.1 Sabit süreli kontrol	12
3.2.2 Trafik uyarmalı kontrol:	13
3.2.2.1 NTCIP trafik uyarmalı kontrol uygulamaları.....	14
3.2.2.2 LHOVRA	19
3.2.3 Eniyileştirmeye dayalı kontrol yöntemleri.....	22
3.2.3.1 MOVA	22
3.2.3.2 SCOOT.....	23
3.2.3.3 SCATS	25
3.2.3.4 UTOPIA	26
3.2.4 El ile kumandalı kontrol:.....	27
3.3 Trafik Sinyal Kontrolünde Başarım Ölçütleri.....	28
3.3.1 Genel	28
3.3.2 Kapasite ve doygunluk derecesi.....	28
3.3.3 Kuyruk uzunluğu.....	30
3.3.4 Durma sayıları.....	31
3.3.5 Gecikme	31
3.3.5.1 Gecikme türleri.....	32
3.3.5.2 Gecikme bileşenleri.....	34
3.3.5.3 Webster gecikme modeli.....	34
3.3.5.4 Akçelik gecikme modeli	35
3.3.5.5 HCM gecikme modeli	37
4. TRAFİK IŞIKLARINDA TOPLU TAŞIMA ÖNCELİĞİ.....	39

4.1	Kavşak Odaklı Toplu Taşıma Önceliği Uygulamaları	40
4.1.1	Edilgen toplu taşıma önceliği	40
4.1.2	Etken toplu taşıma önceliği	41
4.1.2.1	Yeşil süresi uzatma.....	42
4.1.2.2	Erken yeşil süresi verme (kırmızıyı erken kesme)	42
4.1.2.3	Faz ekleme.....	42
4.1.2.4	Faz atlama	43
4.1.2.5	Trafik uyarmalı toplu taşıma fazı	43
4.1.3	Toplu taşıma önceliğinde yenilikçi yaklaşımlar.....	43
4.1.3.1	Geçici toplu taşıma şeridi uygulaması	43
4.1.3.2	Bağlantılı araçlar ortamında toplu taşıma önceliği yaklaşımları....	45
5.	ÖNERİLEN ALGORİTMA (TS-PDM) İLE TRAFİK SİNYAL KONTROLÜ.....	49
6.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR.....	59
6.1	Yöntem.....	59
6.2	Saha Çalışması	61
6.2.1	Seçilen kavşak	61
6.2.2	Veri toplama	63
6.2.3	Otomobil doluluk oranlarının belirlenmesi	65
6.3	En İyi Algoritmalarının Karşılaştırılması	66
6.3.1	Test metodu	68
6.3.2	Genetik algoritmalar	70
6.3.3	PSO algoritması.....	71
6.3.4	PSO Sonuçları	73
6.3.5	GA sonuçları	77
6.3.6	PSO ve GA karşılaştırması değerlendirmesi	80
6.4	Gecikme Ölçümleri	81
7.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	87
	KAYNAKLAR.....	89
	EKLER.....	95
	EK A : “Sinyalize Kavşaklarda Gecikmeyi Minimize Etmekte Kullanılan Optimizasyon Tekniklerinin Karşılaştırılması: PSO ve GA” Başlıklı Makale	97
	ÖZGEÇMİŞ.....	99

KISALTMALAR

3GPP	: The 3rd Generation Partnership Project. Mobil iletişim standartlarını geliştirmek için farklı telekomünikasyon kuruluşlarının bir araya geldiği bir iş birliği projesidir.
5G	: 5. Nesil Mobil Telekomünikasyon Hizmeti
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ACO	: Karınca Kolonisi Algoritması (Ant Colony Optimization)
AUS	: Akıllı Ulaşım Sistemleri
BMILP	: İkili Karışık Tamsayılı Doğrusal Programlama (Binary Mixed Integer Linear Programs)
BPSC	: Otobüs Öncelikli Sinyal Kontrolü
BSM	: Temel Güvenlik Mesajı (Basic Security Message)
DEA	: Diferansiyel Gelişim Algoritması (Differential Evolution Algorithm)
DS	: Doygunluk derecesi (Degrees of Saturation).
DSRC	: Tahsis Edilmiş Kısa Mesafe Haberleşme (Dedicated Short-Range Communications)
GA	: Genetik Algoritmalar
HCM	: Karayolu Kapasite El Kitabı (Highway Capacity Manual)
HOT	: Ücretli Yüksek Doluluklu Araç Şeridi Uygulaması (High-Occupancy Toll)
HOV	: Yüksek Doluluklu Araç Şeridi Uygulaması (High-Occupancy Vehicle)
HS	: Harmoni Arama Algoritması (Harmony Search Algorithm)
ID	: Identity (Kimlik)
IEEE	: Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
ISS	: Artımlı Bölünme Seçimi (Incremental Split Selection)
LF	: Bağlantı Akışı (Link Flow)

LHOVRA	: İsveç'te geliştirilmiş olan bir trafik uyarmalı sistem.
LP	: Bağlantı Planı (Link Plan)
LTE	: Uzun Dönem Evrim Yüksek Hızlı Kablosuz Veri Aktarım Standardı (Long-Term Evolution)
LTE-V2X	: LTE üzerinden Araç-Nesne Etkileşimi
MOVA	: Mikroişlemci Tabanlı Optimum Taşıt Uyarma (Microprocessor Optimised Vehicle Actuation)
MPCY	: SCOOT dokümanlarında yer alan bir kavram. Minimum Pratik Döngü Süresi (Minimum Practical CYcle length, MPCY)
MVG	: Münih Ulaşım Şirketi (Münchner Verkehrsgesellschaft). Münih'teki toplu taşıma sistemini işleten belediyeye ait ana kuruluş
NP-Hard	: Çözmesi son derece zor olan problemleri ifade eder. Bu problemler için bilinen bir hızlı çözüm yolu yoktur ve çözmek için harcanan süre genellikle problem büyüdükçe çok hızlı artar.
NTCIP	: National Transportation Communications for Intelligent Transportation System Protocol. NTCIP, farklı üreticilere ait elektronik trafik kontrol ekipmanlarının bir sistem olarak birlikte çalışabilmesini sağlamak için hem iletişim kurallarını (protokoller) hem de gerekli kelime dağarcığını (nesneler) belirleyen bir standartlar ailesidir.
NS	: Ağ Benzetim Aracı (Network Simulator)
OBU	: Araç İçi Birim (On-board Unit)
PACE	: ABD'nin Chicago bölgesinde bir banliyö toplu taşıma işletmecisi
PI	: Başarım endeksi (Performance Index)
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)
PT	: Public Transport (Toplu Taşıma)
PTV-Vissim	: Ulaştırma sektöründe sıklıkla kullanılan, PTV Group firmasına ait bir mikro-benzetim yazılımı
RSU	: Yol Kenarı Ünitesi (Road-side Unit)
RTA	: Avustralya'nın Yeni Güney Galler eyaletindeki Karayolu ve Trafik Otoritesi
SAE	: Amerikan Otomotiv Mühendisleri Birliği

SCATS	: Sidney Koordineli Adaptif Trafik Kontrol Sistemi (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System)
SCOOT	: Faz, Devre, Ofset Optimizasyonu Tekniği (Split Cycle Offset Optimisation Technique)
TCSC	: Tristör Kontrollü Seri Kompansatör
TDMC	: Zamana Bağlı Çoklu Plan Kontrolü
TOL	: Traffic Optimization Logic. LHOVRA trafik uyarmalı kontrol sistemine eniyileme ve toplu taşıma önceliği özelliklerinin eklenmesi ile meydana gelmiş eniyilemeye dayalı gelişmiş bir trafik kontrol sistemi
TRANSYT	: TRAffic Network StudY Tool. Kavşaklar için en iyi sinyal sürelerini çevrimdışı elde etmek ve benzetimler yapmak için kullanılan bir yazılım
TRANSYT-7F	: TRAffic Network StudY Tool, version 7F: Kavşaklar için en iyi sinyal sürelerini çevrimdışı elde etmek ve benzetimler yapmak için kullanılan bir yazılımın 7F versiyonu
TriMET	: ABD’de Portland/Oregon bölgesinin toplu taşıma işletmecisi
TRL	: İngiliz Ulaştırma Araştırma Laboratuvarı. Günümüzde kâr amacı gütmeyen Transport Research Foundation (TRF)’a ait bir şirketler grubuna dönüşmüştür.
TRRL	: Birleşik Krallık Ulaştırma ve Yol Araştırma Laboratuvarı (Transport And Road Research Laboratory)
TS-PDM	: Kişi Gecikmesini Enküçükleyen Trafik Kontrol Sistemi
TT	: Toplu Taşıma
TTÖ	: Toplu Taşıma Önceliği
UTOPIA	: Entegre Otomasyon ile Kentiçi Trafik Optimizasyonu (Urban Traffic Optimization by Integrated Automation)
V2I	: Araç-Yol Etkileşimi (Vehicle-to-Infrastructure Communication)
V2V	: Araç-Araç Etkileşimi (Vehicle-to-Vehicle Communication)
V2X	: Araç-Nesne Etkileşimi (Vehicle-to-Infrastructure Communication)
YDA	: Yüksek Doluluklu Araç



SEMBOLLER

C	: Devre süresi (sn)
c	: Şerit grubu kapasitesi (tş/sa)
d	: Kontrol kaynaklı ortalama taşıt gecikmesi (sn/tş)
d₁	: Tekdüze gecikme (sn/tş)
d₂	: Artımlı gecikme (sn/tş)
d₃	: Başlangıç kuyruk gecikmesi (sn/tş)
d_{cur}	: Mevcut fazın sonlandırılması durumunda fazda geçecek kişiler için yol açılacak toplam gecikme (sn)
d_{next}	: Mevcut fazın uzatılması durumunda sonraki fazda geçecek kişiler için yol açılacak toplam gecikme (sn)
d_p	: Yön için toplam kişi gecikmesi (sn)
f_{fitness}	: PSO algortimasında uygunluk fonksiyonu
g	: Şerit grubu için etkin yeşil süre (sn)
g_{best}	: PSO algoritmasında tüm parçacıklar için global en iyi çözüm
g_{min}	: Bir akım için asgari yeşil süre (sn)
g_t	: Boşluk süresi (sn)
h	: Doygunluk taşıt aralığı (sn)
I	: Akış yukarı sinyallerden kaynaklanan artımlı gecikme ayarı
k	: Uyarımlı kontrol için artımlı gecikme ayarı
K	: PSO algoritmasında salınım katsayısı
l_t	: Faz geçişleri sırasında oluşan kayıp zaman (sn)
N	: Şerit sayısı
N₀	: Ortalama kalıntı kuyruk uzunluğu (tş)
p	: Gözlem aralığı boyunca belli bir yön için algılanan kişi sayısı
P	: Gözlem aralığı boyunca belli bir yön için algılanan kişi sayısının saatlik eşdeğeri (kişi/sa)
p_{best}	: PSO algoritmasında her parçacığın en iyi çözümü

p_{cur}	: Geçmekte olan akımın x3 yol kesimindeki yolcu sayısı
p_{next}	: Bekleyen akımın x1 yol kesimindeki yolcu sayısı
q	: Trafik hacmi (tş/sa)
T	: Analiz periyodunun süresi (sa)
T_f	: Gözlem aralığı (sa)
U	: Kişi gecikmesi fayda fonksiyonu değeri (sn)
u	: Yeşil süre oranı
s	: Doygunluk akımı (doygunluk akım değeri)
V	: Saatlik trafik hacmi (tş/sa)
v, v_1, v_2, v_3	: Analiz periyodu boyunca elde edilen trafik hacimleri
v_i^k	: PSO algoritmasında i. parçacığın k. yinelemedeki hızı
x	: Şerit grubu için hacim-kapasite oranı veya doygunluk derecesi
x_0	: Doygunluk derecesi eşik değeri. Doygunluk derecesinin bu değerin altında olduğu durumlarda ortalama kalıntı kuyruk uzunluğu sıfır olarak kabul edilir.
x_1	: Yolun seyir hızında giden bir aracın yeşil sürenin boşluk süresi kadar uzatılması durumunda durmadan kavşaktan geçebileceği mesafe.
x_2	: Kırmızı ışık sönerken kavşağa seyir hızıyla yaklaşan bir aracın minimum yeşil süre dolmadan kavşaktan geçebileceği mesafe.
x_3	: Sınırları maksimum kuyruk uzunluğu, akış yukarı kavşakların mesafesi, ayırım/katılım noktaları ve araç-arac iletişimi maksimum mesafesi tarafından belirlenen gözlem noktası mesafesi.
x_i^k	: PSO algoritmasında i. parçacığın k. yinelemedeki konumu
X	: Hacim-kapasite oranı veya doygunluk derecesi
y	: Akış oranı
ϕ_1	: PSO algoritmasında bilişsel parametre katsayısı
ϕ_2	: PSO algoritmasında sosyal parametre katsayısı
λ	: Bir kavşak kolunun efektif olarak yeşil olduğu sürenin devre süresine oranı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 5.1 : Farklı sezgisel algoritmalarla elde edilen ortalama başarılar.	52
Çizelge 6.1 : Akım 1 trafik hacimleri (sabah zirve saatler 07:00-09:00).	63
Çizelge 6.2 : Akım 1 trafik hacimleri (sabah zirve saatler 07:00-09:00, otobüs oranı artırılmıştır).....	64
Çizelge 6.3 : Akım 2 trafik hacimleri (sabah zirve saatler 07:00-09:00).	64
Çizelge 6.4 : Ortalama doluluk değerleri ve binek otomobil eşdeğer birim değerleri. Kaynak: (İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2011) (TS 6407 standardına göre).	66
Çizelge 6.5 : Metodlar için sınır değerler.	69
Çizelge 6.6 : Örnek bir çalıştırma sonucu.....	69
Çizelge 6.7 : GA Parametreleri.....	70
Çizelge 6.8 : PSO ölçüm sonuçları.	74
Çizelge 6.9 : GA sonuçları.....	77
Çizelge 6.10 : Taşıt, otobüs, YDA ve kişi başına ortalama gecikme (sn) değerleri ile taşıt başına ortalama durma sayıları ve yakıt tüketimleri (litre/100 km).....	82
Çizelge 6.11 : Taşıt gecikmesi, otobüs gecikmesi, YDA gecikmesi, kişi gecikmesi, durma sayıları ve yakıt tüketimi değişkenlerinin standart sapma değerleri.....	83



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Trafik uyarmalı uygulamalar için farklı algılama bölgeleri (National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2015).	16
Şekil 3.2 : Artan süre uygulaması ve geçiş süresi parametresi (National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2015).	18
Şekil 3.3 : Değişken boşluk süresi uygulaması (National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2015).	20
Şekil 3.4 : 70 km/sa'lık bir kavşak yaklaşımında LHOVRA fonksiyonları için dedektör yerleşim noktaları (Al-Mudhaffar, 2006).	21
Şekil 3.5 : Bir T kavşak için MOVA sisteminde dedektör yerleşim noktaları (TRL, 2017)...	23
Şekil 3.6 : UTOPIA'da trafik sorununun farklı düzeylerde ele alınması (Şerban ve Frunzete, 2022).	27
Şekil 3.7 : Sinyalize bir kavşaktan geçmekte olan bir aracın maruz kaldığı gecikme türleri (TRB, 2010).	33
Şekil 4.1 : Londra'da bir ön sinyal uygulaması (Wu ve Hounsell, 1998).	44
Şekil 4.2 : Tek şeritli yollarda karşı yön şeridinin geçici olarak otobüse tahsis edilmesi uygulaması (Guler ve diğerleri, 2015).	45
Şekil 5.1 : x_1 , x_2 , ve x_3 yol kesimleri.	50
Şekil 5.2 : TS-PDM genel akış diyagramı.	55
Şekil 5.3 : TS-PDM Faz değiştirme kararı akış diyagramı.	56
Şekil 5.4 : Faz değiştirme kararı için bir örnek durum.	58
Şekil 6.1 : Koska kavşağı uydu görüntüsü (Güngören, İstanbul).	61
Şekil 6.2 : Koska kavşağı – Akımlar.	62
Şekil 6.3 : Koska kavşağı – Faz diyagramı.	62
Şekil 6.4 : Yolcu sayıları Poisson fonksiyon değerleri karşılaştırması.	66
Şekil 6.5 : PSO-GA karşılaştırmasında kullanılan basit kavşak modeli.	69
Şekil 6.6 : Genetik algoritma akış diyagramı.	71
Şekil 6.7 : PSO algoritması akış diyagramı.	74
Şekil 6.8 : PSO hata değişimi.	76

Şekil 6.9 : PSO işlem süreleri.	76
Şekil 6.10 : GA hata değişimi.	78
Şekil 6.11 : GA işlem süreleri.	79
Şekil 6.12 : PSO ve GA işlem süreleri karşılaştırması.	79
Şekil 6.13 : PSO ve GA hata oranı karşılaştırması.	80
Şekil 6.14 : Farklı kontrol metodları için taşıt, otobüs, YDA ve kişi ortalama gecikme (sn) değerleri.	83
Şekil 6.15 : Farklı kontrol metodları için taşıt, otobüs, YDA ve kişi ortalama gecikme değişkenlerinin standart sapma değerleri.	84
Şekil 6.16 : Farklı kontrol metodları için taşıt başına ortalama durma sayıları.	84
Şekil 6.17 : Durma sayıları değişkeni standart sapma değerleri.	85
Şekil 6.18 : Farklı kontrol metodları için yakıt tüketimleri (lt/100 km).	85
Şekil 6.19 : Yakıt tüketimi değişkeni standart sapma değerleri.	86
Şekil A.1 : “Sinyalize Kavşaklarda Gecikmeyi Minimize Etmekte Kullanılan Optimizasyon Tekniklerinin Karşılaştırılması: PSO ve GA” başlıklı makale	97

ARAÇ-YOL ETKİLEŞİMİ ORTAMINDA SİNYALİZE KAVŞAKLARDA KİŞİ GECİKMESİNİ ENKÜÇÜKLEYEN BİR ALGORİTMA

ÖZET

Sinyalize kavşaklarda toplu taşıma önceliği, işletme maliyetlerinin düşürülmesinde ve toplu taşıma kullanımının teşvik edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Geleneksel olarak kavşaklardaki sinyal sistemleri yollarda veya araçlarda bulunan sensörler aracılığıyla toplu taşıma araçlarına kavşaklarda geçiş önceliği sağlarlar. Ancak bu sadece toplu taşıma araçlarıyla sınırlıdır. Toplu taşıma araçları ve özellikle otobüsler şehirlerde insan hareketliliğini artırmakta en önemli unsurlar olsa da özel araçlar ve ara toplu taşıma modları da şehirlerin bir gerçeği olup onları da hareketliliği artırma konusunda verimli kullanmaya teşvik etmek gerekmektedir. Bazı ülkelerde uygulanan otoyollarda yüksek doluluklu araçlara özel şerit tahsis edilmesi uygulamasında olduğu gibi kentsel alanlarda bulunan kavşaklarda sadece resmi toplu taşıma araçlarına değil, ikiden fazla yolcusu olan her türlü araca sinyalizasyonda öncelik verilebilir. Bugüne kadar algılama teknolojilerinin kontrol yöntemlerinin ihtiyaç duyduğu verileri sağlayamaması dolayısıyla hayata geçirilemeyen böylesi bir uygulama araç-yol etkileşimi gibi gelişen yeni teknolojiler ile etkin bir şekilde hayata geçirilebilir. Ayrıca araç-yol etkileşimi teknolojisi, yolcu sayma teknolojileri ile birleştirilerek bir kavşakta yolcu başına düşen gecikmeler hesaplanabilmektedir. Tez çalışmasının amacı izole ışıklı kavşaklarda taşıtlara içlerindeki yolcu sayısı ile orantılı bir şekilde öncelik sağlayan ve bu şekilde kişi başına gecikmeyi enküçükleyen bir algoritma sunmaktır. Bir başka ifadeyle, sunulan algoritma ile geleneksel toplu taşıma önceliği uygulamalarının sadece otobüslere sağladığı avantajlardan ara toplu taşıma araçları ve yüksek doluluklu özel otomobillerin de faydalanmasına imkan verilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, bu çalışma, sinyal denetleyicisi ile iletişim için yolcu sayımı teknolojilerini ve araç-yol etkileşimini kullanır. Bu çalışma, bağlantılı araç teknolojisinden yararlanarak izole kavşaklarda insan hareketliliğini artırmak için bir algoritma sunmaktadır. Önerilen algoritma, araçlardaki yolcu sayısını dikkate alarak parçacık sürü optimizasyonu yöntemini kullanarak optimum sinyal sürelerini üretmektedir. İstanbul Güngören'deki bir kavşağın gerçek sayım ve sınıflama verileri kullanılarak benzetim ortamında farklı zaman dilimleri için gerçekleştirilen testler, önerilen algoritmanın geleneksel toplu taşıma önceliği algoritmalarının başarımını çok aştığını göstermektedir. Sınırlı işlem gücüne sahip gömülü bir sistemde uygulanmaya uygun yüksek başarımlı olarak tasarlanan algoritma, eniyileştirilmiş bir sabit süreli çoklu planlı kontrol algoritmasına kıyasla yolcu

başına gecikmede %14'lük bir iyileşme ve geleneksel bir otobüs öncelikli kontrol algoritmasına kıyasla yolcu başına gecikmede %8'lik bir iyileşme sağlar.



AN ALGORITHM MINIMIZING PERSON DELAY IN ISOLATED SIGNALIZED INTERSECTIONS IN VEHICLE-TO-INFRASTRUCTURE ENVIRONMENT

SUMMARY

Vehicle ownership is an important factor for traffic congestion in urban areas. The sole solution for the traffic congestion is to promote public transport (PT) usage. Private vehicles have very low passenger-carrying capacity and utilization compared to public transport. For example, the average number of passengers per private vehicle in Istanbul was determined to be 1.57 in the Istanbul Transportation Master Plan, while the average number of passengers per vehicle for public transportation (bus) was determined as 30.4. The aim of a traffic control system should be to increase the mobility of people rather than vehicles. High passenger-carrying capacity makes buses ideal vehicles for a mobility-friendly city. As a result, bus and tram priority has been applied in traffic control systems with more or less sophistication in almost every major city in Europe. However, signal priority applications are restricted only to public transport vehicles. The idea of High Occupancy Vehicles (HOV) lane applications in interurban roads can be converted to urban areas and priority can be given not only to official transit vehicles but also to any vehicle with more than two passengers. In this regard, emerging technologies like vehicle-to-infrastructure communication (V2I) may assist these studies. In addition, V2I technology can be combined with passenger count technologies, thus delays per passengers at an intersection can be calculated.

The aim of the thesis study is to propose an algorithm that prioritizes vehicles at signalized intersections in proportion to the number of passengers they carry, thereby minimizing per capita delay. In other words, the proposed algorithm seeks to extend the benefits of traditional public transportation priority systems, which typically favor buses, to intermediate public transportation vehicles and high-occupancy private cars as well. For this purpose, this study uses passenger count technologies and V2I for communicating with the signal controller. This study introduces an algorithm for increasing human mobility in isolated intersections by taking advantage of connected-vehicles technology. The proposed algorithm named TS-PDM generates the best signal times by taking into account the number of passengers in vehicles.

The proposed algorithm runs on the intersection controller unit with Roadside Unit (RSU). Vehicles' On-board Units (OBU) periodically report location, temporary ID, speed, and number of passengers in the vehicle with a time stamp. In order for the algorithm to work effectively, the system needs to know vehicle information in sections, starting from the stop line and ending at the various distances. Traffic demand at the intersection is determined by observing those sections from every direction.

The optimum phase green times that minimize delays at the intersection are determined by evaluating the traffic volumes from all approaches using a heuristic algorithm such as particle swarm optimization (PSO), genetic algorithms (GA), ant colony optimization (ACO), etc. The delay-optimization problem is not an NP-hard problem. Applying it in an embedded system with limited processing power or in a central system consisting of many nodes might require high performance and algorithmic simplicity. This study uses the PSO algorithm. PSO is a concept first discussed by Eberhart and Kennedy and was inspired from the social behaviors of bird flocks and fish schools for optimizing nonlinear functions. Implementing the PSO algorithm is simple and has become increasingly common in many different areas including the transportation sector.

PSO and GA have been compared within the scope of this study, and PSO is found to converge to optimal values much quicker than GA. The PSO algorithm converges on a better solution (with an error 5.88% the size of GA) using the same number of particles (population size) and fewer iterations (up to 28.6% less than GA). The total passenger-delay values for the directions are used as a fitness function in the PSO algorithm. To obtain the total delay value for each direction, the vehicle delay is obtained from the HCM-2000 delay formula and multiplied by the total number of passengers.

In order to keep up with the variability of traffic demand, the TS-PDM algorithm includes some predetermined parameters as well as instantly changing parameters. The minimum phase length is fixed and pre-determined by the user. The algorithm does not run phases below the minimum time. Meanwhile, phase-length maximum limits are very important for adapting to changes in traffic demand. A more sophisticated approach is needed in order to minimize per-person delays. The traffic volumes measured in the previous cycle help estimate traffic volume in the next cycle but in reality, do not guarantee what the volume will actually be. Therefore, the control system should be able to generate a response when the traffic demand does not match the estimate. The TS-PDM system terminates the relevant green early when the traffic demand from one direction is not as expected, thus not unnecessarily delaying the vehicles in the crossing directions.

The TS-PDM control method takes vehicle and passenger counts at 120-sec intervals using point detectors about 300 m from the stop line. At the beginning of each phase, the number of vehicles and passengers in the last count is converted into hourly volumes and input into the PSO algorithm; the green time of the phase to be started is calculated and applied.

For testing the proposed algorithm, a two-phase intersection has been selected at Gungoren in Istanbul. In order to see the effects of developments in the algorithm more clearly, a basic-structured intersection with very little pedestrian movement has been chosen, with a PTV-Vissim file being created to simulate the selected and nearby intersections as the traffic network. Traffic volumes for seven different vehicle classes (automobile, pickup, taxi, minibus/van, paratransit vehicle, bus, and truck) for three time zones (morning peak hours, off-peak hours, evening peak hours) have been collected from field at 15-minute intervals and entered into the simulation file.

Passengers were assigned with a Poisson distribution function for each vehicle produced in the simulation based on the average number of passengers for each vehicle class from the Istanbul Transportation Master Plan. The number of passengers assigned to each object vehicle in the simulation has then been used to calculate delays later.

Since, this study focuses on the signal control algorithm rather than the communication technology itself a rough simulation model of vehicle-to-vehicle communication is. The software model for a traffic simulation program has been developed in the program PTV-Vissim for this purpose. The simulation determines the likelihood that any vehicle around a coordinate set in this model will receive a wireless signal.

For comparison purposes, two signal controls have been conducted apart from the proposed signal control. One of these methods is one that represents the time-dependent multi-plan structure and called TDMC. In this method, phase times are calculated offline beforehand for different traffic volumes. These fixed phase times are then activated according to the time of the day. The second of these methods is designed to represent traditional bus priority signal control systems and called BPSC. The bus-priority control algorithm applies the options of “early green” and “green time extension.

Two-hour simulations were run 10 times in order to find out whether the proposed TS-PDM method had superiority over other conventional methods; average delay values, emission, and stop counts have been recorded. The expected result is a significant reduction in per-person delay values compared to the TDMC and BPSC methods. Delay measurements have been obtained using a custom script and by measuring travel times in 200m-long road segments; the number of passengers has been taken into consideration because the per-person delay (including passengers in private vehicles) is not measurable using standard delay measurements in PTV-Vissim.

The intent of this paper has been to propose an algorithm for signalized intersection in V2I system to minimize person delays. To achieve this goal, particle swarm optimization algorithm is adapted for designing the proposed control algorithm of the traffic signal system of an arterial road.

The effectiveness of the proposed control algorithm was then compared for Time-Dependent Multiplan Control and Bus Priority Signal Control in undersaturated conditions. For the numerical sample, the VISSIM (representing real traffic conditions) simulations were used in the two-phase signal system. The results from the performance of the numerical case study simulation are stated below:

Delays per passenger are decreased by 14.09% compared to TDMC and by 8.33% compared to BPSC.

- Delays per vehicle are reduced by 6.20% compared to TDMC and by 10.78% compared to BPSC by vehicle.

- Delays per HOV vehicles (vehicles with five or more passengers) are reduced by 8.24% compared to TDMC and by 14.54% compared to BPSC.

- Number of stops and fuel consumption perform better than the other methods when the intersection signal is controlled by TS-PDM.

- When increasing the proportion of buses, the BPSC method controls bus delays better than TS-PDM. However, while the BPSC method increases delays per person, delays per bus with

TS-PDM are reduced by 27.80% compared to TDMC. However, TS-PDM has an increase of 6.18% compared to BPSC.

As can be understood from the results, a significant improvement occurs in per-person delays without causing an increase in vehicle delays using the TS-PDM method. Moreover, unlike the bus priority systems, the system increases the mobility of people, not buses in the city.

This study was conducted at an isolated two-phase intersection and will encourage human-focused innovative approaches to signal optimization in the coming years. Furthermore, the method can be generalized to junctions and arterials with a large number of phases. Better delay scores can be achieved by modifying the method for application in arterial and by coordinating.



1. GİRİŞ

1.1 Genel

Günümüzde hızla artan nüfus ve kentleşme, şehir içi ulaşım ağlarına olan talebi her geçen gün artırmaktadır. Bu talep karşısında, ulaşım sistemlerindeki verimsizlikler ve trafik sıkışıklığı, gecikmelere neden olmakla kalmayıp ekonomik kayıplara, çevre kirliliğine ve yaşam kalitesinin düşmesine yol açmaktadır. Özellikle büyük şehirlerde, bu sorunların çözümü için bireysel araç kullanımını azaltarak toplu taşıma sistemlerinin etkinliğini artırmak, sürdürülebilir bir ulaşım politikası oluşturmanın temel taşıdır.

Toplu taşıma, yüksek yolcu taşıma kapasitesi sayesinde trafik yoğunluğunu azaltmakta ve kaynakların daha verimli kullanılmasını sağlamaktadır. Ancak, toplu ulaşım sistemlerinin tercih edilmesini sağlamak, bu sistemlerin hızlı, güvenilir ve konforlu olmasına bağlıdır. Bu noktada, akıllı ulaşım sistemleri (AUS) devreye girerek ulaşım verimliliğini artırmak için teknolojik çözümler sunmaktadır. Trafik yönetimi ve ışıklı kavşak optimizasyonu, AUS'un kritik bileşenlerinden biri olarak öne çıkmakta ve yolculuk sürelerini önemli ölçüde azaltabilmektedir.

Özellikle ışıklı kavşaklarda toplu taşıma araçlarına öncelik tanınması, toplu taşımanın cazibesini artırmanın etkili bir yoludur. Özel araçlar, toplu taşıma araçlarına göre çok düşük yolcu taşıma kapasitesine sahiptir. Örneğin, İstanbul Ulaşım Ana Planında (İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2011) İstanbul'da özel araç başına düşen ortalama yolcu sayısı 1,57 olarak belirlenirken, toplu taşıma (otobüs) için araç başına düşen ortalama yolcu sayısı 30,4 olarak belirlenmiştir. Trafik kontrol sistemlerinin en önemli hedeflerinden birisinin araçların değil, insanların hareketliliğini artırmak olması gerektiğinden, yüksek taşıma kapasitesi, otobüsleri hareketlilik dostu bir şehir için ideal kılmaktadır (Davidsson ve Di Taranto, 1992). Bu husustan hareketle, Avrupa'nın hemen hemen her büyük şehrinde ileri trafik kontrol sistemlerinde otobüs ve tramvay önceliği az ya da çok uygulanmıştır. Otoyollarda ve şehir içi yollarda toplu taşımaya özel şeritler/yollar tahsis edilmesi, toplu taşıma araçlarının gecikmelerini azaltacak

şekilde trafik sinyallerinin planlanması buna örnek olarak gösterilebilir (Smith, Hemily ve Ivanovic, 2005).

Sinyal kontrolünde toplu taşımaya öncelik verilmesi fikri yeni değildir. Salter (Salter ve Shahi, 1979) otobüslere öncelik vererek özel araç trafiğindeki gecikmelerin arttığını ve buna karşılık otobüs gecikmelerinin azaldığını göstermiştir. Birçok çalışma, toplu taşıma önceliğinin özel araç trafiği üzerindeki gecikmeler, trafik sıkışıklıkları gibi olumsuz etkilerini azaltmak için yeni kontrol ve tasarım yöntemleri önermiştir (Al-Sahili ve Taylor, 1996; E. C.-P. Chang ve Messer, 1985; Dadashzadeh ve Ergun, 2018; Garrow ve Machemehl, 1999; Jacobson ve Sheffi, 1981; Lee, Shalaby, Greenough, Bowie ve Hung, 2005; Muthuswamy, McShane ve Daniel, 2007; Salter ve Shahi, 1979). Lee ve diğ. (2005) yeşil süreleri uzatmak ve/veya kırmızıyı erken kesmek (erken yeşil) gibi toplu taşıma önceliği yöntemlerini araştırmıştır. Bu klasik yöntemler, kavşaklarda otobüs önceliğinin uygulanmadığı yönlerde gecikmelerin artmasına neden olmuştur. Özellikle yoğun saatlerde, diğer yönlerdeki trafiği hafifletmek saatler alabilir (Shalaby, Lee, Greenough, Hung ve Bowie, 2006). Bu gibi olumsuz etkilerden kaçınmak için çakışan yönlerde telafi amaçlı ilave yeşil süreler uygulamak ve faz atlama gibi çeşitli yöntemler tanıtılmıştır (Balke, Dudek ve Urbanik, 2000; Lee ve diğerleri, 2005). Diğer taraftan, tam adaptif (trafik talebine göre otomatik olarak uyarlanan) sinyal kontrolü diğer bir çözüm seçeneği olarak sunulmuştur (G. Chang, Vasudevan ve Su, 1996; Liao ve Davis, 2007). SCATS, SCOOT ve UTOPIA gibi dünya çapında iyi bilinen adaptif trafik yönetim sistemleri, kavşaklardaki trafik akışına zarar vermeden toplu taşıma araçlarına öncelik verir (Daniel, 1992; Davidsson ve Di Taranto, 1992). Adaptif sistemlerin en önemli eksikliği, genellikle araç gecikmelerini azaltmaya odaklanmaları ve yolcu başına gecikmeleri azaltmak için gerekli parametreleri ölçememeleridir.

Kişi başına gecikmeleri azaltmak için sinyal kontrol yöntemleri dışında toplu taşımaya özel şerit tahsis etmek gibi çözümler de vardır, ancak bu tür çözümlerin metropollerde uygulanması yol kenarlarındaki arazi yetersizliği nedeniyle pek mümkün değildir (Kantoğlu, 2013; Ma, Ni, Head ve Zhao, 2013). Bir şeridi geçici olarak ters yöne tahsis etmek gibi ilave arazi gerektirmeyen bazı yenilikçi çözümler de önerilmiştir (Guler, Gayah ve Menendez, 2015).

Önerilen yöntemler önemli iyileştirmeler sağlasa da en iyi kişi başına gecikmelerin elde edilmesi için araştırmalar hala devam etmektedir. Özellikle, algılama ve iletişim

teknolojilerindeki sınırlamalar nedeniyle yeterli verinin (örneğin, trafik durumu, otobüs verileri) bulunmaması, bu alanın gelişmesinin önünde büyük bir engel olmuştur (Hu, Park ve Lee, 2015).

