

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAPAY ARI KOLONİSİ ALGORİTMASI İLE DEVRE SÜRESİ
MODELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Özge YILMAZ

HAZİRAN 2019



Canım Anneme

ÖZET

YAPAY ARI KOLONİSİ ALGORİTMASI İLE DEVRE SÜRESİ MODELLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

YILMAZ, Özge

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Ali Payıdar AKGÜNGÖR

Haziran 2019, 114 sayfa

Günümüzde artan nüfus ve ekonomideki büyüme sonucu trafikteki araç kullanım oranı hızla artmakta, buna bağlı olarak yol kapasiteleri yetersiz kalmaktadır. Bu durum kavşaklarda gereksiz zaman kaybına, yakıt tüketimlerinin, emisyon değerlerinin artması ve sürücü memnuniyetsizlikleri gibi olumsuz etkilere neden olmaktadır. Bu sorunların çözümü için ise optimum devre sürelerinin belirlenmesi önem arz etmektedir.

Bu tez kapsamında Yapay Arı Kolonisi Algoritmasına (YAKA) bağlı olarak optimum devre süresini tayin eden modeller geliştirilecektir. Geliştirilen modellerin performans karşılaştırmaları Webster optimum devre süresi modeline göre gecikme değerleri üzerinden yapılacaktır. Modellerden ve Webster yaklaşımından elde edilen devre sürelerine göre her bir trafik durumu için gecikme değerleri VISSIM Simülasyon programı ile elde edilecektir. Dört kollu bir kavşağın simülasyonu yapılarak farklı devre sürelerine göre kavşağın sinyal kontrolü incelenecektir.

Tezde farklı trafik hacimlerinde optimum devre süresini veren modeller geliştirilmiş ve performansları ortaya konulmuştur. Modellerin geliştirilmesinde Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) ve Yapay Arı Kolonisi Algoritması (YAKA) kullanılmış olup, farklı model formları oluşturulmuştur. Modeller, literatürde yaygın olarak kullanılan Webster optimum devre süresi modeli ile karşılaştırılmış ve performanslar, ortalama taşıt gecikmeleri ile incelenerek hangi modelin Webster

modeline göre daha iyi sonuçlar verdiği ortaya konulmuştur. Performans değerlendirmesinde kullanılan gecikme verisi VISSIM simülasyon programı üzerinden elde edilmiştir.

Geliştirilen model formları içerisinde her 3 model de Webster modeline göre daha başarılı olmakla birlikte, Model-2 formunun en iyi performansa sahip olduğu görülmüştür. Geliştirilen modellerin diğer bir başarısı da hem doygun altı hem de doygun üstü trafik durumlarında trafiği yönetebilmesidir.

Bu tez ile farklı yapay zekâ tekniklerinin sinyalizasyon optimizasyonunda kullanılmasıyla kavşak performansında iyileştirme gerçekleştirilecektir. Ayrıca, gecikme, yakıt tüketimi gibi olumsuz etkileri minimize etmeyi amaç edindiği için trafik planlamalarında bu çalışmadan çıkacak sonuçlardan yararlanılabileceği düşünölmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kavşak kontrolü, Optimizasyon, Webster optimum devre süresi, Diferansiyel gelişim algoritması, Yapay arı kolonisi algoritması, VISSIM.

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF CYCLE LENGTH MODELS WITH ARTIFICIAL BEE COLONY ALGORITHM

YILMAZ, Özge

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Science

Department of Civil Engineering, M.Sc. Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Ali Payıdar AKGÜNGÖR

June 2019, 114 pages

Today, as a result of increasing population and economic welfare level, vehicle usage rate in traffic is rapidly increasing, because of this, road capacities are insufficient. This situation causes adverse effects, such as increase in delays, fuel consumption and emissions and also driver dissatisfaction. It is important to determine the optimum cycle length for resolving these problems.

Models that determine the optimum cycle length will be developed in this Project depending on the Artificial Bee Colony Algorithm (ABC). Performance comparisons of the developed models will be made using the delay values according to Webster optimal cycle time model. Delay values for each traffic situation will be gotten by VISSIM Simulation program according to the cycle lengths obtained from proposed Models and Webster approach. The control of the intersection will be examined by simulating a four-armed intersection according to different cycle lengths.

In the thesis, models were developed to determine the optimal cycle length for different traffic situations and performances of models were revealed. In the development of the models, Differential Evolution Algorithm (DEA) and Artificial Bee Colony Algorithm (ABC) were used and different model forms were created. The models were compared with the Webster optimal cycle length model which is commonly used in the literature and the performances were examined with average per vehicle and it was revealed that which model gives better result than Webster

model. The delay data to be used in the performance evaluation were obtained from the VISSIM simulation program.

Among the developed model forms, it is seen that the model structure in the Model-2 form has the best performance in all three models with being more successful than the Webster model. Another success of the developed models is that it can manage the traffic in both saturated and supersaturated traffic situations.

This thesis will improve the performance of intersection by using different artificial intelligence techniques in optimization of signalization. In addition, since it is intended to minimize the adverse effects, such as delay, fuel consumption, it is thought that the results of this study can be utilized in traffic planning.

Key Words: Intersection control, Optimization, Webster optimal cycle time, Differential evolution algorithm, Artificial bee colony algorithm, VISSIM.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi çalışmalarım boyunca engin bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, yardımlarını esirgemeyen, her aşamada destek olan danışmanım, değerli hocam Sayın Prof. Dr. Ali Payıdar AKGÜNGÖR' e ve tez kapsamında yapmış olduğum çalışmalarda bilgilerini her zaman benimle paylaşıp, sorun yaşadığım her an desteğiyle yardımlarını esirgemeyen hocam Sayın Ersin KORKMAZ' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu uzun soluklu yüksek lisans yolculuğumda manevi desteğiyle her zaman anne eli gibi eli üzerimde olan Sayın Doktor Öğretim Üyesi Eda AVANOĞLU SICACIK hocama; her an desteğiyle beni ayakta tutan, her koşulda her zaman yanımda olup beni her kararımdaya destekleyen hayat arkadaşım, biricik eşim Makine Mühendisi Erkan Mehmet YILMAZ' a; bütün varlığıyla her zaman yanımda duran ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen biricik babam İsmet YILDIZ' a tüm destekleri için şükranlarımı sunarım.

En büyük teşekkürümü ise beni dünyaya getiren, büyüten, aldığım tüm kararlarda arkamdaya durarak destekleyen, her zaman yanımda olduğunu ve yüksek lisansımı bitirmemi herkesten çok istediğini bildiğim, yüksek lisans sürecinde kendisini ebediyete uğurladığım biricik annem Hacer YILDIZ' a etmek istiyorum. Ruhun şad olsun meleğim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

<u>İÇİNDEKİLER</u>	<u>SAYFA</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER DİZİNİ	xiii
KISALTMALAR DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Problem	2
1.2. Amaç	2
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1. Literatür	3
2.2. Kavşaklar.....	8
2.2.1. Hemzemin (Eşdüzey) Kavşaklar:.....	10
2.2.1.1. Denetimsiz Eş Düzey Kavşaklar.....	10
2.2.1.2. Denetimli Eş Düzey Kavşaklar.....	11
2.2.2. Katlı Kavşaklar.....	12
2.3. Sinyalizasyon.....	12
2.3.1. İzole Sinyalizasyon Sistemi	13
2.3.1.1. Sabit Zamanlı Sinyalizasyon Sistemi	14
2.3.1.2. Trafik Uyarmalı Sinyalizasyon Sistemi.....	15
2.3.1.2.1. Yarı- Trafik Uyarmalı Sinyalizasyon Sistemi	15
2.3.1.2.2. Tam- Trafik Uyarmalı Sinyalizasyon Sistemi	15
2.3.1.3. Yaya Uyarmalı Sinyalizasyon Sistemi	15

2.3.1.4.	El İle Kumandalı Sinyalizasyon Sistemi	16
2.3.2.	Sinyalizasyon Temel Kavramları	16
2.4.	Devre Süresi	19
2.4.1.	Devre Süresi Bileşikleri.....	19
2.4.2.	Kayıp Zaman.....	20
3.	ANALİTİK YÖNTEMLER.....	21
3.1.	İngiliz (Webster) Yöntemi.....	21
3.1.1.	Doygun Akım Hesabı.....	23
3.1.1.1.	Kavşak Kolunun Genişliği.....	23
3.1.1.2.	Eğim Etkisi	24
3.1.1.3.	Trafik Kompozisyonunun Etkisi.....	24
3.1.1.4.	Sola Dönen Trafiğin Etkisi	25
3.1.1.5.	Sağa Dönen Trafiğin Etkisi.....	26
3.1.1.6.	Yaya Etkisi.....	26
3.1.1.7.	Park Şeridi Etkisi	26
3.1.2.	Webster Yöntemi ile İlgili Yapılan Diğer Çalışmalar:	28
3.2.	HCM Yöntemi (HCM: Highway Capacity Manual).....	30
3.2.1.	Girdi Parametreleri.....	32
3.2.1.1.	Geometrik Özellikler	33
3.2.1.2.	Trafik Özellikleri	33
3.2.1.3.	Sinyal Özellikleri	34
3.2.2.	Hacim Düzeltmeleri	35
3.2.2.1.	Saatlik Trafik Hacimlerin Zirve Saat Faktörü İle Zirve Saat Trafiğine Dönüştürülerek Düzeltilmesi.....	35
3.2.2.2.	Şerit Gruplarının Belirlenmesi İşlemi.....	36
3.2.2.3.	Trafik Hacimlerinin Belirlenen Şerit Gruplarına Göre Tekrar Düzenlenmesi Durumu.....	38

3.2.3.	Doygun Akım Değeri.....	38
3.2.4.	Kapasite.....	42
3.2.5.	Performans	43
3.2.5.1.	Gecikme	43
3.2.5.2.	Hizmet Düzeyinin Belirlenmesi.....	45
4.	YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ	47
4.1.	Diferansiyel Gelişim Algoritması	47
4.1.1.	Başlangıç Popülasyonu	48
4.1.2.	Mutasyon.....	49
4.1.3.	Çaprazlama.....	51
4.1.3.1.	Binomial Çaprazlama Metodu	51
4.1.3.2.	Üstel Çaprazlama Metodu	52
4.1.3.3.	Aritmetik Çaprazlama Metodu	52
4.1.4.	Seçim.....	53
4.1.5.	Diferansiyel Gelişim Algoritmasında Kontrol Parametreleri	53
4.2.	Yapay Arı Kolonisi Algoritması	54
4.2.1.	Arıların Doğası.....	55
4.2.2.	Arıların Yiyecek Arama Davranışı	59
4.2.3.	Yapay Arı Kolonisi Algoritmasının Basamakları	64
4.2.3.1.	Başlangıç Yiyecek Kaynak Bölgelerinin Üretilmesi	65
4.2.3.2.	İşçi Arıların Yiyecek Kaynağı Olan Bölgeye Gönderilmesi	66
4.2.3.3.	Olasılıksal Seçilim İçin Olasılık Değerlerinin Görevli Arıların Verdiği Bilgiye Göre Bulunması	67
4.2.3.4.	Gözcü Arıların Bulunan Olasılık Verilerine Göre Yiyecek Kaynağı Bölgesi Seçmeleri.....	68
4.2.3.5.	Kaynağı Bırakma Kriteri : Limit ve Kaşif Arı Üretimi	68
5.	METODOLOJİ.....	69

5.1. VISSIM Simülasyon Programı.....	69
5.2. VISSIM' in Özellikleri.....	71
5.3. Optimum Devre Süresi Modellerinin Geliştirilmesi	72
5.4. Geliştirilen Optimum Devre Süresi Modellerinin Simülasyon Ortamında Performansları	76
6. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	80
7. SONUÇLAR.....	89
KAYNAKLAR	91
EKLER.....	97
EK 1. Kayıp zamanın 4 sn. ve 10 sn. arasında değiştiği farklı trafik durumlarına göre oluşturulmuş veriler.....	97
EK 2. Webster ve geliştirilen arama algoritmasına göre kayıp zamanın 4 sn. ve 10 sn. arasındaki trafik durumlarının devre süreleri	104
EK 3. Kayıp süreleri 4 sn, 6 sn, 8 sn ve 10 sn değerleri için elde edilen gecikme ve devre süresi değerleri	111