Geleneksel sinyal optimizasyon sistemlerinde, trafik durumunu gösteren parametreler (ör. trafik hacmi, ortalama hız, kuyruk uzunluğu, işgaliye), manyetik döngü detektörleri, manyetometreler veya temassız sensörler (ör. radar, video dedektörleri) yoluyla elde edilmektedir. Son yıllarda ortaya çıkan yeni teknolojiler sayesinde, daha önce uygun maliyetlerle elde edilemeyen bazı parametreler (örneğin araç hızları, konumları, aralıkları, ivmelenmeleri) artık elde edilebilmektedir.

Hu ve diğ. (2014, 2015), bağlantılı araç teknolojilerini (V2X) kullanarak benzetim ortamında izole ve koordineli kavşaklarda, toplu taşıma öncelik sistemindeki gecikmeleri geleneksel sistemlere kıyasla %84'e kadar iyileştiren yöntemler önermiştir. Toplu taşıma önceliğinin kavşaklardaki diğer yönleri olumsuz etkilemeden uygulanabilmesi için son yıllarda bağlantılı araç teknolojisinin avantajlarından yararlanılmaktadır. Genel olarak bu tür çalışmalarda araçlarda bulunan yolcu sayıları için varsayımlar (ör. yolcu ortalamalarının otobüslerde 30-40, özel araçlarda 1,5 olduğu varsayılarak) yapılarak otobüs önceliği uygulanmaktadır (Ma, Head ve Feng, 2014; Stevanovic, Stevanovic, Kergaye ve Martin, 2011).

Mevcut toplu taşıma önceliği uygulamalarının ortak özelliği, içi boş ya da yolcu dolu olsun otobüslere öncelik vermesidir. Bu nedenle, yedi yolcusu olan özel bir aile otomobili, yalnızca sürücüsüyle seyahat eden bir otobüse göre nispeten daha düşük önceliğe sahiptir. Ancak doluluk oranı yüksek olan özel araçlar, benzer amaçlara sahip diğer uygulamalarda (örn. yüksek doluluklu şerit uygulaması (HOV)) tahsisli şeritlerden faydalanabilmektedir (Dahlgren, 1996; G. Zhang, Wu, Liu ve Wang, 2010). Peki, otoyollarda yüksek doluluğa sahip özel araçlara öncelik verilirken neden sinyalizasyon kavşaklarda öncelik verilmiyor? Açıkçası, temel neden mevcut teknolojik altyapının sinyalizasyon kavşaklarda yeterli veri sağlayamamasıdır. Araçların doluluk oranlarının belirlenip trafik sinyal denetleyicilerine bildirilebilmesi durumunda, ulaşım yöneticilerinin farklı tercihlere sahip olacağını tahmin etmek zor değildir.

Şimdiye kadar incelenen çalışmalar, tüm araçlardaki gerçek zamanlı yolcu sayısını, kişi gecikmesini enküçüklemekte dikkate almamıştır. Mevcut çalışmalardan farklı

olarak, bu çalışma kişi gecikmesini en aza indirmek için gerçek zamanlı yolcu sayısını kullanan yenilikçi bir algoritma sunmaktadır.

Literatürden farklı olarak, bu çalışma araçlardaki yolcu sayısına ilişkin bilgilerin kullanılabilceğı bir senaryo geliştirmektedir. Araçta bulunan yolcu sayısını belirlemeye yönelik henüz bir sistem bulunmamaktadır. Ancak gelişen araç-yol etkileşimi teknolojilerinin devreye girmesiyle birlikte bu parametrenin kolaylıkla elde edilebileceğı düşünölmüş ve benzetim programları ve saha çalışmaları desteğı ile bu öneri kanıtlanmıştır. Bu bağlamda, PTV-Vissim'de yer alan araç-yol etkileşimi benzetim aracı kullanılarak algoritmanın faydaları ortaya konulmuştur. Benzetim programının sahadaki durumu daha iyi yansıtabilmesi için saha çalışmaları ile desteklenmesine ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle, benzetimde özel araçlara (otomobillere) atanan kişi sayısının nasıl dağıldığına dair bir saha çalışması da yapılmıştır.

İstanbul Ulaşım Ana Planında verilen ortalama değerler kullanılarak toplu ulaşım araçlarına atanacak yolcu sayısı belirlenmiştir. Benzetim programının parametreleri sahadaki gerçek duruma göre uyarlanmıştır.

Bu çalışmada önerilen algoritma, bağlantılı araçlar teknolojisini destekleyen trafik sinyal denetleyici ünitesinde çalışmaktadır. Araçların içerisinde yer alan araç üstü birimler (OBU), araçtaki konum, geçici kimlik, hız ve yolcu sayısını periyodik olarak bir zaman damgası ile bildirmektedir. Araçlar her bir kavşak yaklaşımının akış yukarısında en uzun kuyruktan daha geride belirlenmiş noktalardan kavşağı yaklaşırken algılanmakta ve oluşturdukları trafik hacimleri ve herbir araçtaki yolcu sayısı dikkate alınarak bir sonraki devrede en küçük gecikmeyi sağlayacak yeşil süreleri hesaplanmaktadır. Geciklemeyi enküçökmekte kullanılacak algoritmanın seçimi için de bir çalışma yapılmış ve bu kapsamda seçilen iki algoritmanın (Parçacık Sürü optimizasyonu (PSO) ile genetik algoritmalar (GA) karşılaştırılması için deneysel çalışmalar yapıp başarımları raporlanmıştır.

Sonraki devre çalıştırılırken, belirlenen bu yeşil süreler üst sınır olarak değerlendirilmekte ve araçların rastgele gelişlerinden kaynaklı olarak belirli bir yaklaşımda araçlar arası beklenmedik zaman aralıkları oluştuğunda veya geçiş için bekleyen diğeryaklaşımlarda beklenmedik yolcu yoğunlukları oluştuğunda mevcut

yaklaşım durdurularak sıradaki yaklaşıma daha erken geçiş hakkı tanınarak gereksiz beklemler engellenmektedir.

1.2 Amaç

Tez çalışmasının amacı izole ışıklı kavşaklarda taşıtlara içlerindeki yolcu sayısı ile orantılı bir şekilde öncelik sağlayan ve bu şekilde kişi başına gecikmeyi enküçükleyen bir algoritma sunmaktır. Bir başka ifadeyle, sunulan algoirtma ile geleneksel toplu taşıma önceliği uygulamalarının sadece otoöslere sağladığı avantajlardan ara toplu taşıma araçları ve yüksek doluluklu özel otomobillerin de faydalanmasına imkan verilmesi hedeflenmiştir.

1.3 Tezin Yapısı

Tez çalışması Giriş bölümü hariç 6 bölümden oluşmaktadır. Tez çalışmasının konusu araç-yol etkileşimi teknolojisi, trafik sinyalizasyonu, toplu taşıma önceliği gibi birçok arka plan bilgisini gerektirdiğinden dolayı 2., 3. ve 4. bölümlerde bu konularla ilgili tanıtıcı bilgiler, literatür araştırması sonuçları ve önceki benzer çalışmalara yer verilmiştir. Önceki çalışmalar arasında geniş bir yaygınlık kazanıp daha sonra birçok farklı çalışmada uygulanarak geleneksel hale gelenler ilgili yöntemin adıyla (örneğin, yeşil süresi uzatma, erken yeşil süresi verme vb.) incelenmiştir. Son zamanlarda yapılp henüz geleneksel hale gelmemiş çalışmalar ise “4.1.3 Taşıma Önceliğinde Yenilikçi Yaklaşımlar” başlığı adı altında ayrı ayrı ele alınmış ve detaylandırılmıştır. 5. bölümde önerilen TS-PDM algoritmasının yapısı ve çalışma şekli detaylı bir şekilde açıklanmıştır. 6. bölümde tez iddiasını ıspatlamak üzere hem sahada hem de benzetim ortamında yapılmış tüm deneysel çalışmalar ele alınmış ve sonuçları paylaşılmıştır. Son bölümde yapılan tüm çalışmalardan elde edilen nihai sonuçlar yorumlanmış ve sonraki uygulamalara ışık tutacak değerlendirmelere yer verilmiştir.



2. ARAÇ-YOL ETKİLEŞİMİ TEKNOLOJİSİ

Araç-araç ve araç-altyapı etkileşimi (V2X), yollarda ölüm ve yaralanmayla sonuçlanan trafik kazalarını azaltmak için geliştirilmekte ve kentsel alanlarda trafik yoğunluğunun neden olduğu ekonomik kayıpları en aza indirmek için benzeri görülmemiş fırsatlar sunmaktadır.

V2X temel olarak araçların birbirleriyle veya diğer nesnelerle (örneğin yol kenarı ekipmanı, cep telefonları) arasında iletişim kurmasını sağlayan bir kablosuz iletişim türüdür. Bu teknoloji, araçta bulunan elektronik bir kart (araç üstü birim, OBU) yardımıyla 5,8/5,9 GHz bantlarında 300 m'ye kadar kablosuz iletişim sağlamaktadır. Söz konusu teknoloji Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE) tarafından ilk olarak IEEE 802.11p adıyla standartlaştırılmıştır.

Bu teknoloji, araçlar kendilerine ulaşan sinyalleri tekrarladıkları için daha uzun mesafelerde iletişim sağlayabilmektedir. Uluslararası Otomotiv Mühendisleri Derneği (SAE) de bu standardı temel alan bir iletişim mesajı sözlüğü tanımlamıştır. Sözlükteki en temel güvenlik mesajı (yani, J2735 Özel Kısa Menzilli İletişim (DSRC) Mesaj Kümesi Sözlüğü), Temel Güvenlik Mesajı (BSM) olarak bilinir. Bu mesaj, araçların geçici kimlik bilgileri, hız, konum, hızlanma, fren durumu, boyut ve araç aralıkları gibi bilgileri içerir ve saniyenin onda biri periyotlarda yayınlanır.

Bu mesajları yol kenarı ekipmanı ile toplayarak, yalnızca sayım ve işgaliye gibi veriler değil, aynı zamanda mekansal yoğunluk, kuyruk uzunluğu ve hızlanma gibi geleneksel teknolojilerle kolayca elde edilemeyen parametreler de elde edilebilir. Bu parametrelerle daha verimli bir trafik kontrolünün sağlanacağı tahmin edilmektedir. Bu çalışmada belirli bir alandaki araç sayısı (uzaysal yoğunluk) ve araçlardaki yolcu sayısı parametresi kullanılmaktadır. Bir araçtaki yolcu sayısını gösteren parametre şu anda BSM'de yer almamakta ancak yakın gelecekte SAE'nin mesaj sözlüğüne eklenmesi beklenmektedir (Hasan, Fink, Vargas, Adame ve Hernandez, 2016).

Yeni nesil mobil iletişim teknolojisinin gelişmesiyle Üçüncü Nesil Ortaklık Projesi (3GPP) tarafından tanımlanan Long Term Evolution (LTE) -V2X teknolojisinin

standardizasyonu, son yıllarda kısa menzilli kablosuz haberleşmede yeni bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır. LTE-V2X teknolojisinin, eş zamanlı LTE veri trafiği ve V2X hizmeti gibi durumlar haricinde çoğu durumda, senaryoda ve temel başarımlar ölçütlerinde IEEE 802.11p'den daha iyi başarımlar gösterdiği iddia edilmektedir (Bazzi, Cecchini, Menarini, Masini ve Zanella, 2019; Karoui, Freitas ve Chalhoub, 2020; Zhao ve diğerleri, 2018). LTE-V2X'in gelişimi çok umut verici olup zaten ticarileştirilmiş bulunan V2X teknolojisinin yayılmasını hızlandırması beklenmektedir.



3. TRAFİK SİNYALİZASYONU

3.1 Tarihçe

Trafik kavramının ilk ortaya çıkışı 1868 yılına dayanır. Londra’da Parlamento binaları çevresinde sayısı artan at arabalarının yaya güvenliğini tehlikeye sokması dolayısıyla John Peake Knight tarafından döner gaz lambalarından oluşan bir kontrol sistemi Great George Caddesi ve Bridge Caddesi kesişimine kurulmuştur. Sistemin merkezinde bir semafor kolu ve kırmızı ile yeşil ışıkları olan döner bir gaz lambası yer almakta olup bir polis memuru tarafından yaya geçişine izin vermek için trafiği durdurmak amacıyla çalıştırılmaktadır. Gaz lambalarının gündüz görünürlüğü azalması dolayısıyla semafor kolları aşağı doğru 45°’lik açıda kapandığında geçişe izin verilmekte, kollar yatay düz hale geldiğinde ise trafik durdurulmaktadır. Sistem kurulduktan yaklaşık bir ay sonra patlamış ve sistemi çalıştırmakla görevli polis memurunu da yaralamıştır (Pollard, 2008).

1900’lü yıllarda elektrik şebekelerinin yaygınlaşmasıyla birlikte elektrikle çalışan daha az tehlikeli sinyalizasyon cihazları üzerinde çalışmalar başlamıştır. Bilinen ilk elektrikli trafik ışığını ABD’de yer alan Salt Lake şehrinde Lester Wire isimli bir polis memuru 1912 yılında tasarlamıştır. Ancak buluşun patentini kendisinden bir yıl sonra James Hoge almıştır. James Hoge’un sesli uyarı da içeren sistemi 1914 yılında Cleveland Ohio’da kurulmuştur. Sistem kırmızı ve yeşil lambalar ile bir zilden oluşmaktaydı. Zil görme engelliler ve renk körleri için sisteme eklenmişti (Pollard, 2008).

Yalnızca iki rengin olması ani renk geçişlerine yol açmaktaydı ve bu sebeple insanların renk değişimlerine tepki göstermeleri belli bir süre almaktaydı. Bu sorunu çözmek için yine bir polis memuru olan William Potts tarafından tarihteki ilk üç renkli elektrikli ve tamamen otomatik trafik sinyalizasyon sistemi tasarlanmıştır. Potts’un sistemi ilk olarak 1920 yılında Detroit’te bulunan Woodward ve Michigan caddelerinin kesiştiği bir kavşakta uygulanmıştır. Sistemdeki en önemli yenilik sarı ışığın eklenmesiyle

kırmızı-yeşil renk geçişinde yaya ve araçların kavşağı terk edebilmesinin sağlanıyordu.

Türkiye’de ilk trafik ışığı 1929 yılında İstanbul’da kurulmuştur. İstanbul Belediyesi o zamanlar “işaret feneri” olarak adlandırılan cihazları Karaköy’de test edeceğini resmi olarak duyurmuş ve konu 19 Mart 1929 tarihli Cumhuriyet gazetesinde de duyurulmuştur (Murat ve Gundogan, 2019).

Zaman içerisinde bu ilk sistemler giderek olgunlaşmış ve birçok kavşağın eş zamanlı olarak çalışmasıyla erken dönem yeşil dalga uygulamaları da hayata geçmiştir. İlk olarak 1926 yılında Washington’da bulunan 16. Caddede böyle bir sistem kurulmuş ve caddede sabit bir hızla seyahat eden araçların caddede bulunan tüm kavşaklarda durmadan yeşilde geçmelerine olanak sağlanmıştır. Böylece caddedeki seyahat süresi yarıya inmiştir (Mcshane, 1999).

Aynı yıllarda bir taraftan insan eliyle kontrol edilen sistemler yerini, süreleri önceden belirlenmiş otomatik kontrol edilen sistemlere bırakırken bir taraftan da önceleri trafik polisleri tarafından gözlemle elde edilen trafik verilerinin otomatik sistemlerle toplanması ihtiyacı belirginleşmiştir. Bu ihtiyacı gören Baltimore/Maryland’den demiryolu sinyal mühendisi Jr. Charles Adler belirli bir konumda sürücünün korna çalmasıyla etkinleşen bir algılama cihazı geliştirmiştir. Bu cihaz, yakındaki bir elektrik direğine monte edilen küçük bir kutudaki mikrofondan oluşuyordu. Adler’in cihazı, 1928’de Baltimore’daki bir kavşakta ilk kez kuruldu ve araç sensörü aracılığıyla geçiş talebi alan ilk yarı trafik uyarmalı sinyal sistemi kurulmuş oldu (Klein, Mills ve Gibson, 2006).

Hemen hemen aynı dönemde, elektrik mühendisi Henry A. Haugh, yol içine yerleştirilen basınca duyarlı bir sensör geliştirdi. Bu sensör, elektrik kontağı olarak işlev gören iki metal plakanın, araçların tekerlek basıncıyla bir araya gelmesiyle çalışıyordu. Basınca duyarlı bu pedal tipi sensör, korna ile etkinleşen sensörden daha popüler hale geldi. Bu sensör, 30 yıldan uzun bir süre boyunca trafik uyarmalı sistemlerde araçları algılamak için birincil yöntem olarak yaygın şekilde kullanıldı (Klein ve diğerleri, 2006).

Araçların en belirgin ve en kolay tespit edilen özelliğini -ağırlıklarını- kullanarak algılama yapan pedal tipi sensörün ekonomik açıdan dezavantajları vardı. Kar küreme araçları plakayı yoldan kaldırarak pahalı onarımlara yol açabiliyordu. Ayrıca, yolun

yeniden asfaltlanmasından sonra sensörün yeniden kurulması da ek bir maliyetti. Bu sorunlar, daha ince özelliklere dayanan trafik sensörlerinin arayışına yol açtı. Yıllar içerisinde birçok farklı karakteristiğe odaklanan sensör teknolojileri üzerine çalışmalar sürdü. Bu karakteristik özelliklerin başlıcaları ve ilgili teknolojiler aşağıda sıralanmıştır (Klein ve diğerleri, 2006).

- Ses (akustik sensörler)
- Görünürlük ve opaklık (optik ve kızılötesi sensörler ve video görüntü işlemcileri)
- Yerin manyetik alanı (manyetik sensörler, manyetometreler)
- İletilen enerjinin yansıması (kızılötesi lazer radar, ultrasonik sensörler ve mikrodalga radar sensörleri)
- Elektromanyetik endüksiyon (endüktif döngü dedektörleri)
- Titreşim (sürtünme ile elektriklenen sensörler, sismik ve eylemsizlik anahtarı sensörleri).

Ancak bu teknolojilerin içerisinde elektromanyetik endüksiyon (endüktif döngü dedektörleri) birçok özelliği (ekonomiklik, uygulamada kolaylık, sürdürülebilirlik vb.) bir arada sunması dolayısıyla büyük bir yaygınlık kazandı ve günümüzde de hala kullanılmaya devam etmektedir.

Sonraki yıllarda trafik ışıklarının görünümünü değiştirecek önemli bir değişiklik olmamış ve ve gittikçe dünyanın her tarafında standart bir hal almaya başlamıştır. Ancak 1950’li yıllardan sonra bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler özellikle gelişmiş kontrol yöntemleri konusunda çok büyük ilerlemeler yaşanmasına yol açmıştır. Söz konusu kontrol yöntemleri sonraki bölümde ele alınmıştır.

3.2 Sinyal Kontrol Yöntemleri

Trafik sinyalizasyonun asıl görevi ortak bir alanı kullanmaya çalışan çakışan trafik hareketleri arasında bir zaman paylaşımını yapmaktır (TRB, 2000). Ancak trafik güvenliği ile ilgili bu asli görev yerine getirilirken diğer yandan yol kapasitesi ister istemez düşürülmektedir. Trafik güvenliğinden taviz vermeden söz konusu kapasitenin olabildiğince yüksek tutulması, maliyet etkinliği, sürdürülebilirlik vb. diğer rekabet unsurları birçok sinyal kontrol yöntemlerinin gelişmesine yol açmıştır.

Bir kavşak belli sayıda giriş ve çıkıştan oluşan bir sistem olarak düşünülürse, belli bir girişten girip belli bir çıkıştan çıkacak olan tüm trafik kullanıcıları (taşıtlar, yayalar, bisikletler vb.) “hareket” (movement) olarak adlandırılır. Bir trafik sinyal denetleyicisi temelde bir kavşaktaki trafik hareketlerine belli bir sırayla yol hakkı vererek hareketlerin güvenli bir şekilde kavşağı kullanmasını sağlar. Trafik sinyal denetleyicisinden her zaman aynı elektriksel sinyali alan ve ortak olarak yol hakkı alacak olan bir veya daha fazla hareket “grup”¹ olarak adlandırılır. Aralarında çakışma olmayıp birlikte yol hakkı alan gruplar “faz”ları oluşturur. Kavşaktaki tüm sinyal göstergelerinin tam bir dizisi ise “devre” olarak adlandırılır. Belli bir anda kavşakta bulunan tüm göstergelerin belli bir renk kombinasyonuna geçtiği düşünülün. Göstergelerin durumlarının değişip tekrar tıpa tıp aynı renk kombinasyonuna gelmesi arasındaki süre bir devreyi oluşturur.

Genel olarak, günümüzde türde trafik sinyal kontrol yöntemi kullanılmaktadır. Bunlar sağladıkları kontrol türüne göre en basitten en gelişmişe doğru; el ile kumandalı, sabit süreli (pretimed veya time-of-day), trafik uyarmalı (actuated) ve eniyileştirmeye dayalı kontrol olarak sınıflandırılabilir.

3.2.1 Sabit süreli kontrol

Sabit süreli kontrol türünde, kavşağa değişik yönlerden yaklaşan taşıt ve yaya trafiğine, önceden hazırlanmış zaman planlarına uygun olarak sıra ile geçiş hakkı verilmektedir. Her bir geçiş hakkının süresi (faz süresi veya yeşil süresi) önceden belirlenmiş olup sabittir. Bununla birlikte, trafik yoğunluğundaki değişimlere uyum sağlamak için yılın ayına, haftanın gününe ve günün saatine göre farklı süreler tanımlanabilmektedir. Önceden yapılan saha gözlemlerinde haftanın belli günleri (örneğin hafta içi günler), günün belli saatleri (sabah işe gidiş saatleri, akşam işten dönüş saatleri gibi) ve yılın belli dönemlerindeki (örneğin okulların açık olduğu aylar

¹ Uluslararası literatürde “grup” kavramı yerine “phase” kavramı kullanılmaktadır. Türkiye’deki sinyalizasyon pratiğinde ise “faz” daha ziyade; uluslararası literatürde birbirleriyle çakışmayan grupların oluşturduğu küme anlamındaki “stage” kavramı yerine kullanılmaktadır.

gibi) trafik desenleri tespit edilerek bu desenlere göre önceden farklı faz sıra ve süreleri tanımlanarak trafik sinyal denetleyici cihazlara yüklenir. Trafik sinyal denetleyiciler de zamana bağlı olarak bu farklı sinyal planlarını çalıştırır. Bu kontrol türünde, sabit bir faz sırası ve süresi uygulanmasından dolayı devre süresi ilgili zaman diliminde sabit olmaktadır (TRB, 2010).

3.2.2 Trafik uyarmalı kontrol:

Trafik uyarmalı (actuated) kontrol, kavşağın bir veya daha fazla koluna yalnızca o kola yerleştirilmiş algılayıcıdan (taşıt dedektörü veya yaya butonu) bir talep algılanınca geçiş hakkı verilmesi veya yeşil süresinin taleplerin sıklığına göre uzayıp ksalmasını içeren kontrol türüdür. Yeşil süresi, dedektörden elde edilen trafik talebi bilgisine göre belirlenir ve önceden ayarlanmış minimum ve maksimum sınırlarla kısıtlanır. Trafik uyarmalı bir fazın sona ermesi, çakışan bir trafik hareketinden gelen bir hizmet çağrısını gerektirir. Taşıt dedektörü veya yaya butonu bulunan kavşak kollarında bir taşıt veya yayanın algılayıcıyı tetiklemesiyle, ilgili yön için trafik sinyal denetleyicisinde bir hizmet çağrısı kaydedilir. Taşıt dedektörü veya yaya butonu gibi bir algılayıcı içermeyen yönler için genelde her devrede tekrar eden sürekli bir hizmet çağrısı (phase recall) ayarlanır. Talep tespit edilmezse, uyarmalı bir faz belli bir devre için atlanabilir (TRB, 2010).

Trafik uyarmalı kontrolün özel bir halinde sadece bazı yönlerde (genellikle tali yollar ve yaya hareketleri) algılayıcı bulunur ve diğer yönlerde (genellikle ana yollar) algılayıcı bulunmaz. Oldukça sık rastlanan bu kontrol yöntemi “yarı trafik uyarmalı (semi-actuated) kontrol” olarak adlandırılır. Bu kontrol yönteminde, ana yollara her devrede geçiş hakkı verilir ve sabit süreli olarak işletilir. Sabit süre sona erdiğinde tali yollardan veya yaya hareketlerinden bir hizmet çağrısı gelirse, diğer kollara belirlenen sırayla geçiş hakkı verilir. Eğer tali yollardan veya yaya hareketlerinden bir hizmet çağrısı kaydedilmemişse ana yollar sürekli olarak açık kalmaya devam eder (TRB, 2010).

Yukarıda bahsi geçen özellikler neredeyse tüm trafik uyarmalı sistemlerin temel ve ortak özellikleridir. Dünyada birbirinden farklı gelişmiş trafik uyarmalı uygulamaları mevcuttur. ABD’de gerek tavsiye niteliğinde yayınlanan el kitapları gerekse standartlar yoluyla farklı sinyal denetleyiciler için ortak trafik uyarmalı kontrol parametreleri tanımlanmıştır. Birleşik Krallık’ta ise İngiliz Ulaştırma Araştırma

Laboratuvarı (TRL) tarafından trafik uyarmalı kontrolün ötesine geçen ancak birçok gelişmiş trafik uyarmalı kontrol parametresini de barındıran MOVA sistemi geliştirilmiştir. Diğer tarafta İsveç'te geliştirilip İskandinav ülkelerinde uygulanan LHOVRA sistemi de gelişmiş trafik uyarmalı sistemlerdendir. ABD'de uygulanan trafik uyarmalı kontrolün MOVA veya LHOVRA gibi özel bir ismi olmadığından ve NTCIP (National Transportation Communications for Intelligent Transportation System Protocol) standartlarına uyan trafik sinyal denetleyicilerde çalıştığından ötürü bu bölümde NTCIP Trafik Uyarmalı Kontrol Uygulamaları olarak adlandırılacaktır.

3.2.2.1 NTCIP trafik uyarmalı kontrol uygulamaları

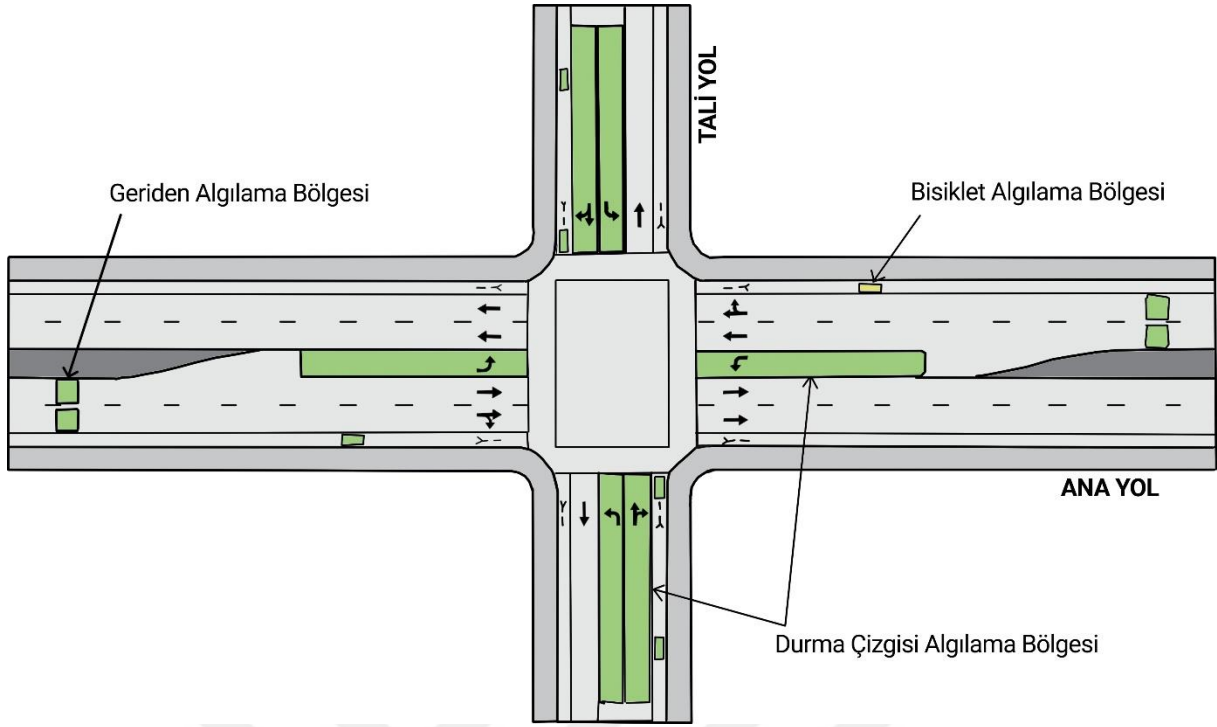
Tipik bir trafik uyarmalı uygulamadan beklenen aşağıdaki başlıca fonksiyonlar için NTCIP 1202 (NTCIP Joint Committee, 2019) standardında gerekli parametrelerin tanımlamaları yapılmış, Trafik Sinyal Denetleyicileri El Kitabı (FHWA, 2023) ve Sinyal Zamanlamaları El Kitabı (National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2015) gibi rehber dokümanlarda da uygulamalarda nelere dikkat edileceği anlatılmıştır. Söz konusu fonksiyonlar ve fonksiyonlara ilişkin algılama ihtiyaçları şunlardır:

- Kavşaktaki bir hareketin varlığının ve ona ilişkin grubun belirlenmesi
- Bir grubun yeşil süresinin uzatılması
- Bir grubun yeşil süresinin sonlandırılması için trafikteki talep boşluklarının (geçiş talebinin hiç olmaması veya verimsiz bir trafik akışının olması durumu) tespit edilmesi
- Yüksek hızlı yollarda sürücülerin ikilem² bölgesinde sarı ışık başlangıcına denk gelmemesinin sağlanması

² Işıklı bir kavşakta ışık yeşilden sarıya döndüğünde kavşağa yaklaşan sürücü, kavşağı geçmek ya da durmak konusunda karar vermesi gereken bir bölgede kalır. Bu bölge genel olarak ikilem bölgesi veya karar bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Bazı kaynaklarda bu genel tanım karar bölgesi için kullanılmakta olup; kırmızı koruma ve sarı

Şekil 3.1’de yukarıda bahsi geçen farklı trafik uyarma fonksiyonlarını gerçekleştirmek için gerekli olan algılama bölgeleri gösterilmektedir. Bir hareketin varlığını algılamak için şekildeki herhangi bir algılama bölgesi kullanılabilir. Ancak yüksek hızlı yollarda, hem yeşil süresini güvenli şekilde sonlandırabilmek hem de kuyruk boyu ve başarımlı ölçümünü yapabilmek için durma çizgisinin bir hayli gerisinde algılama gereklidir. Özellikle ikilem bölgesi uygulamaları, için geriden algılama dedektörlerinin mesafesi oldukça önemlidir. Çünkü sürücünün güvenli bir şekilde geçmesi veya durması için sarı ışığı en doğru zamanda görmesi gereklidir. Sürücünün güvenli şekilde durabilmesi için, ikilem bölgesine girmeden sarı ışığı görmesi; güvenli şekilde geçebilmesi için de ikilem bölgesinde iken sarı ışık başlangıcını görmemesi gereklidir. ABD’deki rehber dokümanlara göre ikilem bölgesi başlangıcı durma çizgisine 5,5 sn kala başlar ve 2,5 sn kala biter. Dolayısıyla örneğin 72 km/sa’lik seyir hızı olan bir yolda ikilem bölgesi mesafe cinsinden 111 m – 50 m arasındadır. Sonuç olarak geriden algılama dedektörleri en az 111 m geriye konularak denetleyicinin geçiş süresi (passage time) parametresi sürücünün ikilem bölgesinde sarı ışık başlangıcını görmeyeceği şekilde ayarlanmalıdır.

ışık sürelerinin, sürücünün güvenli şekilde geçmesi veya durması için yeterli olmadığı durumlar için ikilem bölgesi kavramı kullanılmaktadır (National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2015). Bu çalışmada ikilem bölgesi için bu tanım esas alınmıştır.



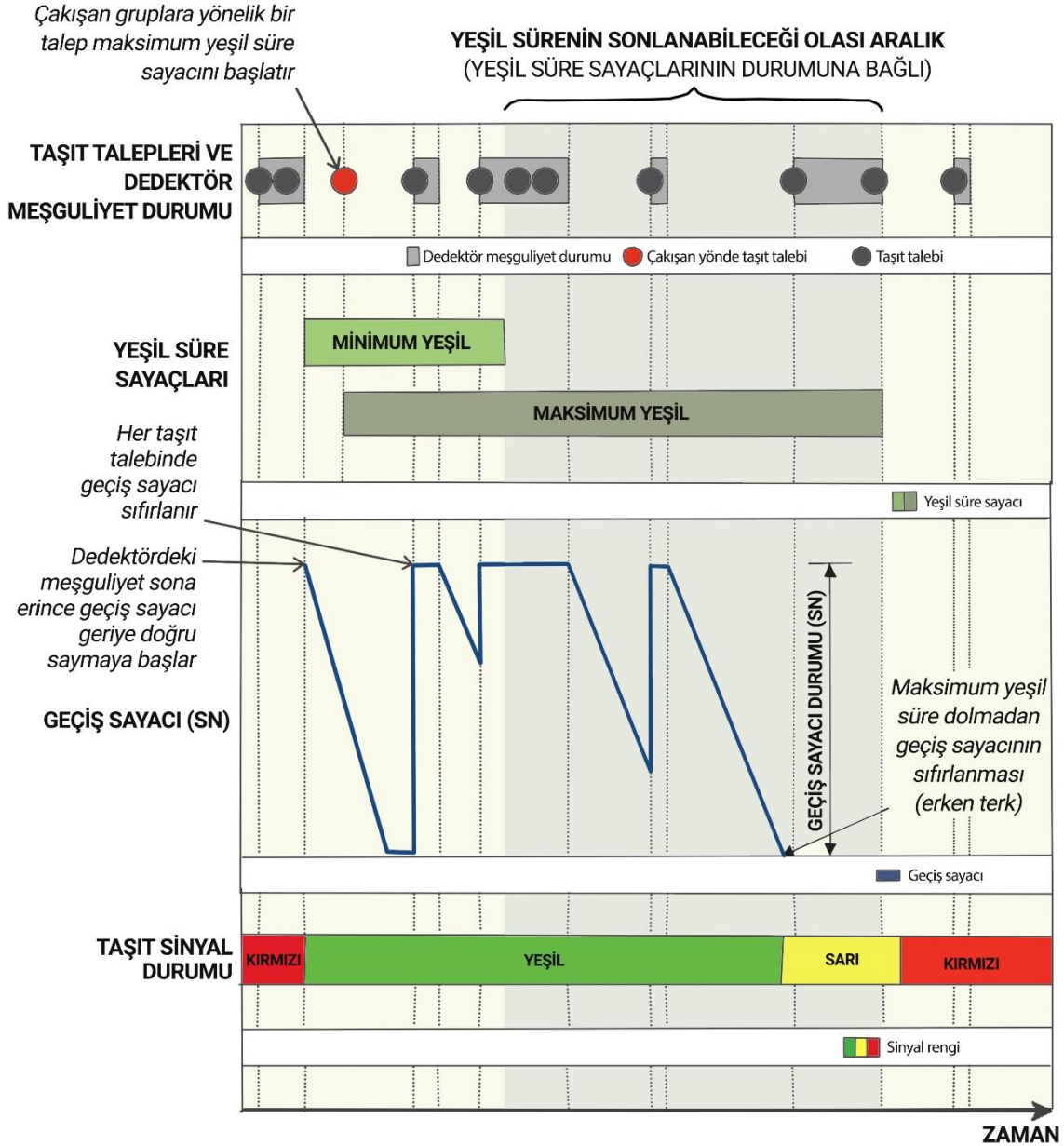
Şekil 3.1 : Trafik uyarımlı uygulamalar için farklı algılama bölgeleri (National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2015).

Yüksek hızlı yollarda, geriden algılama dedektörleri durma çizgisi dedektörleri ile doğru şekilde bir arada kullanıldığında kavşak yaklaşımlarında oluşan taşıt kuyruklarını temizlemeye de yardımcı olabilir. NTCIP’de bu tür fonksiyonlar için birim uzatma (unit extension), minimum yeşil süre (minimum green), değişken başlangıç yeşil süresi (variable initial) ve maksimum yeşil süre (maximum green) parametreleri tanımlanmıştır. *Birim uzatma* (taşıt aralığı, taşıt uzatması, geçiş süresi ve boşluk süresi olarak da adlandırılır); kavşak kolu yaklaşımında yer alan algılama bölgesine yeni bir taşıt her girdiğinde yeşil süresine eklenen birim süredir. *Minimum yeşil süresi*; başlangıç yeşil süresi ile bir birim uzatma süresinin toplamından oluşur. *Başlangıç yeşil süresi* kavşak yaklaşımındaki dedektör ile dur çizgisi arasında yer alan taşıtların kavşağı terk etmesi için gerekli olan asgari süredir. *Değişken başlangıç süresi* ise minimum yeşil süre sayacı ile eş zamanlı olarak başlatılan ve başlangıç anındaki her bir taşıt talebinde arttırılan bir süredir. Bu süre, maksimum değişken başlangıç süresi değerini aşamaz. *Maksimum yeşil süre*; belli bir kavşak yaklaşımı için atanmış azami yeşil süresidir. Söz konusu yeşil süresi dolunca, kuyrukta bekleyen araçlar olsa dahi çakışan yöndeki yaklaşımlara yeşil sinyali yanar ve mevcut yaklaşımın sinyali kırmızıya döner.

Düşük hızlı yollarda ise ikilem bölgesinden kaynaklı risk oldukça düşük olduğu için durma çizgisi algılama bölgesi ile herhangi bir güvenlik kaygısı olmaksızın kuyrukların temizlenmesi ve gecikmelerin azaltılması hedeflenir. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi yaklaşık 24 m civarında oldukça uzun bir algılama bölgesi (tek veya birden fazla sensör kullanılabilir) ve sıfıra yaklaşan geçiş süresi parametresi kullanılarak hem ağır ilerleyen trafikten kaynaklı olarak yeşil süresinin erken sonlandırılması hem de son araç durma çizgisini terk ettiği anda yeşil süresi sonlandırılarak gecikmenin artması engellenir.

Kırmızıda dönüşlerin serbest olduğu yollarda ise; belli bir süre boyunca dedektörü meşgul eden taşıtlar için yeşil çağrısı etkinleştirilir aksi takdirde ise taşıtın kırmızıda geçebildiği varsayılarak ilgili yön yeşil yapılmaz.

Şekil 3.2’de tipik bir trafik uyarmalı sistemde geçiş süresi uygulaması gösterilmektedir. Geçiş süresi, taşıt trafiğinde oluşan boşluklarda yeşil süresini sonlandırmak için kullanılan bir parametredir. Taşıt trafiğindeki boşluktan kasıt taşıt trafiğinde verimsiz bir akışın başladığı ve tipik olarak taşıtlar arasında 2-3 saniyeden fazla boşlukların oluşmaya başladığı durumlardır. Taşıt talepleri aralarındaki boşluk belirlenen geçiş süresinden kısa olduğu sürece ilgili grubun yeşil süresi uzatılır. Eğer taşıtlar arasındaki boşluk belirlenen eşiğin üstüne çıkarsa bu uygulama sayesinde maksimum yeşil süresine ulaşmadan ilgili grubun geçiş hakkı sonlandırılır. Geçiş süresi parametresi çok uzun seçilirse çakışan yöndeki trafikte gereksiz beklemler artar.



Şekil 3.2 : Artan süre uygulaması ve geçiş süresi parametresi (National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2015).

Geçiş süresi uygulaması aslında bir azalan sayaç uygulamasıdır. Her taşıt talebinde (taşıtın algılama bölgesini terk ettiği anda) sayaç geçiş süresine ayarlanır ve geçen her saniye bu sayacın değeri bir azaltılır. Yeni bir taşıt talep verdiğinde, eğer bu sayaç sıfıra ulaşmamışsa tekrar geçiş süresine ayarlanır ve geriye doğru saymaya başlar. Bu sayaç sıfırlanmadan yeni taşıt taleplerinin oluşması durumunda grubun yeşil süresi maksimum yeşil süresine kadar uzar. Bir fazın taşıt trafiğindeki boşluklardan kaynaklı erken sonlanması (erken terk) aşağıdaki üç koşulun bir arada oluşması durumunda gerçekleşir.

- Minimum yeşil süre sona ermiştir.
- Çakışan yönlerde bekleyen bir geçiş talebi mevcuttur.
- Geçiş süresi sayacı sıfırlanmıştır.

NTCIP, esnekliği artırmak için birçok farklı trafik uyarmalı kontrol parametresi tanımlamıştır. Örneğin yeşil süresinin uzatılması yalnızca tekdüze şekilde değil, değişken bir uzatma parametresi ile de sağlanarak trafikte oluşan talep boşluklarının gerçekten verimsiz bir akıştan ibaret olması durumunda yeşilin sonlandırılmasına izin verilir. Şekil 3.3'te de görüldüğü gibi asgari yeşil süre sona erdikten sonra bir süre sabit bir boşluk süresi uygulanır ve ardından doğrusal bir şekilde zamanla boşluk süresi belli bir minimum süreye kadar azaltılır. Bu uygulamanın amacı, bir yönde oluşan bir taşıt kuyruğunun temizlenmeye başladığı ilk anlarda taşıtlar arasında oluşabilecek boşlukların çok erken bir vakitte yeşil sürenin sonlanmasına neden olmamasıdır. Taşıt akışı belli bir düzene ulaştıktan sonra boşluk süresi gittikçe azaltılır ve ancak yeterince verimli bir akış olması durumunda maksimum yeşil süresine ulaşılması sağlanır.

3.2.2.2 LHOVRA

İsveç'te geliştirilmiş olan LHOVRA trafik uyarmalı sistemin özel bir hali olup çıkış amacı ışıklı kavşaklarda gecikme ve durma sayılarını azaltmanın yanı sıra yüksek hızlı (70 km/sa ve yukarısı) yollarda trafik güvenliğini de artırmaktır. İlk ortaya atıldığı dönemdeki deneme sürecinde test kavşaklarında kaza oranını, milyonda 0,7'den milyonda 0,5'e indirdiği raporlanmıştır. Bu başarısının da etkisiyle yıllar içerisinde İsveç'te ve diğer İskandinav ülkelerinde kullanımı yaygınlaşmıştır (Al-Mudhaffar, 2006).

LHOVRA kelimesinin her bir harfi başka bir kullanım amacını simgelemektedir:

L → Kamyon, otobüs ve konvoy önceliği

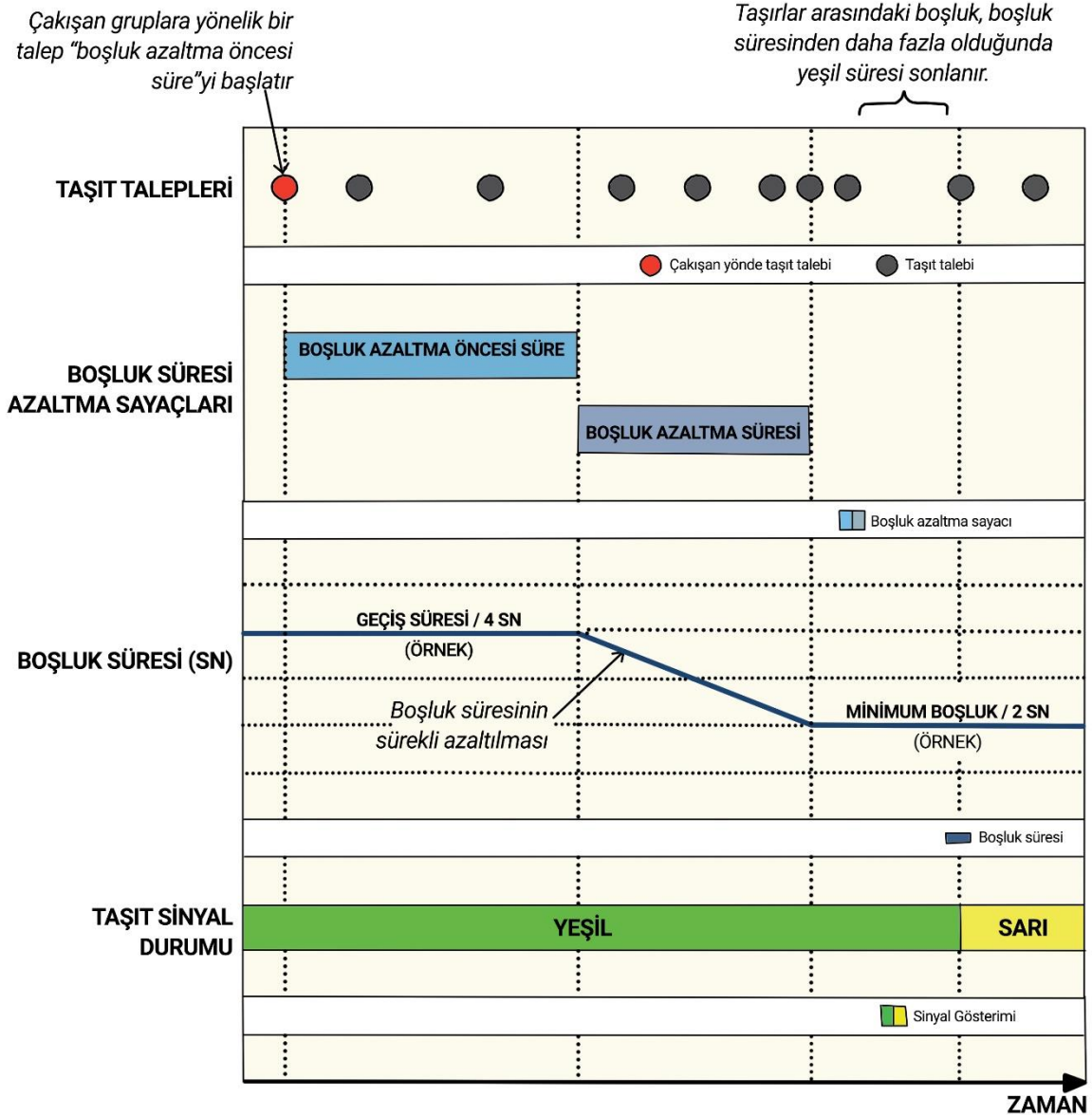
H → Ana yol önceliği

O → Kaza azaltma

V → Değişken sarı süresi

R → Değişken kırmızı süresi

A → Tüm kırmızı durumuna dönme

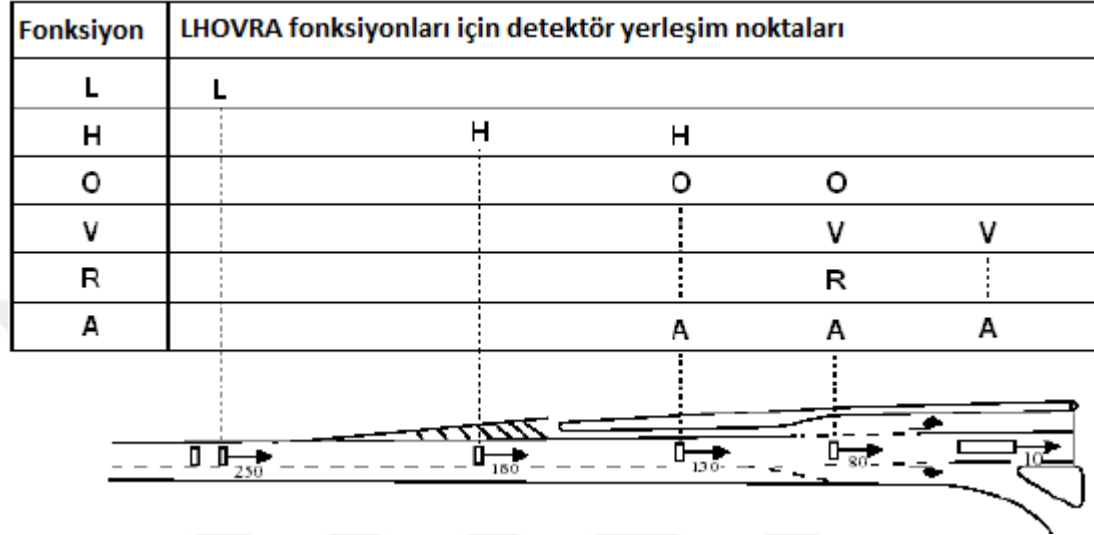


Şekil 3.3 : Değişken boşluk süresi uygulaması (National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2015).

LHOVRA'nın O fonksiyonu ikilem bölgesinde kalan taşıtların sayısını azaltmak suretiyle kırmızı ışık ihlallerinin ve arkadan çarpma kazalarının sayısını azaltmaya yöneliktir. Bu, taşıtlar ikilem bölgesine başlangıcında algılanarak ve sarı ışığın yanması bir süre daha ertelenerek sağlanır. Birçok faktöre bağlı olmakla birlikte LHOVRA rehber dokümanlarında ikilem bölgesinin genel olarak dur çizgisinin 50 ila 130 m berisinde olduğu belirtilmektedir. Dolayısıyla, söz konusu fonksiyonu sağlamaya yönelik dedektör yerleşimlerinin dur çizgisinin 80 ila 150 m berisinde

olması önerilmektedir. LHOVRA'nın farklı fonksiyonları için dedektör yerleşim noktaları Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

LHOVRA kontrol yönteminde asgari yeşil süresi sabit olup dedektörde algılanan taşıt sayısına bağlı değildir. Halbuki benzer birçok sistemde asgari yeşil süre algılanan taşıt sayısına bağlı olarak değişebilmektedir.



Şekil 3.4 : 70 km/sa'lik bir kavşak yaklaşımında LHOVRA fonksiyonları için dedektör yerleşim noktaları (Al-Mudhaffar, 2006).

Yine LHOVRA'nın bir diğer temel farkı faz tabanlı değil grup tabanlı bir kontrol yöntemi olmasıdır. Faz tabanlı sistemlerde her grup mutlaka en az bir faza atanır ve fazlar belli bir sıra ile işletilir. Grup tabanlı kontrolde ise gruplar arası çakışma durumları (çakışma matrisi) dikkate alınarak dinamik şekilde gruplar birlikte yol hakkı alabilir.

LHOVRA sisteminde bir eniyileme özelliği olmadığından sonraki yıllarda SOS (Self optimizing signal control) ve TOL (Traffic Optimization Logic) sistemleri geliştirilmiştir. Trafik uyarmalı kontrol yöntemlerinin önemli bir eksiği olarak kabul edilecek bir özelliği yeşil süre sonlandırma kararında sadece mevcut yaklaşımdaki talepleri dikkate alıp, bekleyen yaklaşımlarda oluşan kuyruklanmayı dikkate almamalarıdır. SOS sisteminin temelinde de Miller tarafından geliştirilen ve belirli aralıklarla bir yeşil süre sonlandırma kararının tüm kavşak yaklaşımlarında yol açacağı toplam taşıt gecikmesini dikkate alan bir eniyileme algoritması yer alır. Miller'ın stratejisinde, bir grubun yeşil süresinin uzatılması kararı, bir kontrol fonksiyonunun değeri göz önünde bulundurularak, belirli aralıklarla alınır. Bu fonksiyon, yeşil sürenin uzatılması durumunda kavşaktan geçebilecek ilave araçların kaçındığı taşıt-saniye

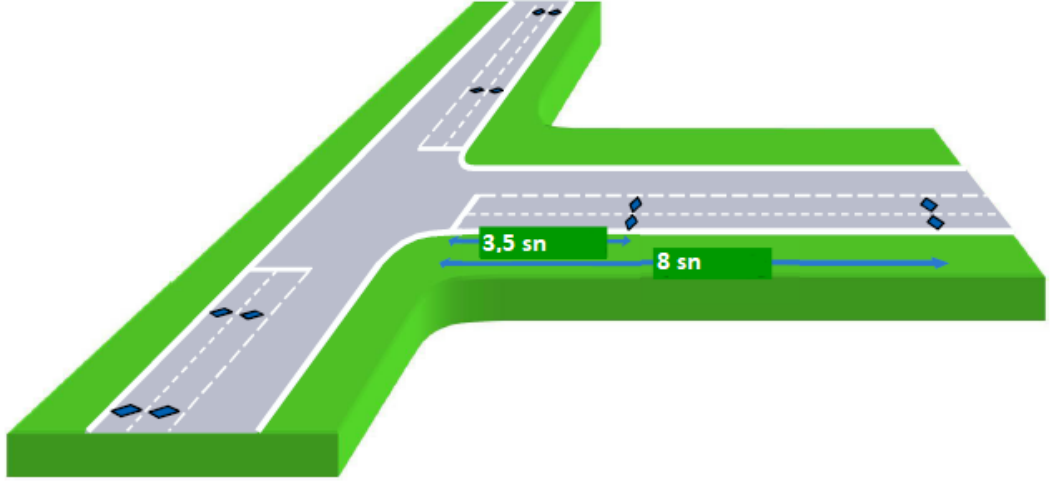
cinsinden gecikme ile bu uzatma nedeniyle çakışan yaklaşımlarda bekleyen araçların yaşadığı kayıp arasındaki farkı temsil eder. TOL yöntemi ise Miller algoritmasının toplu taşıma önceliği dikkate alınarak genişletilmesinden ibarettir (Al-Mudhaffar, 2006) .

3.2.3 Eniyileştirmeye dayalı kontrol yöntemleri

3.2.3.1 MOVA

MOVA (Microprocessor Optimised Vehicle Actuation), izole kavşaklardaki trafik ışıklarını kontrol etmek için geliştirilen bir stratejidir. İzole kavşaklar yakınındaki diğer ışıklı kavşaklardaki sinyalizasyon sistemleri ile bağlantısı olmayan veya diğer kavşaklarda bulunan sinyalizasyon sistemlerinden etkilenmeyen kavşaklardır. MOVA, çok düşük akımlarda da doygunluk üstü akımalarda da çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Çoğu trafik koşulunda – doygunluk altı koşullarda – MOVA, gecikmeyi en aza indirme hedefiyle çalışır; herhangi bir kavşak yaklaşımında doygunluk üstü akımlar oluştuğunda ise sistem, kavşak kapasitesini en üst düzeye çıkarma hedefiyle çalışma moduna geçer (TRL, 2017).

MOVA, her yaklaşımda ve her şeritte stratejik noktalara (bkz. Şekil 3.5) yerleştirilen "nokta" dedektörlerini kullanır. Dedektör konumları, durma çizgisinin akış yönündeki mesafeye göre belirlenen "seyir hızına" göre ayarlanır. Seyir hızı, başlangıçtaki kuyruğun bitmesinden sonra yaklaşım üzerindeki araçların %15'lik yüzdelik hız dilimidir. Dedektör konumları ideal olarak akış yukarı yönde, durma çizgisinden yaklaşık 8 saniye seyir mesafesinde (IN-dedektörü olarak bilinir) ve 3,5 saniye seyir mesafesinde (X-dedektörü olarak bilinir) seçilir. Elbette dedektör yerleşimleri saha şartlarına göre çalışma başarımını ciddi ölçüde etkilemeden önemli ölçüde idealden sapabilir (TRL, 2017).



Şekil 3.5 : Bir T kavşak için MOVA sisteminde dedektör yerleşim noktaları³ (TRL, 2017).

3.2.3.2 SCOOT

SCOOT (Split Cycle Offset Optimization Technique, Faz, Devre ve Ofset Eniyileme Tekniği) 1980’li yıllarda Birleşik Krallık’ta Ulaştırma ve Yol Araştırma Laboratuvarı (Transport And Road Research Laboratory, TRRL) tarafından geliştirilmiş merkezi bir adaptif trafik kontrol sistemidir (Robertson ve Bretherton, 1991). SCOOT uygulanmaya başladıktan sonra yıllar içerisinde birçok değişiklikler geçirmiş olmakla beraber, temel çalışma prensipleri korunmuştur (Stevanovic, Kergaye ve Martin, 2009). SCOOT kendisinden önce optimum sinyal sürelerini çevrimdışı olarak hesaplamakta kullanılan bir bilgisayar programı olan TRANSYT’in çevrimiçi bir devamı niteliğindedir. SCOOT Londra başta olmak üzere Pekin, Delhi ve Sao Paolo gibi birçok pek çok şehirde yaygın olarak kullanılmaktadır (TRLSoftware, 2018).

SCOOT sistemi bir yol ağı üzerinde sürekli olarak algılayıcılarla trafik talebini ölçerek sinyal sürelerini optimize eder. Sistem bir sonraki sinyal devresinde ortaya çıkacak durma sayılarını ve gecikmeyi tahmin etmek üzere yol üzerindeki algılayıcılardan elde edilen verilere dayalı olarak trafik davranışını çevrimiçi olarak modeller. En temel çalışma prensibi, mevcut trafik akışına olabildiğince az müdahale edecek şekilde

³ İngiltere’de trafik akışı yolun solundandır.

sinyal parametrelerini aşamalı olarak değiştirmektir. Bu nedenle, optimizasyon rutinleri, sinyal parametrelerindeki küçük değişikliklerin tahmin edilen başarımlar ölçütleri (gecikmeler ve durma sayıları) üzerindeki etkilerini değerlendirmekle sınırlı olup faz süreleri, ofsetler ve devre süreleri gibi sinyal parametreleri ayrı ayrı optimize edilir.

SCOOT sisteminde faz süresi optimizasyonu, bir kavşaktaki doygunluk değerini, kavşak kollarındaki azami doygunluk derecesini en aza indirerek dengeler. Sistemde doygunluk derecesi, akış profili'nin (trafik talebi) doygunluk kapasitesi'ne (boşalma hızı) oranının, etkin yeşil süre ile çarpılmasıyla hesaplanır. Her faz değişim zamanından 5 saniye önce çalışan faz süresi optimizasyonu, bir fazın 4 saniye erken, aynı sürede veya 4 saniye geç başlayıp başlamaması gerektiğine karar verir (Stevanovic ve diğerleri, 2009).

Ofset optimizasyonu, devrede bir kez, belirli bir kavşağın akış yukarısında ve akış aşağısında bulunan tüm normal bağlantılardaki (giriş, çıkış ve filtre bağlantıları hariç) durma sayılarını ve gecikmeleri tahmin etmek için akış profillerini kullanır. Bu tahminler, ofseti 4 saniye azaltmak, aynı bırakmak veya ofseti 4 saniye artırmak (daha yüksek devre süreleri için ± 8 saniyeye kadar) olmak üzere üç seçenek için yapılır. Bir kavşağın tüm kolları için tahmin edilen durmalar ve gecikmeler ağırlıklandırılır ve bir başarımlar endeksi (Performance Index, PI) elde etmek için toplanır. Ofset optimizasyonu, PI'yi en aza indiren bir ofset değerini seçer (Stevanovic ve diğerleri, 2009).

Devre süresi optimizasyonu, bir bölgede yer alan ve aralarında iyi bir koordinasyon beklenen kavşaklar arasında çalışır. Devre süresi optimizasyonu, koordinasyon bölgesindeki tüm bağlantıların (kavşaklar arasındaki) doygunluk derecesine bakar. Bu bağlantılardan herhangi biri ideal doygunluk seviyesindeyse (Bu değer kullanıcı tarafından yapılandırılabilir, ancak tipik olarak değeri %90'dır.), o düğüm için Minimum Pratik Döngü Süresi (Minimum Practical CYcle length, MPCY) küçük bir sabit adımla artırılır. Tüm bağlantılar ideal doygunluk seviyesinin altındaysa, o düğüm için MPCY süresi küçük bir sabit adımla azaltılır. Her düğüm için başlangıç MPCY süreleri kullanıcı tarafından belirlenir. Sabit adımlar, devre süreleri için sırasıyla 64 saniyeye kadar ± 4 , 72 ile 128 saniye arasında ± 8 ve 144 saniyenin üzerinde ± 16 saniyedir (Stevanovic ve diğerleri, 2009).

3.2.3.3 SCATS

SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System, Sidney Koordine Adaptif Trafik Sistemi), 1980'lerin başında Avustralya'nın Yeni Güney Galler eyaletindeki Karayolu ve Trafik Otoritesi (RTA) tarafından geliştirilen iki seviyeli hiyerarşik bir adaptif trafik sinyal kontrol sistemidir. SCATS, trafik talebi ve sistem kapasitesindeki değişikliklere yanıt olarak sinyal sürelerini ayarlamak için her şeritte, dur çizgisinin hemen önünde bulunan araç dedektörlerinden gelen bilgileri kullanır (Sims ve Dobinson, 1980).

SCOOT'un aksine, SCATS doğrudan eniyileme yapmaz. Bunun yerine, önceki devrelerde trafik akışındaki değişikliklere dayanarak sinyal sürelerini ayarlayan bir sezgisel geri bildirim sistemi olarak çalışır (Stevanovic ve diğerleri, 2009).

SCATS stratejisi, daha yüksek devre sürelerinin daha büyük kavşak kapasitesi anlamına geldiğini varsayar. Strateji, yaklaşım talebine orantılı faz sürelerini ve trafik hacimleri arttıkça (ve daha yavaş trafik akışları) için daha uzun ofsetlerin olması gerektiğini savunur.

SCOOT'a benzer şekilde, SCATS da çeşitli sinyal sürelerinin ayarlamalarını ayrı ayrı ele alır. İlk olarak, SCATS saha dedektörlerinden trafik ölçümlerini toplar ve doyumluk dereceleri (Degrees of Saturation, DS) ve bağlantı akışlarını (Link Flow, LF) hesaplar. Daha sonra, DS ve LF'leri kullanarak devre sürelerini, faz sürelerini ve ofsetleri hesaplar. Tüm sinyal süreleri, DS ve LF'ler için yeni değerler elde edildikten sonra her devre için bir kez hesaplanır (Stevanovic ve diğerleri, 2009).

Devre süresi ayarlaması, aralarında iyi bir koordinasyon olacağı tahmin edilen kavşaklar arasında uygulanır. Bir bölgedeki birbirlerine yakın devre süresi uzunluğu bulunan kavşaklar, aralarında eşleştirilerek bir alt koordinasyon sistemi elde edilir. Eşleştirmeler kalıcı veya şarta bağlı olarak (devre süresi farkı 10 sn'den küçükse gibi) geçici de olabilir. Bir seçenek olarak devre süreleri arasında 10 sn'den daha fazla fark olunca, bazı kavşaklar alt sistemin dışına da çıkarılabilir.

SCATS sisteminde faz süresi ayarlaması kayıtlı süre seçenekleri üzerinden yapılır. Sistem, tüm kavşak yaklaşımlarındaki maksimum doyumluk derecelerini (kullanıcılar tarafından tanımlanmış olan DS'ler) en aza indirecek şekilde bir kavşağın doyumluğunu ayarlar. SCATS'daki DS, kullanılan yeşil sürenin kullanılabilecek yeşil süreye oranı olarak hesaplanır. SCATS genellikle en uygun faz planını, Artımlı

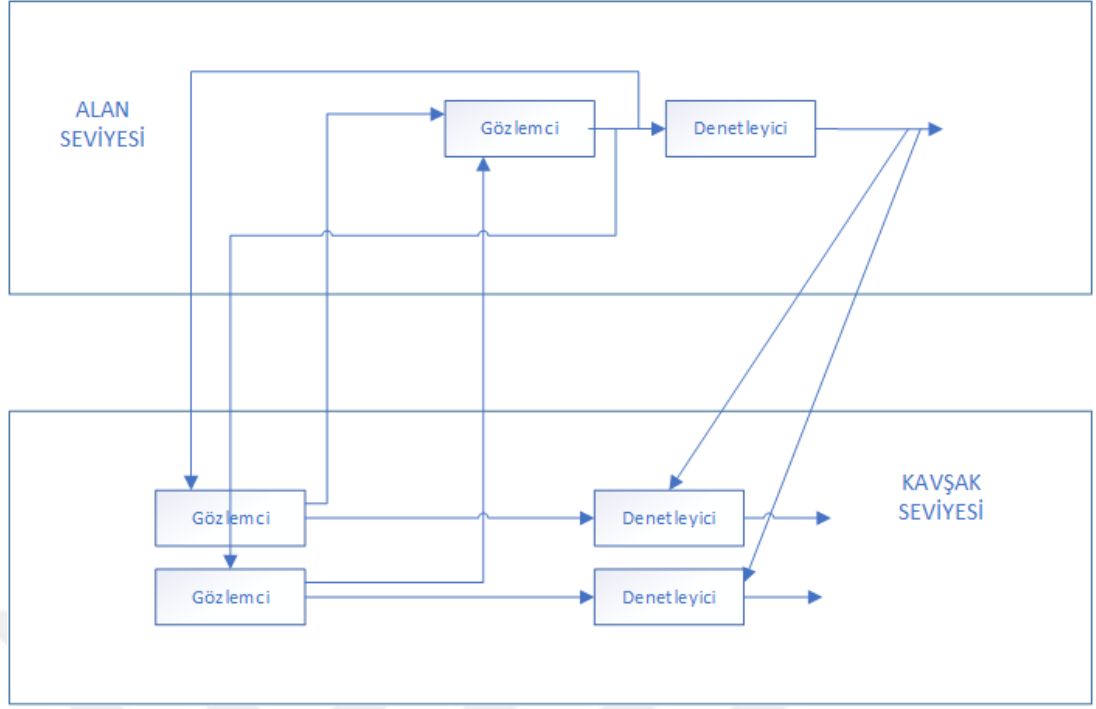
Bölünme Seçimi (Incremental Split Selection, ISS) adı verilen bir yöntemle seçer. ISS, her devrede faz süresi paylarını küçük miktarlarda artırma ve azaltma işlemidir; amaç en yoğun hareketin DS'sini azaltmaktır. Devre süresinin $\pm\%4$ 'ü hassasiyetinde değişebilen faz plan seçenekleri, ISS tablolarında saklanır (Stevanovic ve diğerleri, 2009).

SCATS'ta ofset ayarlamaları, bir çift ofseti ve bir çift devre süresi uzunluğunu temsil eden ofset planının (SCATS'ta Bağlantı Planı veya LP olarak adlandırılır) seçilmesi esasına dayanır. SCATS, iki kavşak arasındaki bir kesitte çeşitli trafik koşulları için iyi bir ilerlemeyi kolaylaştırmak üzere ofsetler sunan dört LP seçeneğine sahiptir. Bu planların ikisi çift yönlü iyi bir ilerleme sağlarken diğer ikisi geliş veya gidişin baskın şekilde daha yoğun olması durumunda iyi bir ilerlemeyi sağlar (Stevanovic ve diğerleri, 2009).

3.2.3.4 UTOPIA

Bir diğer eniyileştirmeye dayalı kentsel trafik kontrol sistemi UTOPIA'dır (Urban Traffic Optimization by Integrated Automation, Entegre Otomasyonla Kentsel Trafik Optimizasyonu). Bu kontrol sistemi 1984 yılında Torino'da geliştirilmiş ve uygulamaya konulmuştur. UTOPIA, büyük ölçekli trafik kontrolü teorisine dayanarak oluşturulmuş, bu nedenle sorunu (sıkışık trafik) daha küçük ve yönetimi daha kolay alt sorunlara bölmeyi amaçlamıştır. Sorunu alt sorunlara bölme işlemi topolojik bir kurala göre elde edilmiştir. Bu kural gereği, her alt sorun bir şehirden kontrol edilmesi gereken bir kavşak olarak tanımlanmıştır. Böylece, trafik sorunu kavşak düzeyi ve alan düzeyi olmak üzere iki düzeyde ele alınmıştır: Şekil 3.6'da bu iki kategori ve aralarındaki ilişki görülebilir (Şerban ve Frunzete, 2022).

Kavşak seviyesi, bu trafik kontrol sisteminin en alt seviyesini temsil eder. Bu seviyede, her kavşak için yerel bir kontrol çalışır ve bitişik kavşak veya alan seviyesiyle etkileşime girer. Her kavşak seviyesi sırasıyla gözlemci ve denetleyici olmak üzere iki bölüme ayrılır. Gözlemcinin rolü, kavşaktan geçen araç sayısına ve trafik ışığı renklerinin süresine dayanarak kavşağın durumunu tahmin etmektir. Denetleyicinin rolü, trafik ışığının her rengi için en uygun süreleri belirlemektir.



Şekil 3.6 : UTOPIA’da trafik sorununun farklı düzeylerde ele alınması (Şerban ve Frunzete, 2022).

Alan seviyesi, her kavşak seviyesiyle iletişim kurarak faaliyet gösterdiği alandaki trafiği kontrol etmektir. Ayrıca, alan seviyesi de benzer şekilde iki bölüme ayrılır: gözlemci ve denetleyici. Gözlemcinin rolü, araç sayısına göre tüm alandaki trafik koşullarını analiz etmek ve gerçek zamanlı olarak belirli bir yolu kullanacak araç sayısını tahmin etmektir. Denetleyicinin rolü, ortalama hızı ve araç sayısının doygunluğunu ayarlayarak ilgili alandaki trafiğin işleyişini optimize etmektir (Şerban ve Frunzete, 2022).

3.2.4 El ile kumandalı kontrol:

El ile kumandalı kontrol daha ziyade olağan dışı durumlarda kullanılan bir yöntemdir. Bu kontrol yöntemi bir kavşakta yönlere ait trafik talepleri olağan durumdan büyük sapmalar gösterdiğinde (örneğin kaza sonrası biriken trafiğin temizlenmesi veya kalabalık bir organizasyon sonrası bir bölgenin boşaltılması) uygulanır. Uygulanan metod bazen basitçe trafik polisi tarafından kavşaktaki ışıkların yanıp sönen (flaş) moduna alınması veya kavşaktaki tüm ışıkların karartılarak sinyalizasyonun iptal edilmesi olabilir. Daha gelişmiş bir yöntem olarak bazen uzaktan kavşak kamera ile izlenerek veya bir trafik polisi tarafından doğrudan gözlem yapılarak (genelde) belirli fazların süresi olağan süresinin çok üzerinde uzatılır ve olağan dışı

durum sona erdiğinde sistem tekrar trafik sinyal denetleyicisinde yüklü bulunan sinyal programına göre çalışmaya devam eder. Eğer kavşakta doğrudan kontrol sağlanacaksa trafik polisinin kullanması için bir elle kumanda paneli gereklidir. Eğer kavşak uzaktan el ile kumanda edilecekse merkezi bir yazılım ara yüzü üzerinden elle kontrol menüsü sağlanması yeterlidir.