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>SAYFA</u>
Şekil 2.1. Kavşak Tipleri	9
Şekil 2.2. Hemzemin ve Köprülü Kavşak Dönüşleri.....	9
Şekil 2.3. Geometrik Durumlarına Göre Kavşak Şekilleri	10
Şekil 2.4. Sinyal Devre Düzeni.....	16
Şekil 2.5. Örnek Faz Düzeni	18
Şekil 2.6. Devre Düzeni Diyagramı	19
Şekil 3.1. Sinyalize Kavşak Metodolojisi.....	32
Şekil 3.2. Tipik Şerit Grupları.....	36
Şekil 4.1. Temel Adımlar.....	47
Şekil 4.2. Arıların Doğası	56
Şekil 4.3. Arı Görev Dağılımı.....	59
Şekil 4.4. Arıların Yer-Yön Bulmaları	62
Şekil 4.5. Arıların Yiyecek Arama Davranışı.....	63
Şekil 5.1. 4 kollu sinyalize kavşak.....	78
Şekil 5.2. 3 boyutlu 4 kollu sinyalize kavşak	78
Şekil 6.1. Toplam Kayıp Zaman 4 Saniye İken Webster ve Geliştirilen Modeller İçin Optimum Devre Süreleri	81
Şekil 6.2. Toplam Kayıp Zaman 5 Saniye İken Webster ve Geliştirilen Modeller İçin Optimum Devre Süreleri	81
Şekil 6.3. Toplam Kayıp Zaman 6 Saniye İken Webster ve Geliştirilen Modeller İçin Optimum Devre Süreleri	82
Şekil 6.4. Toplam Kayıp Zaman 7 Saniye İken Webster ve Geliştirilen Modeller İçin Optimum Devre Süreleri	82
Şekil 6.5. Toplam Kayıp Zaman 8 Saniye İken Webster ve Geliştirilen Modeller İçin Optimum Devre Süreleri	83
Şekil 6.6. Toplam Kayıp Zaman 9 Saniye İken Webster ve Geliştirilen Modeller İçin Optimum Devre Süreleri	83
Şekil 6.7. Toplam Kayıp Zaman 10 Saniye İken Webster ve Geliştirilen Modeller İçin Optimum Devre Süreleri.....	84

Şekil 6.8. Toplam Kayıp Zaman 4 Saniye İken Webster ve Geliştirilen Modeller İçin Gecikme Değerleri	85
Şekil 6.9. Toplam Kayıp Zaman 6 Saniye İken Webster ve Geliştirilen Modeller İçin Gecikme Değerleri	86
Şekil 6.10. Toplam Kayıp Zaman 8 Saniye İken Webster ve Geliştirilen Modeller İçin Gecikme Değerleri	86
Şekil 6.11. Toplam Kayıp Zaman 10 Saniye İken Webster ve Geliştirilen Modeller İçin Gecikme Değerleri	87



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>SAYFA</u>
Çizelge 3.1. Kavşak Değişikliğine Göre Doygun Akım Değerleri Tablosu.....	24
Çizelge 3.2. Farklı Türdeki Taşıtlar Birim Oto Eşdeğerlikleri	25
Çizelge 3.3. Şerit Kullanım Faktörleri	38
Çizelge 3.4. Ağır Taşıtlar İçin Düzeltme Faktörü, fHW	39
Çizelge 3.5. Şerit Genişliği İçin Düzeltme Faktörü, fW	40
Çizelge 3.6. Otobüs Blokajı Düzeltme Faktörü, fbb	40
Çizelge 3.7. Park İçin Düzeltme Faktörü, fp	40
Çizelge 3.8. Kavşağın Bulunduğu Bölge Türü İçin Düzeltme Faktörü, fa.....	41
Çizelge 3.9. Kavşağın Bulunduğu Kol için Eğim Düzeltme Faktörü, fg.....	41
Çizelge 3.10. Sola Dönen Araçlar İçin Düzeltme Faktörü, fLT; Sağa Dönen Araçlar İçin Düzeltme Faktörü, fRT; Yaya Düzeltme Faktörü (Sağa Dönüşler İçin), fRbp ; Yaya Düzeltme Faktörü (Sola Dönüşler İçin), fLbp	42
Çizelge 3.11. Hizmet Düzeyi	45
Çizelge 5.1. DGA Kontrol Parametreleri.....	73
Çizelge 5.2. YAKA Kontrol Parametreleri.....	74
Çizelge 5.3. Geliştirilen Optimum Devre Süresi Tahmin Modellerinin Katsayıları .	75
Çizelge 5.4. Kayıp Zaman 4 sn İçin Gecikme ve Devre Süresi Değerleri (sn)	75
Çizelge 5.5. Belirlenen Optimum Devre Süresi Tahmin Modellerinin Katsayıları...	76
Çizelge 5.6. Kayıp Zaman 4 sn İçin Farklı Trafik Durumları	77
Çizelge 6.1. Optimum Devre Süreleri Tahminine Göre İstatistikî Bulgular	85
Çizelge 6.2. Gecikme Değerleri Tahminlerine Göre İstatistikî Bulgular	87

SİMGELER DİZİNİ

C	Devre Süresi
C_{opt}	Optimum Devre Süresi
c	Kavşak Kolunun Kapasitesi
g	Etkili Yeşil Süre
a	Sarı Süre
r	Kırmızı Süre
s	Doygun Akım
T	Analiz Periyodu
l	Kayıp Zaman
d	Gecikme
λ	Yeşil Süre Oranı
x	Doygunluk Derecesi
N	Şerit Sayısı

KISALTMALAR DİZİNİ

DGA	Diferansiyel Gelişim Algoritması
GA	Genetik Algoritması
HCM	Otoyol kapasite kullanımı (Highway Capacity Manual)
YAKA	Yapay Arı Kolonisi Algoritması
HCS	Otoyol kapasite yazılımı (Highway Capacity Software)
KKO	Karınca Kolonisi Algoritması
ZSF	Zirve Saat Faktörü
VISSIM	Verkehr in <i>Städten</i> -Simulation: traffic in towns– simulation
OKHK	Ortalama Karesel Hataların Karekökü
OMYH	Ortalama Mutlak Yüzdesel Hatalar

1. GİRİŞ

Ulaşım, insanlığı her zaman ilgilendiren bir konu olmuş ve hayatımızın her alanında yer edinmiştir. Çünkü ulaştırma; bilgilerin, belgelerin, hizmetlerin, insanların, hayvanların yani canlı veya cansız olguların belirli bir yerden başka bir yere bir amaç doğrultusunda taşınmasında en önemli faktördür. Ulaştırmanın hayatımızdaki bu önemi bilim insanlarını bu konu üzerinde çalışmaya ve geliştirmeler yapmaya itmiştir. Hem sürücülerin hem de yayaların daha rahat bir ulaşım sağlayabilmeleri için ulaştırmayı geliştirmek ve ulaştırmanın çeşitli problemlerini çözmek adına pek çok çalışmalar yapılmıştır.

Her geçen gün artan nüfus beraberinde trafikteki araç sayısının ve yaya hareketlerinin artmasına ve bu durum da trafikte geçirilen sürenin uzamasına neden olmaktadır. Özellikle kavşakların performanslarına bağlı olarak oluşan kavşaklarda ki bu zaman kayıpları, sürücü sabırsızlığını arttırarak, yayalara karşı olan davranışlarının olumsuzlaşmasına neden olmuştur. Bu olumsuz davranışlar ve sabırsızlıklar ani kazalar ile can ve mal kaybına sebebiyet verirken aynı zamanda da ülke ekonomisi açısından da olumsuzluklar yaratmaktadır. Bu durumda insanlar hem maddi hem de manevi zararlara uğramakta ve psikolojik olarak olumsuz etkilenmektedir. Bu olumsuzluklar sadece yayalar ve sürücüler üzerinde psikolojik olarak değil aynı zamanda çevreye emisyon salınımının artması, doğayı kirletmesi, gürültü kirliliğini oluşturması bakımından da insanların sağlığını kötü yönde etkilemektedir.

Tüm bu olumsuzluklar göz önüne alındığında kavşaklarda optimum devre süresinin önemli bir kavram olduğu görülmektedir. Devre sürenin optimize edilmesi ile kavşaklarda sinyalizasyona bağlı olarak geçen süreler ve kayıp zamanlar daha makul, değerlere indirilmesi mümkün olmaktadır. Optimum devre süresinin doğru olarak belirlenmesi ve faz düzenlerinin bu devre süresine bağlı olarak ayarlanması ile araç başına düşen ortalama gecikmelerin azalması ve gereksiz yakıt tüketiminin önüne geçilmesi mümkün olabilecektir.

1.1. Problem

Kavşaklarda karşılaşılan önemli problemlerden birisi de uygun devre süresinin belirlenememesi sonucu oluşan kapasite yetersizliği ve buna bağlı olarak gecikme değerlerindeki artıştır. Özellikle yapılaşmanın tamamlandığı ve kavşak geometrisinin değiştirilemediği noktalarda kavşak kapasitesini arttırmak sinyalizasyon kontrolü ile gerçekleştirilebilmektedir. Günümüze seyahat talebi artış trendinde olup, kavşakların verimli kullanılması, yeterli hizmet düzeyine ve kapasiteye ulaştırılması gerekmektedir. Bu noktada sinyalizasyondan kaynaklı gecikmelerin azaltılması ve kapasitesinin artırılması için farklı yaklaşımlarla devre süresi optimizasyonu üzerinde çalışmalar sürdürülmektedir. Ancak geleneksel yaklaşımlarla elde edilen devre süresi modellerinin günümüzde yetersiz kaldığı bilinmekte, bu yönü ile de başta yapay zeka teknikleri olmak üzere meta sezgisel algoritmaların trafik mühendisliğinde kullanılması ile optimum çözümler elde edilmesi mümkün olabilmektedir.

1.2. Amaç

Bu tez kapsamında 4 kollu sinyalize bir kavşaktaki gecikmenin minimize edilmesini ve kapasitenin artırılmasını sağlayacak optimum devre süresinin tayin edilmesi amaçlanmaktadır. Devre süresi tahmininde Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) kullanılarak ve Yapay Arı Kolonisi Algoritmasına (YAKA) bağlı tahmin modelleri geliştirilecektir. VISSIM simülasyon programı aracılığıyla farklı trafik durumları için geliştirilen modeller ve Webster devre süresi modeli sonuçlarına göre simüle edilerek performans karşılaştırmaları ortaya konulacaktır.

Farklı trafik durumları için optimum devre süresinin belirlenmesi ve gecikmeyi minimize etmek için yapay zekâ yaklaşımlarından faydalanmayı amaçlayan bu çalışma sonuçlarının trafik planlama, karar alma vb. işlemlerde trafik planlılarına farklı bir bakış açısı getireceği düşünülmektedir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Literatür

Geçmiş yıllardan bu yana kavşak kontrolünün optimizasyonu üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Özellikle kavşak sinyalizasyon sistemlerinde devre süresinin önemli bir etkisi bulunmaktadır. Birçok araştırmacı kavşaklarda farklı yaklaşımları kullanarak iyileştirme gerçekleştirirken devre süresinin optimizasyonu üzerine ağırlık vermiş ve optimum devre süresinin belirlenmesi konusunda çalışmalar yapmışlardır.

Webster 'in geliştirmiş olduğu gecikme modeli ve gecikmeyi minimum yapmaya dayalı optimum devre süresi modeli bu konuda yapılan ilk çalışmalardan biridir. Webster geliştirdiği modelde kayıp zamanlara ve her bir fazdaki akımlar oranına bağlı olarak devre süresini tayin etmiştir. Doygun altı trafik durumlarında çalışan bu model doygun üstü trafik durumlarında etkinliğini yitirdiği için yetersizlikler göstermektedir [1]. Amerikan otoyol idaresinin geliştirdiği zamana bağlı gecikme modeli ve devre süresi modeli bu eksikliği gidermeyi amaçlamıştır. Geliştirilen devre süresi modelinde toplam kayıp zaman ve kritik fazlardaki trafik hacimleri model parametresi olarak kullanılmıştır. Webster modeline göre doygun üstü trafik durumlarında da kullanılabilen model en düşük gecikmeyi sağlamayı amaçlamaktadır.

Chang ve Lin, doygun üstü kavşaklarda trafik durumu için optimum devre süresinin belirlenmesi üzerine çalışmışlardır. Doygun üstü zamanları kapsayan karar metodolojisine göre ayrık dinamik optimizasyon modelleri geliştirmişlerdir. İki fazlı bir kavşak için optimum devre süresini belirleyen modeller, sıkışık trafiklerde uygun devre süresini belirleyebilmiş ve iyi bir performans gösterebilmiştir [2].

Trafik hacminin yüksek olduğu dört fazlı izole kavşaklarda çalışmalarını yapan Cheng ve arkadaşları, en düşük gecikmeyi ve optimum devre süresini veren bir bağıntı ortaya çıkarmayı amaçlamışlardır. Webster ve HCM2000 denklemlerini inceleyerek üç adet regresyon formülü önermişlerdir. Bu üç regresyon formülü

içerisinden de ürettikleri üstel tip regresyon modelinin diğer modellere ve Webster modeline göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir [3].

Lan, Webster gecikme formülünün doygun üstü durumlardaki eksikliğinden yola çıkarak doğrusal olmayan regresyon analiziyle kritik akım oranı, toplam kayıp zaman, devre uzunluğu gibi parametreler arasındaki ilişkiyi saptamaya çalışmış ve yeni bir model geliştirmiştir. Geliştirilen bağıntı ile analitik formüller oldukça yakın tahminler üreterek gecikmede %0,9 oranında düşüş sağlanmıştır [4].

Cheng ve arkadaşları, Webster formülünü dikkate alarak yeni bir devre süresi modeli geliştirmişlerdir. Minimum gecikmeyle beraber optimum devre süresinin belirlenmesi için Synchro5 programını ve CORSIM trafik simülasyonunu da kullanarak çalışmalarını yürütmüşlerdir. Geliştirdikleri üç yeni modelin içinden üstel tip bağıntının HCM 2000 ve Webster formülüne oranla daha olumlu sonuçlar verdiğini açıklamışlardır [5].

Han ve Li, devre süresinin optimizasyonunda matematiksel bağıntılar ve Monte Carlo simülasyonu kullanarak olasılık yaklaşımını uygulamışlardır. Uygun devre süresinin gecikmeyi düşüreceği ve kapasiteyi arttıracığı vurgulanan çalışmada uzun devre süresinin gecikmeyi düşüremediği ve çok kısa devre süresinde yetersiz kapasiteden dolayı gecikmenin arttığını ifade etmişlerdir [6].

Day (2008) sinyalizasyon kavşaklarında Webster formülü ve HCM 'nin hesaplamalarını kullanıp herhangi bir kavşakta minimum devre süresinin az, çok ve yeterli olduğunu tespit ettikleri zaman dilimlerini belirlemişler ve devre sürelerini incelemişlerdir [7].

Kavşak performansını optimuma yakın sağlamayı hedefleyen Singh ve diğerleri Genetik Algoritma (GA) kullanarak gerçek zamanlı sinyal kontrol stratejisi uygulamışlardır. Büyük ve karmaşık bir trafik ağı için zor olan etkili gerçek zamanlı sinyal kontrolünde, yeşil sürenin uzatılıp uzatılamayacağına gelişmiş akıllı sistemler ile karar vermişlerdir. GA'ya dayalı olarak geliştirilen modelin sonuçlarını, sabit zamanlı sistemle karşılaştırmışlar ve kendi geliştirdikleri kontrol sistemlerinin verimli olduğu yorumunu getirmişlerdir [8].

Ma ve Nakamura, devre süresinin belirlenmesinde gecikme yerine emisyon değerinin minimum edilmesine dayanan model geliştirmişlerdir. Gecikmeye dayalı devre süresi modeliyle önerilen modeli karşılaştırdıklarında özellikle ağır taşıt oranının fazla olduğu trafik durumlarında emisyona bağlı devre süresi modelinin etkili olduğunu vurgulamışlardır [9].

Zhao ve arkadaşları (2011) optimum devre süresinin belirlenmesinde hızlı aç gözlü arama algoritmasını kullanmışlardır. Önerilen yöntemin doygun üstü durumlarda optimum devre süresinin belirlenmesinde verimli ve pratik bir yöntem olduğunu göstermişlerdir [10].

Dai ve arkadaşları, daha önceleri elde edilen istatistikleri ve farklı trafik akışlarını göz önünde bulundurup ortalama saatlik trafik hacmine dayanarak geliştirdikleri yöntemle kavşağın devre süresi hesabını yapmışlardır. Kontrol sürecinin eşik değerini bularak bir günü belirli aralıklara bölmüşler ve geliştirdikleri modelin performansını değerlendirmişlerdir. Bu değerlendirmeler sonucu elde ettikleri verilerin gerçek trafik durumları ile örtüştüğünü görmüşlerdir [11].

Al-Kubaisi, araçların davranışları ve gecikmeleri üzerine bir çalışma yapmıştır. Ortaya çıkardığı regresyon modeli ile araç gecikmesini minimum, devre süresini ise optimum yapmayı amaçlamıştır. Modeli doğrulamak amacıyla OSCADY/3 yazılımını kullanmıştır. Elde ettiği sonuçları kıyaslayarak tahmin ettiği ve elde ettiği verilerin örtüştüğünü gözlemiştir. Çalışmasını önce tek şerit ve dört kollu sinyalize kavşak, ardından iki şeritli ve dört kollu sinyalize kavşak ve son olarak da üç şeritli trafik akışı ile dört kollu sinyalize kavşak şeklinde yürütmüştür. Sonuç olarak da araç gecikmesini minimuma indirmek için önerilerde bulunmuştur [12].

Dell'Orco ve arkadaşları, yaptıkları çalışmalarda yapay arı kolonisi ve harmoni arama algoritmalarını sinyal sürelerini optimize etmek için uygulamışlardır. GA'ya göre çalışan TRANSTY-7F program sonuçları ile önerdikleri modelleri karşılaştırmışlar ve daha iyi sonuçlar elde ettiklerini ortaya koymuşlardır [13, 14].

Gecikmenin kavşak performansının belirlenmesinde önemli parametrelerden biri olduğuna değinen Murat ve Çakıcı, yaptıkları çalışmada on dört farklı trafik durumunu göz önüne almışlardır. Harmoni araması, diferansiyel gelişim ve parçacık sürü optimizasyonu tekniklerini kullanarak gecikme ve optimum devre sürelerini

bulmuşlardır. Elde ettikleri sonuçları Webster'in optimum devre süresi modeli ile karşılaştırdıklarında kendi kullandıkları tekniklerin Webster denklemiyle buldukları sonuçlara kıyasla daha iyi olduğunu görmüşlerdir [15].

Zakariya ve Rabia, minimum gecikme ve optimum devre uzunluğunu bulmak için bir arama algoritması geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, otoyol kapasite kullanımında (HCM) bulunan zamana bağlı gecikme bağıntılarından yararlanarak iki adet optimum devre süresi modeli önermişlerdir. Önerdikleri bu modellerin sonuçlarını Webster formülü ile karşılaştırmışlardır. Çalışma sonuçları önerilen bağıntıların doygun akım durumlarında Webster modelinden daha iyi sonuçlar verdiğini karşılaştırarak belirtmişlerdir [16].

Daha önceleri GA'nın trafik sinyal optimizasyonundaki etkinliğini ve GA'nın verdiği iyi sonuçları gören fakat kısıtlı optimizasyon problemlerinde erken yakınsamaya uğrayan GA'nın bu sorununu gidermek amacıyla Sabar ve arkadaşları (2017) çalışmalarında önerdikleri memetik algoritma ile arama işlemlerini hızlandırma, ürettikleri çözümlerin yüksek kalitede olması gibi amaçlarla GA'nın güçlü yönlerini birleştirmişlerdir. Önerdikleri yaklaşımı Avustralya'daki iki kavşak verilerine göre AIMSUN simülasyon programı üzerinden test etmişlerdir. Önerilen yöntemin trafik sinyal optimizasyonunda GA'dan daha başarılı sonuçlar vererek gecikmeyi düşürdüğü görülmüştür [17].

Trafik sinyallerini optimize etmek amacıyla Jovanovic ve arkadaşları, arı kolonisi optimizasyon yöntemine dayalı yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Seyahat süresini minimuma indiren devre süresinin optimum olmasını amaçlamışlardır. Arı kolonisi algoritması ile elde ettikleri sonuçları benzetimli Tavlama yöntemiyle karşılaştırmışlardır ve arı kolonisi algoritmasının daha iyi sonuçları verdiğini ifade etmişlerdir [18].

Yapay arı kolonisi algoritması devre süresi hesabı optimizasyonunda kullanılırken aynı zamanda başka disiplinlerde de kullanılmıştır. Batbat, proteinlerin doğal yapısına dönüşürken serbest enerji düzeylerinin hesaplanması sırasında kullanılmakta olan ve sudan kaçma özelliklerine göre sınıflandırılan amino asitlerden oluşan HP modelinde aday olan protein modellerinin ortaya konmasında arıların besin arama

davranışlarını model alan Yapay Arı Kolonisi Algoritması temelli oluşturulan ayrık model kullanmıştır [19].

Kartal, finansal portföy optimizasyon problemlerinin önceden çözülmesinin zor ve zaman alıcı olduğunu belirterek bu problemleri sezgisel optimizasyon yöntemlerinden olan YAKA'yı kullanarak çözümlenmeye çalışmıştır. Yapay Arı Kolonisi Algoritmasından elde ettiği verileri başka yöntemlerle de karşılaştırmış olup, sonuçların YAKA kullanılarak elde edilen sonuçların daha iyi olduğunu gözlemlemiştir [20].

Özcan (2016), atölye tipi çizelgeleme problemlerinin çözülmesi için Yapay Arı Kolonisi Algoritması ve evrimsel algoritmalar bir arada kullanılarak önerilen metodun çeşitli kriterler içerisinde daha iyi sonuç verdiğini açıklamıştır. [21]

Dilmaç, elektrokardiyogram işaretlerinin analizi, çeşitli kalp hastalıklarının teşhisinde yaygın olarak kullanmakta olduğunu belirtmiş, bir günden pek çok veri alındığını, kardiyologların bunu incelerken çok zaman kaybı yaşadıklarını ve zorlandıklarını anlatmıştır. Dilmaç, Yapay arı kolonisi algoritmasının elektrokardiyogram verilerinin hem analizi hem de kalp vurularının sınıflamasında kullanmış olup, kullanımının ardından iyileştirmelere ihtiyaç duyduğunu göstermiştir. Yapmış olduğu düzenlemelerle bu yöntemin performansını arttırmış, elde ettiği bu yönteme de "İyileştirilmiş ABC (MABC)" adını vermiştir. Geliştirilen yöntem ile hem yüksek bir hıza sahip olan hem de yüksek sınıflama başarısına sahip bir sınıflayıcı elde etmiştir [22].

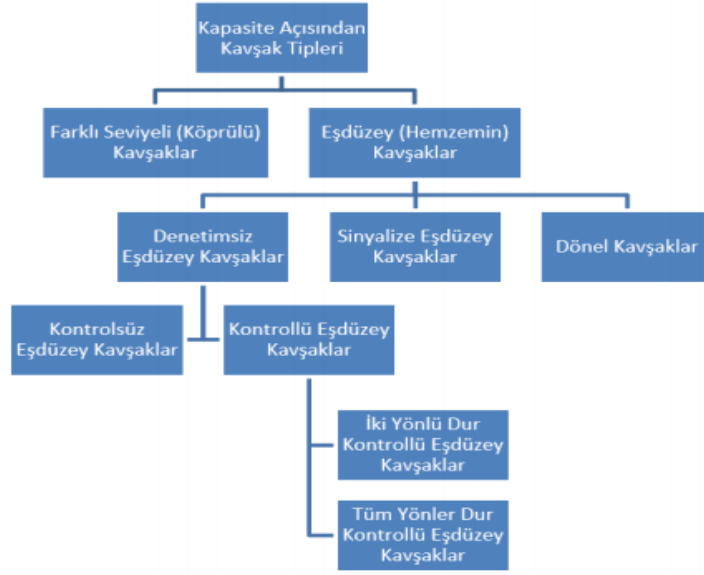
Devre süresi optimizasyonu için YAKA dışında yapay zeka uygulamalarının bir diğer örneği olan Karınca Kolonisi Algoritması (KKO), Başkan ve Haldenbilen tarafından kullanılarak devre süresi optimizasyonu problemi çözülmeye çalışılmıştır. Bu çalışma ile hem gecikmenin optimizasyonu hem de devre süresinin optimizasyonu gerçekleştirilmiş olup beraberinde trafik mühendisliğinde ortaya çıkan pek çok problemin çözüme ulaştırılması da göz önünde bulundurulmuştur. [23].

2.2. Kavşaklar

Değişik yön ve doğrultulardan gelen yolların kesiştiği, birleştiği ve ayrıldığı noktalara kavşak adı verilir. Kavşakları, bu değişik yön ve doğrultulardan gelen araçlar güvenli bir şekilde birleşip ardından güvenli bir şekilde yollarına devam edebilecek şekilde tasarlamak gerekir. Kavşaklar tasarlanırken her şeyden önce kapasiteye, ekonomiye ve çevreye uygun tasarım yapılmalıdır. Böylelikle de hem ekonomik açıdan ortaya çıkabilecek zararlar hem de insan sağlığına gelebilecek tehlikeler en az düzeye indirilebilir [24].

Kavşaklar, trafik akımlarının ortak kullandığı önemli bir alandır ve bu ortak alanda ortaya çıkan bazı problemler olabilir. Örnek olarak, kavşağın oluşturan kollarda herhangi bir engel olması, kavşağı oluşturan kollarin görüş açısının yetersiz olması gibi durumlar meydana geldiğinde kavşak tasarımının önemi büyüktür. Bu sorunları belirleyip uygun kavşak tasarımını da yapmak önemlidir.

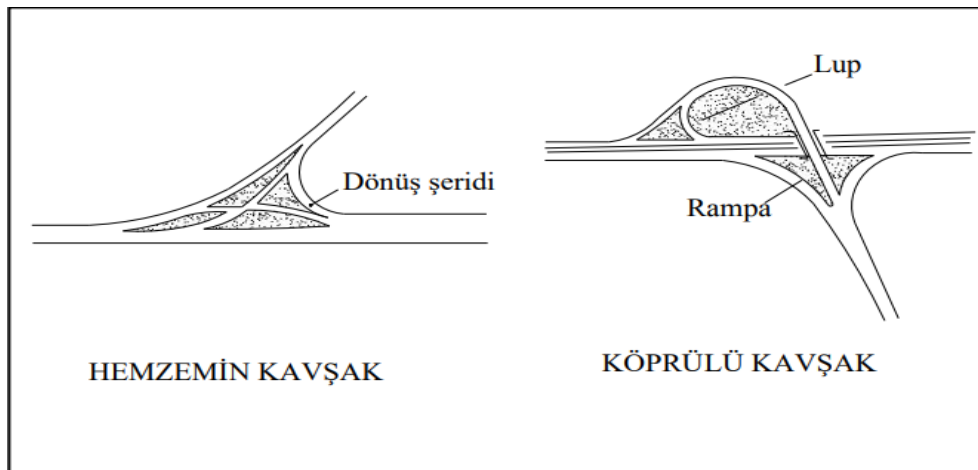
Kavşaklar bağlanan yolların kesişim durumu ile trafik hacimlerine göre sınıflandırılırlar. Buna göre kavşaklar ana olarak 2 başlıkta incelenir ve Şekil 2.1.' de gösterilmiştir. Bunlardan ilki hemzemin (eşdüzey) kavşaklardır ve hemzemin kavşaklar aynı düzeyde olup gelen trafik hacimlerine göre geçiş önceliği veren kavşaklardır. Farklı düzeyli kavşaklar denilen kavşak türü ise yolların farklı düzeylerde birleşmesi ile meydana gelir.