3.3 Trafik Sinyal Kontrolünde Başarım Ölçütleri

3.3.1 Genel

Sinyalize edilmiş bir kavşağın değerlendirilmesine yönelik bazı etkililik ölçütlerini tanımlamak veya sinyalize kavşakta uygulanan operasyonların kalitesini tanımlamak zorlu bir süreçtir. Kapasite analizi ve benzetimlerde kullanılan birtakım ölçütler vardır ve bunların tümü, sinyalize bir kavşaktan geçen bir sürücünün deneyiminin bazı yönlerini sayısallaştırmaktadır. En yaygın kullanılan ölçütler araç başına ortalama gecikme, kuyruk uzunluğu ve durma sayısıdır. Bunların dışında yakıt tüketimi, kirletici gaz salımları (karbon dioksit vb.), maliyet (araç işletme maliyeti ve kişilerin zamanının parasal karşılığının toplamı), kişi başına gecikme, otobüs gecikmesi, seyahat süresi vb. birçok ikincil başarım ölçütü de kullanılmakta olup bunlar gecikme ve durma sayılarından türetilmektedir. Kapasite ve doygunluk derecesi ise daha temel başarım ölçütleridir (Akcelik, 1981). Bu bölümde kapasite, doygunluk derecesi, kuyruk uzunluğu, durma sayıları ve gecikme kavramlarına değinilmiştir.

3.3.2 Kapasite ve doygunluk derecesi

Kapasite; mevcut yol, trafik ve kontrol koşulları ile çevresel koşullar altında, belirli bir zaman diliminde kişilerin veya araçların bir noktadan veya yolun sabit bir kesitinden geçebileceği makul ve sürdürülebilir saatlik akım değerini ifade eder. Kapasite tanımı, makul beklentilere dayanır. Kapasite, talebin yeterli olduğu yoğun dönemlerde tekrarlanabilir şekilde ulaşılabilen bir akım değeridir; gözlemlenebilecek en yüksek akım değeri değildir. Akım değeri trafik hacmi ile ilişkili bir kavramdır. Trafik hacmi; belirli bir zaman aralığında bir şerit veya yol kesiti üzerinde belirli bir noktadan geçen toplam araç sayısını ifade eder. Trafik hacmi genellikle yıllık, günlük, saatlik veya daha küçük zaman dilimlerinde ifade edilir. Akım değeri ise bir saatten daha küçük bir zaman diliminde (ör. 15 dk.) ölçülen trafik hacminin saatlik eşdeğeri olarak ifade edilir (TRB, 2010).

Işıklı kavşaklar trafik akımlarını kesintiye uğratar. Bir trafik sinyal denetleyici, çakışan akımların bazılarına yol verirken diğerlerini durdurur. Dolayısıyla bir akım sadece kendisine ayrılan etkin yeşil sürede kavşağı kullanabilir. Örneğin, 90 sn'lik bir sinyal devresinin 30 sn'sini geçiş için etkin olarak kullanabilen bir akım, 90 sn'nin sadece 1/3'ünü geçiş için kullanabilecektir. Dolayısıyla bir saatin sadece 20 dk'lık kısmından bu akım yararlanabilecektir. Eğer akımın normalde saatlik maksimum akım değeri 1500 tş/sa ise ışıklı kavşak geçişinde akım değeri 500 tş/sa'ya düşer (TRB, 2010).

Sinyalize bir kavşakta duran araçlar yeşil yanıp da harekete geçince akımın sabit bir akım değerine ulaşabilmesi için bir süre geçmesi gerekir. Kuyruğun en önündeki aracın yeşili algılayıp buna tepki vermesi ve ön tekerleklerinin önündeki durma çizgisini geçmesi bir süre alır. İkinci sıradaki taşıtın ön tekerleklerinin durma çizgisini geçmesi ile birinci aracın ön tekerleklerinin durma çizgisini geçmesi arasındaki süre (*taşıt aralığı, headway*) sonraki araçlar arasındaki taşıt aralığından daha fazladır. İlk dört araç için taşıt aralığının gittikçe azaldığı ve dördüncü aracın geçişinden sonra taşıt aralığının genelde sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Dördüncü araçtan sonraki sabit taşıt aralığına *doygunluk taşıt aralığı* adı verilmektedir. Kuyrukta yeterince taşıt olması durumunda bir saatlik yeşil sürede söz konusu sabit doygunluk taşıt aralığı ile akışın devam etmesi durumunda geçebilecek olan taşıt sayısı *doygunluk akım değeri* olarak adlandırılır. Bu şartlarda oluşan akıma *doygunluk akımı* adı verilir. Çoğu zaman doygunluk akım değeri anlamında da doygunluk akımı kavramı kullanılır. Doygunluk akımı ile ilgili Eşitlik 3.1 geçerlidir (TRB, 2010).

$$s = \frac{3600}{h} \quad (3.1)$$

s = doygunluk akımı (doygunluk akım değeri, tş/sa)

h = doygunluk taşıt aralığı (sn)

Sonuç olarak sinyalize bir kavşakta her bir akımın kapasitesi, akımın doygunluk akımı ve etkin yeşil süresinin devre süresine oranıyla doğru orantılı olup Eşitlik (3.2)'de formülü verilmiştir.

$$c = N \cdot s \cdot \frac{g}{C} \quad (3.2)$$

Eşitlikte;

c = kapasite (tş/sa),

N = şerit sayısı,

s = doyunluk akımı (tş/sa),

g = etkin yeşil süre (sn),

C = devre süresi (sn)'dir.

Bir akım için diğcr önemli bir ölçüt *hacim-kapasite oranı* (TRB, 2010) veya *doygunluk derecesi* (Akcelik, 1981) olarak bilinir ve Eşitlik (3.3)'teki formül yardımıyla elde edilir. Akım değeri veya trafik hacmi *talep*, kapasite de *arz* olarak düşünülürse *doygunluk derecesi* arz talep dengesini gösteren önemli bir ölçüt olmaktadır.

$$X = \frac{V}{c} \quad (3.3)$$

Eşitlikte;

X = hacim-kapasite oranı veya doyunluk derecesi,

V = trafik hacmi veya akım değeri (tş/sa),

c = kapasite (tş/sa)'dır.

3.3.3 Kuyruk uzunluğu

Kuyruk en genel anlamda sinyalizc bir kavşakta geçmek için kendisine yeşil ışığın yanmasını bekleyen trafik kullanıcılarının sayısıdır (National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2015). Kuyrukta bekleyenlerin oluşturduğu toplam uzunluk da kuyruk uzunluğudur. Kuyruklanma genelde talebin kavşak kapasitesini aştığı durumlarda gözlenir. Kuyruklanma, hem önemli bir operasyonel ölçüt hem de bir kavşağın ve çevresinin tasarımı için dikkate alınması gereken bir unsurdur. Mevcut depolama uzunluğunu aşan kuyruklar, çeşitli işletme sorunlarına yol açabilir. Örneğin, düz gidenlerin şeridindeki bir kuyruk, dönüş şeridine giriş noktasını aştığında, dönüş şeridine erişimi engeller ve bu şeridin etkili bir şekilde kullanılmasını önler. Benzer şekilde, bir dönüş şeridindeki kuyruğun düz gidiş şeridine taşması, düz gidecek araçların hareketine engel olur. Bir kavşaktan geriye doğru uzanan kuyruklar, diğcr caddelere erişimi engelleyebilir ve en kötü durumda, geriye taşarak akış yukarıdaki kavşakları da bloke edebilir, böylece yan yollarda da kuyruk oluşumuna neden olabilir.

Kuyruk uzunluğu, maksimum kuyruk gerisi ve en yüksek olasılıklı kuyruk (örneğin, oluşması olası kuyrukların %95’lik diliminin sahip olduğu uzunluk) kuyruklanma ile ilgili kullanılabilecek ölçütlerdendir (TRB, 2010).

3.3.4 Durma sayıları

Trafik ışıkları çakışan yollar üzerindeki araçların geçişini düzenleyerek bir aracın durmasını veya diğer araçlara yol vermesini gerektirir. Bu durma, gecikmeye neden olur ve yakıt tüketimi ile taşıtların aşınması açısından bir maliyete sahiptir. Bu nedenle, oluşan duraklamalarla ilgili bilgiler, başarımın değerlendirilmesi ve yol kullanıcı maliyetlerinin hesaplanmasında faydalıdır. Bu ölçüm genellikle “*durma oranı*” terimiyle ifade edilir. Durma oranı; durma sayısının hizmet verilen araç sayısına bölünmesiyle elde edilir.

Bir kavşağa tali bir yoldan gelen araçların belli bir gecikmeye uğraması genellikle beklenir. Ancak, ana cadde boyunca seyahat eden sürücüler, durmadan ilerlemeyi bekler. Onların beklentisi, trafik ışıklarının bir dereceye kadar koordine edilmiş olması ve sırayla tüm kavşaklardan yeşilde geçmektir. Bu nedenle, durma oranı, koordineli sinyal sistemlerinin değerlendirilmesinde faydalı bir başarımlı ölçütüdür (TRB, 2010).

3.3.5 Gecikme

Gecikme, sürücünün deneyimiyle doğrudan ilintili olan ve kavşağı geçerken harcanan fazla zamanın bir ölçüsüdür. Kuyruk uzunluğu da faydalı bir ölçüt olup belirli bir kavşağın, akış yukarı kavşaktan gelen deşarjı ne zaman engellemeye başlayacağını belirlemede kritik öneme sahiptir. Durma sayısı, özellikle hava kalitesi modellerinde önemli bir girdi parametresi olup aynı zamanda sürücülerin ardışık kavşakları geçerken yaşadıkları deneyimle de doğrudan ilintilidir. Bu üçü arasında gecikme, sürücü tarafından doğrudan algılandığı için sinyalle kavşaklarda en sık kullanılan etkinlik ölçüsüdür. Gecikmenin tahmini, araçların rastgele gelişi, araçların durması nedeniyle kaybedilen zaman, aşırı doymuş akım koşulları vb. nedeniyle karmaşıktır. Bu bölümde, gecikmeleri tahmin etmek için bazı önemli modeller yer almaktadır. Bu kapsamda, farklı gecikme türleri ve gecikmeyi ölçmenin farklı yöntemleri anlatılacaktır.

3.3.5.1 Gecikme türleri

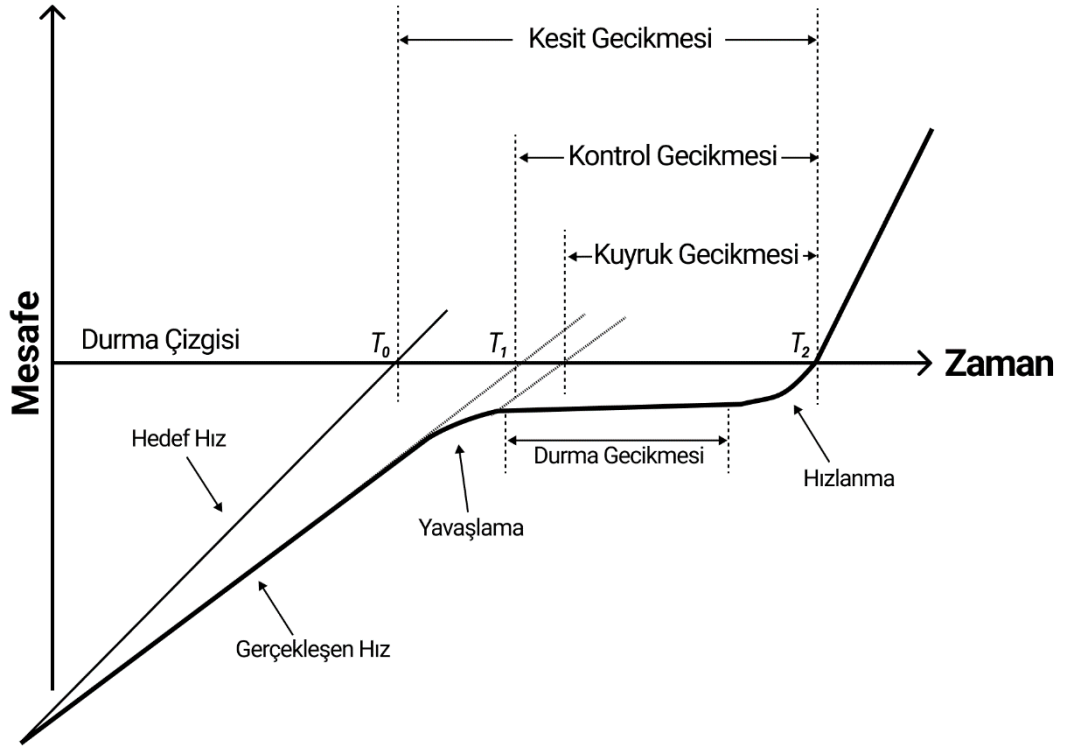
Birden fazla tanım ve eşik değeri kullanılması nedeniyle gecikme, trafik analiz araçları arasında karşılaştırılması en zor ölçümlerden biridir (TRB, 2010). Gecikmenin sahada ölçümü mümkün olmakla beraber, farklı gözlemcilerin, kullandıkları yöntemle bağlı olarak farklı sonuçlar elde etmesi mümkündür. Bu nedenle, birçok farklı amaç için tahmine dayalı modellerinin kullanılması daha elverişli olmaktadır. Gecikme birçok farklı yolla elde edilebilir. En sık kullanılan gecikme türleri aşağıda sıralanmıştır.

- Durma gecikmesi
- Yavaşlama-hızlanma gecikmesi
- Seyahat süresi gecikmesi
- Kuyruk gecikmesi
- Kontrol gecikmesi

Şekil 3.7’de durma gecikmesi, yavaşlama-hızlanma gecikmesi ve seyahat süresi gecikmesi arasındaki farklar bir aracın sinyalizasyon bir kavşaktan geçişi için bir çizimle gösterilmiştir. Şekilde aracın hedef (arzu edilen) konum-zaman eğrisi ile kırmızı ışıktaki durmayı içeren gerçek konum-zaman eğrisi ayrı ayrı gösterilmiştir.

Hedef konum-zaman eğrisi aracın yol ve trafik koşullarının elvermesi durumunda tercih edeceği hız ile seyahat etmesi durumunu gerçek konum-zaman grafiği ise trafik koşullarından dolayı daha yavaş hızın tercih edilmesinden, durmaktan, yavaşlamak ve hızlanmaktan kaynaklı gecikmeleri içermektedir.

- Durma Gecikmesi: Durma gecikmesi, bir aracın fiilen durduğu süreyi yansıtır. Bir aracın hızı belli bir değerin altına düştüğünde bu fiilen durma kabul edilir. Aynı şekilde duran bir araç hızını belli bir değerin üstüne çıkarınca fiilen hareket etmiş sayılır. Bu sebeple bir durmanın başlangıcı ve sonu genellikle hız eşiklerine dayanır ve bu eşikler kullanılan yazılımsal araçlara göre farklılık gösterebilir. Bazı durumlarda, eşik hızları kullanıcı tarafından da tanımlanabilir.



Şekil 3.7 : Sinyalize bir kavşaktan geçmekte olan bir aracın maruz kaldığı gecikme türleri (TRB, 2010).

- Kuyruk gecikmesi: Kuyruk gecikmesi, bir aracın kuyrukta harcadığı süreyi yansıtır. Bir kuyruklanma durumunun oluşup oluşmadığı farklı yazılımsal araçlar tarafından farklı şekilde tanımlanabilmektedir. Kuyruklanma ile ilgili yazılımsal araçların kullandığı özellikler arasında hız, ivme, araçlar arasındaki aralık ve söz konusu özellikleri paylaşan araç sayısı yer almaktadır.
- Kontrol gecikmesi: Kontrol gecikmesi, bir trafik kontrol cihazının varlığından kaynaklanan gecikmedir. Bir kavşağa yaklaşırken araçların yavaşlaması, kavşak yaklaşımında durma süresi, araçların bir kuyruktan geçerken harcadığı süre ve kavşaktan geçtikten sonra istenen hıza ulaşmaları için gereken süreyi içerir.
- Kesit gecikmesi: Kesit gecikmesi, bir yol kesimin hedef hızda geçmek için gereken süre ile aynı yol kesimini gerçekleştiren hız ile geçmek için harcanan süre arasındaki fark olarak temsil edilir.

3.3.5.2 Gecikme bileşenleri

Farklı analitik gecikme modelleri gecikme değerini elde edebilmek için öncelikle gecikmeyi alt bileşenlerine ayırmışlardır. Tekdüze gecikme aşağı yukarı çoğu modelde mevcut olan bir bileşen olup, elde edilme formülü de çoğu modelde büyük benzerlik gösterir. Rastgele gelişlerden kaynaklı gecikme ise farklı modellerde farklı adlandırılabilen bazen başka alt bileşenlere ayrılabilir (ör. rastgele taşma gecikmesi, sürekli taşma gecikmesi vb.). Bu çalışmada HCM'nin kullandığı artımlı gecikme terimi tercih edilmiştir.

- Tekdüze Gecikme: Bir kavşağa düzenli varışlar ve kavşakta istikrarlı bir trafik akışı olması (hiçbir devre süresi arızası bulunmaması) varsayımına dayanan gecikmedir. İstikrarlı akışta hiçbir sinyal devresi arızası yoktur, yani hiçbir araç kavşaktan geçebilmek için birden fazla yeşil fazını beklemek zorunda kalmamıştır.
- Artımlı Gecikme: Trafikte araç gelişleri gerçekte tekdüze değildir. Her bir devrede trafik talebinde dalgalanmalar olabilir. Rastgele gelişlerden kaynaklı olarak devre bazlı talep dalgalanmalarının kapasiteyi zaman zaman aşmasından (yani, devre süresi arızası) kaynaklanan gecikmeleri ve analiz dönemi boyunca devam eden aşırı doygunluktan kaynaklanan gecikmedir. Bu gecikme bazen rastgele gecikme olarak da adlandırılır (TRB, 2010).

3.3.5.3 Webster gecikme modeli

Webster 1958 yılında “Pilot Model Automatic Computing Engine” adını verdiği bir benzetim programının yardımıyla, bir kavşaktaki trafik ve trafik sinyal cihazı davranışının benzetimini yaparak, doygunluk altı koşullarda saha ölçümleriyle oldukça iyi örtüşen bir gecikme formülü önermiştir. Webster, kendisinden sonra önerilen gecikme formüllerine temel oluşturacak bu modelle elde ettiği gecikme sonuçlarını sabit süreli ve trafik uyarmalı olarak çalışan birçok kavşaktan elde ettiği saha ölçümleriyle doğrulamıştır. Önerdiği modelde bulunan üç gecikme bileşeninin ikisi teorik olarak elde edilmiştir. Üçüncü bileşen ise modelin sahadan elde edilen ölçümlerle örtüşmesi için önerilen pratik bir düzeltme bileşenidir. Modelde kullanılan gecikme formülü Eşitlik (3.4)'te verilmiştir (Webster, 1958).

$$d = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0,65 \left(\frac{C}{q^2} \right)^{1/3} x^{2+5\lambda} \quad (3.4)$$

d = kavşağın belli bir kolu için ortalama araç gecikmesi (sn),

C = devre süresi (sn),

q = trafik hacmi (tş/sn),

λ = Söz konusu kavşak kolunun efektif olarak yeşil olduğu sürenin devre süresine oranı,

s = doyumluk akımı (tş/sn),

x = doyumluk derecesi. Kavşaktaki geçen trafik hacminin kavşaktan geçebilecek azami trafik hacmine oranıdır. $x = q/\lambda s$

Eşitliğin birinci bileşeni tekdüze varışlar için gecikmeyi vermektedir. Tekdüze varışlarda araçların varışları arasında geçen süre sabit varsayılmaktadır. Ancak trafikte varışlar genelde tekdüze olmayıp gelişigüzeeldir. Bu nedenle gelişigüzel varışlar için ikinci bileşen formüle eklenmiştir. Gelişigüzel varışları modellemek için literatürde bazı çalışmalar yapılmış olup çoğunda araç varışlarının Poisson dağılımına uyduğu varsayılmıştır. Gelişigüzel varışların söz konusu olması durumunda -tekdüze varışların aksine- bazı araçlar geldikleri devrede kavşağı terk edememektedir. Dolayısıyla gelişigüzel gecikme bileşeni bu durumdan kaynaklı gecikmeleri de içermektedir. Modelde araçlar gelişigüzel bir şekilde kuyruğa eklenmekte olup sabit aralıklarda kuyruktan ayrılmaktadırlar. Kuyruğu boşaltma hızı sabit olup doyumluk akımı olarak tanımlanmaktadır. Eşitlikteki üçüncü bileşen ise tamamen saha ölçümlerine dayalı olarak önerilen bir düzeltme terimidir. Webster çalışmasında söz konusu bileşenin elle hesaplanabilmesi için x, λ, q ve C 'nin farklı değerlerine karşılık gelen üçüncü bileşen değerlerini bir tablo halinde de paylaşmıştır.

3.3.5.4 Akçelik gecikme modeli

Akçelik'in gecikme modelinde tekdüze gecikme bileşeni Webster ile aynı olmakla beraber doyumluk üstü trafik talebinin oluşturduğu kalıntı araç kuyruklarının neden olduğu gecikme farklı tanımlanmıştır. Kalıntı kuyruklar doyumluk altı koşullarda birkaç devrede eriyebilirken doyumluk üstü koşullarda çok daha uzun sürede eriyebilmektedir. Akçelik doyumluk üstü koşullarda ($x > x_0$) ortalama kalıntı kuyruk

uzunluğu için Eşitlik (3.5)'teki gibi bir formül önermiştir. Doygunluk altı koşullarda kalıntı kuyruk uzunluğu sıfır kabul edilir (Akcelik, 1981).

$$N_0 = \begin{cases} \frac{cT_f}{4} \left(z + \sqrt{z^2 + \frac{12(x - x_0)}{cT_f}} \right) & x > x_0 \end{cases} \quad (3.5)$$

N_0 = ortalama kalıntı kuyruk uzunluğu (tş). Eğer birden fazla şeritte araçlar birikiyorsa şeritlerde biriken toplam araç sayısıdır.

c = Kapasite (tş/sa).

T_f = Gözlem aralığı (sa). Gözlem aralığı boyunca ortalama akım oranının değişmediği varsayılır.

cT_f = T_f süresi boyunca kuyruktan boşalabilecek azami araç sayısı.

$x = q/c$, doygunluk derecesi.

x_0 = Doygunluk derecesinin bu değerın altında olduğu durumlarda ortalama kalıntı kuyruk uzunluğu sıfır olarak kabul edilir ve Eşitlik (3.6) yardımıyla hesaplanır.

$$x_0 = 0,67 + sg/600 \quad (3.6)$$

Eşitlikte;

sg = devre süresi boyunca geçebilecek azami araç sayısı,

s = doygunluk akımıdır.

Gecikme ise Eşitlik (3.7)'teki formül yardımıyla hesaplanır.

$$d = \frac{qC(1 - u)^2}{2(1 - y)} + N_0 \cdot x \quad (3.7)$$

Eşitlikte;

d = toplam gecikme (tş-sa/sa),

q = akım değerı veya saniyede gelen taşıt sayısı (tş/sn),

C = devre süresi,

u = yeşil süre oranı, g yeşil süre ise $u = g/C$,

y = akış oranı ($= q/s$),

N_0 = ortalama kalıntı kuyruk uzunluğu (t_s)'dur.

3.3.5.5 HCM gecikme modeli

HCM modelinde gecikme Eşitlik (3.8)'de gösterildiği gibi *tekdüze gecikme*, *artımlı gecikme* ve *başlangıç kuyruk gecikmesi* olmak üzere üç bileşenden oluşmaktadır.

$$d = d_1(PF) + d_2 + d_3 \quad (3.8)$$

Eşitlikte;

d = kontrol gecikmesi (sn/ t_s),

d_1 = tekdüze gecikme (sn/ t_s),

PF = ilerleme ayarlama faktörü,

d_2 = artımlı gecikme (sn/ t_s) ve

d_3 = başlangıç kuyruk gecikmesidir (sn/ t_s).

Bir şerit grubu için (1,0'dan küçük veya ona eşit) hacim/kapasite oranı (x) tekdüze gecikmeyi temsil eder. Eşitlik (3.9), tamamen tekdüze varışlar ve sabit akış varsayımı altında bir kontrol gecikmesi tahmini sağlar.

$$d_1 = \frac{0,5C(1 - g/C)^2}{1 - [\min(1, x) \frac{g}{C}]} \quad (3.9)$$

Eşitlikte;

d_1 = tekdüze gecikme (sn/ t_s),

x = şerit grubu için hacim/kapasite (v/c) oranı (*doygunluk derecesi* olarak da adlandırılır),

C = devre süresi (sn),

g = şerit grubu için etkin yeşil süredir (sn).

Eşitlik (3.10), düzensiz varışlar, bireysel döngü hataları ve uzun süreli aşırı doyma dönemlerinin neden olduğu artımlı gecikmeyi hesaplar.

$$d_2 = 900T[(x - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{8kIx}{cT}}] \quad (3.10)$$

Eşitlikte;

c = şerit grubunun kapasitesi (tş/sa),

k = uyarımlı kontrol için artımlı gecikme ayarı,

I = akış yukarı sinyallerden kaynaklanan artımlı gecikme ayarı,

x = şerit grubu için hacim/kapasite oranı ve

T = analiz periyodunun süresidir (sa).

Eşitlik (3.10)'da yer alan uyarımlı kontrol için artımlı gecikme ayarı, kontrolörün gecikme üzerindeki etkisini hesaba katar. Sabit süreli sinyaller için $k = 0,50$ değeri uygulanır.

Akış yukarı sinyallerden filtrelenmiş varışların etkileri, Eşitlik (3.10)'daki artımlı gecikme ayarlama faktörü I tarafından dikkate alınır. İzole bir kavşak için $I = 1.0$ değeri kullanılır.

4. TRAFİK IŞIKLARINDA TOPLU TAŞIMA ÖNCELİĞİ

Toplu Taşıma Önceliği (TTÖ), toplu taşıma araçlarının (genellikle otobüsler veya tramvaylar) ışıklı kavşaklardan geçişini kolaylaştıran bir uygulama stratejisidir. TTÖ'nün hedefleri, toplu taşıma araçlarının sefer zaman çizelgesine uyumunu artırmak ve toplu taşıma seyahat sürelerinin verimliliğini artırmak ve aynı zamanda toplu taşıma araçlarının normal trafik akışı üzerindeki etkilerini en aza indirmektir.

Toplu taşıma önceliği dünyada birçok yerde uygulanmış ve faydaları raporlanmıştır. ABD (Smith ve diğerleri, 2005) ve Almanya'dan (König, Heipp ve Seifert, 2016) bazı örnekler aşağıda listelenmiştir.

- Tacoma/Washington'da TTÖ ve sinyal optimizasyonunun birleştirilmesi, iki koridorda toplu taşıma aracı gecikmesini yaklaşık %40 oranında azaltmıştır.
- TriMet⁴ (Portland/Oregon), TTÖ kullanarak hatta bir otobüs ilave etmekten kurtulmuş ve seyahat süresinde %10'luk bir iyileşme, seyahat süresi değişkenliğinde ise %19'a varan bir azalma sağlamıştır. Artan güvenilirlik sayesinde, TriMet planlanan dinlenme süresini azaltabilmiştir.
- Chicago'da, PACE⁵ otobüsleri ortalama olarak %15'lik (üç dakika) bir seyahat süresi azalması elde etmiştir. Gerçek seyahat süresi azalmaları, günün saatine bağlı olarak %7 ile %20 arasında değişiklik göstermiştir.
- Los Angeles'ta TTÖ ile otobüs seyahat sürelerinde %25'e varan azalma yaşanmıştır.

⁴ Portland/Oregon bölgesinin toplu taşıma işletmecisi.

⁵ Chicago bölgesinde bir banliyö toplu taşıma işletmecisi.

- M n h'te işletmesi MVG tarafından yapılan tramvay hatlarının tamamı aşamalı olarak 1994-2004 yılları arasında “MVG Hızlandırma Projesi” kapsamında hızlandırılmıştır. Proje sayesinde 16 adet tramvaylık tasarruf sağlandığı raporlanmıştır. O tarihlerde hızlandırma projesi olmaması durumunda 129 tramvayla sağlanacak yolculuk konforu ve kalitesi 113 ara lık bir filoyla sağlanmıştır. Proje kapsamında yapılan hızlandırma çalışmalarında genel olarak üç yöntemden yararlanılmıştır. Bunlar trafik ı ıklarında toplu taşıma araçlarına öncelik verilmesi, toplu taşıma araçlarına (tramvay ve otobüs)  zel ayırık şeritler yapılması, durak ceplerinin kaldırılması ve durakların yeniden yapılmasıdır.
- M n h'te 18 otobüs hattının hızlandırılması sayesinde 16 otobüs ve 122 dakika seyahat süresi tasarruf edilmiştir. Hızlandırma sayesinde M n h'te MVG i letmesindeki otobüs hatlarında %7 civarında dakiklik artı ı sağlanmıştır.

Toplu taşıma önceliğinin sağlanması hem otobüslere özel yolların veya şeritlerin tahsis edilmesi gibi yol odaklı olarak hem de trafik ı ıklarında otobüslere geçiş önceliği verilmesi gibi kavşak odaklı olarak sağlanabilir. Yol odaklı çözümlerde, sadece otobüslerin kullanacağı ayrılmış şeritler ( stanbul'da D100 karayolunda Metrobüs uygulaması gibi) söz konusudur. Bu  zel şeritler bazen trafik akımı ile aynı yönde bazen de ters yönde olabilmektedir. Yol odaklı çözümler çoğunlukla ilave arazi kullanımını gerektiren uygulamalardır. Dolayısıyla ilave arazi kullanımının çoğunlukla mümkün olmadığı kentsel bölgelerde bir çözüm seçeneği olamamaktadırlar. Tezin kapsamı gereği ilave arazi kullanımını gerektirmeyen ve akıllı ulaşım sistemleriyle sağlanabilen kavşak odaklı toplu taşıma önceliği çözümleri ele alınmıştır.

4.1 Kav ak Odaklı Toplu Taşıma  nceliği Uygulamaları

Kav ak odaklı TT  uygulamaları toplu taşıma araçlarına trafik ı ıklarında geçiş önceliği sağlanması uygulamalarıdır. Bu uygulamalar etken ve edilgen olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

4.1.1 Edilgen toplu taşıma  nceliği

Herhangi ilave bir donanım veya yazılım yatırımı olmaksızın gerçekleştirilen ve algılama sistemlerini içermeyen uygulamalardır. Bu uygulamalarda toplu taşıma

önceliği toplu taşıma güzergahları bilgisi ve yolcu yoğunlukları göz önüne alınarak planlanır ve toplu taşıma aracının algılanmasına bakılmaksızın sürekli olarak her sinyal devresinde uygulanır. Söz konusu uygulamalarda yeşil süreleri ve ilgili diğer parametreler toplu taşıma araçlarının kullandığı yönlerin gecikmesini veya durma sayılarını azaltacak şekilde planlanmaktadır. Örneğin söz konusu yönlerin yeşil süreleri görece olarak diğer yönlere göre daha fazla olmaktadır. Eğer peş peşe kavşaklar söz konusu ise kavşaklar arası koordinasyon toplu taşıma araçlarının hızı ve duraklardaki ortalama bekleme süreleri dikkate alınarak sağlanır. Genel olarak, güzergahlar, yolcu yoğunlukları, sefer saatleri ve duraklama süreleri iyi bilinip toplu taşıma operasyonları öngörülebilir olduğunda, edilgen öncelik stratejileri kullanışlı olabilir. Aksi takdirde trafik ışıkları toplu taşıma araçlarının akışı için koordine edildiğinden, diğer araçlar gereksiz gecikmeler, durmalar ve bunlardan kaynaklı memnuniyetsizlikler yaşayabilir (Smith ve diğerleri, 2005).

4.1.2 Etken toplu taşıma önceliği

Etken öncelik uygulamasında algılama sistemi yardımıyla toplu taşıma araçlarının geçiş istekleri gerçek zamanlı olarak alınır ve araca geçiş önceliği sağlanır. Trafik sinyal denetleyicisi veya daha genel olarak trafik kontrol sisteminin yeteneklerine bağlı olarak birçok farklı etken öncelik yöntemi uygulanabilir. En yaygın kullanılan yöntemler erken yeşil süresi verme (kırmızıyı erken kesme) ve yeşil süresi uzatmadır. Ancak bununla beraber faz atlama yapma, faz ekleme veya özel toplu taşıma fazı çalıştırma gibi yöntemler de kullanılmaktadır.

Aşağıda bahsi geçecek olan tüm etken toplu taşıma önceliği uygulamalarının kavşaklar arası koordinasyonu bozmadan uygulanması beklenir. Özellikle NTCIP 1211(NTCIP Joint Committee, 2017)'de bu özellik toplu taşıma önceliği uygulamasının tanımında yer alan bir şarttır. Bu şartın sağlanamaması durumunda yapılan uygulama toplu

taşıma önceliği (İng. priority) değil toplu taşıma geçiş üstünlüğü (İng. preemption⁶) olarak adlandırılır.

4.1.2.1 Yeşil süresi uzatma

Yeşil Süresi Uzatma, toplu taşıma aracının kavşağı beklemeden terk edebilmesi için toplu taşıma aracı kavşağa yaklaştığında ilgili yönün yeşil süresini uzatma yöntemidir. Bu yöntem sadece toplu taşıma aracı kavşağa yaklaştığında, geldiği yöne yeşil ışık yanmakta ise kullanılabilir. Bu yöntemi etkili kılan ve çok tercih edilmesini sağlayan sebep kayıp süreler yol açan ilave geçiş/temizleme adımlarına (faz geçişlerinde çalıştırılan yanıp-sönen yeşil, sarı, kırmızı-sarı gibi geçiş adımları) ihtiyaç duymamasıdır. Bu sayede diğer yöntemlere kıyasla hem toplu taşıma aracının gecikmesi hem de çakışan yönlerdeki diğer araçların gecikmesi en az olur (Al-Sahili ve Taylor, 1996; Smith ve diğerleri, 2005).

4.1.2.2 Erken yeşil süresi verme (kırmızıyı erken kesme)

Erken Yeşil Süresi Verme veya Kırmızıyı Erken Kesme olarak bilinen uygulama diğer fazlardan birini sonlandırıp toplu taşıma aracının bulunduğu yöne erken yeşil süresi vermektir. Bu uygulama toplu taşıma aracı kavşağa yaklaştığında bulunduğu yöne kırmızı yanmakta ise uygulanmaktadır. Yeşili erken sonlandırılacak yönlerde bir trafik güvenliği sorunu yaşanmaması için asgari yeşil süreler tanımlanmış olmalıdır (Al-Sahili ve Taylor, 1996).

4.1.2.3 Faz ekleme

Normal faz düzeninde açılmayan öncelikli bir fazın belli bir devrede açılması “Faz Ekleme” olarak adlandırılır. Bu uygulama bir toplu taşıma aracının algılanması ve

⁶ Preemption (Geçiş Üstünlüğü): NTCIP 1202:2005'e göre, demiryolu geçitlerine, acil durum araçlarının geçişine, toplu taşıma araçlarının geçişine ve diğer özel görevlere hizmet sağlamak amacıyla trafik sinyallerinin normal kontrolünün dışında -bu özel görevlerin ihtiyaçlarını karşılamak için normal trafik kontrolünün sonlandırılmasını gerektiren- özel bir sinyal kontrol moduna aktarılmasıdır.

ilgili öncelikli faz talebini etkinleştirmesi ile gerçekleşir. Karşı yönde cadde kenarlarında bulunan otobüs garajlarına gidecek olan otobüslere özel olarak sola dönüş fazlarının talebe bağlı açılması bu uygulamaya örnek olarak verilebilir (Smith ve diğerleri, 2005).

4.1.2.4 Faz atlama

Toplu taşıma aracı fazına öncelik verebilmek için normal faz düzeninde, sırası gelmiş olan düşük öncelikli bir fazın çalışmasının ertelenerek, öncelikli fazın açılmasıdır. Bazı uygulamalarda ertelenen veya erken sonlandırılan fazlardan kaynaklı kayıp süreler sonraki devrelerde telafi edilerek, öncelik verilmeyen yönlerdeki trafiğin olumsuz etkilenmesi sınırlandırılmaktadır (Al-Sahili ve Taylor, 1996).

4.1.2.5 Trafik uyarmalı toplu taşıma fazı

Trafik uyarmalı toplu taşıma fazları, yalnızca bir toplu taşıma aracı kavşakta tespit edildiğinde etkinleştirilir. Bir örnek, toplu taşıma araçlarına ayrılmış bir sola dönüş şeridi olabilir. Sola dönüş fazı, yalnızca şeritte bir toplu taşıma aracı tespit edildiğinde etkinleştirilir. Bir başka örnek, toplu taşıma aracının normal trafik akışından önce akış aşağı yöndeki bağlantıya girmesine izin veren bir kuyruk atlama fazının kullanımıdır. Kuyruk atlama fazı, yalnızca toplu taşıma aracı için olan ve bu aracın kavşakta yeşil ışık bekleyen diğer trafiğin önüne geçmesine olanak tanıyan bir sinyal (örneğin, beyaz bir çubuk) gösterir (Smith ve diğerleri, 2005).

4.1.3 Toplu taşıma önceliğinde yenilikçi yaklaşımlar

Toplu taşıma araçlarına öncelik sağlamak için yukarıda bahsi geçen geleneksel yöntemlerin dışında, son yıllarda birtakım yenilikçi çözümler de önerilmiştir. Otobüsle aynı yöndeki veya karşı yöndeki bir şeridi akıllı ulaşım sistemleri desteğiyle geçici süreli olarak toplu taşımaya ayırmak ve bağlantılı araç teknolojilerinden yararlanarak toplu taşımaya öncelik sağlamak en çok öne çıkan yaklaşımlardır.

4.1.3.1 Geçici toplu taşıma şeridi uygulaması

Geçici toplu taşıma şeridi uygulaması 1990'lı yıllarda toplu taşıma önceliği stratejilerine bir yenilik olarak eklenmiş ve Birleşik Krallık başta olmak üzere birçok ülkede uygulama alanı bulmuştur. Söz konusu uygulama, otobüslere ayrık tam bir şerit ayrılmadığı durumlarda (yeterince yol alanı bulunmaması gibi nedenlerle) genel

trafiğin kullanımında olan bir şeridin ön sinyal kurularak geçici olarak otobüslere tahsis edilmesidir.

Otobüsler için ayrı bir şerit bulunmadığı durumlarda otobüsler genel taşıt trafiğine katılarak kavşaklardan geçmekte ve diğer taşıtlarla aynı gecikmeleri yaşamaktadır. Işıklarda otobüs önceliği uygulaması bulunsa dahi bu durumda otobüsler kendileri için açılmış olan yeşil ışıktan, önlerinde birikmiş olan taşıt kuyruğundan dolayı yararlanamamaktadır. Bu durumun önüne geçmek için Şekil 4.1’de görüldüğü gibi otobüs kavşağa yaklaşırken algılanmakta ve ön sinyal olarak adlandırılan sinyaller sayesinde diğer taşıt trafiği durdurularak otobüs ile kavşak arasındaki alan boş bırakılarak otobüsün ana sinyale daha hızlı ulaşması ve kendisi için açılmış olan yeşil ışıktan yararlanması sağlanmaktadır (Wu ve Hounsell, 1998).

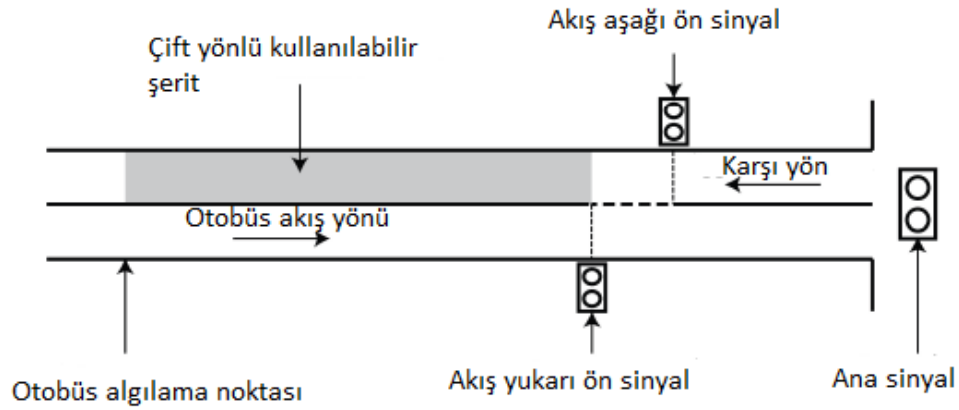


Şekil 4.1 : Londra'da bir ön sinyal uygulaması (Wu ve Hounsell, 1998).

Bu yöntemle toplu taşıma gecikmeleri azaltılırken, aynı zamanda bir yan etki olarak kavşak kapasitesi düşürülmektedir ve genel taşıt trafiğinde gecikmelere yol açılmaktadır. Toplu taşıma taşıt gecikmesi ile kavşak kapasitesi arasındaki bu ödünleşim dengesini doğru kurabilmek için sinyal sürelerinin hassas bir şekilde ayarlanması da birçok durumda tek başına yeterli olmayıp ilave gerçek zamanlı önlemler alınması gerekmiştir. He ve diğ. (2016) tarafından, bahsi geçen sistemin gerçek zamanlı bir adaptif sistemle desteklenmesi önerilmiştir. Trafik hacimleri, otobüslerin doluluk bilgisi (geçmiş istatistiksel bilgi) ve otobüslerin sefer sıklığını parametre olarak kullanan bu algoritma ile kişi başına ortalama gecikmelerin klasik ön

sinyalli statik bir sisteme göre zirve dışı saatlerde birkaç saniye azaltılabildiği gösterilmiştir (He, Guler ve Menendez, 2016).

Aynı kontrol yönteminin arazi kısıtlamasının maksimum olduğu tek şeritli yollardan oluşan bir kavşakta da uygulanabilmesi için Guler ve diğ. (2015) tarafından oldukça yenilikçi bir yöntem daha önerilmiştir. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi bu yöntemde otobüslerin gidiş yönündeki ön sinyallere ilave olarak karşı yönde de ön sinyal konulması ve hem gidiş yönündeki şeridin hem de karşı yöndeki şeridin geçici süreliğine otobüslere ayrılması önerilmiştir. Yöntemde otobüs kavşağa yaklaştığında her iki taraftaki ön sinyaller genel trafik için kırmızıya döner ve otobüslerin karşı şeritten ilerleyerek kavşağı geçtikten sonra kendi şeridine geçmesi beklenir. Otobüs manevrasını tamamladığında ön sinyaller yeşile döner ve genel trafiğin hareket etmesine izin verilir. Bu yöntem oldukça yenilikçi olmasına rağmen uygulamada birçok kısıtlamaya tabidir. Kavşak doygunluk sınırına yaklaştığında, otobüs sıklığı 2-3 dakika aralığının altına düştüğünde veya karşı yönden gelip dönen taşıtların oranı belli bir oranın üstüne çıktığında (%25) bu kontrol yönteminden verim alınamadığı belirtilmiştir. Ayrıca bu yöntem tanımı gereği sadece tek şeritli yollar için önerilmiştir (Guler ve diğerleri, 2015).



Şekil 4.2 : Tek şeritli yollarda karşı yön şeridinin geçici olarak otobüse tahsis edilmesi uygulaması (Guler ve diğerleri, 2015).

4.1.3.2 Bağlantılı araçlar ortamında toplu taşıma önceliği yaklaşımları

Bağlantılı araçlar teknolojisinin hızlı gelişmesi son yıllarda birçok ulaşım araştırmacısının yönünü bu alana çevirmiştir. Özellikle trafikteki taşıtların tam konumunu, hızını vb. bilgilerinin bu teknolojiyle alınabilmesi ulaşım çalışmalarında

birçok fırsatlar sunmaktadır. Toplu taşıma önceliği alanında da bu teknolojiyi kullanan bazı çalışmalar son yıllarda yayınlanmıştır. Hu ve diğ. (2014) bağlantılı araçlar ortamında, çakışan yönlerdeki gecikmeyi fazla artırmadan otobüs gecikmesini azaltan bir algoritma önermişlerdir. Algoritma yalnızca seferine geç kalan taşıtlara öncelik vermekte ve öncelik ölçütü olarak da kişi başına ortalama gecikmeyi kullanmaktadır. Böylece geleneksel yöntemlerdeki çakışan yönlerde oluşan ilave taşıt gecikmesi en aza indirilmeye çalışılmaktadır. Kişi başına gecikme ölçütünün sağlanması durumunda geleneksel bir şekilde yeşil süresinin doğrudan artırılması yerine mevcut yeşil süresi bölünerek bir kısmı otobüsün varış anına denk getirilmektedir. Çalışmada geleneksel toplu taşıma önceliği uygulamalarından farklılaşan en önemli unsur, toplu taşıma taşıtı ile trafik sinyal denetleyicisi arasında karşılıklı bir haberleşme ve iş birliği içermesidir. Çalışmada toplu taşıma taşıtının sefer çizelgesi bilgisinden yararlanılarak sadece geciken taşıtlara öncelik sağlanmakta ve kavşakta yeşil ışığa denk gelebilmesi için taşıta belli bir hızda seyretmesi gerektiği bilgisi iletilmektedir. Çalışmada taşıttaki yolcu sayısı bilgisinin bağlantılı araçlar ortamında sağlandığı varsayılmıştır (Hu ve diğerleri, 2014).

Hu ve diğ. (2015) yukarıda bahsi geçen izole kavşak çözümünü ardışık kavşaklarda uygulanabilecek şekilde genellemişlerdir. Çalışmada problem, standart dal ve sınır yöntemiyle çözülen İkili Karışık Tamsayılı Doğrusal Programlama (BMILP) olarak formüle edilmiştir. Model için ölçüt olarak önceki çalışmada olduğu gibi kişi başına gecikmeyi en aza indirme benimsenmiştir. Öncekine benzer şekilde, bu çalışmada da otobüs ile trafik sinyal denetleyici arasında bir iş birliği söz konusudur ve yine benzer şekilde otobüs varışlarında yeşil süresi bölünüp kaydırılarak varış anına denk getirilmektedir. Önerilen algoritma analitik testler ve benzetim programı yardımıyla geleneksel otobüs önceliği sistemleri ile kıyaslanmıştır. Benzetim programıyla yapılan testlerde önerilen algoritmanın geleneksel otobüs önceliği sistemlerine göre %50'nin üzerinde otobüs gecikmesini azalttığı raporlanmıştır. Burada önemli bir husus, geleneksel toplu taşıma önceliği sistemlerinin çalışmada biraz kabaca modellenmiş olmasıdır. Çalışmada geleneksel toplu taşıma önceliği sistemleri yeşil sürenin son 10 saniyesinde algılanan otobüsler için ilave 10 sn süre verilmesi ve bu sürede kavşaktan geçememesi durumunda 5 sn daha telafi süresi verilmesi şeklinde modellenmiştir (Hu ve diğerleri, 2015). Halbuki 4.1.2'de bahsedildiği gibi etken toplu taşıma önceliği uygulamalarının kavşaklar arası koordinasyonu bozmadan uygulanması beklenir.

Dolayısıyla söz konusu algoritmanın en azından yeşil süresi uzatma, kırmızıyı erken kesme ve koordinasyon özelliği olan bir geleneksel toplu taşıma önceliği uygulamasıyla kıyaslanması gerekirdi. Aksi takdirde elde edilen gecikme kazancının ne kadarının kişi başına gecikme eniyileme algoritmasından ne kadarının koordinasyondan kaynaklı olduğu anlaşılamamaktadır.

Yang ve diğ. (2019) bağlantılı araçlar ortamında, kavşak giriş ve çıkışlarında bulunan otobüs duraklarını da dikkate alan bir toplu taşıma önceliği algoritması önermişlerdir. Kavşak girişlerinde bulunan otobüs durakları başka bazı çalışmalarda da dikkate alınırken kavşak çıkışındaki otobüs duraklarının hesaba katılması -yazarın bilgisi dahilinde olan çalışmalar arasında- yalnızca bu çalışmada görülmüştür. Kavşak çıkışındaki duraklarda bekleyen otobüsler kavşağın çıkışını tıkayarak taşıtların kavşağı terk etmesini zorlaştırır. Yapılan çalışmada gerçek zamanlı olarak toplam yolcuların gecikmesinin enküçüklenmesi hedeflenmiştir. Ayrıca algoritma, trafik sinyallerinin çalışmasını hem otobüs durakları hem de otobüs sefer tarifiyle koordine edecek şekilde genişletilmiştir. Tek yönlü iki yolun kesişiminden oluşan tipik artı şeklindeki izole bir kavşakta, benzetim programları ile yapılan testlerde, sabit zamanlı kontrole göre kişi başına gecikmelerde %60 civarında iyileştirme sağladığı raporlanmıştır (Yang, Menendez ve Guler, 2019).



5. ÖNERİLEN ALGORİTMA (TS-PDM) İLE TRAFİK SİNYAL KONTROLÜ

Önerilen algoritma, bağlantılı araçlar teknolojisini destekleyen trafik sinyal denetleyici ünitesinde çalışmaktadır. Araçların OBU'ları, araçtaki konum, geçici kimlik, hız ve yolcu sayısını periyodik olarak bir zaman damgası ile bildirmektedir. Algoritmanın etkin bir şekilde çalışabilmesi için, kontrol edilecek her bir kavşak kolu için durma çizgisinden başlayıp Şekil 5.1'de gösterilen çeşitli mesafelerde sona eren yol kesimlerinde bulunan araçların bahsi geçen konum, geçici kimlik, hız ve yolcu sayısı bilgilerine sahip olunması gereklidir.

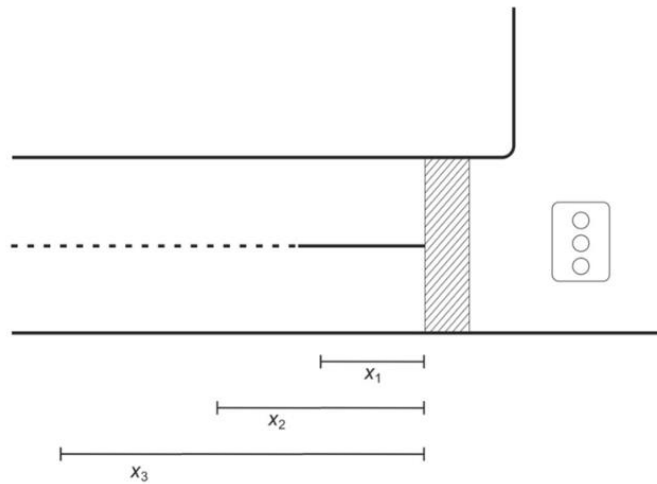
Söz konusu yol kesimleri belirlenirken kavşaktaki seyir hızı (yaklaşık 50 km/sa) dikkate alınmıştır. Yol kesimleri için tanımlar ve ölçütler şu şekildedir;

x_1 yol kesimi: Yolun seyir hızında giden bir aracın yeşil sürenin boşluk süresi kadar uzatılması durumunda durmadan kavşaktan geçebileceği mesafedir. Yüksek hızlı yollarda seyir hızında giden araçların güvenli duruş için ikilem bölgesine girmeden sarı ışık başlangıcını görmeleri veya güvenli geçiş için ikilem bölgesinin içerisinde iken sarı ışık başlangıcı ile karşılaşmamaları trafik güvenliği açısından önemlidir. İkilem bölgelerinin sınırları 3.2.2.1'de detaylı olarak ele alınmıştır. Dolayısıyla, yüksek hızlı yollarda boşluk süresi parametresi seçimi ikilem bölgesi sınırları dikkate alınarak yapılmalıdır. Söz konusu kavşak için boşluk süresi 3 sn olup x_1 yol kesimi durma çizgisinden itibaren 35 m'lik bir mesafeyi kapsar. Bu alandaki yolcu sayısı p_1 ile temsil edilir.

x_2 yol kesimi: Kırmızı ışık sönerken x_2 noktasından kavşağa seyir hızıyla yaklaşan bir aracın minimum yeşil süre dolmadan kavşaktan geçebileceği varsayılmaktadır. Bu çalışmada minimum yeşil ışık süresi hesaplanırken şehir içi hız sınırı (50 km/sa) dikkate alınmıştır. Seyir hızının daha yüksek olduğu yollarda bulunan kavşaklarda minimum yeşil süresi ve x_2 noktası seyir hızına göre belirlenir. Bu kavşak için minimum yeşil süre artı faz geçiş kayıp süresi $(g_{min} + l_t) = 7$ saniyedir. x_2 yol kesimi bu süre dikkate alınarak söz konusu kavşak için durma çizgisinden itibaren yaklaşık olarak 100 m'lik bir mesafeyi kapsar. Bu alandaki yolcu sayısı p_2 ile temsil edilmektedir.

x_3 yol kesimi: x_3 yol kesimi gözlem için kullanılan bir bölge olup sınırları maksimum kuyruk uzunluğu, akış yukarı kavşakların mesafesi, ayırım/katılım noktaları ve araç-araċ iletişimi maksimum mesafesi tarafından belirlenmektedir. Devre süresi ve yeşil süreleri hesaplanırken kavşak kollarına ait trafik akış hızları kullanılmaktadır. Gözlem süresi (120 sn) boyunca elde edilen sayımlar önce saatlik trafik hacimlerine dönüştürölüp, sonra hesaplamalarda kullanılmaktadır. Eğer gözlem noktası durma çizgisine çok yakın seçilirse, sinyalizasyon kaynaklı oluşan kuyruklar gözlem süresi boyunca gözlem noktasının sürekli bazı taşıtlar tarafından meşgul edilmesine yol ağar ve kavşağa yeni gelen araçlar hemen algılanamaz. Bu ise ölçümlerde hatalara yol ağar. Kuyruklanmadan kaynaklı ölçüm hatalarının en aza indirilmesi için ölçüm noktası maksimum kuyruk boyunun gerisine çekilmelidir. Ancak araç-araċ iletişiminin de azami mesafesi olan 300 m'den daha geriye de çekilemez. x_3 mesafesi belirlenirken akış yukarıda yer alan kavşaklara ve yoldaki ayırım ve katılımlara da dikkat edilmelidir. x_3 yol kesiminin başlangıcından kontrol edilen kavşağın durma çizgisine kadar başka bir kavşak veya ayırım/katılım noktası bulunmamalıdır. Bu ęalıřmada x_3 mesafesi 300 m olarak alınmıştır. 120 sn aralıklarla bu alana giren araç sayısı v_3 , yolcu sayısı p_3 olarak gösterilmiştir.

Benzer mesafeler MOVA Trafik Kontrol Uygulama El Kitabı'nda (TRL, 2017) tanımlanmıştır.



şekil 5.1 : x_1 , x_2 , ve x_3 yol kesimleri.

Kavşaktaki trafik talebi, her yönden x_3 yol kesimi gözlenerek belirlenir. Bir araç bu bölge içinden gönderdiği ilk mesaj ile ölçümlere dahil olur. 120 sn aralığında x_3 yol kesimine dahil olan yeni araçlar trafik talebini oluşurmaktadır. Paręacık sürü optimizasyonu (PSO), genetik

algoritmalar (GA), karınca kolonisi optimizasyonu (ACO) gibi sezgisel (heuristic) algoritmalar kullanılarak tüm yaklaşımlardan gelen trafik talepleri değerlendirilerek kavşaktaki gecikmeleri en aza indiren optimum yeşil süreleri belirlenir. Eniyileme algoritması en iyi faz sürelerini bulurken fazların minimum ve maksimum sınır değerleri ile devre süresinin minimum ve maksimum sınır değerlerini dikkate alır.

Önerilen algoritma sahada sınırlı bellek ve işlem gücüne sahip elektronik kartlarda çalışacaktır. Dolayısıyla olabildiğince az işlemci gücü ve bellek kullanacak şekilde tasarlanmalıdır. Algoritmada hesap yükü en fazla olan kısım eniyileme algoritması işlevidir. Bu sebeple hangi eniyileme algoritmasının seçileceği önemlidir. Bu çalışmada kullanılacak eniyileme algoritmasının seçimi için araştırmalar ve deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Raman ve Gill (2017)'e göre, dinamik programlama, açgözlü algoritma (greedy algoritması), dal ve sınır yöntemleri gibi geleneksel algoritmaların, sezgisel algoritmalarından (örneğin, GA, ACO, PSO) önemli ölçüde daha az verimli olduğu kanıtlanmıştır. Bu sebeple daha çok sezgisel algoritmalar üzerinde araştırmalar yoğunlaştırılmıştır (Raman ve Gill, 2017).

Literatürdeki çalışmalar gözden geçirilmiş ve sezgisel algoritmaların (GA, PSO, ACO, Harmoni Arama Algoritmaları (HS), Diferansiyel Gelişim Algoritması (DEA)) kullanıldığı benzer çalışmaların sonuçları Çizelge 5.1'de gösterilmiştir. Bu çalışmalarda yapılan tasarımın tüm araçlar için sonuçları incelenmiştir. Çalışmaların tamamı farklı şehirler ve farklı kavşaklar için yapıldığından aralarındaki karşılaştırma çok sağlıklı olmayacaktır. Bu nedenle her çalışma kendi uygulama alanına getirdiği faydalar ile değerlendirilmelidir (Shaikh, El-Abd, Khanafer ve Gao, 2022).

Bu bilgilerden hareketle benzer çalışmalarda en iyi sonuçları veren PSO ve GA algoritmalarının bu çalışmada kullanılan gecikme fonksiyonunun en küçüklenmesi problemini çözme hususundaki başarımlarının kıyaslanmasına karar verilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda PSO'nun optimal değerlere GA'dan çok daha hızlı yakınsadığı görülmüştür. PSO algoritması, aynı sayıda parçacık (popülasyon boyutu) ve daha az iterasyon (GA'dan %28,6 daha az) kullanarak daha iyi bir çözüme (GA'nın %5,88'i kadar bir hatayla) yakınsar. PSO ve GA karşılaştırmasına 6.3'te detaylı olarak yer verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Farklı sezgisel algoritmalarla elde edilen ortalama başarılar.

Sezgisel Algoritma	Ortalama Taşıt Gecikme Azaltma Oranı	Referans
PSO	%41	(Dong, Huang ve Liu, 2010)
GA	%34,57	(Li, Zhao, Liu, Liu ve Li, 2017)
DEA	%28-30	(Çakici ve Murat, 2019)
HS	%25	(Y. Zhang, Gao, Zhang ve Su, 2019)

Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında bu çalışmada PSO algoritmasının kullanılmasına karar verilmiştir. PSO, ilk olarak Eberhart ve Kennedy tarafından ortaya atılmış bir kavramdır ve doğrusal olmayan fonksiyonları optimize etmek için kuş sürülerinin ve balık sürülerinin sosyal davranışlarından esinlenmiştir (Kennedy ve Eberhart, 1995). PSO algoritmasını uygulamak basittir ve ulaşım sektörü de dahil olmak üzere birçok farklı alanda giderek yaygınlaşmaktadır (Ghasemi ve Rasekhi, 2016). Gecikme optimizasyon problemi için GA veya yerel optimuma yakınsamayan herhangi bir benzer optimizasyon algoritması da kullanılabilir (Gundogan ve diğerleri, 2014).

Yönler için toplam yolcu gecikme değerleri, PSO algoritmasında bir uygunluk fonksiyonu olarak kullanılır. Her yön için toplam gecikme değerini elde etmek için araç gecikmesi, denklem (5.1)'de gösterildiği gibi HCM-2000 (Reilly, 1997) gecikme formülünden elde edilir ve toplam yolcu sayısı ile çarpılır.

$$d_p = d \times p \quad (5.1)$$

Eşitlikte;

d_p = yön için toplam kişi gecikmesi (sn),

d = taşıt başına ortalama kontrol gecikmesi (sn/tş) ve

p = yön için toplam yolcu sayısıdır (kişi).

Bu çalışma 3.3.5.5’de detayları ile yer alan HCM-2010 gecikme modelini kullanır. Çalışma izole kavşaklar için yapıldığından, araçların rastgele varışını varsayar. Bu sebeple Eşitlik (3.8)’de $PF = 1$ alınmıştır.

$$PF = 1 \quad (5.2)$$

Akış yukarı sinyallerden filtrelenmiş varışların etkileri, denklem Eşitlik (3.10)'daki artımlı gecikme ayarlama faktörü I tarafından dikkate alınır. İzole bir kavşak için $I = 1$ değeri kullanılır. Bu çalışma izole bir kavşak için yapıldığından $I = 1$ alınmıştır.

$$I = 1 \quad (5.3)$$

TS-PDM algoritmasının amacı kişi başına gecikmeleri enküçükleyen en uygun devre süresini bulmak ve akımlardaki trafik taleplerine orantılı şekilde devre süresini fazlara dağıtmaktır. Algoritmanın genel akışı Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Algoritma başlangıcında önceden girilmiş faz süreleri bir dosyadan okunur ve ilk devrede fazlar sırayla sabit süreli olarak çalıştırılır. İlk devreden sonra gözlem aralığı dolup trafik talepleri elde edilene kadar algoritma fazları sabit süreli olarak çalıştırmaya devam eder. Pratikte gözlem aralığı 120 sn civarı olduğu için genelde kavşağın faz sayısı ve önceden girilmiş faz sürelerine göre bu bir veya iki sinyal devresine karşılık gelir.

Trafik talepleri elde edildikten sonra fazlar değişken süreli olarak çalışmaya başlar. Değişken süreli çalışmada minimum faz süresi sabittir ve kullanıcı tarafından önceden belirlenir. Algoritma, minimum sürenin altındaki faz sürelerini çalıştırmaz. Trafik talebindeki değişikliklere uyum sağlamak için faz sürelerinin maksimum değerleri çok önemlidir. Kişi başına gecikmeleri en aza indirmek için sofistike bir yaklaşıma ihtiyaç vardır. Bir önceki döngüde ölçülen trafik hacimleri, bir sonraki döngüdeki trafik hacmini tahmin etmeye yardımcı olur, ancak gerçekte hacmin ne olacağını garanti etmez. Bu nedenle, kontrol sistemi, trafik talebi tahminle eşleşmediğinde bir yanıt üretebilmelidir. TS-PDM sistemi, trafik talebinin bir yönden beklendiği gibi olmadığı durumlarda ilgili yeşil süreyi erken sonlandırmakta ve böylece gereksiz beklemeleri önlemektedir.

TS-PDM kontrol yöntemi, dur çizgisinden yaklaşık 300 m mesafedeki sanal ölçüm noktasından 120 saniyelik aralıklarla araç ve yolcu sayımlarını alır. Yeni bir sinyal devresi başladığında son sayımdaki araç (v_i) ve yolcu (p_i) sayıları Eşitlik (5.4) ve Eşitlik (5.5)'teki gibi saatlik hacimlere dönüştürülerek PSO algoritmasına girilir; yeni devre için fazların maksimum yeşil süresi hesaplanır ve uygulanır.

$$V = v \cdot \frac{3600}{120} = 30v \quad (5.4)$$

Eşitlikte;

V = trafik hacmi (tş/sa)

v = ölçülen taşıt sayısı (tş/120 sn)'dir.

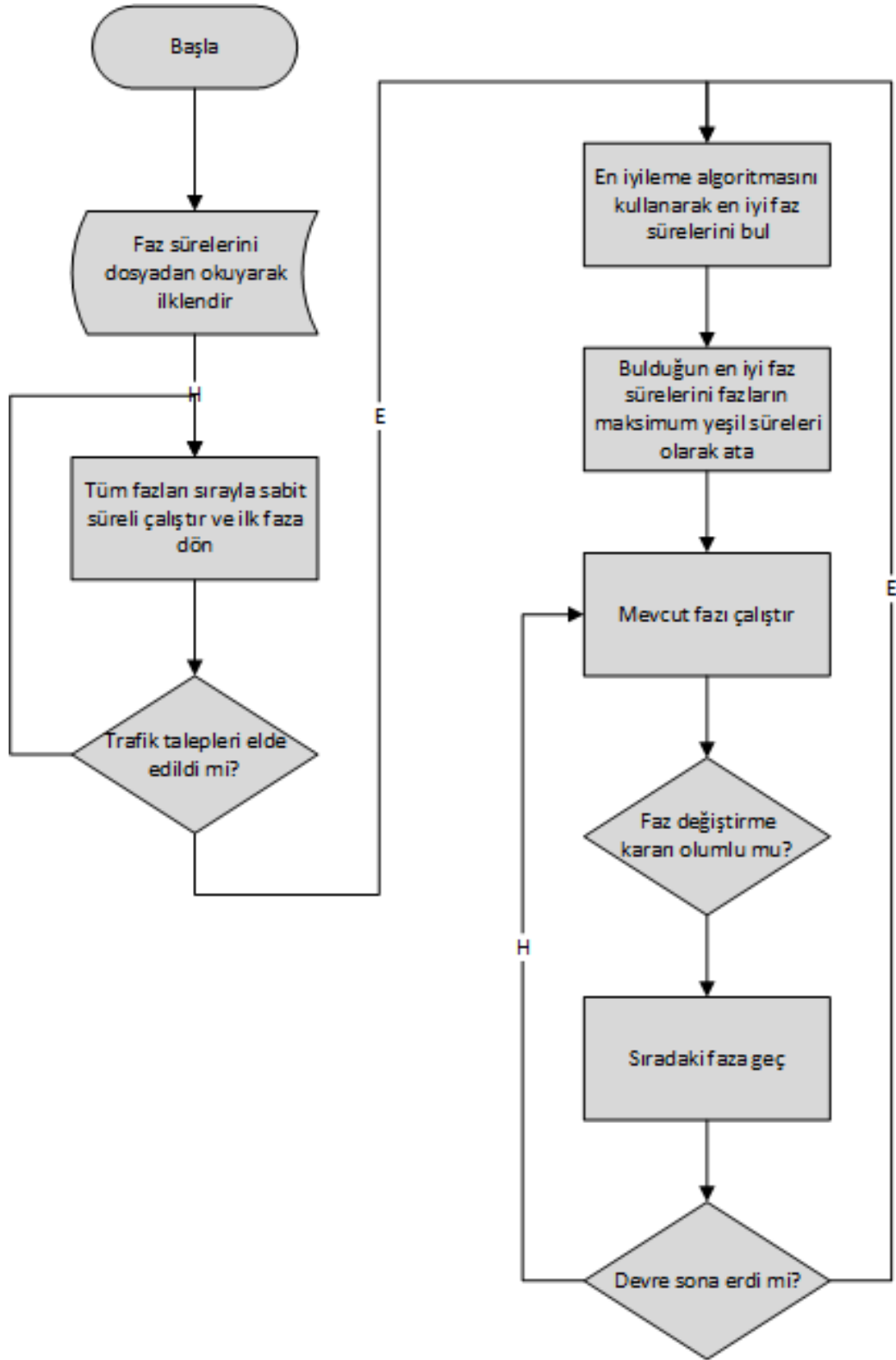
$$P = p \cdot \frac{3600}{120} = 30p \quad (5.5)$$

Eşitlikte;

P = saatlik eşdeğer yolcu sayısı (yolcu/sa)

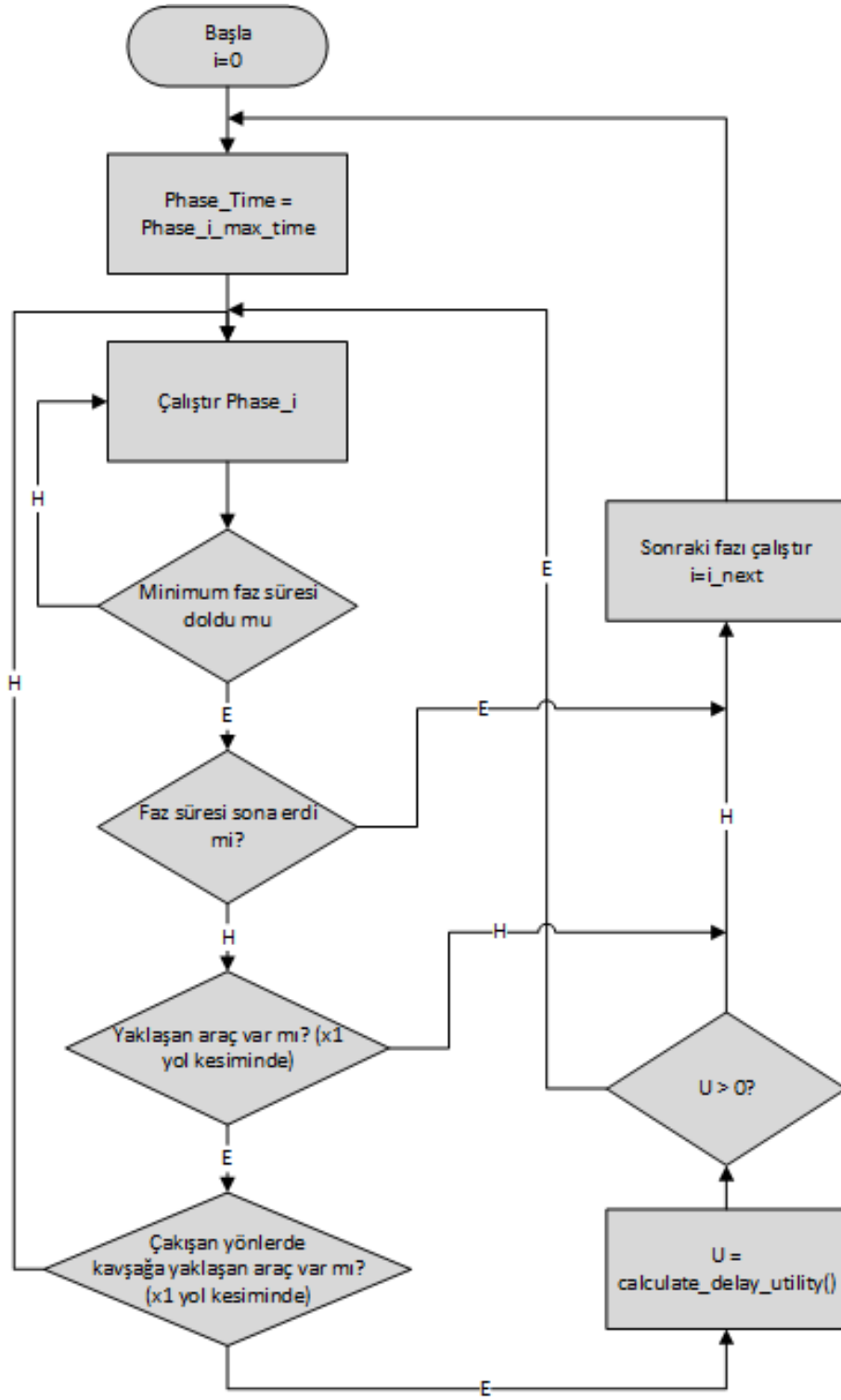
p = ölçülen yolcu sayısı (yolcu/120 sn)'dir.