Şekil 2.1. Kavşak Tipleri [25]

Farklı düzeyli kavşaklar eşdüzeyli kavşaklara göre daha maliyetlidir. Ancak eşdüzey kavşaklarda kazalar, araç sıkışıklıkları, gecikmelerin fazlalığı gibi durumlar daha fazla yaşanmaktadır. Eşdüzeyli kavşaklar trafikteki duraklamalar, gecikmeler, tıkanıklıklar gibi sorunlara sebep olduğundan ve farklı düzeyli kavşak tipine göre daha çok kullanılmasından dolayı bu kavşaklarla ilgili araştırmalara daha fazla rastlanmaktadır.

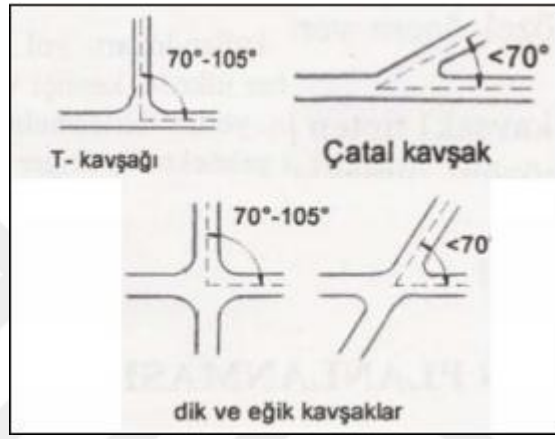
Hemzemin kavşakların ve köprülÜ kavşakların dönüşleri Şekil 2.2.' de gösterilmiştir:



Şekil 2.2. Hemzemin ve KöprülÜ Kavşak Dönüşleri [28]

2.2.1. Hemzemin (Eşdüzey) Kavşaklar:

Eşdüzey kavşaklar Şekil 2.3.' te verilen çeşitlere sahiptir. Birleşen üç yolun arasındaki açı 70 dereceden küçük olursa çatal kavşak denir. Aşağıdaki şekildeki dört kolun eğik bir biçimde birleştiği kavşağa makas tipi kavşak (aralarındaki açı 70 dereceden küçüktür), bu yolların arasındaki açı 70- 105 derece arasında olursa dik kavşak olarak adlandırılır. Üç kolu birleştiren kavşaklarda iki kol arasında 70- 105 derece arasında bir açı varsa T kavşak denilmektedir.



Şekil 2.3. Geometrik Durumlarına Göre Kavşak Şekilleri [27]

Eş düzey kavşaklar kendi içerisinde denetimsiz eş düzey kavşaklar ve denetimli eş düzey kavşaklar olarak iki ana başlığa ayrılırlar.

2.2.1.1. Denetimsiz Eş Düzey Kavşaklar

Denetimsiz eş düzey kavşaklar, sinyalizasyon sisteminin kullanılmadığı kavşaklardır. Bu kavşaklarda kontrol, trafik levhaları ile ya da herhangi bir işaret kullanılmadan sağlanır. Ana yol ve tali yol şeklinde adlandırılan yollarda geçiş üstünlüğü ana yola aittir ve tali yola “DUR” ya da “YOL VER” şeklinde levhalar konulur. Tali yoldaki sürücü üstünlüğün ana yoldaki sürücüde olduğunu bilir ve ona göre davranır. Sürücü ana yolda ya da tali yolda olduğunu genelde yolun daha üstün olmasından, örnek olarak genişliğinden, anlar. Bu duruma göre de sürücü kavşağı kontrol ederek geçiş

üstünlüğü olana yol verir, ardından kavşağı kullanarak yoluna devam eder. Bu kavşaklarda kazalar daha çok olmakta, araçların yandan ve önden çarpmaları yoğun yaşanmaktadır [26].

2.2.1.2. Denetimli Eş Düzey Kavşaklar

Trafik akımının sinyalizasyon veya polis memuru ile kontrol edildiği kavşak türüdür. Bu kavşak türü denetimsiz eş düzey kavşak modeline göre daha güvenilir ve kontrollüdür. Sinyalizasyonun kullanılması ile trafik akımının ve yayaların en güvenilir şekilde bu alanı kullanmaları mümkün olur. Böylece kazalar minimize edilmiş, taşıtların geçişi sağlanarak, tıkanıklıklar azaltılmış olur. Tüm bunların sağlanabilmesi sadece sinyalizasyon kullanımının ile değil o sinyalizasyondaki sürelerin iyi belirlenmesi ile de doğrudan ilgilidir. Gecikme ve optimum devre süreleri uygulanan sinyal kontrolü ve sürelerine bağlı olarak değişir.

Denetimli eş düzey kavşaklar da dönel kavşak ve sinyalize (ışıklı) kavşak olarak iki bölümde incelenir.

Dönel kavşaklar (yuvarlak ada kavşaklar), ortada bir yuvarlak bölgenin olması ve bu bölgenin etrafında trafik akımının çeşitli doğrultulara yönlendirilmesi ile oluşan kavşak türüdür. Genelde bu dönel kavşaklarda araçların süratleri düşüktür ve bu durum emniyetli bir geçiş sağlanmasına yardımcı olmaktadır. Bu tür kavşağın yapılabilmesi için yeterli alanın da olması önemlidir. Dönel kavşaklardaki araç birleşimleri ve ayrılmaları devamlıdır ve bu birleşimler ile ayrılmalar saat yönünün tersi yönde dönüşler ile olur.

Işıklı kavşaklar belirli renklerden oluşan lambalarla, bu renklere göre geçişin kimde olduğunu gösteren bir mekanizmaya sahiptir ve bu kavşak türü genellikle trafik akımının fazla olduğu yolların birleşim yerlerinde tercih edilir. Böylece araçların hızları azalır, kaza yapma riski düşer. Genelde kazaların çoğu maddi hasarlı küçük kazalarla sınırlı kalır. Ölümlü kazaların çok olmadığı görülür, yayaların da sürücülerin de can güvenliği sağlanmış olur. Kazalar genelde araçların birbirlerine arkadan çarpmaları şeklinde olmaktadır.

Işıklı kavşaklarda yeşil, sarı, kırmızı sürelerin ve böylece de uygun devre süresinin belirlenememesi gibi durumlarda kavşakta beklemeler, bunun sonucunda da kazalar meydana gelebilmektedir. Bu sebeple devre süresinin trafik hacmine göre doğru ayarlanması ve bu ayarlama sonucunda da minimum düzeyde gecikmeyle beraber optimum devre süresine ulaşılması amaçlanır.

2.2.2. Katlı Kavşaklar

Trafiğin yoğun olarak var olduğu bir bölgede kazaları azaltmak, hızı düşürmeden ulaşımı sağlayıp aktarımları mümkün kılmak, trafiğin herhangi bir sekteye uğramadan devamını sağlayan farklı yüksekliklerdeki kavşak tipidir. Bu kavşak tipi hemzemin kavşaklara göre daha maliyetlidir. Ancak yüksek trafik değerlerinde kazaları önlemesi ve hızı düşürmemesi sebebiyle tercih edilen bir kavşak türü olmuştur.

2.3. Sinyalizasyon

Sinyalizasyon, araçların veya yayaların trafikteki geçiş kontrolünü yapabilmek için ışıklı veya sesli sistemlerdir. Amaç, kaza riskini azaltarak araç ve yaya kontrolünü yapmak, trafik akışının devamlılığını sağlamaktır. Sinyalizasyon sistemleri de genel olarak trafik yoğunluğunun fazla olduğu kavşaklarda kullanılmaktadır. Bir bölgeye sinyalizasyon sistemi kurulmadan önce o bölgede araç sayımı, bu araçların türlerine göre sınıflandırmaları ve gereken araştırmalar yapılır. Bu araştırmalara göre belirlenen kavşak yapımı tamamlanır, yayalar için geçitler ayarlanır ve sinyalizasyon sistemi için devre süresi ayarlaması yapılır. Bu ayarlama ile kırmızı, yeşil, sarı süreler bilgisayar aracılığı ile sinyalizasyon sistemine girilir. Böylece trafik kontrolü sağlanmaya başlanır. Temel amaç en az gecikme, yakıt tüketiminin azaltılması, doğanın kirletilmesinin önüne geçilmesi, gürültü ve asabiyetin azaltılarak can ve mal kaybının olmadığı bir ulaşım sağlanmasıdır.

Kavşaklarda sinyalizasyonun kullanılıp kullanılmayacağına belli kriterler dahilinde karar verilmektedir. Örneğin; trafik hacmi fazlaysa, yayaların ulaşımında aksaklıklar oluşuyorsa ve can güvenliği tehlikeleri varsa, sıkışıklıklar fazlaysa bu gibi durumlarda bu kavşaklarda sinyalizasyon kullanımı çok büyük avantajlar sağlamaktadır. Çünkü bu saydığımız durumların oluşmasıyla beraber hem sürücülerde hem yayalarda asabiyet ve tahammülsüzlük baş gösterecek, bu durumda da acelecilik ortaya çıkacağından kazalar artabilecektir. Kavşağın kapasitesinin yüksek olmasına rağmen bundan faydalanamamak, kavşağın sinyalizasyona gereksinim duyacak bir şekilde sahip olması, gecikmelerle beraber ortaya çıkan tıkanıklıkların kavşakta kullanılabilir olan kapasitenin kullanılmasına engel olması, kavşakta her işaretlemenin yapılmasına karşın art arda aynı kazaların yaşanması, yayaların can güvenliğinin olmaması sebebiyle kavşağı kullanamaması gibi durumların olması da kavşakta sinyalizasyon sistemi olmasını zorunlu kılan etmenlerdendir [26].

Işıklı sinyalizasyon istemlerinde kullanılan ışıklı işaretlerin etkili olabilmesi için yaya ve araç kullanıcılarının dikkatini çekecek nitelikte, basit olarak anlaşılabilir şekilde olmalıdır. Aynı zamanda da sürücülerin algılayıp yeterli sürede bunu reaksiyona geçirebilecek süreyi de tanımalıdır.

Bazı bölgelerde ışıklı sinyalizasyon sistemleri ile beraber yayalar için butonlar geliştirilmiştir. Bu butonlar aracılığıyla trafik yayalar tarafından durdurulabilir ve araç trafiği bir süre bekletilerek yayaların geçmesine imkan sağlanabilmektedir.

Sinyalizasyon sistemleri kendi içerisinde izole sinyalizasyon sistemi ve koordine sinyalizasyon sistemi olmak üzere iki ana başlıkta incelenebilir.

2.3.1. İzole Sinyalizasyon Sistemi

İzole sinyalizasyon sistemi bir kavşağın kendi başına başka kavşaklara bağlı olmadan çalıştığı sistemdir. Diğer bir deyişle, bir kavşak kendisine yollar aracılığı ile bağlı olan diğer kavşaklara bağımlı olmamaktadır. Devre süresi, yeşil süre, kırmızı süre,

sarı süre gibi diğer süreler öteki kavşaklardan bağımsızdır. Bu tür sinyalizasyon sistemleri, oldukça sık kullanılmakla birlikte dört başlıkta incelenir [29]:

- Sabit Zamanlı Sinyalizasyon Sistemi
- Trafik Uyarmalı Sinyalizasyon Sistemi
- Yaya Uyarmalı Sinyalizasyon Sistemi
- El İle Kumandalı Sinyalizasyon Sistemi

2.3.1.1. Sabit Zamanlı Sinyalizasyon Sistemi

Bu tür sinyalizasyon sisteminde önceden sabit olarak belirlenmiş bir zamanlama programı vardır. Taşıtlar, kavşağa girerlerken bu program dahilindeki geçiş hakkına göre sağlanır. Bu süreler belirlenmeden önce o kavşaktaki trafik hacmi değerlerinin bilinmesi gerekir. Bu değerlerin saptanması için gerekli sayımların yapılması ve o kavşakta gerekli incelemelerin, araştırmaların yapılmasına bağlıdır. Bu incelemelerin öncelikle pik saatlerde (iş çıkışı, öğle vakti vs.) yapılması gerekir, bu durumda tikanıkların en aza indirilmesi sağlanır. Bu araştırmaların ardından elde edilen verilerle geçiş için gereken süreler hesaplanır ve zamanlama programına dahil edilir.

Ancak bu tür programlamanın olumsuz yanı, bazı günlerde gereksiz gecikmelere sebep olmasıdır. Örneğin, hafta içi bir kavşak trafiği ile hafta sonu bir kavşak trafiğindeki trafik hacmi çoğu yerde aynı olmamaktadır. Programlanan zaman da en yüksek trafik hacmine göre olduğundan dolayı hafta sonu trafik hacminin az olduğu bir zamanda gereksiz bir gecikme durumu oluşur. Eğer mevsimlere ve trafik durumlarına göre gereken ayarlamalar, kontroller yapıp zamanlama sisteminde düzeltmeler yapıldığında bu sakınca da ortadan kaldırılmış olur.