PSO algoritmasının uygunluk fonksiyonu da kişi başına gecikmeleri enküçükleyecek şekilde ayarlanmıştır. Hesaplanan yeşil süre, fazın çalışabileceği maksimum süredir. Bekleyen kavşak yaklaşımında yolcu birikmesi durumunda mevcut faz sonlandırılarak bir sonraki faza hizmet verilir. Bir fazı sonlandırma kararı, fazın minimum süresine ulaşıldıktan sonra her saniye güncellenir. Önceden belirlenmiş asgari güvenlik süresine ulaşılmadan bir faz sonlandırılmaz.



Şekil 5.2 : TS-PDM genel akış diyagramı.

Faz değiştirme kararı Şekil 5.3'te gösterilmektedir.



Şekil 5.3 : TS-PDM Faz değiştirme kararı akış diyagramı.

Şekil 5.3'te bahsi geçen, fazın uzatılması durumunda geçmeye devam edecek araçların kaçındıkları gecikme ile, fazın uzatılmasından dolayı geçişi ertelenen taşıtların uğrayacağı ilave

gecikme arasındaki farkı temsil eden calculate_delay_utility işlevi aşağıdaki gibi hesaplanır (bkz. denklem (5.6, (5.7 ve (5.8):

$$d_{cur} = p_{cur} \times (g_{min} + 2l_t) \quad (5.6)$$

$$d_{next} = p_{next} \times (l_t + g_t) \quad (5.7)$$

$$U = |d_{cur} - d_{next}| \quad (5.8)$$

Eşitliklerde;

U = Gecikme fayda fonksiyonu değeri (sn),

p_{cur} = Geçmekte olan akımın x_1 yol kesimindeki yolcu sayısı,

p_{next} = bekleyen akımın x_2 yol kesimindeki yolcu sayısı,

l_t = faz geçişleri sırasında oluşan kayıp zaman(sn),

ve g_t = boşluk süresidir(sn).

Bu çalışma iki fazlı bir kavşak için yapılmıştır ancak eşitlikler 3 veya daha fazla fazdan oluşan kavşaklarda da geçerlidir. 3 veya daha fazla faz söz konusu ise mevcut devrede henüz yol hakkı verilmemiş tüm kritik akımlar (kritik akımların tespiti için bkz. (Akcelik, 1981)) için U değeri hesaplanır ve en küçük U değerini veren akım bekleyen akım olarak seçilir.

Bir faz uzatıldığında, en az g_t kadar uzatılmalıdır. Uygulamada, $g_t \geq 3$ 'tür. Bir aracın kavşağı kullanmasına izin verildikten sonra araç kavşaktan ayrılmadan tekrar durdurulmamalıdır. İncelenen kavşak için,

$g_t = 3$ saniye;

g_{min} = bir akım için asgari yeşil süre. Bu, bir akım için kullanıcı tarafından yapılandırılabilen bir değerdir.

Eşitlik (5.8)'in arkasındaki mantık, geçmekte olan akımın x_1 yol kesiminde bulunup mevcut fazda geçecek olan yolcuların erken bir faz değişikliği kararı nedeniyle haksız muamele görmemesini sağlamaktır. Mevcut fazda geçecek yolcuların, mevcut faz sonlandırılırsa en az d_{cur} süresi kadar bekleyecekleri varsayılmaktadır. Geçerli faz g_t kadar uzatılırsa, bir sonraki fazda geçecek yolcular en az d_{next} saniye geciktirilir.

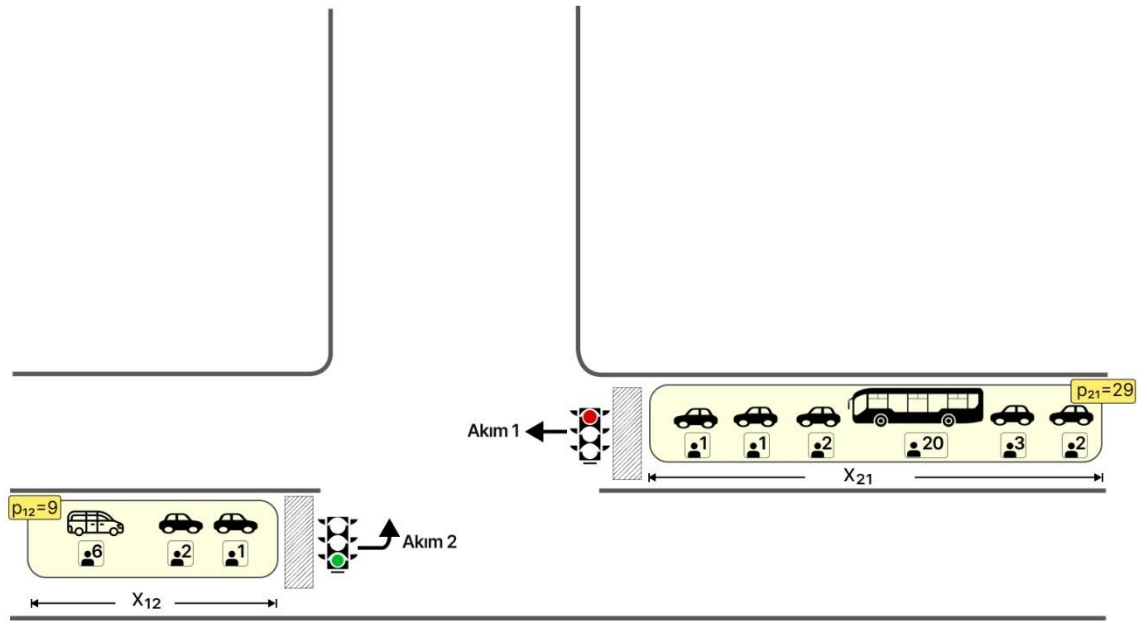
Eşitliklerin daha iyi anlaşılması için bir örnek olarak belli bir anda Şekil 5.4'te gösterilen durumun oluştuğunu düşünelim. Geçiş hakkı Akım 2'de olup minimum süre tamamlanmıştır ve algoritma bir faz değiştirme kararını verecektir. Şekilde görüldüğü gibi geçmekte olan akım Akım 2 olup, Akım 2 için x_1 yol kesimindeki yolcu sayısı $p_{cur} = p_{12} = 9$; bekleyen akım Akım 1 olup, Akım 1 için x_2 yol kesimindeki yolcu sayısı $p_{next} = p_{21} = 29$ 'dur. Söz konusu kavşakta $g_{min} = 6 sn$, $l_t = 1 sn$, $g_t = 3 sn$ varsayılarak Eşitlik (5.6)'da yerine konursa;

$$d_{cur} = p_{cur} \times (g_{min} + 2l_t) = 9. (6 + 2.1) = 56 sn$$

$$d_{next} = p_{next} \times (l_t + g_t) = 29. (1 + 3) = 116 sn$$

$$U = |d_{cur} - d_{next}| = 56 - 116 = -60$$

$U = -60 < 0$ olarak elde edilir. Bu durumda $U < 0$ olduğundan sonraki faza geçiş kararı verilecektir.



Şekil 5.4 : Faz değiştirme kararı için bir örnek durum.

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR

6.1 Yöntem

TS-PDM algoritmasının faydalarının bir saha çalışmasıyla gösterilmesi düşünülmüş ancak TS-PDM algoritmasının gerektirdiği tam veri setinin, şu anda kullanımda olan yaygın teknolojilerle elde edilemediği anlaşılmıştır. Algoritmanın ihtiyaç duyduğu araçlardaki yolcu sayısını sağlayan bir teknoloji olup olmadığı araştırılmıştır. Xerox firması, özel araçlardaki yolcu sayısını algılayan bir sistem geliştirmiş olduğunu iddia etse de (*Xerox ® Vehicle Passenger Detection System*, 2017), bu sistemin bir sebeple satılabilir durumda olmadığı ve geliştirme sürecinin devam ettiği anlaşılmaktadır. Sistem, yüksek doluluklu şerit denetleme uygulamalarında kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Dolayısıyla bu çalışmanın yapıldığı tarihte sinyalizasyon kavşaklarında kuruluma hazır bir sistem mevcut değildi. Piyasadaki bağlantılı araç yaygınlığı belli bir seviyeye geldiğinde, özel araçlara ait doluluk bilgileri kolayca algılanabilir hale gelecektir. Araçlarda yolcu koltuklarına yerleştirilen sensörler ile Can-Bus üzerinden yolcu sayısına ilişkin bilgi OBU'ya gönderilebilmektedir. Bu tür sensörler, bugün piyasada bulunan birçok popüler otomobil modelinin tüm koltuklarında zaten bulunmaktadır. OBU daha sonra bu bilgiyi DSRC veya benzeri bağlantılı araç teknolojileri aracılığıyla periyodik olarak yayımlayabilir. IEEE tarafından desteklenen ve yayınlanan Hasan ve diğ. (2016) çalışması, araç doluluk bilgilerinin “SAE J2735” mesaj seti sözlüğüne eklenmesini önermiştir. Ancak, sınırlı sayıda DSRC özellikli araç şu anda piyasada bulunmakta olup önerilen sistem doğrulamasını uygulamak için gereken yaygınlıkta değildir. Araç doluluk bilgilerinin tam olarak alınabilmesi için DSRC veya 5G teknolojisinin yaygınlaşması gerekmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada, araç doluluk bilgilerinin mevcut olduğu varsayılarak benzetim ortamında doğrulama yapılmıştır.

Bağlantılı araç teknolojileri yaygın olmamakla birlikte, bu teknolojiler teorik çalışmalar için benzetim ortamlarında modellenmiştir. Örneğin, Network Simulator (NS) gibi benzetim programları, araç-arac (V2V) ve araç-yol (V2I) etkileşiminin benzetimini yapmak için kullanılmaktadır. Bu çalışma ise, iletişim teknolojilerinden çok sinyal kontrol algoritmasına

odaklanmaktadır. Bu nedenle, daha basit bir benzetim modeli kullanılabilir. PTV-Vissim (*Vissim Users Manual*, 2000) programında trafik benzetimlerinde bağlantılı araç teknolojisini basitçe modellemek mümkündür. Benzetim basitçe, seçilen bir nokta civarındaki araçların yayılan bir sinyali alma olasılığını belirleme imkanını sunmaktadır. Benzetim programı programcıya, Python arayüzü aracılığıyla yayılan sinyalin ulaştığı araçların listesini sağlar. Kayıp sinyallerin modellenmesi için PTV-Vissim'de mesafeye dayalı bir kayıp oranı tanımlamak da mümkündür. Bahsi geçen imkân kullanılarak araç-arac etkileşimi modellenmiştir. Benzetim ortamındaki araçlarda bulunan yolcu sayılarının doğru modellenmesi için otomobillerdeki doluluk oranları dağılımını belirlemeye yönelik bir saha çalışması da yapılmıştır.

Önerilen algoritmanın başarımını ortaya koymak bir benzetim ortamı oluşturulmuş ve literatürde yaygın olarak kullanılan iki farklı sinyal kontrol algoritması ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırmalarda her üç kontrol yönteminin benzetim ortamında sağladığı kişi gecikmesi, taşıt gecikmesi, otobüs gecikmesi, yüksek doluluklu araç gecikmesi, durma sayısı ve yakıt tüketimi değerleri ölçüt olarak kullanılmıştır. Kişi gecikmesi hariç diğer ölçümler PTV-Vissim yazılımı tarafından sunulabilmektedir. Kişi gecikmesi için PTV-Vissim tarafından sunulan uygun bir çıktı yoktur. Bu sebeple, özel bir betik kullanılarak 200 m uzunluğundaki yol dilimlerinde seyahat süreleri ölçülmüş ve yolcu sayıları da hesaba katılarak kişi gecikmeleri elde edilmiştir.

Karşılaştırmalarda kullanılan diğer iki kontrol türünden birisi sabit süreli kontrol olup, Zamana Bağlı Çoklu Plan Kontrolü (TDMC) olarak adlandırılmıştır. Bu yöntem, tipik bir sabit süreli kontrol yöntemi olmakla beraber kullanılan yeşil süreleri benzetime girilen trafik hacimleri için taşıt gecikmesini enküçükleyecek şekilde seçilmiştir.

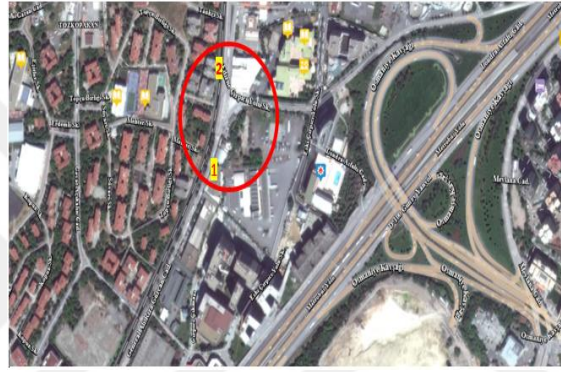
Karşılaştırmaya konu diğer sinyal kontrol yöntemi ise geleneksel otobüs önceliği yöntemlerine temsil eden bir yöntem olup, Otobüs Öncelikli Sinyal Kontrolü (BPSC) olarak adlandırılmıştır. Yöntemde hem “Erken yeşil” hem de “yeşil süre uzatma” seçenekleri uygulanmıştır. Ayrıca yöntem modellenirken yeşil süreleri de önerilen algoritmaya benzer şekilde dinamik olarak her devrede eniyileme algoritması yardımıyla taşıt gecikmelerini enküçükleyecek şekilde belirlenmektedir.

Önerilen algoritmada kullanılacak eniyileme algoritmasının seçimi müstakil bir çalışma olarak ele alınmış ve test yöntemi, ölçüm sonuçları vb. tüm başlıkları 6.3 bölümünde ele alınmıştır.

6.2 Saha Çalışması

6.2.1 Seçilen kavşak

Önerilen algoritmanın test edilmesi için Şekil 6.1'de gösterildiği gibi İstanbul Güngören'de iki fazlı bir kavşak -Koska kavşağı olarak bilinir- seçilmiştir. Algoritmanın başarısını daha net görebilmek için çok az yaya hareketinin olduğu basit yapıli bir kavşak tercih edilmiştir. Seçilen kavşak ve civarındaki yol ağının PTV-Vissim benzetim dosyası oluşturulmuştur.

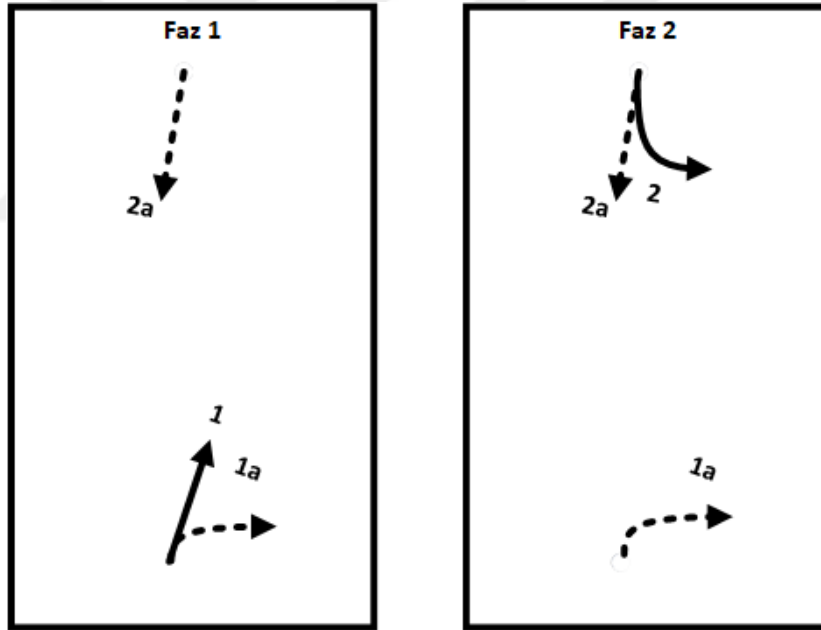


Şekil 6.1 : Koska kavşağı uydu görüntüsü (Güngören, İstanbul).

Şekil 6.2'de görüldüğü gibi, kavşakta 4 akım bulunmakta olup 1a ve 2a akımları sinyal kontrolsüz hareketlerdir, dolayısıyla kavşak iki fazlıdır. Faz diyagramı Şekil 6.3'te gösterilmiştir. Akım 1, Faz 1'de yeşildir ve Akım 2, Faz 2'de yeşildir. Bu kavşakta, sinyal kontrolsüz akımlardan dolayı işbirlikli hız kontrolünün mümkün olmadığı not edilmelidir. Bilindiği üzere işbirlikli hız kontrol yönteminde kırmızıda kavşağı yaklaşan araçlar, tam yeşil ışık başlangıcında durma çizgisine ulaşmak için önceden yavaşlar. Ancak bu tür serbest dönüşlerin düz gidişlerle aynı şeridi paylaştığı kavşaklarda bu işbirlikli hız kontrolü mümkün olmaz. Şekil 6.2'de görüldüğü gibi Akım 1 ve Akım 2'ye ait araçlar yavaşlayarak kavşağı yaklaşırsa normalde kavşaktan serbestçe geçebilen Akım 1a ve Akım 2a'daki araçları engellerler.



Şekil 6.2 : Koska kavşağı – Akımlar.



Şekil 6.3 : Koska kavşağı – Faz diyagramı.

6.2.2 Veri toplama

Üç zaman diliminde (sabah zirve saatler 07:00-09:00, gün içi yoğun olmayan saatler 12:00-14:00, akşam zirve saatler 17:00-19:00) altı farklı araç sınıfı (otomobil, kamyonet, taksi, ara toplu taşıma aracı, otobüs ve kamyon) için trafik hacimleri 15 dakikalık aralıklarla toplanmıştır. Otobüslerin tüm trafikteki oranı çok düşüktür ($< \%1$) ve bu nedenle doğrudan sahadan alınan sayımlarla otobüs gecikmelerini değerlendirmek sağlıklı olmayacaktır. Otobüs gecikmeleri ile ilgili karşılaştırmaların daha sağlıklı olması için benzetim programında otobüs oranı artırılarak ölçümler yapılmıştır. Kavşakta, en yüksek trafik yoğunluğu sabah saatlerinde yaşanmakta olup, sabah zirve trafik hacimleri Çizelge 6.1, Çizelge 6.2 ve Çizelge 6.3'te verilmiştir. Söz konusu çizelgelerde her bir satır 15 dakikalık sayımları göstermektedir.

Çizelge 6.1 : Akım 1 trafik hacimleri (sabah zirve saatler 07:00-09:00).

Otomobil	Ticari Araç /Kamyonet	Taksi	Ara Toplu Taşıma Aracı	Otobüs	Kamyon
396	112	44	160	0	0
524	76	52	112	8	4
632	172	76	112	8	12
704	132	56	96	0	12
716	156	64	104	0	12
1032	152	56	88	4	12
836	148	56	124	4	4
780	112	64	104	4	12

Çizelge 6.2 : Akım 1 trafik hacimleri (sabah zirve saatler 07:00-09:00, otobüs oranı artırılmıştır).

Otomobil	Ticari Araç /Kamyonet	Taksi	Ara Toplu Taşıma Aracı	Otobüs	Kamyon
336	112	44	160	60	0
464	76	52	112	68	4
572	172	76	112	68	12
644	132	56	96	60	12
656	156	64	108	60	12
972	152	56	88	64	12
776	148	56	124	64	4
720	112	64	104	64	12

Çizelge 6.3 : Akım 2 trafik hacimleri (sabah zirve saatler 07:00-09:00).

Otomobil	Ticari Araç /Kamyonet	Taksi	Ara Toplu Taşıma Aracı	Otobüs	Kamyon
740	232	72	320	16	28
1252	344	104	240	8	16
1376	312	88	212	16	16

Çizelge 6.3 (devamı) : Akım 2 trafik hacimleri (sabah zirve saatler 07:00-09:00).

Otomobil	Ticari Araç /Kamyonet	Taksi	Ara Toplu Taşıma Aracı	Otobüs	Kamyon
1912	300	112	224	20	0
1752	300	100	236	12	16
1412	228	92	108	8	4
1772	328	128	164	12	8
1840	336	120	144	8	24

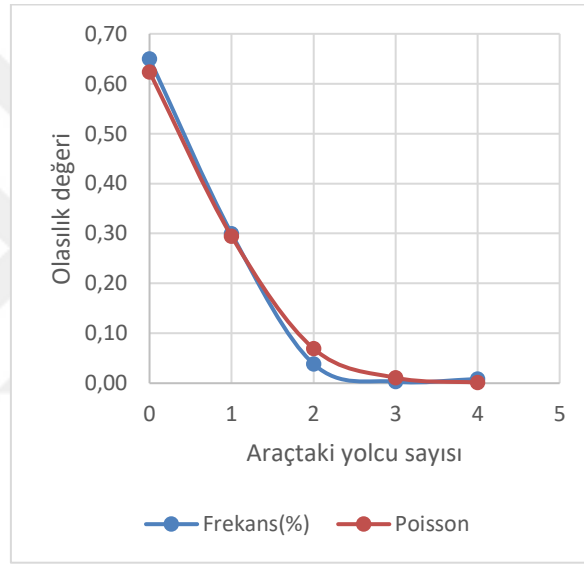
6.2.3 Otomobil doluluk oranlarının belirlenmesi

Benzetim ortamında otomobil başına düşen yolcu sayısının modellenmesi için bir saha çalışması yapılmıştır. Rastgele seçilen bir kavşağın her bir kolundan geçen her otomobildeki kişi sayısı not edilmiştir. Elde edilen sayımlar ki-kare testine tabi tutulduğunda Poisson dağılımına uygun dağıldığı anlaşılmıştır ($\chi^2 = 7,75$, $t = 11,75$; $\alpha = \%5$ anlamlılık ve $df = 3$ 'te sıfır hipotezi kabul edilir).

Buna göre, belirli bir araçtaki yolcu sayısı (sürücü hariç), Şekil 6.4'de gösterildiği gibi Poisson dağılımına uygundur. Otomobil başına düşen ortalama yolcu sayısı, İstanbul Ulaşım Ana Planı'ndaki rakamlarla uyumludur (İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2011). Bu sonuçtan hareketle, benzetim dosyasında üretilen araçlara yapılan yolcu atamaları Poisson dağılım fonksiyonu ile yapılmıştır. Araç sınıfları için ortalama yolcu sayıları İstanbul Ulaşım Ana Planı'ndan alınmıştır (bkz. Çizelge 6.4). Araçlara atanan yolcu sayıları benzetim sırasında kişi başına düşen gecikmeleri hesaplamak için kullanılmıştır. Araçların birim otomobil eşdeğerleri TS 6407 referans alınarak hesaplanmıştır. TS 6407, Türkiye'de kentsel alanlarda yol ve kavşak kapasitesinin hesaplanması için binek otomobil birim eşdeğerleriyle (birim otomobil katsayıları) ilgilidir.

Çizelge 6.4 : Ortalama doluluk değerleri ve binek otomobil eşdeğer birim değerleri. Kaynak: (İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2011) (TS 6407 standardına göre).

Araç Sınıf	Ortalama Doluluk Değeri	Birim Otomobil Eşdeğeri
Binek Otomobil	1,57	1,00
Ara Toplu Taşıma Aracı	10,00	1,27
Otobüs	30,40	2,25



Şekil 6.4 : Yolcu sayıları Poisson fonksiyon değerleri karşılaştırması.

6.3 En İyileme Algoritmalarının Karşılaştırılması

Sezgisel optimizasyon algoritmaları, global optimizasyon problemlerine en iyi çözümleri bulmada önemli bir rol oynamaktadır. GA ilk geliştirildiğinde, karmaşık ve geleneksel eniyileme teknikleri kullanılarak çözülmesi zor olan kontrol sistemi parametrelerini optimize etmek için hızla popülerlik kazandılar. Son zamanlarda başka bir yöntem olan PSO, popüler bir seçenek haline geldi ve diğer çeşitli optimizasyon teknikleri arasında birçok araştırmacının ilgisini çekti. Her iki teknik de belirlenmiş bir amaca götüren en iyi çözümü bulmaya yöneliktir.

Her birinin kendi kavramları ve yaklaşımları vardır, ancak çoğu zaman doğrusal olmayan fonksiyonları enküçüklemek veya enbüyüklemek gibi benzer amaçlar için kullanılırlar.

Sinyalize kavşaklarda araç gecikmesi bu doğrusal olmayan problemlerden biridir. Sinyalize kavşaklar ve araç gecikmeleri ile ilgili birçok çalışmada sezgisel algoritmalar kullanılmıştır. Bu çalışmalar incelendiğinde sezgisel algoritmaların bu tür çalışmalar için etkili çözümler sunduğu görülmektedir (Akgüngör, Yılmaz, Korkmaz ve Doğan, 2019; Çakici ve Murat, 2021). Bir kavşağın farklı yönleri için verilen tahmini trafik hacimlerini kullanarak en iyi yeşil sürelerine ulaşmak trafik kontrol sistemleri için son derece önemlidir. Trafik hacimleri her devrede değiştiğinden, kontrol sisteminin bir sonraki trafik hacimlerini tahmin etmesi ve yeni en iyi yeşil süreleri ve devre süresini hesaplaması gerekir. Böyle bir sistem eğer merkezi bir mimariye sahipse o zaman binlerce kavşağı (örneğin İstanbul şehrinde 2000'den fazla kavşak bulunmaktadır) eş zamanlı kontrol edebilmek için bir veya birkaç sunucu bilgisayar kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle, mümkün olduğu kadar az işlemci gücü kullanarak mümkün olan en kısa sürede en iyi bir çözüm bulunmalıdır. Sistem eğer dağıtık bir mimariye sahipse ve kontrol algoritması trafik sinyal denetleyicisine gömülecekse güç tüketiminin mümkün olduğunca düşük tutulması ve algoritmanın, hız ve işlem kapasitesi düşük bir cihaz tarafından çalıştırılabilecek basitlikte olması istenir. Sonuç olarak, en hızlı ve güvenilir eniyileme tekniğinin seçimi önemlidir.

İki algoritma arasındaki benzerlikler ve her ikisinin de benzer amaçlar için kullanılması nedeniyle bazı araştırmacılar bu algoritmaları karşılaştırmışlardır (Eberhart ve Shi, 1998). PSO'yu ilk öneren araştırmacılardan biri olan Eberhart, iki yöntem arasındaki farkları genel hatlarıyla açıklamaya çalışmıştır. Eberhart'a göre, iki algoritma arasında bazı kavramlar açısından analogiler kurulabilir. GA'da çözüm adaylarına bireyler, tüm bireylere ise popülasyon adı verilir. PSO'da çözüm adaylarına parçacık, parçacıkların tümüne ise sürü adı verilir. Eberhart'ın vurguladığı en önemli fark, GA'da en iyi kromozomların bir sonraki nesle taşınması, PSO'da ise tüm parçacıkların bir sonraki iterasyona taşınmasıdır. Bu benzerlikler ve farklılıklar, bizi iki algoritmanın üstünlüğü konusunda kesin bir yargıya götürmez. Farklı koşullarda ve farklı problem uzayları için yapılan karşılaştırmalarda farklı sonuçların çıkması doğaldır. Örneğin Panda ve Padhy (2007) TCSC tabanlı Kontrolör Tasarımı alanındaki problem uzaylarının bir karşılaştırmasını yapmışlar ve her iki algoritmanın da söz konusu problemi çözümünde etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Bununla birlikte; söz konusu çalışmada,

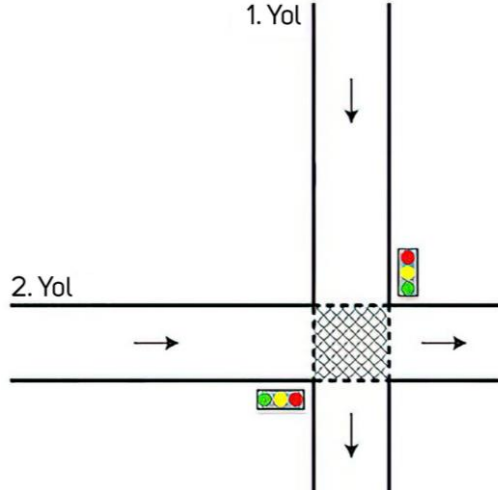
GA'nın işlem sürelerinin PSO'ya göre daha küçük olduğu, ancak PSO'nun GA'ya göre daha az sayıda iterasyonda sonuca yakınsadığı görülmüştür (Panda ve Padhy, 2007).

Bu bölümde, tez çalışmasının önemli bir parçası olarak en iyi optimizasyon algoritmasının seçilmesi konusundaki deneyimler paylaşılmaktadır. Taşıt gecikmesi enküçükleme problem uzayında en iyi bilinen iki algoritma olan GA ve PSO karşılaştırılmıştır.

6.3.1 Test metodu

İki algoritmayı karşılaştırmak için, Şekil 6.5'de gösterilen, dört kollu ve iki akımdan oluşan iki fazlı basit bir sanal kavşak kullanılmıştır. Sanal kavşakta her akım için başlangıç saatlik trafik hacmi 400 tş/sa'dır. Referans değer olarak Çizelge 6.5'de yer alan sınır değerler gözetilerek asgari ve azami devre süresi aralığındaki tüm tamsayı devre süreleri için her bir fazın yeşil süresi HCM gecikme formülüyle hesaplanmıştır. Ardından, en iyi yeşil süreleri bulmaları için GA ve PSO optimizasyon algoritmaları Çizelge 6.5'de yer alan sınır değerleri gözeterek şekilde çalıştırılmıştır. Hem GA hem de PSO algoritmalarının girdileri, akımların saatlik trafik hacimleridir. Hem GA hem de PSO algoritmalarının uygunluk fonksiyonu, HCM gecikme fonksiyonudur (bkz. Bölüm 3.3.5.5). GA'nın varsayılan parametreleri Çizelge 6.7'te gösterilmiştir. Değişken sayıda yineleme sayısı (50, 100, 1000, 2500, 5000, 10000) ve popülasyon boyutları (10, 20, 50, 100) için yeşil süreler, gecikme hata değerleri ve işlem süreleri kaydedilmiştir. Trafik hacimleri bir kolda 400 tş/sa'dan 8000 tş/sa'ya, diğer kolda 400 tş/sa'dan 5200 tş/sa'ya kadar her adımda 400 araçlık artışla değiştirilmiştir. Bir örnek çalıştırma sonucu Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Örnek çalıştırmada aynı trafik hacimleri için, GA (7,99 sn, 12,00 sn) faz süreleri ve 15,66 sn gecikmeye ve PSO (7,56 sn, 12,44 sn) faz süreleri ve 15,68 sn gecikmeye yakınsamıştır. Bu örnekte GA'nın ulaştığı gecikme değeri, deneme yanılma gecikmesinden daha az olduğu için, GA'nın hatasının sıfır olduğu varsayılır. Deneme yanılma yöntemi yalnızca tamsayı değerleri kullandığından, algoritmaların kayan noktalı sayılarla daha iyi gecikme sonuçları elde etmesi mümkündür. Ancak bu farklılıkların uygulamada önemli bir etkisi olmamaktadır. Çünkü gerçek hayat pratiğinde trafik sinyal denetleyicilerine uygulanan faz süreleri genelde tamsayı olmaktadır.



Şekil 6.5 : PSO-GA karşılaştırmasında kullanılan basit kavşak modeli.

Çizelge 6.5 : Metodlar için sınır değerler.

Değişken	Değer (sn)
Asgari yeşil süresi	6
Azami yeşil süresi	134
Faz geçişi sırasındaki kayıp süre	5+5=10
Azami devre süresi	150

Çizelge 6.6 : Örnek bir çalıştırma sonucu.

Algoritma	V1	V2	Hata	T1 (sn)	T2 (sn)	Gecikme (sn)
Deneme-yanılma referans değeri	400	800		8	12	15,67
GA	400	800	0,00	7,99	12,00	15,66
PSO	400	800	0,06	7,56	12,44	15,68

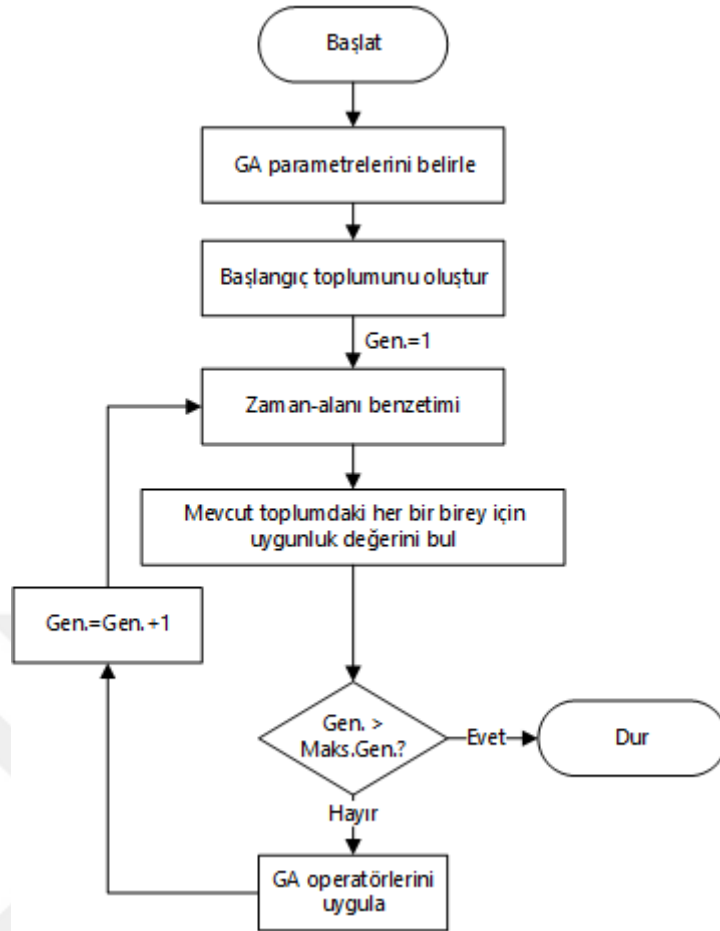
Çizelge 6.6'da; V1 ve V2 sırasıyla kavşağın 1. ve 2. kolları için saatlik trafik hacimleridir. T1 ve T2 sırasıyla kavşağın 1. ve 2. akımları için saniye cinsinden yeşil faz süreleridir. Bir algoritma için hata, gecikmelerin referans gecikme değerlerinden pozitif kaymalarının yüzdesidir. Gecikme, Bölüm 3.3.5.5'te formüle edildiği gibi bir akım için ortalama taşıt gecikmesidir.