2.3.1.2. Trafik Uyarmalı Sinyalizasyon Sistemi

Bu sistemin içerisinde var olan uyarıcılar (sensörler), gelen trafiğin durumuna ve yoğunluğuna göre ayarlamalar yapmaktadır. İki şekilde incelenir ;

2.3.1.2.1. Yarı- Trafik Uyarmalı Sinyalizasyon Sistemi

Bu sistemde ana yol ve tali yol olarak adlandırılan yolların trafik hacimlerine göre sinyal süreleri ayarlanır. Yollarda araçların yaklaşım kısımlarında yerleştirilen alıcılar, araç geldiği zaman bunu uyarı olarak algılar. Normalde ana yol için sürekli yeşil ışık yanar ve tali yoldan araç geldiği zaman bu uyarıya göre sinyal durumu değişir [29].

2.3.1.2.2. Tam- Trafik Uyarmalı Sinyalizasyon Sistemi

Tam- trafik uyarmalı sinyalizasyon sisteminde, yollarda araçların yaklaştığı bölgelerdeki alıcılar her zaman uyarılar alır. Alınan bu uyarılar yollardaki trafik hacmine ve geçiş hakkının kimde olduğuna göre düzenlenir. Bu hacimlerin neredeyse gerçek değerlerine göre ayarlamalar yapan sistem çok iyi çalışmaktadır ancak diğer sistemlere oranla ekonomik açıdan oldukça yüksek maliyete sahiptir ve sabit bir devre süresi yoktur [29].

2.3.1.3. Yaya Uyarmalı Sinyalizasyon Sistemi

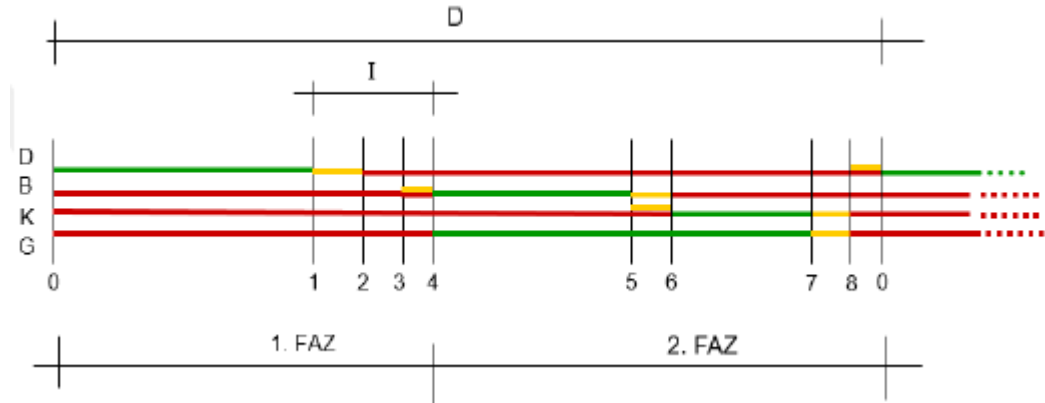
Yaya uyarmalı sinyalizasyon sistemin yayaların az kullandığı yollarda bir buton aracılığıyla trafiği durdurması ardından, yayanın geçmesiyle tekrar yolun araç trafiğine geçiş vermesi şeklinde çalışmaktadır.

2.3.1.4. El İle Kumandalı Sinyalizasyon Sistemi

Bu sistem ile kavşak dışardan bir kumanda vasıtası ile yönetilir. Bütün ışıklı cihazlar bu kumandaya bağlanır ve trafiğin durumuna göre önceden sabit zamanlı olarak kontrol edilen bir kavşak ani olarak değişen bir trafik durumu olduğunda dışarıdan gözlemlenmeler yapılır ve duruma göre bu kumanda aracılığı ile kavşak kontrol edilebilir böylece olumsuz durumların, tıkanıklıkların önüne geçilebilir. Bu sisteme “Manuel İşletme” adı da verilir.

2.3.2. Sinyalizasyon Temel Kavramları

Devre Süresi (Period-C): Işıklı sinyallerin bir devreyi tamamlaması için geçen toplam süredir. Şekil 2.4.’ te örnek bir sinyal devre düzeni verilmiştir:



Şekil 2.4. Sinyal Devre Düzeni [26]

Faz: Kavşağa bağlanan yaklaşımlardan bir tanesinin geçmesi ve durması arasındaki geçen süredir.

Aralık: Işıklı sinyalizasyon tesisinde ışıklı sinyallerden herhangi birinin hiç değişmediği süredir.

Aralık Değişimi: Sarı sürenin ve hep kırmızı sürenin tamamını kapsayan süredir.

Etkili Yeşil Süre (g) : Belirli bir doğrultuda hareket halinde olan araçlara geçiş hakkının tanındığı zamandır.

Yeşil Süre Oranı (g/ C) :Etkili yeşil sürenin devre süresine bölünmesi ile elde edilen orana denir.

Yeşiller Arası Süre: Bir yaklaşım koluna yanan yeşil sürenin bitmesini ardından, ona tekrar yeşil sürenin başlaması arasında geçen süreye denir.

Sarı Süre (a) : Sinyalizasyon ile kontrol edilen alana yaklaşmakta olan araçlara geçme haklarının sona erdiğini göstermekte olan ışığın süresidir.

Kırmızı Süre (r) : Geçiş hakkına sahip olan araçların artık geçiş haklarının olmadığını gösteren süredir.

Her Yöne Kırmızı Süre: Birbiri ile kesişmekte olan araçların ve yaya geçitlerinin hepsine kırmızı ışığın yandığı süredir. Bir başka deyişle yeşil ışığın sonunda veya sarı ışıkta kavşağa girmiş olan araçların kavşağı boşaltmaları için ihtiyaç duyulan süredir.

Kayıp Zaman (Yeşiller Arası Süre Toplamı) :Bir devre süresince, hiçbir akıma geçişin verilmediği süredir.

Doymuş Akım (Doyma Akımı- s) : Sinyalizasyon ile kontrol edilen bir kavşakta oluşan bir kuyruğun olması halinde kesintiye uğramadan yeşil süre içerisinde değişmeyen bir hızda boşalan akımdır. Diğer bir deyişle bir kavşaktan geçebilecek olan maksimum saatlik araç sayısını ifade eden değerdir.

Analiz Periyodu (T) : Bir kavşağın yoğunluğuna bağlı olarak değişen ve kavşağın performansının ölçüldüğü süredir. Birimi saattir.

Kapasite: Yol, kavşak veya kontrol altında tutulan bir trafik şeridinden birim zamanda (saatte) geçebilecek en fazla araç sayısını ifade eden değerdir.

Gecikme: Taşıtın bir yaklaşım yolunda diğer araçlar, kontrol mekanizması ve yolun geometrik özellikleri nedeniyle kaybettiği zamandır.

Doğunluk Derecesi: Yolun bir yaklaşım yönündeki gerçek akım değerinin kapasite değerine olan oranı doğunluk derecesi olarak adlandırılır.

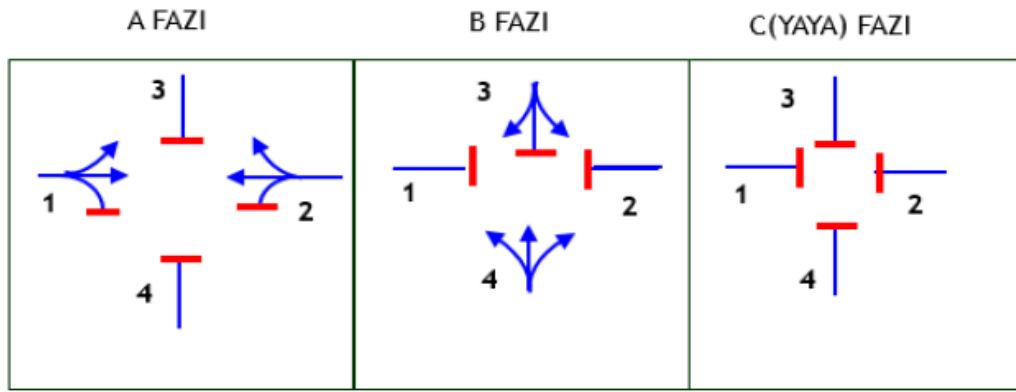
Yarı- Trafik Uyarımalı Sinyal Düzeni: Kavşakta birleşen yaklaşım yönlerinin bazılarında (ana yol) geçiş hakkını verip diğer yaklaşım yönlerine (tali yol) de ihtiyaç dahilinde geçiş hakkının verildiği ve sürelerin buna göre ayarlandığı düzendir.

Tam- Trafik Uyarımalı Sinyal Düzeni: Kavşağa gelen yaklaşım yönlerinin taleplerine göre sürelerin ayarlandığı düzendir.

Yaya Uyarımalı Sinyal Düzeni: Sinyalize kavşaklarda sinyallerin yayalar tarafından ayarlandığı düzendir.

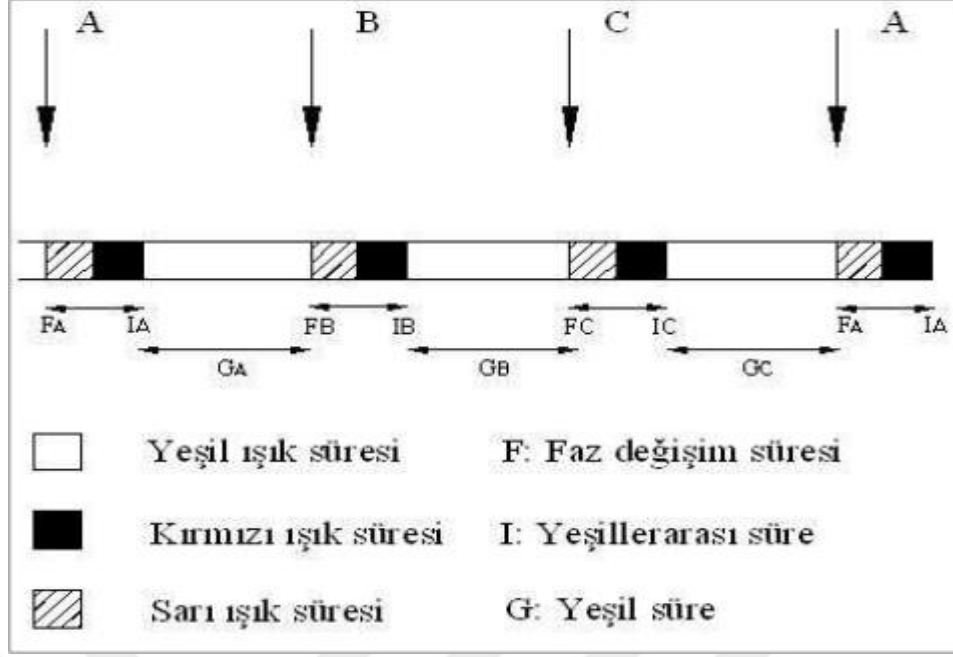
El İle Kumandalı Sinyal Düzeni: Kavşakta araçların geçiş haklarının bir kişi tarafından onun görüşü ile bir kumanda vasıtasıyla ayarlandığı düzendir.

Faz Düzeni: Işıklı sinyalizasyon ile kontrol edilen yerlerde geçiş hakkının araçlar ve yayalar için ayarlandığı düzendir. Örnek bir faz düzeni Şekil 2.5.' te gösterilmiştir:



Şekil 2.5. Örnek Faz Düzeni [26]

Devre Düzeni: Bir kavşakta fazlardan geçen akımların hangilerinin geçiş hakkına sahip olduğu, yeşil süreleri, kırmızı süreleri, yeşiller arası süreleri bir zaman diyagramı üzerinde gösterilirse buna devre düzeni adı verilir. Devre düzeni ile ilgili görsel Şekil 2.6.' da verilmiştir.



Şekil 2.6. Devre Düzeni Diyagramı [30]

2.4. Devre Süresi

Devre süresi; yolun geometrik özelliklerine, uygulamaya konulan faz düzenine ve trafik koşullarına göre saptanır ve bu sürenin ayarlanması kavşak performansı açısından önemlidir.

Devre süresinin hesaplamasında ve bu hesaplama sırasında birbirinden farklı kriterlerin uygulanması için pek çok yöntem geliştirilmiştir. Bu geliştirilen yöntemlerin çoğu ampirik yaklaşımlara dayanır. Bunun nedeni sürücü davranışları, taşıt özellikleri gibi bazı durumların kesin durumlara bağlanamıyor olmasıdır.