6.3.2 Genetik algoritmalar

Genetik algoritmalar, biyolojik evrim teorisinden ilham alan iyi bilinen genel amaçlı sezgisel eniyileme tekniklerinden birisidir. Farklı bireyler (aday çözümler) bir popülasyon oluşturur. Bireylerin kromozomları, nihai en uygun çözümü oluşturmak için her adımda değiştirilir. Her adımda en uygun bireyler, bir sonraki adımdaki bireylerin (gelecek nesil) ebeveynleri olarak seçilir. En iyi bireyler uygunluk fonksiyonuna göre seçilir. Uygunluk puanı, ebeveynleri seçmek için tek parametre değildir, ancak bireyin seçilme olasılığını artırır. Ebeveyn seçimi stokastik bir süreçtir. Biyolojik bir sürecin çaprazlama ve mutasyon operatörleri, genetik algoritmalar için de geçerlidir. Şekil 6.6'da, GA için akış şeması gösterilmektedir (Panda ve Padhy, 2007). Bu çalışmada kullanılan GA parametreleri Çizelge 6.7'de verilmiştir.

Çizelge 6.7 : GA Parametreleri.

Elitizm	Var
Mutasyon oranı	0,215
Tekdüzelik oranı	0,5



Şekil 6.6 : Genetik algoritma akış diyagramı.

6.3.3 PSO algoritması

Parçacık Sürü Optimizasyonu, kuş ve balık sürülerinden ilham alan bir eniyileme yöntemidir. 1995 yılında J. Kennedy ve R.C. Eberhart tarafından önerilmiştir (Kennedy ve Eberhart, 1995). PSO, fonksiyon optimizasyonu, sinir ağı eğitimi, otomatik kontrolde parametre ayarı gibi birçok optimizasyon problemini başarıyla çözmüştür (Erdoğan, 2010). PSO, balıkların, kuşların ve bazı hayvanların davranışlarından esinlenerek optimizasyon problemleri için geliştirilmiş bir yöntemdir. Balıklar, kuşlar ve diğer sosyal hayvanlar gruplar halinde izlendiğinde, yiyecek ararken birbirleriyle etkileşime girdikleri görülmüştür. Birisi yiyecek bulduğunda, diğerlerinin yiyecek aradıkları yönü değiştirdikleri ve buna göre hızlarını güncelledikleri gözlenmiştir. Bu sosyal etkileşim PSO ile modellenmiştir. PSO da tıpkı GA gibi evrimsel bir algoritmadır. GA'da mevcut tüm çözümler popülasyon olarak adlandırılırken, PSO'da bunlar sürü olarak adlandırılır. PSO, GA'ya benzer bir evrimsel algoritma olmakla

birlikte çaprazlama ve mutasyon gibi operatörlerden yoksun olduğu için daha basittir ve optimal çözüme daha hızlı yakınsar. Sürüdeki her kuşa parçacık denir. PSO'daki her parçacık potansiyel bir çözümdür. Örneğin, D adet değişken içeren (ya da D-boyutlu) bir problemin fonksiyonunun hesaplanması, Eşitlik (6.1)'in hesaplanması için n parçacıklı denklemin başlangıç çözümüdür (Erdoğan ve Yalçın, 2015).

$$\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1D} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2D} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nD} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

i. parçacık için uygunluk fonksiyonu Denklem (6.2)'de verilmiştir.

$$f_{fitness} = f(x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{iD}) \quad (6.2)$$

Yukarıdaki matriste parçacık olarak adlandırılan her satır bir çözümü ifade eder. n parçacık için n çözüm elde edilir. Araştırma uzayında, parçacıklar iki temel değişkene göre hareket eder. Her yinelemede her bireyin en iyi çözümü (p_{best}) ve tüm bireylerin en iyi çözümü (g_{best}) elde edilir. Her yinelemede yalnızca bir g_{best} vardır. Algoritmanın başlangıcında her parçacık için başlangıç değeri aynı zamanda p_{best} 'in değeridir. Diğer parçacıkların konumları, sonraki iterasyonlarda güncellenir ve mevcut konum, önceki p_{best} ile karşılaştırılır. Yeni çözüm, p_{best} 'ten üstünse p_{best} olarak belirlenir.

PSO'da sürü, bir ön çözüm ile başlarken her parçacık da bir hız ve konum değeri ile başlar. Parçacık konumlarının değişken değerleri belli bir aralık içindedir. Parçacıklar hızlarını, hem sürü hem de kendileri için değiştirerek hareket ederler. Parçacıkların her yenilemesi, onları optimum çözüme yaklaştırır. Şekil 6.7'te, PSO için akış diyagramı gösterilmektedir. Denklem (6.3) ve Denklem (6.4), i'inci parçacık için hız ve konum formüllerini sağlar (Panda ve Padhy, 2007; Shaikh ve diğ., 2022).

$$v_i^{k+1} = K(v_i^k + \varphi_1 rand())(p_{best\ i}^k - x_i^k) + \varphi_2 rand()(g_{best} - x_i^k) \quad (6.3)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (6.4)$$

Denklemlerde;

k = yineleme sayısı,

x_i^k = i. parçacığın k. yinelemedeki konumu,

x_i^{k+1} = i. parçacığın (k+1). yinelemedeki konumu,

v_i^k = i. parçacığın k. yinelemedeki hızı,

v_i^{k+1} = i. parçacığın (k+1). yinelemedeki hızı,

K, φ_1, φ_2 = katsayılardır.

$rand()$ fonksiyonu (0,1) aralığında rassal dağılan bir sayı döndürür.

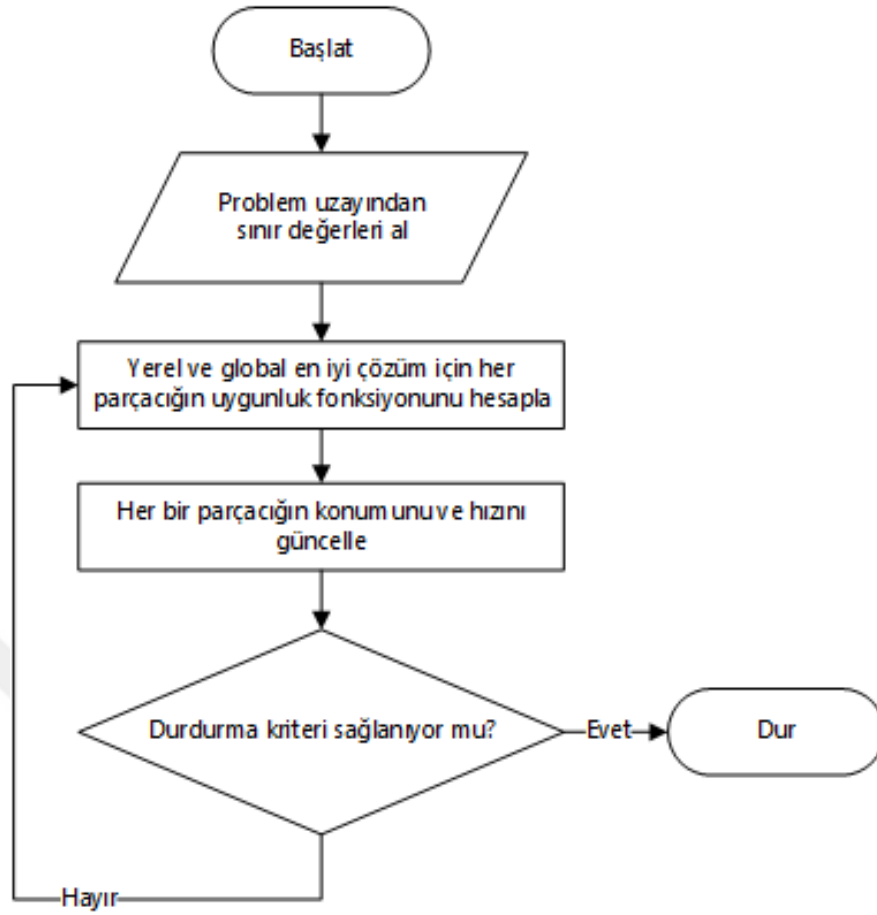
Sınırlandırma faktörü K 'nin etkisi, parçacığın hareketindeki salınımı azaltmaktır. Sonuç olarak, zamanla parçacıklar çözüme yaklaşır. φ_1 ve φ_2 sosyal ve bilişsel parametrelerdir. Denklem (6.4) hız hesaplandıktan sonra konumu belirlemek için kullanılır.

Hem φ_1 hem de φ_2 , parçacığın sırasıyla kendi deneyimine ve sürüdeki (sosyal) diğer parçacıkların deneyimlerine göre (bilişsel olarak) hareket etmesine izin verir.

PSO'nun parçacık sayısı (n) 20 ile 40 arasında değişebilir. Daha doğru bir ölçüme ihtiyaç duyulursa, parçacık sayısı artırılabilir. Değişken sayısı ve değişkenlerin değer aralığı probleme göre değişmektedir. φ_1 ve φ_2 genellikle 2'ye yakın değerlere ayarlanır. Sırasıyla 2 ve 2,1 değerleri alınırsa K sabiti 0,7298 olarak kullanılır (Panda ve Padhy, 2007).

6.3.4 PSO Sonuçları

Çizelge 6.8'de PSO algoritması için sonuçlar gösterilmektedir. Popülasyon (sürü) boyutu 10 ile 100 arasında değişmektedir. Her sürü boyutu için yenileme sayısı 50 ile 10000 arasında değişmektedir. Parçacık sayısına ve yenileme sayısına bağlı olarak hatanın değişimi Şekil 6.8'de, işlem süreleri ise Şekil 6.9'te grafiksel olarak gösterilmiştir. Grafiklerde kabarcık gösterimi kullanılmıştır. Kabarcık grafik, üç farklı veri değişkenini görselleştiren bir grafik türüdür. X ve Y eksenleri, iki değişkenin değerlerini gösterirken, her veri noktası bir kabarcık olarak temsil edilir ve kabarcığın büyüklüğü, üçüncü bir değişkenin değerini ifade eder. Bu sayede, üç boyutlu veriler iki boyutlu bir düzlemde görsel olarak karşılaştırılabilir. 20'lik bir sürü boyutu, makul bir hata oranı elde etmek için fazlasıyla yeterlidir. Çoğu trafik sinyal denetleyicisinin çoğu zaman yeşil süreler için tamsayı değerleri kullandığına dikkat edilmelidir. Yani bir kayan noktalı tamsayı dönüştürme zaten %1 düzeyinde bir hata değişikliğine neden olup bu da pratikte sıfır hata anlamına gelir.



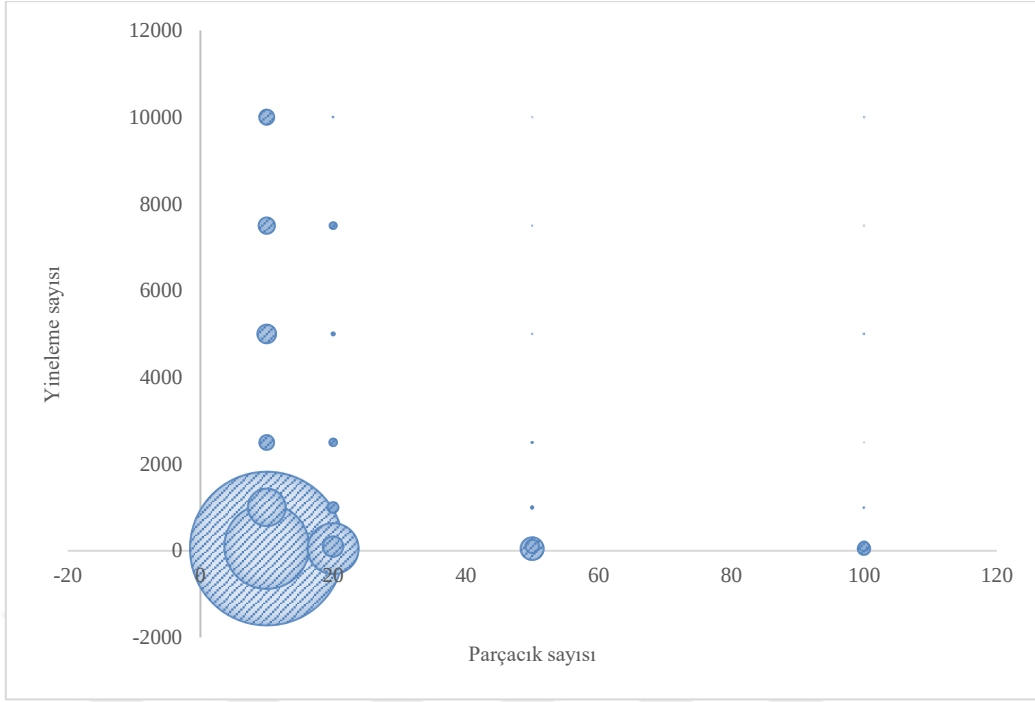
Şekil 6.7 : PSO algoritması akış diyagramı.

Çizelge 6.8 : PSO ölçüm sonuçları.

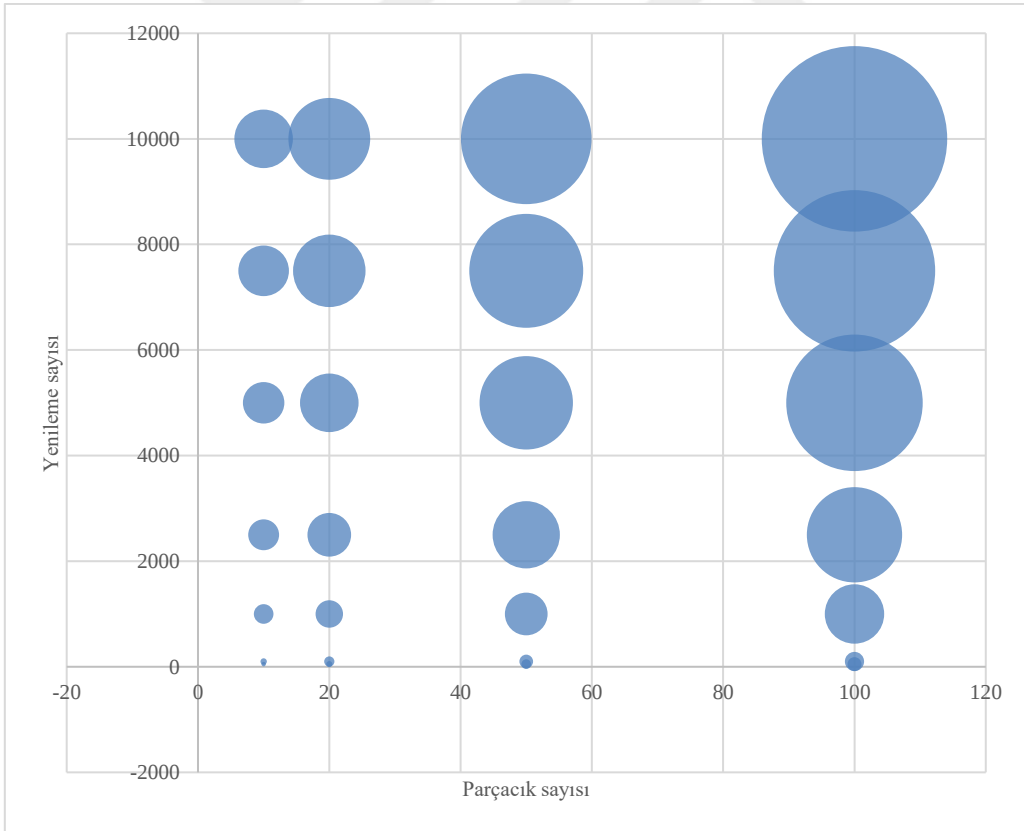
No	Sürü boyutu	Yenileme sayısı	Hata	İşlem süresi (sn)
1	10	50	2,98	0,02
2	10	100	0,92	0,04
3	10	1000	0,19	0,37
4	10	2500	0,03	0,92
5	10	5000	0,05	1,66
6	10	7500	0,04	2,47
7	10	10000	0,03	3,30
8	20	50	0,34	0,04

Çizelge 6.8 (devamı) : PSO ölçüm sonuçları.

No	Sürü boyutu	Yenileme sayısı	Hata	İşlem süresi (sn)
9	20	100	0,06	0,10
10	20	1000	0,02	0,73
11	20	2500	0,01	1,84
12	20	5000	0,00	3,31
13	20	7500	0,01	5,06
14	20	10000	0,00	6,44
15	50	50	0,07	0,09
16	50	100	0,03	0,18
17	50	1000	0,00	1,76
18	50	2500	0,00	4,36
19	50	5000	0,00	8,41
20	50	7500	0,00	12,51
21	50	10000	0,00	16,44
22	100	50	0,02	0,19
23	100	100	0,02	0,36
24	100	1000	0,00	3,40
25	100	2500	0,00	8,75
26	100	5000	0,00	17,96
27	100	7500	0,00	25,11
28	100	10000	0,00	33,16



Şekil 6.8 : PSO hata değişimi.



Şekil 6.9 : PSO işlem süreleri.

6.3.5 GA sonuçları

Çizelge 6.9'da GA algoritması için elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Popülasyon boyutu 10 ila 100 arasında değişmektedir. Üst değerin 10000 olduğu PSO'nun aksine, her popülasyon boyutu için yineleme sayısı 50 ila 1000 arasında değişir. Bunun nedeni, yineleme sayısı 1000'den fazla olduğunda GA ağının çok yavaşlamasıdır. Bu nedenle çalıştırma, 1000 yinelemeden sonra durdurulmuştur. Popülasyon büyüklüğüne bağlı olarak hatanın değişimi Şekil 6.10'da grafiksel olarak gösterilmiştir. Makul bir hata oranı elde etmek için en az 1000 popülasyon büyüklüğü gereklidir.

Şekil 6.11'de görüldüğü gibi, sürü boyutu veya yineleme sayısı arttıkça GA işleme süresi önemli ölçüde artmaktadır. 1000 yinelemeden sonraki işlem süreleri test dahi edilemeyecek kadar uzundur.

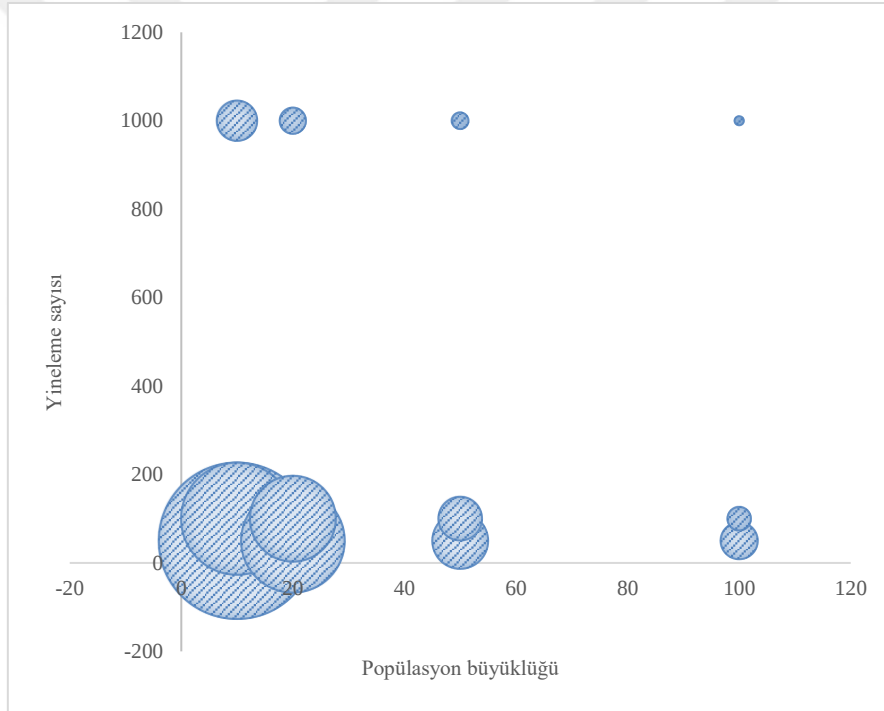
Şekil 6.12 ve Şekil 6.13'da sırasıyla PSO ve GA arasındaki farkı daha iyi anlamak için işlem süreleri ve hata oranları kabarcık yöntemiyle karşılaştırılmıştır. Bu gösterimde, x eksenini yineleme sayısını; y eksenini ise popülasyon büyüklüğünü temsil eder. Kabarcıkların yarıçapları, sırasıyla işlem sürelerini ve hatanın büyüklüklerini göstermektedir.

Çizelge 6.9 : GA sonuçları.

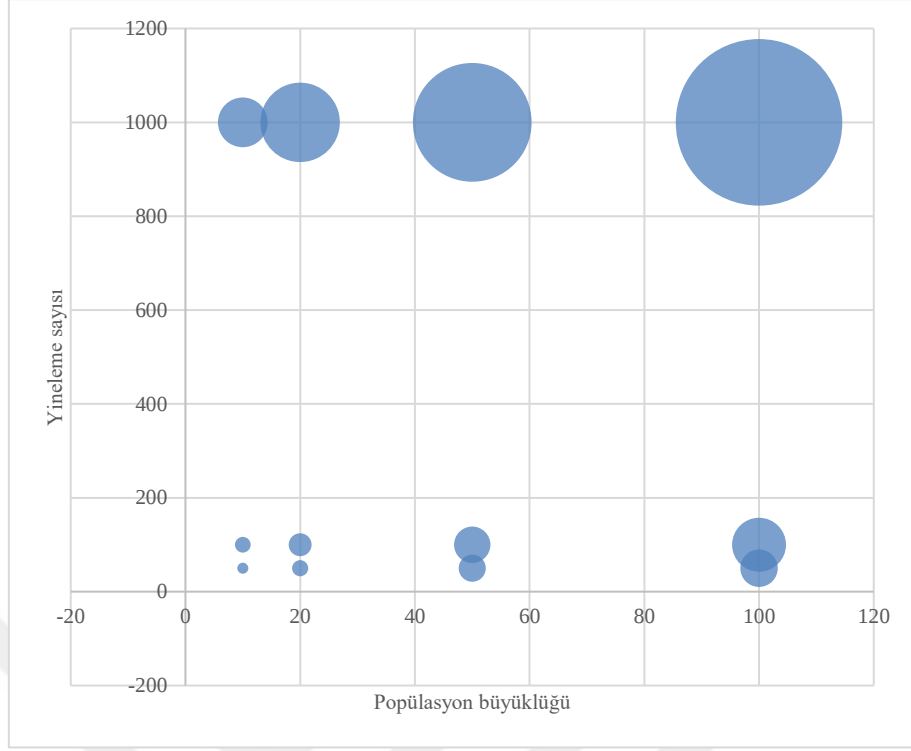
No	Popülasyon boyutu	Yenileme sayısı	Hata	İşlem süresi (sn)
1	10	50	3,4748	0,1576
2	10	100	1,7959	0,3195
3	10	1000	0,2418	3,1942
4	20	50	1,5358	0,3357
5	20	100	1,0595	0,6758
6	20	1000	0,1056	8,1324
7	50	50	0,4573	0,9452

Çizelge 6.9 (devamı) : GA sonuçları.

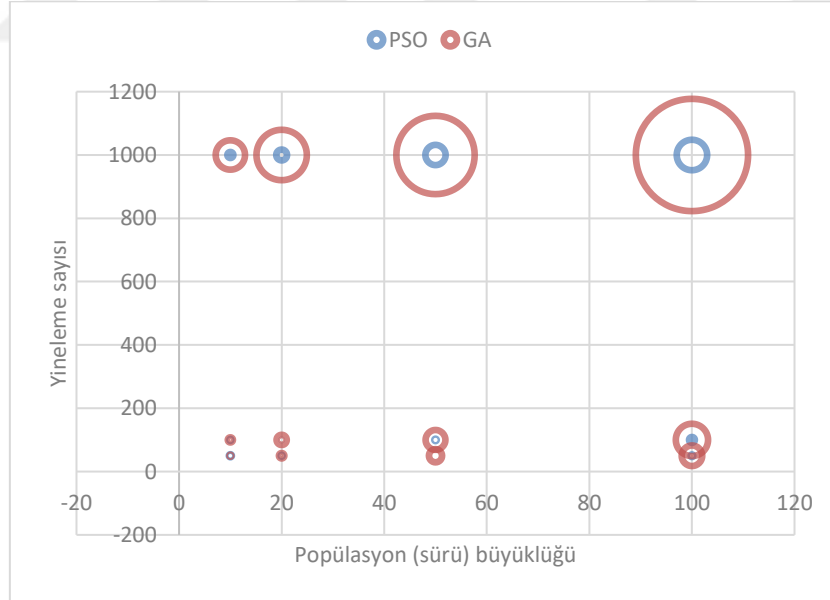
No	Popülasyon boyutu	Yenileme sayısı	Hata	İşlem süresi (sn)
8	50	100	0,2829	1,7073
9	50	1000	0,0454	18,1872
10	100	50	0,2044	1,8087
11	100	100	0,0856	3,7515
12	100	1000	0,0154	35,7794



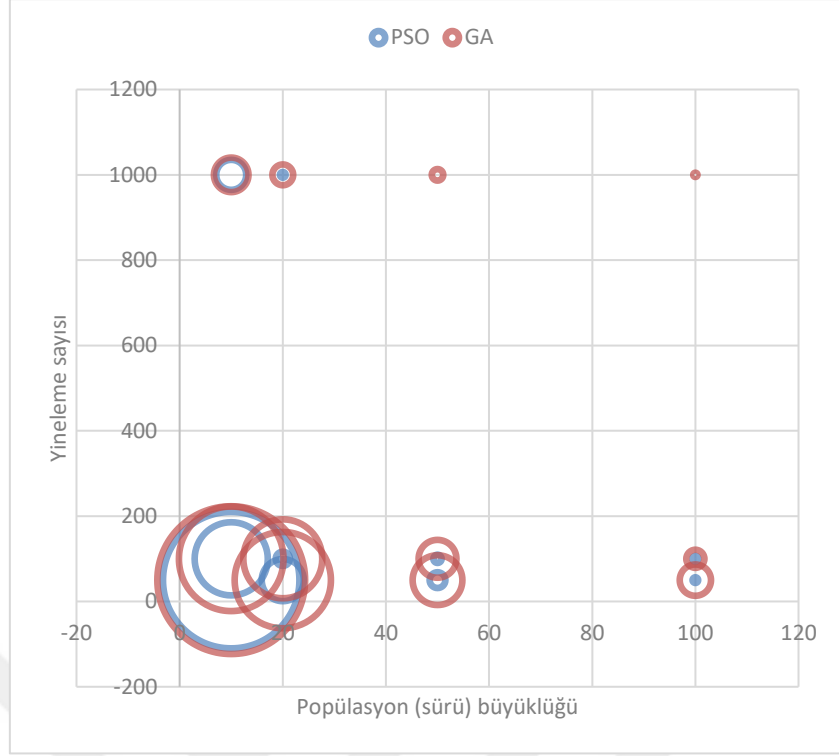
Şekil 6.10 : GA hata değişimi.



Şekil 6.11 : GA işlem süreleri.



Şekil 6.12 : PSO ve GA işlem süreleri karşılaştırması.



Şekil 6.13 : PSO ve GA hata oranı karşılaştırması.

6.3.6 PSO ve GA karşılaştırması değerlendirilmesi

Elde edilen test sonuçlarına bağlı olarak, aşağıdaki tespitleri yapmak mümkündür:

- Aralarında başarımlar farklılıkları olsa bile hem PSO hem de GA en küçük gecikme değerlerine ulaşmak için uygulanması gereken en uygun yeşil süreleri bulabilmektedir.
- Aynı sayıda yineleme için (100), PSO algoritması GA'dan 6,8 kat daha hızlı bir şekilde sonuca ulaşmaktadır.
- Popülasyon (sürü) büyüklüğü 20 ve iterasyon sayısı 100 alındığında, PSO algoritması GA'dan 17,6 kat daha küçük bir hata değerine ulaşmaktadır.
- GA ancak popülasyon büyüklüğü 100 ve iterasyon sayısı 1000 olduğunda kabul edilebilir bir hata oranına (%1,5) ulaşmaktadır. Ancak bu 1000. İterasyonun elde edilmesi için 35,7 sn gerekmiştir. Testlerin i7 işlemcili bir dizüstü bilgisayarda Python programlama dili kullanılarak yapıldığı düşünüldüğünde, gerçek zamanlı bir sistem için

kodların C/C++ gibi daha sistem düzeyinde dillerle yeniden yazılması gerektiği anlaşılmaktadır.

- Popülasyon büyüklüğü 50 ve yineleme sayısı 1000 olduğunda, PSO neredeyse sıfır hataya ulaşmaktadır. Üstelik aynı donanım ile PSO'nun 1000. İterasyona ulaşması için sadece 1,76 sn yeterlidir. Gerçek zamanlı bir sistem, PSO ile ek bir donanım veya yazılım geliştirmesine gerek kalmadan testlerin gerçekleştirildiği yazılım dili ve donanım ile yönetilebilir.

Sonuç olarak, genetik algoritmalarda iterasyon sayısının artmasının işlem süresini önemli ölçüde uzattığı kolayca görülebilir. Bu nedenle, trafikte gecikme enküçüklemesi problemi için PSO algoritmasının kullanılması hem işlem süresi hem de hata başarımı açısından daha uygundur.

6.4 Gecikme Ölçümleri

Önerilen TS-PDM yönteminin diğer geleneksel yöntemlere üstünlüğü olup olmadığını anlamak için 10 kez 2 saatlik benzetimler çalıştırılmış; ortalama gecikme değerleri, yakıt tüketimi ve durma sayıları kaydedilmiştir. Beklenen sonuç, TDMC ve BPSC yöntemlerine kıyasla kişi başına gecikme değerlerinde önemli bir azalmadır. Ancak sonuçları daha iyi farketmek ve istatistiksel olarak anlamlı hale getirebilmek için doluluk oranı yüksek olan araçların belli oranın üstünde olması önemlidir. Bu kavşaktaki ara toplu taşıma (servis araçları vb.) araç sayısı gerçekten de belli bir oranın ($>4\%$) üzerinde olduğu için algoritmanın sağladığı fayda, doğrudan görülebilmektedir. Ancak, çalışmaya esas kavşakta tüm trafikte otobüslerin oranı düşüktür ($<1\%$) ve bu nedenle, doğrudan sahadan alınan sayımları kullanarak yöntemin otobüsler için faydalarını gözlemlemek kolay değildir. Otobüs yönteminin faydasını daha net gözlemleyebilmek için toplam hacimler sabit tutulmak kaydıyla⁷ otobüs sayısı artırılarak ve otomobil sayısı azaltılarak ölçümler yapılmıştır. Yöntemler arasında adil bir karşılaştırma

⁷ Sahadan alınan sayımlara ekleme yapılmamıştır. Sadece otobüslerin oranı artırılmıştır.

yapılabilmesi için sadece araç ve yolcu gecikmeleri için değil, beş ve üzeri yolculu yüksek doluluklu (YDA olarak işaretlenmiş) araç ve otobüsler için de ayrı raporlamalar yapılmıştır.

Ölçümlerin gösterilmesi için oluşturulan şekillerde kümelenmiş sütun grafik tipi kullanılmıştır. Kümelenmiş sütun grafik, aynı kategorideki birden fazla veri grubunu karşılaştırmak için kullanılan bir grafik türüdür. Her kategori için gruplar yan yana sütunlar olarak yer alır ve bu grafik türü, özellikle kategoriler arasında sayısal değerlerin görsel olarak karşılaştırılmasını kolaylaştırır.

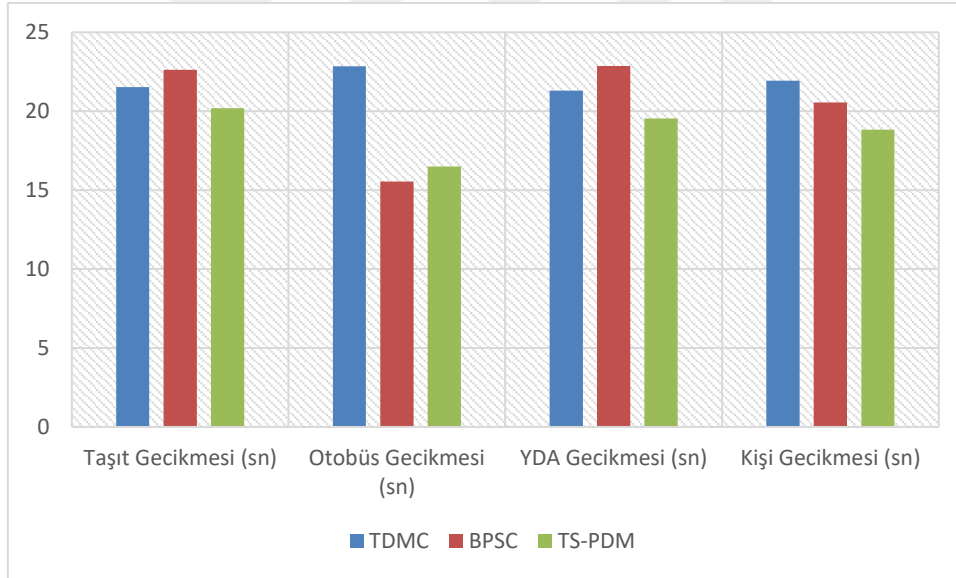
Farklı kontrol yöntemleri için (otobüslerin oranının artırıldığı durumlar için) gecikmeler, durma sayısı ve yakıt tüketimleri Çizelge 6.10'de gösterilmekte olup sırayla gecikme değerleri, durma sayıları ve yakıt tüketimleri grafik halinde Şekil 6.14, Şekil 6.16 ve Şekil 6.18'te gösterilmiştir. Taşıt gecikmesi, otobüs gecikmesi, YDA gecikmesi, kişi gecikmesi, durma sayıları ve yakıt tüketimi değişkenlerinin standart sapma değerleri Çizelge 6.11'de gösterilmiştir. Durma sayıları değişkeni standart sapma değerleri Şekil 6.17'de, yakıt tüketimi değişkeni standart sapma değerleri ise Şekil 6.19'da grafik olarak gösterilmiştir.

Çizelge 6.10 : Taşıt, otobüs, YDA ve kişi başına ortalama gecikme (sn) değerleri ile taşıt başına ortalama durma sayıları ve yakıt tüketimleri (litre/100 km).