2.4.1. Devre Süresi Bileşikleri

Bir devre süresi iki bileşekten oluşur :

- Araç akımları için verilen yeşil süreler toplamı

- Kayıp zaman

Devre süresi denklemi denklem 2.1' de verilmektedir.

$$C = \sum_{i=1}^n G_i + l \quad (2.1)$$

C : Devre Süresi

n : Faz sayısı

G_i : i fazını kontrol eden akımın yeşil süresi

l : Kayıp zaman

2.4.2. Kayıp Zaman

Kayıp zaman, devre süresi boyunca yeşiller arası süre toplamına denir. Aynı zamanda kayıp zaman; devre süresi içerisinde sarı sürelerin, koruma sürelerinin, her yöne kırmızı sürelerin toplamını da ifade eder. Matematiksel ifadesi denklem 2.2' de verilmektedir.

$$l = \sum_{i=1}^n a + \sum_{i=1}^n t_{ki} + \sum_{i=1}^n t_R \quad (2.2)$$

l : Kayıp zaman

t_{ki} : i fazı ile ondan bir önceki faz arasındaki koruma süresi

n : Faz sayısı

a : i fazında akım yönü için belirlenen sarı süresi

$\sum t_R$: Her yöne kırmızı süre toplamı

3. ANALİTİK YÖNTEMLER

3.1. İngiliz (Webster) Yöntemi

Sinyalize kavşaklar da sinyal sürelerinin ve ortalama taşıt gecikmelerin hesaplanmasına yönelik literatürde birçok çalışma mevcut olsa da 1958 yılında Webster tarafından geliştirilen modeller ve araştırmalar ilk öncü çalışmalar olarak kabul edilmektedir. Webster geliştirdiği yöntemde araç gelişlerinin rastgele ayrılışların ise üniform olduğu kabulünü yaparak gecikme süresini hesaplamıştır. Bu yöntemde elde edilen devre süresini gelen akımın doygun akıma oranına göre tüm fazlara bu oranın izin verdiği şekilde dağıtır. Webster yöntemi vasıtasıyla hesaplanan gecikme değerlerinde doygun altı trafik durumlarında iyi sonuç verirken doygun üstü trafik şartlarına yaklaştıkça gecikme değeri sonsuza yaklaşmakta doygun üstü trafik şartlarında ise gecikme tahmini yapamamaktadır.

Bu yönteme göre bir kavşaktan geçebilecek maksimum araç sayısı olan kavşak kapasitesi, bu trafiğe verilen maksimum etkili yeşil süreyle beraber, sinyalizasyon tesisinin geçmeye izin verdiği noktadan geçebilen en fazla araç sayısına bağlıdır. Kavşaktan geçen akımın kapasitesi denklem 3.1' de matematiksel olarak ifade edilmektedir:

$$c = \frac{g * s}{C} \quad (3.1)$$

c : Kavşaktan geçen akımın kapasitesi (araç/ saat)

s : Doygun akım (araç/ saat)

C : Devre süresi (sn)

g : Etkin yeşil süre (sn)

Etkin yeşil sürenin hesabı ise denklem 3.2' de verilmektedir;

$$g = G - l \quad (3.2)$$

G : Görünen yeşil süre

l : Kayıp zaman

Kayıp zaman kavşağın kapasitesini etkilemektedir. Londra’ da kayıp zaman tespiti için yapılan çalışmalarda bu süresinin tahminen 2 saniye olduğu ancak, 0- 7 sn arasında da değişiklik göstereceği görülmüştür. Çünkü kalkışta oluşan gecikme yani başlangıç gecikmesi ve yavaşlayarak gelen akımın gecikmesinden dolayı bu süreye tahminen 2 saniye denilmiştir. Fakat trafik durumları çok fazla değişebildiğinden 0- 7 saniye olarak genelleme yapılmıştır.

Webster yöntemine göre toplam kayıp zaman hesabı denklem 3.3’ te verilmektedir:

$$L = \sum (I - a) + \sum l \quad (3.3)$$

L : Devredeki toplam kayıp zaman (sn)

l : Bir fazdaki kayıp zaman (sn)

a : Sarı ışık süresi (sn)

I : Yeşiller arası süre (sn)

Webster yöntemine göre toplam kayıp zaman; yeşiller arası süreden sarı ışık süresi çıkarılarak bir fazdaki kayıp zaman ile toplanmasından elde edilen bir değerdir. Bir fazdaki kayıp süre olan l başlangıçtaki kayıp ve o fazdaki sarı süresinin ikinci yarısının toplamı ile bulunur. Toplam kayıp zaman olarak ifade edilen L değeri denklem 3.3 ile hesaplanır. L süresinden geriye kalan süre, yararlı süre olarak adlandırılır, matematiksel ifadesi denklem 3.4 ile verilmekte olup fazlara paylaşımı ise denklem 3.5 ve 3.6 ile gösterilmektedir.

$$g_{etkili} = C - L \quad (3.4)$$

Örneğin 2 fazlı bir sistemde etkili yeşil süresinin 2 faza dağılımı denklem 3.5 ve 3.6’ da gösterildiği gibi yapılır :

$$g_1 = \frac{(g_{etkili} * Y_1)}{Y} \quad (3.5)$$

$$g_2 = \frac{(g_{etkili} * Y_2)}{Y} \quad (3.6)$$

Webster minimum ve optimum devre süreleri için geliştirilen denklemler denklem 3.7 ve 3.8' de verilmiştir:

$$C_{min} = \frac{L}{1 - Y} \quad (3.7)$$

$$C_o = \frac{\varphi * L + 5}{1 - Y} \quad (3.8)$$

C_{min} : Minimum devre süresi (sn)

C_o : Optimum devre süresi (sn)

φ : Düzeltme katsayısı (1,2- 1,8 sn arasında yer alan bir değer)

Y : Toplam akım oranı

Y olarak ifade edilen değer trafik hacminin doygun akım değerine olan oranıyla bulunmaktadır.

3.1.1. Doygun Akım Hesabı

Doygun akım değeri tahmininin yapılabilmesi için öncelikle kavşak kolu genişliğinin ölçülmesi gerekir. Ardından eğim, trafik kompozisyonu, sağ ve/veya sola dönen taşıtlar etkisi, park şeridi ve yaya etkisine göre yeniden düzenlenmektedir.

3.1.1.1. Kavşak Kolunun Genişliği

Webster'e göre doygun akım değerinin, dönüş yapan ve park halinde olan herhangi bir taşıt olmadığı takdirde doygun akım değeri denklem 3.9' da verilen bağlantı ile hesaplanmaktadır.

$$s = 160 * w_a \quad (3.9)$$

s : Doygun akım (bo/saat)

w_a : Kavşak kolunun ft cinsinden genişliği

Kavşak değişikliklerine göre doymun akım değerleri tablosu izelge 3.1.' de verilmiştir:

Çizelge 3.1. Kavşak Değişikliğine Göre Doygun Akım Değerleri Tablosu [31]

w_a (ft)	10	11	12	13	14	15	16	17
s (bo/saat)	1850	1875	1900	1950	2075	2250	2475	2700

3.1.1.2. Eğim Etkisi

Doygun akım değerinde eğim etkisi pozitif ve negatif değerine bağlı olarak şu şekilde yansıtılmalıdır:

- Her %1 ıkış eğiminde doymun akım değeri %3 azaltılır.
- Her %1 iniş eğiminde doymun akım değeri %3 arttırılır.

3.1.1.3. Trafik Kompozisyonunun Etkisi

Aşağıda verilen izelge 3.2.' de verilen birim oto değerlerinden de anlaşılacağı üzere doymun akım değeri üzerinde düzeltmeler yapılmalıdır.

Çizelge 3.2. Farklı Türdeki Taşıtlar Birim Oto Eşdeğerlikleri [31]

1 ağır yük taşıtı	1,75 bo
1 otobüs	2,25 bo
1 tramvay	2,50 bo
1 hafif taşıt	1,00 bo
1 motosiklet	0,33 bo
1 bisiklet	0,20 bo

3.1.1.4. Sola Dönen Trafığın Etkisi

Akan trafik akımının karşıt yönünde sola dönen araçlar eğer trafiği tıkayıp olumsuzluklara sebep oluyorsa kavşağın kapasitesi olumsuz etkilenir. Bu durum dört şekilde incelenir:

- Eğer akan karşıt yönde akım yok ve sola dönüşler için özel ayrılmış bir şerit yok ise dönüş akım kuralları göz önünde bulundurulmadan belirtilen diğer kurallara göre doymuş akım tahmini yapılır.
- Eğer akan karşıt yönde akım yok ve sola dönüş için özel ayrılmış bir şerit mevcut ise sola dönen taşıtların doymuş akımı ayrı olarak denklem 3.10 ve 3.11 ile bulunur:

$$\text{Sola dönüş şeridi 1 tane ise;} \quad S = 1800/(1 + (5/R)) \text{ (bo/sa)} \quad (3.10)$$

$$\text{Sola dönüş şeridi 2 tane ise;} \quad S = 3000/(1 + (5/R)) \text{ (bo/sa)} \quad (3.11)$$

R : Sola dönüş yarıçapı (ft)

- Eğer akan karşıt yönde akım var ve sola dönüş için özel ayrılmış bir şerit yok ise bu durum karşıt yöndeki akımın gecikmesine neden olur, sola dönecek olan taşıtlar yeşil sürenin bitmesi ardından kavşağı boşaltmak için belirli bir süre kaybına neden olacaklar ve karşıt yöndeki araçların kendi yeşil süreleri başlamasına rağmen geçiş hakkını kullanamamaları gecikmeyi

tetikleyecektir. Sola dönen her bir araç karşıt yönde akan araca göre 1,75'lik bir düzeltme ile doygun akım hesaplanacaktır.

- Eğer karşıt yönde akım var ve sola dönüş için özel ayrılmış bir şerit de mevcut ise aynı yaklaşım kolunun kullanan karşıt yönde giden trafik akımı sola dönenlerden etkilenmemelidir. Eğer bir etki olmuş ise yukarıda belirtilen maddedeki hesaplama yapılmalıdır.

3.1.1.5. Sağa Dönen Trafiğin Etkisi

Sağa dönen araçların doygun akıma etkisi, dönüş sayısı ve yaya akımına bağlıdır.

- Sağa Dönen Araçlar Akımın %10' undan Az İse : Doğru giden trafik akımına karışıklar ve herhangi bir düzeltme yapmaya sebebiyet doğurmazlar.
- Sağa Dönen Araçlar Akımın %10' undan Fazla İse :%10 olarak sağa geçen araçların her biri 1,25 araç olarak görülür ve bu şekilde çarpılarak düzeltilmesi yapılmalıdır.

3.1.1.6. Yaya Etkisi

Yaya trafiği az ise herhangi bir düzeltme yapılmaz ancak eğer yaya trafiği fazla ise bu yaya trafiğine ayrı bir faz verilmelidir ya da çevre etkisi olarak düşünülüp gereken düzeltmeler yapılmalıdır.

3.1.1.7. Park Şeridi Etkisi

Kavşaktaki Dur çizgisine herhangi bir araç park etmiş ve bu araç doygun akım oranına negatif bir etkide bulunuyor ise bu şerit genişliğindeki kayıp denklem 3.12 ile hesaplanmaktadır:

$$w_{a-kayıp} = 5,5 - \frac{0,9 * (z - 25)}{g} \quad (3.12)$$

$w_{a-kayıp}$: Park eden taşıtın oluşturduğu şerit genişliğindeki kayıp miktarı (ft)

g : Yeşil süre (sn)

z : Park eden taşıtın Dur çizgisine olan uzaklığı

Eğer ;

- $z < 25$ ft ise kısa şerit etkisi yokmuş gibi kabul edilir.
- $z > 25$ ft ise $w_{a-kayıp}$ hesaplanır ve denklem 3.13 ile matematiksel olarak ifade edilir:

$$w_{a-etkin} = w_a - w_{a-kayıp} \quad (3.13)$$

Webster' e göre, bir yaklaşım kolundaki gecikme hesabı denklem 3.14 ile hesaplanır:

$$d = \frac{c - (1 - \lambda)^2}{2(1 - \lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1 - x)} - 0,65 \left(\frac{c}{q^2} \right)^{\frac{1}{3}} x^{(2-5\lambda)} \quad (3.14)$$

d : Bir yaklaşım kolunda taşıt başına ortalama gecikme (sn)

λ : Yeşil süre oranı

q : Kavşak kolundan geçen akım

x : Doygunluk derecesi

Yeşil süre oranı λ denklem 3.15 ile ifade edilmektedir:

$$\lambda = \frac{g}{C} \quad (3.15)$$

Webster'in gecikme denkleminde formülün son kısmı düzeltme terimi olup toplam gecikme değerinin %5-%15'lik bir kısmına karşılık geldiği için denklem 3.15, 3.16' daki şekle dönüştürülebilir:

$$d = \frac{9}{10} * \left[\frac{c - (1 - \lambda)^2}{2(1 - \lambda x)} - \frac{x^2}{2q(1 - x)} \right] \quad (3.16)$$

3.1.2. Webster Yöntemi ile İlgili Yapılan Diğer Çalışmalar:

Webster'in geliştirdiği denkleme göre trafiğin yoğun olduğu zamanlarda yapılan devre süresi tahmininin yüksek olması durumu 2003 yılında Cheng ve arkadaşlarını [3] bu olumsuzluğu azaltarak, minimum gecikmeye dayalı devre süresi denklemi geliştirip karşılaştırma yapmaya itmiştir. Webster ve HCM2000 denklemlerini incelemişler, çalışmalarında Synchro 5 ve HCS yazılımı kullanmışlardır [3]. Denklem 3.17- 3.19 ile belirtilen regresyona dayalı üç farklı model geliştirmişlerdir:

$$C_{opt} = \frac{1,0L + 7,6}{1 - Y} \quad (3.17)$$

$$C_{opt} = \frac{0,6 + 2,90L}{1 - Y} \quad (3.18)$$

$$C_{opt} = 1,5Le^{1,8Y} \quad (3.19)$$

Verilen denklem 3.17- 3.19' dan üstel formdaki model olan denklem 3.19' un hem diğer modellere oranla ve hem de yüksek trafik hacmi durumlarında Webster modeline göre optimum devre süresini daha iyi tahmin ettiğini gözlemlemişlerdir.

Cheng ve arkadaşları (2005), Webster devre süresi modelini regresyon yöntemine dayalı olarak geliştirmişlerdir. Üstel formda model oluşturup farklı devre süresi tahmin modelleri ortaya koymuşlardır. Farklı hacim ve farklı kayıp zaman durumlarına göre CORSIM simülasyon programı üzerinden modellerin sonuçlarını HCM2000 sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır [5]. HCS 2000'de optimum devre süresi için optimizasyon motorunun bulunmaması nedeniyle optimum devre süresi ve yeşil aralığı, başlangıç değeri üretmek için Synchro(5) kullanılarak HCS 2000'deki gradyan arama metodunu kullanılıp toplam kontrol gecikmesini hesaplanmış ve optimum devre süresini bulmuşlardır.

Aynı kayıp zaman ve aynı hacimler, Webster' in devre süresi denkleminde de kullanılmış ve optimum devre süresi hesaplanmıştır. Webster ile HCM 2000 sonuçları karşılaştırıldığında düşük doyumluk derecelerinde optimum devre süreleri benzerdir ancak yüksek hacim ve doyumluk derecelerinde Webster' in optimum devre süresi her zaman yüksek tahmin etmiştir.

Webster'in modelini geliştirmek amacıyla sunulan üç regresyon modeli denklem 3.20- 3.22 ile verilmiştir:

$$C_{opt} = \frac{1,0L + 7,6}{1 - Y} \quad (3.20)$$

$$C_{opt} = \frac{0.6L + 2..9}{1 - Y} + 40 \quad (3.21)$$

$$C_{opt} = 1,5Le^{1,8Y} \quad (3.22)$$

Denklem 3.22 olan üstel modelin hem yüksek hem düşük hacim durumlarında HCM 2000 metodundan daha iyi sonuçlar verdiğini görmüşlerdir.

Al- Kubaisi, sinyalizasyon kavşaklarında araç gecikmesini en aza indiren optimum devre süresini bulmayı amaçlamış, gözlemlediği trafik hareketlerinden geliştirdiği simülasyona dayalı olarak denklem 3.23' te verilen bir regresyon modeli geliştirmiştir [12]:

$$C_{opt} = \frac{2,79L}{1 - Y} + 12,87 \quad (3.23)$$

Geliştirdiği bu regresyon modelinin çıktısını doğrulamak için OSCADY/3 yazılım paketi kullanmıştır. Sonuçların uyumlu olduğunu görmüş ve Bağdat şehrindeki bir kavşak verilerine göre elde edilen devre süresi ve gecikme değerleriyle önerilen modelin sonuçlarını karşılaştırmıştır. Daha düşük gecikme ve devre süresinin elde edilebildiğini bu karşılaştırma sonucu göstermiştir.

Zakariya ve Rabia (2016), Kanada Kapasite Rehberinde ve Otoyol Kapasite Kılavuzunda (HCM) kullanılan zamana bağlı gecikme formülüne göre minimum gecikmeyi veren optimum devre süresini tayin etmek için iki regresyon formülü

önermişlerdir. Bu regresyon formülü için gerekli verileri türetmek ve optimum devre süresini saptamak için arama algoritması geliştirmişlerdir [16].

İlk olarak Webster'in orijinal devre süresi formülünü değiştirmiş; kayıp zaman, optimum devre süresi ve kavşak akış oranı değerlerini MATLAB yazılımına girerek Denklem 3.24 ve 3.25' te verilen regresyon modellerini bulmuşlardır.

$$C_{opt} = \frac{1,978L + 5,109}{1 - 0,9013Y} \quad (3.24)$$

$$C_{opt} = 0,625Le^{3,694Y^{1,712}} + 14,78 \quad (3.25)$$

Sonuç olarak önerilen modellerin düşük doyumluk derecelerinde Webster formülü ile aynı performansa sahip olduğu ancak yüksek q/s değerlerinde optimum devre süresini Webster modeline göre daha iyi tahmin ettiği görülmüştür.

3.2. HCM Yöntemi (HCM: Highway Capacity Manual)

HCM yöntemine göre öncelikli olarak kavşağın kapasitesi en önemli unsurdur ve kavşak kapasitesi de o kavşaktan bir saatte geçebilecek maksimum araç sayısıdır. Kavşak kapasitesi ile bu kavşağın hizmet düzeyi belirlenerek belirli hesaplar yapılabilir. Kavşağın kapasitesini;

- Kavşak geometrisi
- Mevcut trafik
- Sinyalizasyonun koşulları

gibi durumlara bağlıdır. Kavşağa bağlı olan kollarda her birinin akım oranı, bu kollardan geçen gerçek hacmin doyum akıma oranı alınarak belirlenir.

Bir kavşak kolunun doyumluk derecesini ifade eden denklemler 3.26 ve 3.27 ile ifade edilir:

$$x = \frac{q}{c} \quad (3.26)$$

$$x = \frac{q * C}{s * g} \quad (3.27)$$

Burada:

x : Doygunluk derecesi

q : Akım değeri

Kavşak için kritik doygunluk derecesi matematiksel olarak denklem 3.28 ile ifade edilmektedir:

$$x_c = \sum (q/s)_{ci} * \left[\frac{C}{C - L} \right] \quad (3.28)$$

x_c : Kavşak için kritik doygunluk derecesi

$\sum (q/s)_{ci}$: Her fazdaki kritik akım, akımlara ait akım oranlarının toplamı

Sabit sinyalizasyon sistemine sahip olan sistemlerde bu yöntemdeki devre süresi hesabı için kullanılan formül denklem 3.29 ile verilmektedir:

$$C = \frac{L * x_c}{[x_c - \sum (q/s)_{ci}]} \quad (3.29)$$

$\sum (q/s)_{ci}$: Her fazdaki kritik akım, akımlara ait akım oranlarının toplamı

Devre süresi içerisindeki yeşil sürelerin hesaplanması denklem 3.30 ve 3.31 ile ifade edilmektedir:

$$g_i = \frac{q_i * C}{s_i * x_i} = \left(\frac{q}{s} \right)_i * \left(\frac{C}{x_i} \right) \quad (3.30)$$

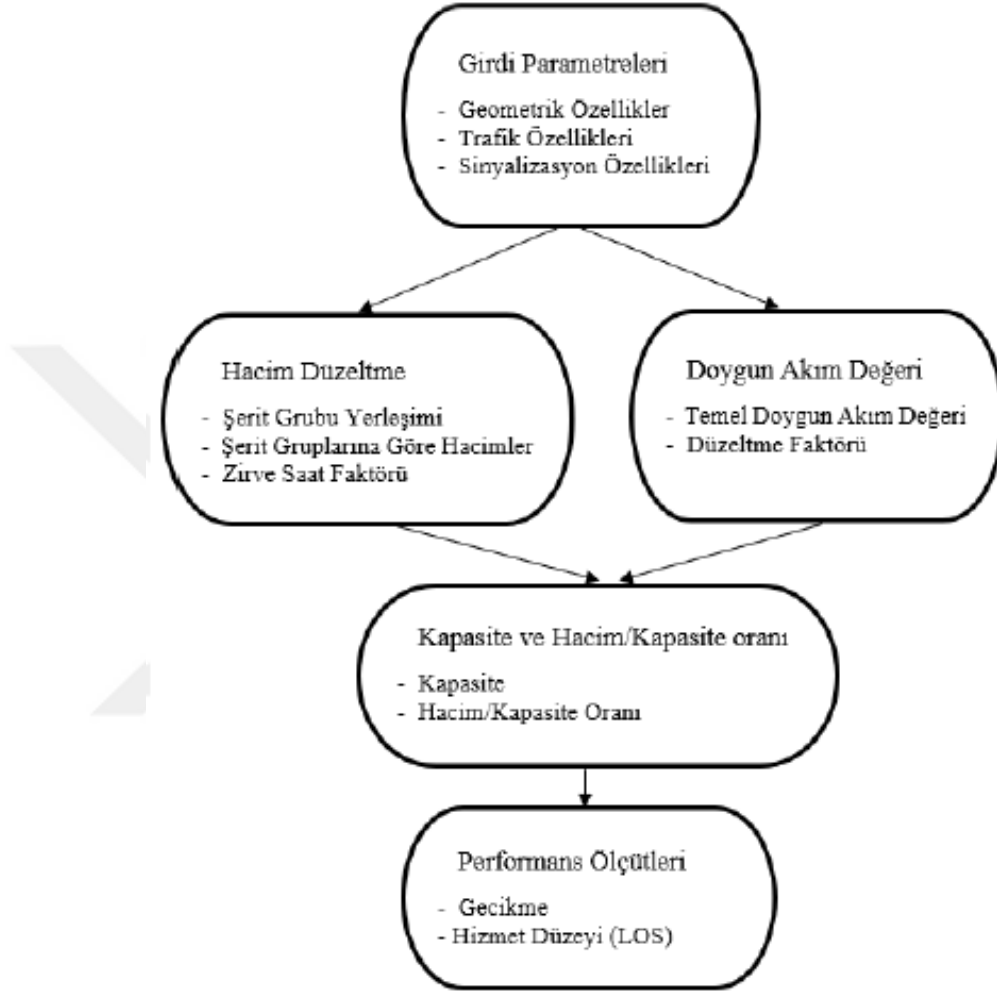
$$g_{i-diğer} = C - (g_i + L) \quad (3.31)$$

Denklem 3.30 ve 3.31' de görüldüğü gibi, örneğin iki kollu bir kavşakta öncelikle birinci kolun yeşil süresi hesaplanır ve ardından ikinci koldaki yeşil süre verilen diğer bağıntı ile hesaplanır.

$\left(\frac{q}{s} \right)_i$: i akımına ait akım oranı

x_i : i akımına ait akım oranı (q/c)

Bu yöntemle göre izlenen yol aşağıdaki Şekil 3.1.' de gösterildiği gibidir ve 5 kısımda incelenir:



Şekil 3.1. Sinyalize Kavşak Metodolojisi [32]

3.2.1. Girdi Parametreleri

Girdi parametreleri 3 kısımda incelenir [32] :

- Geometrik Özellikler
- Trafik Özellikleri

- Sinyalizasyon Özellikleri

3.2.1.1. Geometrik Özellikler

Geometrik bilgiler için öncelikle aşağıdaki bilgilerin öğrenilmesi gerekir:

- Kavşağa bağlanan kolların sayısı
- Yollardaki şerit sayısı
- Şeritlerin genişliği
- Kavşağa bağlanan yolların eğimi
- Park durumu
- Sağ veya sol dönüş durumu
- Sağ veya sol dönüş için depo mesafesi uzunluğu

3.2.1.2. Trafik Özellikleri

Trafik özellikleri içerisinde yaya ve taşıtların hacimleri, taşıtların varış tipi gibi durumlar etkilidir.

Yaya ve taşıt hacimlerini belirledikten sonra önemli olan diğer bir etken ise ağır taşıtların yüzdesidir. Ağır taşıtlar, dörtten fazla tekerleği olan taşıtlardır şeklinde ifade edilir. Taşıt hacimleri içerisinde ağır taşıt yüzdesi de belirlenerek her bir yaklaşım kolu için hesaplamalara dahil edilir. Bu bağlamda etkili olan diğer bir etken bisiklet hacimleridir ve bu hacimler de belirlenir.