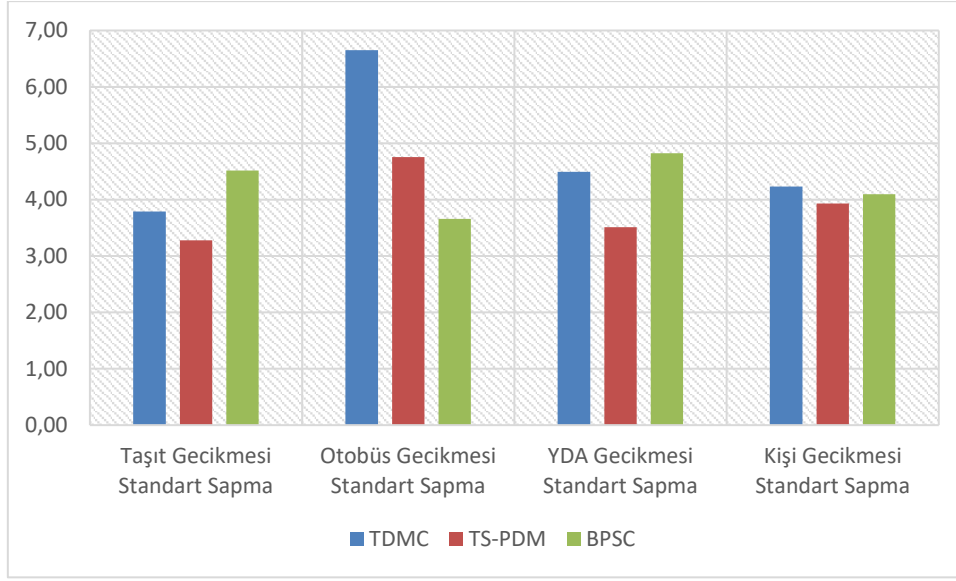
	TDMC	BPSC	TS-PDM
Taşıt Gecikmesi (sn)	21,53	22,63	20,19
Otobüs Gecikmesi (sn)	22,85	15,54	16,5
YDA Gecikmesi (sn)	21,3	22,87	19,55
Kişi Gecikmesi (sn)	21,93	20,55	18,84
Durma Sayıları	0,53	0,55	0,49
Yakıt Tüketimi (lt/ 100 km)	7,58	7,78	7,16

Çizelge 6.11 : Taşıt gecikmesi, otobüs gecikmesi, YDA gecikmesi, kişi gecikmesi, durma sayıları ve yakıt tüketimi değişkenlerinin standart sapma değerleri.

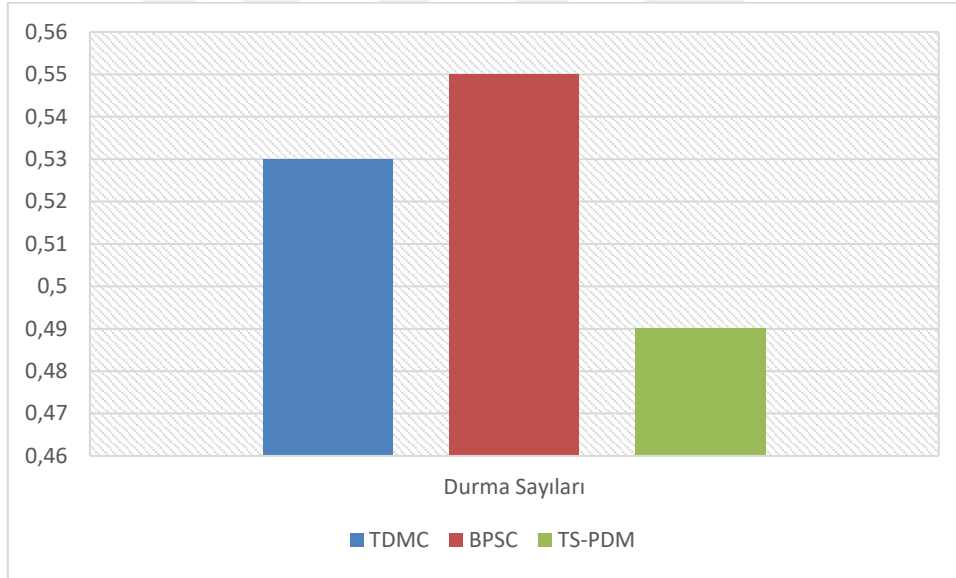
	TDMC	BPSC	TS-PDM
Taşıt Gecikmesi Standart Sapma	3,79	4,52	3,28
Otobüs Gecikmesi Standart Sapma	6,65	3,66	4,75
YDA Gecikmesi Standart Sapma	4,49	4,82	3,51
Kişi Gecikmesi Standart Sapma	4,23	4,10	3,93
Durma Sayıları Standart Sapma	0,38	0,39	0,35
Yakıt Tüketimi Standart Sapma	2,92	2,73	2,71



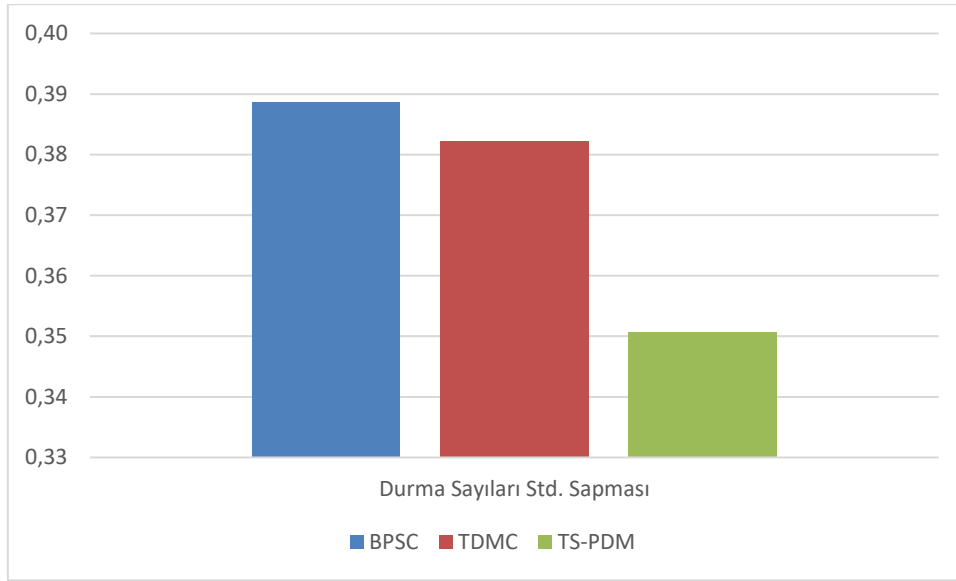
Şekil 6.14 : Farklı kontrol metodları için taşıt, otobüs, YDA ve kişi ortalama gecikme (sn) değerleri.



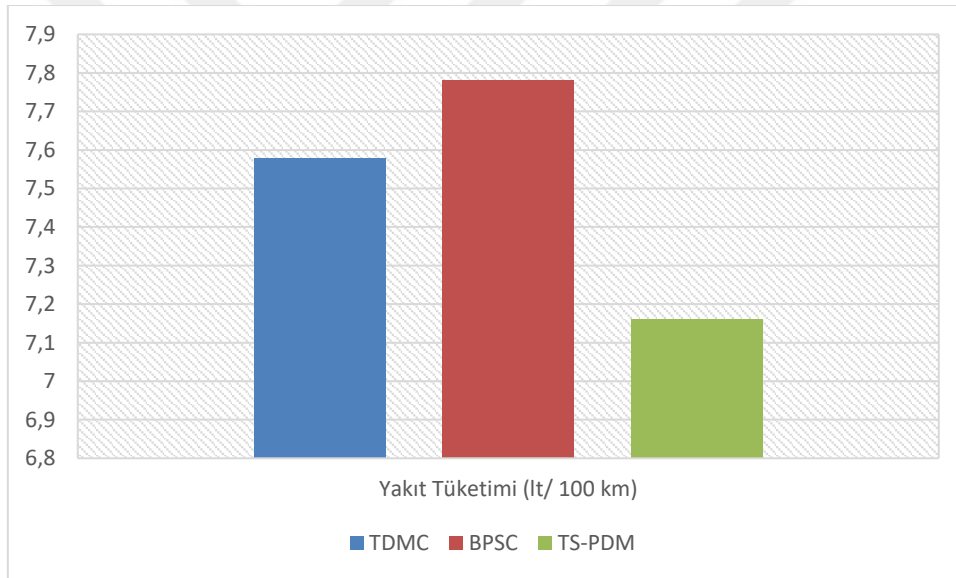
Şekil 6.15 : Farklı kontrol metodları için taşıt, otobüs, YDA ve kişi ortalama gecikme değişkenlerinin standart sapma değerleri.



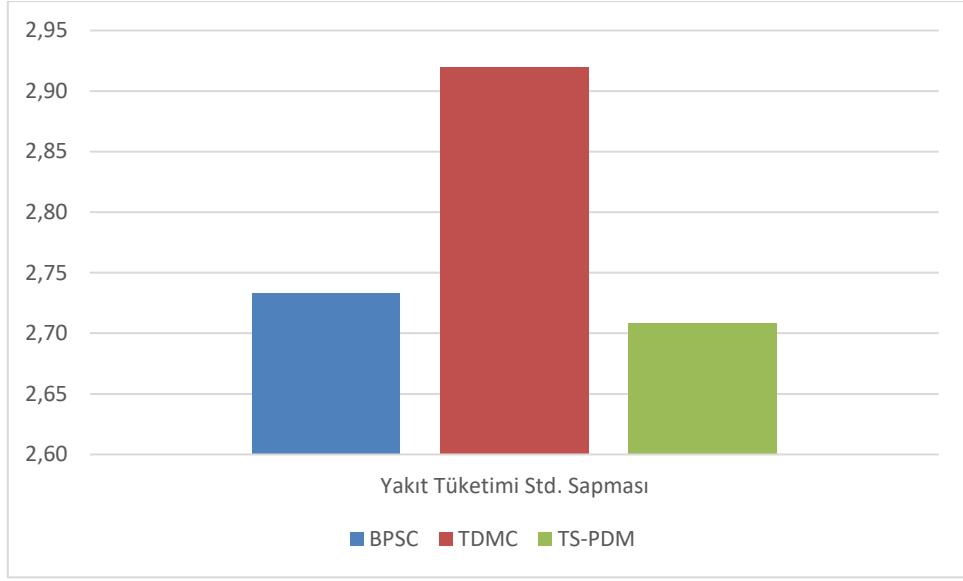
Şekil 6.16 : Farklı kontrol metodları için taşıt başına ortalama durma sayıları.



Şekil 6.17 : Durma sayıları değişkeni standart sapma değerleri.



Şekil 6.18 : Farklı kontrol metodları için yakıt tüketimleri (lt/100 km).



Şekil 6.19 : Yakıt tüketimi değişkeni standart sapma değerleri.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışmasının amacı izole ışıklı kavşaklarda taşıtlara içlerindeki yolcu sayısı ile orantılı bir şekilde öncelik sağlayan ve bu şekilde kişi başına gecikmeyi enküçükleyen bir algoritma sunmaktır. Bir başka ifadeyle, sunulan algoirtma ile geleneksel toplu taşıma önceliği uygulamalarının sadece otoöslere sağladığı avantajlardan ara toplu taşıma araçları ve yüksek doluluklu özel otomobillerin de faydalanmasına imkân verilmesi hedeflenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak hem toplu taşıma araçlarındaki hem de özel araçlardaki yolcu sayılarını gerçek zamanlı olarak kullanarak kişi gecikmelerini enküçükleyen bir algoritma önerilmiştir.

Önerilen kontrol algoritmasının (TS-PDM) etkinliği benzetim ortamında, doyunluk altı koşullarda, süreleri eniyileştirilmiş sabit süreli bir kontrol yöntemi (TDMC) ve otobüs öncelikli sinyal kontrolü (BPSC) algoritmalarıyla karşılaştırılarak ortaya konmuştur. Çalışma için, iki fazlı sinyal sistemine sahip bir kavşağın PTV-VISSIM (gerçek trafik koşullarını temsil eden) benzetimleri kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar aşağıdaki sonuçları göstermiştir.

- Kişi gecikmesi TDMC'ye göre %14,09, BPSC'ye göre %8,33 oranında azaltılmıştır.
- Taşıt gecikmesi TDMC'ye göre %6,20, BPSC'ye göre %10,78 azaltılmıştır.
- YDA gecikmesi (beş veya daha fazla yolcusu olan araçlar) TDMC'ye göre %8,24 ve BPSC'ye göre %14,54 oranında azaltılmıştır.
- Kavşak sinyali TS-PDM tarafından kontrol edildiğinde durma sayısı ve yakıt tüketimi diğer yöntemlere göre daha iyi başarıml göstermiştir.
- BPSC yöntemi otobüs gecikmelerini TS-PDM'den daha iyi kontrol etmekle birlikte kişi başına gecikmeleri artırmaktadır.
- TS-PDM ile otobüs başına gecikmeler TDMC'ye göre %27,80 oranında azalmaktadır.

Sonuçlardan da anlaşılacağı üzere TS-PDM yöntemi kullanılarak taşıt gecikmelerinde bir artışa neden olmadan, otobüslerin geçiş önceliği büyük oranda korunarak ara toplu taşıma araçları ve

yüksek doluluklu özel taşıtlara kısmen öncelik tanınarak kişi gecikmelerinde önemli bir iyileşme sağlanmaktadır.

Bu çalışma diğer kavşaklardaki sinyalizasyon sistemleriyle bir bağlantısı bulunmayan veya diğer kavşaklardan etkilenmeden bağımsız olarak yönetilebilen izole kavşaklar için bir algoritma sunmaktadır. Algoritma bir koordinasyon algoritmasıyla entegre edilerek arter seviyesindeki parametreler koordinasyon algoritması tarafından kavşak seviyesindeki parametreler ise TS-PDM tarafından yönetilecek şekilde katmanlı bir yaklaşımla arter seviyesinde de hem kişi gecikmeleri hem de durma sayıları enküçüklenebilir.

Bu çalışma için seçilen kavşakta her iki yönde de kontrolsüz akımlar bulunduğu araç-yol etkileşiminin sunduğu işbirlikli kontrol imkanının avantajları kullanılamamıştır. Kontrolsüz akımların bulunmadığı kavşaklarda yüksek yolcu yoğunluğuna sahip araçlara hız tavsiyesi yapılarak kavşaktaki gecikmelerden daha az etkilenmeleri sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- Akcelik, R.** (1981). *Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis*. Australian Road Research Board. Research report. Australian Road Research Board.
- Akgüngör, A., Yılmaz, Ö., Korkmaz, E. ve Doğan, E.** (2019). Meta-Sezgisel Yöntemlerle Sabit Zamanlı Sinyalize Kavşaklar için Optimum Devre Süresi Modeli. *El-Cezeri*, 6(2), 259–269. doi:10.31202/ECJSE.496257
- Al-Mudhaffar, A.** (2006). *Impacts of Traffic Signal Control Strategies*. Trita-TEC-PHD. KTH.
- Al-Sahili, K. A. ve Taylor, W. C.** (1996). Evaluation of Bus Priority Signal Strategies in Ann Arbor, Michigan. *Transportation Research Record*, 1554(1), 74–79. doi:10.1177/0361198196155400110
- Balke, K. N., Dudek, C. L. ve Urbanik, T.** (2000). Development and Evaluation of Intelligent Bus Priority Concept. *Transportation Research Record*, 1727(1), 12–19. doi:10.3141/1727-02
- Bazzi, A., Cecchini, G., Menarini, M., Masini, B. M. ve Zanella, A.** (2019). Survey and Perspectives of Vehicular Wi-Fi versus Sidelink Cellular-V2X in the 5G Era. *Future Internet*, 11(6), 122. doi:10.3390/fi11060122
- Cakici, Z. ve Murat, Y. S.** (2019). A Differential Evolution Algorithm-Based Traffic Control Model for Signalized Intersections. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 7360939. doi:10.1155/2019/7360939
- Çakici, Z. ve Murat, Y. Ş.** (2021). Sinyalize Dönel Kavşaklarda Diferansiyel Gelişim Algoritması ile Sinyal Süre Optimizasyonu. *El-Cezeri*, 8(2), 635–651. doi:10.31202/ECJSE.861429
- Chang, E. C.-P. ve Messer, C. J.** (1985). Minimum Delay Optimization of a Maximum Bandwidth Solution to Arterial Signal Timing (Abridgment). *Transportation Research Record*, (1005). <https://trid.trb.org/view/270403> adresinden erişildi.
- Chang, G., Vasudevan, M. ve Su, C.** (1996). Modelling and Evaluation of Adaptive Bus-preemption Control with and without Automatic Vehicle Location Systems. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 30(4), 251–268. doi:10.1016/0965-8564(95)00026-7
- Dadashzadeh, N. ve Ergun, M.** (2018). Spatial Bus Priority Schemes, Implementation Challenges and Needs: An Overview and Directions for Future Studies. *Public Transport*, 10(3), 545–570. doi:10.1007/s12469-018-0191-5
- Dahlgren, J. W.** (1996). An Analysis of the Effectiveness of High-occupancy Vehicle Lanes., 1. <https://elibrary.ru/item.asp?id=5648750> adresinden erişildi.

- Daniel, J.** (1992). Signal Priority for Public Transit Vehicles Using Advanced Traffic Control Systems: A Comparative Evaluation of ATISAC, SCATS and SCOOT. <https://trid.trb.org/view/375047> adresinden erişildi.
- Davidsson, F. ve Di Taranto, C.** (1992). Priority For Public Transport Using Advanced Transport Telematics. *The 3rd International Conference on Vehicle Navigation and Information Systems*, içinde (ss. 530–536). doi:10.1109/VNIS.1992.640243
- Dong, C., Huang, S. ve Liu, X.** (2010). Urban Area Traffic Signal Timing Optimization Based on Sa-PSO. *2010 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence* içinde (C. 3, ss. 80–84). doi:10.1109/AICI.2010.257
- Eberhart, R. C. ve Shi, Y.** (1998). Comparison Between Genetic Algorithms and Particle Swarm Optimization. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 1447, 611–616. doi:10.1007/BFB0040812/COVER
- Erdoğan, P.** (2010). Particle Swarm Optimization Performance on Special Linear Programming Problems. *Scientific Research and Essays*, 5(12), 1506–1518. https://www.researchgate.net/publication/229041601_Particle_swarm_optimization_performance_on_special_linear_programming_problems adresinden erişildi.
- Erdoğan, P. ve Yalçın, E.** (2015). Parçacık Sürü Optimizasyonu ile Kısıtsız Optimizasyon Test Problemlerinin Çözümü. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 4(1), 14–22. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/duzceitbd/issue/4817/66451> adresinden erişildi.
- FHWA.** (2023). *Manual on Uniform Traffic Control Devices* (11. bs.). United States Department of Transportation - Federal Highway Administration. https://mutcd.fhwa.dot.gov/pdfs/11th_Edition/mutcd11thedition.pdf adresinden erişildi.
- Garrow, M. ve Machemehl, R.** (1999). Development and Evaluation of Transit Signal Priority Strategies. *Journal of Public Transportation*, 2(2). doi:https://doi.org/10.5038/2375-0901.2.2.4
- Ghasemi, I. T. B. ; J. ve Rasekhi, J.** (2016). Traffic Signal Prediction Using Elman Neural Network and Particle Swarm Optimization. *International Journal of Engineering (IJE)*, 29(11), 1558–1564. doi:10.5829/idosi.ije.2016.29.11b.09
- Guler, S. I., Gayah, V. V ve Menendez, M.** (2015). Providing Bus Priority at Signalized Intersections with Single-lane Approaches. *Transportation Research Procedia*, Papers selected for Poster Sessions at The 21st International Symposium on Transportation and Traffic Theory Kobe, Japan, 5-7 August, 2015, 9, 225–245. doi:10.1016/j.trpro.2015.07.013
- Gundogan, F., Karagöz, Z., Kocyigit, N., Karadag, A., Ceylan, H. ve Murat, Y.** (2014). An Evaluation of Adaptive Traffic Control System in Istanbul, Turkey. *Journal of traffic and logistic engineering*, 2, 198–202. doi:10.12720/jtle.2.3.198-201

- Hasan, M. Z., Fink, R., Vargas, M., Adame, J. ve Hernandez, E.** (2016). Development and Evaluation of Traffic Signal Algorithms to Support Future Measure of Effectiveness (MOE). *2016 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)* içinde (ss. 407–412). doi:10.1109/EIT.2016.7535275
- He, H., Guler, S. I. ve Menendez, M.** (2016). Adaptive Control Algorithm to Provide Bus Priority with a Pre-signal. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 64, 28–44. doi:https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.01.009
- Hu, J., Park, B. (Brian) ve Parkany, A. E.** (2014). Transit Signal Priority with Connected Vehicle Technology. *Transportation Research Record*, 2418(1), 20–29. doi:10.3141/2418-03
- Hu, J., Park, B. B. ve Lee, Y.-J.** (2015). Coordinated transit signal priority supporting transit progression under Connected Vehicle Technology. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Engineering and Applied Sciences Optimization (OPT-i) - Professor Matthew G. Karlaftis Memorial Issue*, 55, 393–408. doi:10.1016/j.trc.2014.12.005
- Istanbul Büyükşehir Belediyesi.** (2011). *İstanbul Metropolitan Alanı Kentsel Ulaşım Ana Planı (İUAP)*. <https://www.ibb.istanbul/Uploads/2017/3/iUAP-ozet-Rapor.pdf> adresinden erişildi.
- Jacobson, J. ve Sheffi, Y.** (1981). Analytical model of traffic delays under bus signal preemption: Theory and application. *Transportation Research Part B: Methodological*, 15(2), 127–138. doi:10.1016/0191-2615(81)90039-4
- Kantoğlu, T. S.** (2013). *Otobüs Öncelikli Yolların Tasarımı Ve İstanbul'daki Pilot Otobüs Şeridi Uygulamaları*. <https://polen.itu.edu.tr/handle/11527/6953> adresinden erişildi.
- Karoui, M., Freitas, A. ve Chalhoub, G.** (2020). Performance comparison between LTE-V2X and ITS-G5 under realistic urban scenarios. *IEEE Vehicular Technology Conference* içinde (C. 2020-May). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi:10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9129423
- Kennedy, J. ve Eberhart, R.** (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks* içinde (C. 4, ss. 1942--1948 c.4). doi:10.1109/ICNN.1995.488968
- Klein, L. A., Mills, M. K. ve Gibson, D. R. P.** (2006). *Traffic detector handbook : third edition. Volume I*. <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/954%0A> adresinden erişildi.
- König, H., Heipp, G. ve Seifert, V.** (2016). Beschleunigung auf ganzer Linie. *Nahverkehr*, 34(9), 44–50. <https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=3c6ece7e-419a-396e-bf5c-38c598c25e81> adresinden erişildi.
- Lee, J., Shalaby, A., Greenough, J., Bowie, M. ve Hung, S.** (2005). Advanced Transit Signal Priority Control with Online Microsimulation-Based Transit Prediction Model. *Transportation Research Record*, 1925(1), 185–194. doi:10.1177/0361198105192500119

- Li, X., Zhao, Z., Liu, L., Liu, Y. ve Li, P.** (2017). An Optimization Model of Multi-Intersection Signal Control for Trunk Road under Collaborative Information. *Journal of Control Science and Engineering*, 2017, 2846987. doi:10.1155/2017/2846987
- Liao, C.-F. ve Davis, G. A.** (2007). Simulation Study of Bus Signal Priority Strategy: Taking Advantage of Global Positioning System, Automated Vehicle Location System, and Wireless Communications. *Transportation Research Record*, 2034(1), 82–91. doi:10.3141/2034-10
- Ma, W., Head, K. L. ve Feng, Y.** (2014). Integrated optimization of transit priority operation at isolated intersections: A person-capacity-based approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 40, 49–62. doi:10.1016/j.trc.2013.12.011
- Ma, W., Ni, W., Head, L. ve Zhao, J.** (2013). Effective Coordinated Optimization Model for Transit Priority Control under Arterial Progression. *Transportation Research Record*, 2366(1), 71–83. doi:10.3141/2356-09
- Mcshane, C.** (1999). The Origins and Globalization of Traffic Control Signals. *Journal of Urban History*, 25(3), 379–404. doi:10.1177/009614429902500304
- Murat, Y. S. ve Gundogan, F.** (2019). 8 - Turkey. K. Tang, M. Boltze, H. Nakamura ve Z. Tian (Ed.), *Global Practices on Road Traffic Signal Control* içinde (ss. 117–137). Elsevier. doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815302-4.00008-X
- Muthuswamy, S., McShane, W. R. ve Daniel, J. R.** (2007). Evaluation of Transit Signal Priority and Optimal Signal Timing Plans in Transit and Traffic Operations. *Transportation Research Record*, 2034(1), 92–102. doi:10.3141/2034-11
- National Academies of Sciences Engineering and Medicine.** (2015). *Signal Timing Manual - Second Edition* (2. bs.). Washington, DC: The National Academies Press. doi:https://doi.org/10.17226/22097
- NTCIP Joint Committee.** (2017). *NTCIP 1211 v02A-SE03, Object Definitions for Signal Control and Prioritization (SCP)*. <https://www.ntcip.org/file/2018/11/NTCIP1211v02A-SE03.docx> adresinden erişildi.
- NTCIP Joint Committee.** (2019). *NTCIP 1202 v03A, Object Definitions for Actuated Signal Controllers (ASC) Interface*. <https://www.ntcip.org/file/2019/07/NTCIP-1202v0328A.pdf> adresinden erişildi.
- Panda, S. ve Padhy, N. P.** (2007). Comparison of Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm for TCSC-based Controller Design. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 1(3), 551–559. doi:10.5281/ZENODO.1082007
- Pollard, J.** (2008). The eccentric engineer - [network history]. *Engineering & Technology*, 3(15), 93.

- Raman, V. ve Gill, N. S.** (2017). Review of different heuristic algorithms for solving Travelling Salesman Problem. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, 8(5), 423–425. <http://0-search.ebscohost.com.divit.library.itu.edu.tr/login.aspx?direct=true&db=obo&AN=124636351&lang=tr&site=eds-live> adresinden erişildi.
- Reilly, W.** (1997). Highway Capacity Manual 2000. *TR News*, (193). <https://trid.trb.org/view/475202> adresinden erişildi.
- Robertson, D. I. ve Bretherton, R. D.** (1991). Optimizing networks of traffic signals in real time-the SCOOT method. <https://research.ebsco.com/linkprocessor/plink?id=e442ecba-3611-3713-8c1f-d2eb8e2d3351> adresinden erişildi.
- Salter, R. J. ve Shahi, J.** (1979). Prediction of Effects of Bus-Priority Schemes by Using Computer Simulation Techniques. *Transportation Research Record* içinde . <https://trid.trb.org/view/147453> adresinden erişildi.
- Şerban, A. A. ve Frunzete, M.** (2022). Analysis and comparison between urban traffic control systems. *2022 IEEE 28th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)* içinde (ss. 92–95). doi:10.1109/SIITME56728.2022.9988444
- Shaikh, P. W., El-Abd, M., Khanafer, M. ve Gao, K.** (2022). A Review on Swarm Intelligence and Evolutionary Algorithms for Solving the Traffic Signal Control Problem. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(1), 48–63. doi:10.1109/TITS.2020.3014296
- Shalaby, A., Lee, J., Greenough, J., Hung, S. ve Bowie, M.** (2006). Development, Evaluation, and Selection of Advanced Transit Signal Priority Concept Directions. *Journal of Public Transportation*, 9(5). doi:<http://doi.org/10.5038/2375-0901.9.5.6>
- Sims, A. G. ve Dobinson, K. W.** (1980). The Sydney coordinated adaptive traffic (SCAT) system philosophy and benefits. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 29(2), 130–137. doi:10.1109/T-VT.1980.23833
- Smith, H. R., Hemily, B. ve Ivanovic, M.** (2005). Transit Signal Priority (TSP): A Planning and Implementation Handbook. <https://trid.trb.org/View/772546> adresinden erişildi.
- Stevanovic, A., Kergaye, C. ve Martin, P. T.** (2009). Scoot and scats: A closer look into their operations. *88th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC* içinde .
- Stevanovic, A., Stevanovic, J., Kergaye, C. ve Martin, P.** (2011). Traffic control optimization for multi-modal operations in a large-scale urban network. *2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems* içinde (ss. 146–151). doi:10.1109/FISTS.2011.5973603
- TRB.** (2000). *HCM 2000: Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board.
- TRB.** (2010). *HCM 2010: Highway Capacity Manual*. Fifth edition. Washington, D.C. : Transportation Research Board, c2010-. <https://search.library.wisc.edu/catalog/9910110589002121> adresinden erişildi.

- TRL.** (2017). *MOVA Traffic Control Manual Application Guide 44*.
- TRLSoftware.** (2018). *SCOOT*. <https://trlsoftware.com/products/traffic-control/scoot/> adresinden erişildi.
- Vissim Users Manual.* (2000). Karlsruhe, Germany.
- Webster, F. V.** (1958). *Traffic Signal Settings*. Road research technical paper. H.M. Stationery Office. <https://books.google.com.tr/books?id=c9QOQ4jXK5cC> adresinden erişildi.
- Wu, J. ve Hounsell, N.** (1998). Bus Priority Using pre-signals. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 32(8), 563–583. doi:[https://doi.org/10.1016/S0965-8564\(98\)00008-1](https://doi.org/10.1016/S0965-8564(98)00008-1)
- Xerox ® Vehicle Passenger Detection System.* (2017).
- Yang, K., Menendez, M. ve Guler, S. I.** (2019). Implementing transit signal priority in a connected vehicle environment with and without bus stops. *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 7(1), 423–445. doi:10.1080/21680566.2018.1434019
- Zhang, G., Wu, Y.-J., Liu, X. ve Wang, Y.** (2010). Impacts of High Occupancy Toll lane operations on High Occupancy Vehicle travelers. *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems* içinde (ss. 1594–1599). doi:10.1109/ITSC.2010.5625273
- Zhang, Y., Gao, K., Zhang, Y. ve Su, R.** (2019). Traffic Light Scheduling for Pedestrian-Vehicle Mixed-Flow Networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(4), 1468–1483. doi:10.1109/TITS.2018.2852646
- Zhao, L., Fang, J., Hu, J., Li, Y., Lin, L., Shi, Y. ve Li, C.** (2018). The performance comparison of LTE-V2X and IEEE 802.11p. *IEEE Vehicular Technology Conference* içinde (C. 2018-June, ss. 1–5). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi:10.1109/VTCSpring.2018.8417813

EKLER

EK A: “Sinyalize Kavşaklarda Gecikmeyi Minimize Etmekte Kullanılan Optimizasyon Tekniklerinin Karşılaştırılması: PSO ve GA” Başlıklı Makale





EK A : “Sinyalize Kavşaklarda Gecikmeyi Minimize Etmekte Kullanılan Optimizasyon Tekniklerinin Karşılaştırılması: PSO ve GA” Başlıklı Makale

**Comparison of Optimization Techniques for Delay Minimization
in Signalized Intersections: PSO vs GA**

Abdullah Karadag^{1*}, Murat ERGÜN²

^{1*} Istanbul Technical University, Faculty of Civil Engineering, Department of Transportation, Istanbul, Turkey, [REDACTED]

² Istanbul Technical University, Faculty of Civil Engineering, Department of Transportation, Istanbul, Turkey, [REDACTED]

(First received XXXX and in final form XXXX)

(DOI: 10.31590/ejosat.)

Abstract

Minimizing intersection delays is an important challenge in today's smart cities. Even there are different approaches for delay minimization most of them uses the same nonlinear delay formula defined by Highway Capacity Manual (US). As a result choosing a fast and precise algorithm for finding the optimal phase times minimizing the delay output is a critical decision. In this paper we share our experience in selection of best optimization algorithm as a part of our work of developing an innovative system to minimize person delays in intersections. We compared two best known algorithms: Genetic Algorithms (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO). It is shown that using the same population size and number of iterations PSO is 7x faster and 17x more precise than GA.

Keywords: Adaptive traffic signal control, Genetic algorithms, Particle swarm optimization, Intersection delay minimization, Real-time optimization.

Özet

Kavşak gecikmelerini en aza indirmek günümüzün akıllı şehirlerinde önemli bir zorluktur. Gecikme minimizasyonu için farklı yaklaşımlar olsa da bunların çoğu Karayolu Kapasite El Kitabı (ABD) tarafından tanımlanan aynı doğrusal olmayan gecikme formülünü kullanır. Sonuç olarak, gecikme çıktısını en aza indiren optimum faz sürelerini bulmak için hızlı ve hassas bir algoritma seçmek kritik bir karardır. Bu makalede, kavşaklardaki kişi gecikmelerini en aza indirmek için yenilikçi bir sistem geliştirmeye çalışmamızın bir parçası olarak en iyi optimizasyon algoritmasının seçimindeki deneyimimizi paylaşıyoruz. En iyi bilinen iki algoritmayı karşılaştırdık: Genetik Algoritmalar (GA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO). Aynı popülasyon boyutu ve iterasyon sayısı kullanıldığında PSO'nun GA'dan 7 kat daha hızlı ve 17 kat daha hassas olduğu gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Uyarlanabilir trafik sinyal kontrolü, Genetik algoritmalar, Parçacık sürü optimizasyonu, Kavşak gecikme minimizasyonu, Gerçek zamanlı optimizasyon.

* Corresponding Author [REDACTED]

Şekil A.1 : “Sinyalize Kavşaklarda Gecikmeyi Minimize Etmekte Kullanılan Optimizasyon Tekniklerinin Karşılaştırılması: PSO ve GA” başlıklı makale

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Abdullah KARADAĞ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2002, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Müh.
- **Yüksek Lisans** : 2009, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Müh. Anabilim Dalı, Biyomedikal Müh.

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2002 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Müh. bölümünden mezun oldu.
- 2009 yılında aynı üniversitede “Dalgacık Ağlarıyla Elektrokardiyografik Aritmilerin Sınıflandırılması” tez konusuyla yüksek lisansını tamamladı.
- 2003-2018 yılları arasında İSBAK A.Ş.’de Yazılım Mühendisi, Takım Lideri ve Koordinatör ünvanlarıyla çalıştı.
- 2018-2022 yılları arasın Türk Havayolları Teknik A.Ş.’de Proje Yöneticisi ünvanıyla çalıştı.
- 2018-2024 yılları arası Teknik Elemanlar Derneği İstanbul İl Başkanlığını yürüttü.
- 2021 yılından beri Hinda Akıllı Şehir Teknolojileri firmasında Ortak ve Teknik Müdür olarak çalışmaya devam etmektedir.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Karadağ, A., Ergün, M.** 2023. Sinyalize Kavşaklarda Gecikmeyi Minimize Etmekte Kullanılan Optimizasyon Tekniklerinin Karşılaştırılması: PSO ve GA, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, DOI: 10.31590/ejosat.1270905

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Gundogan, F., Karagöz, Z., Kocyigit, N., Karadag, A., Ceylan, H. ve Murat, Y.** (2014). An Evaluation of Adaptive Traffic Control System in Istanbul, Turkey. *Journal of traffic and logistic engineering*, 2, 198–202. doi:10.12720/jtle.2.3.198-201
- **Karadag, A., Alyürük, M. ve Gündogan, F.** (2012). Evaluation of Parking Violation System in Istanbul. *19th Intelligent Transport Systems World Congress, ITS 2012* içinde (s. EU-00366). <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84897011278&partnerID=40&md5=b93920979273e4274e50736c57002915> adresinden erişildi.