Taşıtların varış tipi dediğimiz etken, taşıtların kavşağa girdikleri zaman ile ilgilidir. Varış tipinin belirlenmesi gecikme hesabında ve hizmet seviyesinin belirlenmesinde önemli rol oynar. R_p değeri araçların kavşağa geliş tipine göre 0,3 ile 2 arasında

değer alır. Bu değer 2'ye ne kadar yakınsa kendisinden daha önceki kavşakta toplanan araçların ilerleme kalitesinin yüksek olduğunu ve toplulaşan araçların yeşil ışığın başlangıcında geldiğini ifade eder. Varış tipinin tespit edilebilmesi için bir toplulaşma oranı formülü geliştirilmiştir ve denklem 3.32 ile gösterilmektedir:

$$R_p = \frac{P}{\frac{g_i}{c}} \quad (3.32)$$

R_p : Toplulaşma oranı

P : Devre süresinde ayrılan yeşil süre boyunca kavşağı boşaltan taşıtların sayısının, bu yeşil süre boyunca kavşağa gelen toplam taşıt sayısına oranı

3.2.1.3. Sinyal Özellikleri

HCM yöntemine göre sinyal özellikleri içerisinde yer alanlar şunlardır:

- Devre süresi
- Faz diyagramı
- Yeşiller arası süre
- Yeşil süre

Eğer devre süresi içerisinde yayalara da süre verilecekse öncelikle yayalar için yeşil süre hesaplanmalıdır ve bu süre denklem 3.33 ve 3.34 ile hesaplanır:

$$G_p = 3,2 + \frac{L'}{S_p} + (0,27 * N_{ped})W_E < 3,0 \text{ metre} \quad (3.33)$$

$$G_p = 3,2 + \frac{L'}{S_p} + (0,81 * N_{ped})W_E > 3,0 \text{ metre} \quad (3.34)$$

G_p : Yayalar için minimum yeşil süre (saniye)

S_p : Yayaların ortalama hızı (metre/saniye)

L' : Yürüme mesafesi (metre)

N_{ped} : Karşıdan karşıya geçmekten olan yayaların sayısı

W_E : Yolun genişliği (metre)

3,2: Yayaların harekete başlamaları için geçen süre (saniye) [32]

3.2.2. Hacim Düzeltmeleri

Hacim düzeltme hesaplamalarında izlenen 3 adım bulunmaktadır. Bunlar;

- Saatlik trafik hacimlerin zirve saat faktörü ile zirve saat trafiğine dönüştürülerek düzeltilmesi
- Şerit gruplarının belirlenmesi işlemi
- Trafik hacimlerinin belirlenen şerit gruplarına göre tekrar düzenlenmesi durumu

3.2.2.1. Saatlik Trafik Hacimlerin Zirve Saat Faktörü İle Zirve Saat Trafiğine Dönüştürülerek Düzeltilmesi

Zirve saat faktörü, 1 saatte bir yolda sürekli ve düzenli bir akım elde edemediğimizden dolayı trafik akımlarının en yoğun olduğu saatin (zirve saat) en yoğun olduğu 15 dakikasına göre alınan değerdir. Zirve saat faktörünün hesabı denklem 3.35' te verilmektedir:

$$ZSF = \frac{V}{4 * V_{15}} \quad (3.35)$$

ZSF : Zirve saat faktörü

V : Saatlik akım hacmi (araç/saniye)

V_{15} : Zirve saatteki 15 dakikalık maksimum hacim

Akım oranının bulunması ise zirve saat faktöründen yararlanılarak denklem 3.36 ile hesaplanmaktadır:

$$V_p = \frac{V}{ZSF} \quad (3.36)$$

V_p : Zirve saatteki akım oranı (araç/saat)

3.2.2.2. Şerit Gruplarının Belirlenmesi İşlemi

Bir veya birden fazla trafik akımını karşılayan şerit sayısına göre şerit grupları belirlenir. Birden fazla trafik akımından kastedilen sağa ve/veya sola dönüşlerdir. Bu dönüşler de göz önüne alındığında Şekil 3.2.' de görüldüğü gibi şerit grupları belirlenebilir:

SERIT SAYISI	SERIT AKIMLARI	OLASI SERIT GRUPLARI
1	Sol dönen(LT)+ Dogru giden(TH)+ Sag dönen(RT)	①
2	Sol dönen(özel LT) Dogru giden(TH)+ Sag dönen(RT)	②
2	Sol dönen(LT)+ Dogru giden(TH) Dogru giden(TH)+ Sag dönen(RT)	① ya da ②
3	Sol dönen(özel LT) Dogru giden(TH) Dogru giden(TH)+ Sag dönen(RT)	② ya da ③

Şekil 3.2. Tipik Şerit Grupları [32]

Sola dönüşün olduğu birden fazla şeritli yolda, düz gidenler ile sola dönenler bir şeridi kullanmak durumunda kaldıklarından dolayı sola dönenlerin daha fazla olması sebebiyle bu şeridin özel bir sola dönüş şeridi gibi davranıp davranmadığını anlamak için denklem 3.37 geliştirilmiştir:

$$q_{eşdeğer-soldöner} = q_{soldöner} * \frac{1800}{1400 - q_o} \quad (3.37)$$

$q_{eşdeğer-soldöner}$: Yaklaşık olarak eşdeğer sola döner akım miktarı (araç/saat)

$q_{soldöner}$: Gerçek sola döner akım miktarı (araç/saat)

q_o : Toplam çakışan akım miktarı (araç/saat)

Bu bağıntı ile sola döner akım, yaklaşık olarak düz giden araçların akımına çevrilmiştir. Ancak çakışan akım miktarı 1400 ve üzeri olunca, yani sola döner akımlar düz giden akımlardan fazla olduğu zaman, yukarıdaki denklem 3.37 geçersiz olur ve bu denklemin yerine denklem 3.38 kullanılır:

$$q_{eşdeğer-soldöner} \geq \frac{(q_a - q_{soldöner})}{(N - 1)} \quad (3.38)$$

Bu formüldeki gibi olduğunda sola dönüş için ayrı bir şerit grubu kabul edilmiş olur.

q_a : Kavşak kolundaki toplam akım (araç/saat)

N : Kavşak kolundaki şerit sayısı toplamı

Eşdeğer sola döner akım oranı eğer diğer şeritlerdeki düz giden akımın oranından az ise bu sefer şerit, tek bir şerit olarak kabul edilir. Ya da eşdeğer sola döner akım denklem 3.39' daki gibiyse, sola dönerler ayrı bir şerit kabul edilmez, ortak şerit dahilinde alınırlar:

$$q_{eşdeğer-soldöner} < \frac{(q_a - q_{soldöner})}{(N - 1)} \quad (3.39)$$

3.2.2.3. Trafik Hacimlerinin Belirlenen Şerit Gruplarına Göre Tekrar Düzenlenmesi Durumu

Birden fazla şeridin olduğu kavşak yaklaşım kollarında kullanım oranı eşit olmamaktadır. Bu sebepten dolayı akım değerlerinin eşit olarak kullanılması için denklem 3.40 ile yeniden bir düzenleme yapılarak düzeltilmektedir:

$$q = q_g * U_f \quad (3.40)$$

q : Her bir şerit grubu için düzeltilmiş olan talep edilen akım (araç/saat)

q_g : Her bir şerit grubu için düzeltilmemiş olan talep edilen akım (araç/saat)

U_f : Şerit kullanım faktörü

Çizelge 3.3. Şerit Kullanım Faktörleri [32]

Grupta Doğru Giden Şerit Sayısı	Şerit Kullanım Faktörü, U_f
1	1,00
2	1,05
≥ 3	1,10

3.2.3. Doygun Akım Değeri

Doygun akım değeri, bir kavşaktan belirlenen devre süresi içerisinde ayrılan yeşil süre boyunca geçebilecek maksimum araç sayısı olarak ifade edilir. Bu değer, hesaplamalarda 1800 araç/saat-şerit olarak alınan değer çeşitli düzeltme faktörleri ile çarpılarak bulunan değeri ifade etmektedir ve denklem 3.41 ile ifade edilmektedir:

$$S = S_0 * N * f_{HW} * f_W * f_{bb} * f_p * f_a * f_g * f_{LT} * f_{LU} * f_{RT} * f_{Rbp} * f_{Lpb} \quad (3.41)$$

S : Doygun akım oranı (araç/saat)

S_0 : Temel akım oranı

N : Yaklaşım kolundaki şerit sayısı

f_{HW} : Ağır taşıtlar için düzeltme faktörü

f_W : Şerit genişliği için düzeltme faktörü

f_{bb} : Otobüs blokajı düzeltme faktörü

f_p : Park için düzeltme faktörü

f_a : Kavşağın bulunduğu bölge türü için düzeltme faktörü

f_g : Kavşak kolunun bulunduğu yolu için eğim düzeltme faktörü

f_{LT} : Sola dönen araçlar için düzeltme faktörü

f_{LU} : Şerit kullanımını için düzeltme faktörü

f_{RT} : Sağa dönen araçlar için düzeltme faktörü

f_{Rbp} : Yaya düzeltme faktörü (Sağa dönüşler için)

f_{Lpb} : Yaya düzeltme faktörü (Sola dönüşler için)

Çizelge 3.4. Ağır Taşıtlar İçin Düzeltme Faktörü, f_{HW}

Ağır Taşıtların Yüzdesi , %HW	0	2	4	6	8	10	15	20	25	30
Ağır Taşıtların Faktörü, f_{HW}	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93	0,91	0,89	0,87

Çizelge 3.5. Şerit Genişliği İçin Düzeltme Faktörü, f_w

Şerit Genişliği(ft)	8	9	10	11	12	13	14	15	≥ 16
Şerit genişliği için düzeltme faktörü, f_w	0,87	0,90	0,93	0,97	1,00	1,03	1,07	1,10	2 şerit alınır

Çizelge 3.6. Otobüs Blokajı Düzeltme Faktörü, f_{bb}

Şerit Grubundaki Şerit Sayısı	Bir saatte otobüslerin durma sayısı, N_b				
	0	10	20	30	40
1	1,00	0,96	0,92	0,88	0,83
2	1,00	0,98	0,96	0,94	0,92
3	1,00	0,99	0,97	0,96	0,92

Çizelge 3.7. Park İçin Düzeltme Faktörü, f_p

Şerit Grubundaki Şerit Sayısı	Park Yasak İse	Bir saatte yapılan park manevrası sayısı, N_m				
		0	10	20	30	40
10	1,00	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70
2	1,00	0,95	0,92	0,89	0,87	0,85
3	1,00	0,97	0,95	0,93	0,91	0,89

Çizelge 3.8. Kavşağın Bulunduğu Bölge Türü İçin Düzeltme Faktörü, f_a

Bölge Türü	Bölge Faktörü, f_a
MİA (Merkezi İş Alanı)	0,90
Diğer Bölgeler	1,00

Çizelge 3.9. Kavşağın Bulunduğu Kol için Eğim Düzeltme Faktörü, f_g

	Negatif Eğim			Düz Seviye	Pozitif Eğim		
Eğim(%)	-6	-4	-2	0,00	+2	+4	+6
Eğim Faktörü, f_g	1,03	1,02	1,01	1,00	0,99	0,98	0,97

$$f_{LU} = \frac{V_g}{V_{g1} * N} \quad (3.42)$$

V_g : İncelenen koldaki trafik akımının hacmi (araç/saat)

V_{g1} : Akımın içindeki her bir şeritten geçen trafiğin en büyüğü (araç/saat)

N : İncelenen koldaki trafik akımının geçtiği şerit sayısı

Çizelge 3.10. Sola Dönen Araçlar İçin Düzeltme Faktörü, f_{LT} ; Sağa Dönen Araçlar İçin Düzeltme Faktörü, f_{RT} ; Yaya Düzeltme Faktörü (Sağa Dönüşler İçin), f_{Rbp} ; Yaya Düzeltme Faktörü (Sola Dönüşler İçin), f_{Lbp}

Sola Dönüşler	- Dönüş Şeridi: $f_{LT}=0,95$ - Ortak Kullanılan Şerit: $f_{LT} = \frac{1}{1,0+0,05*P_{LT}}$	P_{LT} : İncelenen akım içinde sola dönen araçların oranı.
Sağa Dönüşler	- Dönüş Şeridi: $f_{RT}=0,85$ - Ortak Kullanılan Şerit: $f_{RT} = 1,0 - (0,15) * P_{RT}$	P_{LT} : İncelenen akım içinde sağa dönen araçların oranı ($f_{RT} \geq 0,050$)
Yaya ve Bisiklet	Sola Dönüş Faktörü: $f_{Lbp} = 1,0 - (1 - A_{pbt}) * P_{LT} * (1 - P_{LTA})$	P_{LT} : İncelenen akım içinde sola dönen araçların oranı. A_{pbt} : Geçiş hakkı alan fazın düzeltme faktörü. P_{LTA} : Sola dönen ve düz giden araçların toplam yeşil süresi içinde korunan yeşil süre oranı.
	Sağa Dönüş Faktörü: $f_{Rbp} = 1,0 - (1 - A_{pbt}) * P_{RT} * (1 - P_{RTA})$	P_{RT} : İncelenen akım içinde sağa dönen araçların oranı. P_{RTA} : Sağa dönen ve düz giden araçların toplam yeşil süresi içinde korunan yeşil süre oranı.

3.2.4. Kapasite

Bir devre süresi boyunca bir kavşaktan bir saatte geçebilecek maksimum araç sayısı, o kavşağın kapasitesi olarak adlandırılır. Kavşak kapasitesi denklem 3.1 ile gösterilmektedir ve bu değerın hesaplanmasında etkili olan faktörler aşağıda sıralanmıştır:

- Doygun akım değeri
- Devre süresi
- Yeşil süre

Hacim/Kapasite oranı olarak tanımlanan x değeri için geliştirilen denklem ise denklem 3.26 ile ifade edilmektedir. Kritik hacim /Kapasite oranı olan X_c denklem 3.28 ile belirlenir.

3.2.5. Performans

Kavşakların kapasitesinin performansını etkileyen iki önemli etmen vardır:

- Gecikme
- Hizmet Düzeyi

3.2.5.1. Gecikme

Bir aracın, kendi isteği dışındaki durumlardan dolayı kaybettiği zamana gecikme adı verilir. Gecikmeye sebep olan pek çok durum olabilir. Araca yeşil sürenin bitmesiyle durma komutu geldiğinde durmasının ardından yayaları ve kendisine yeşil süresi başlayan araçları beklerken geçen süre, önünde bulunan araçla arasında güvenli bir uzaklık olması için ayarlama yapılırken kaybettiği zaman, kavşakta bulunup ağır hareket ederek akışı yavaşlatan ve kavşağa park ederek manevra zorluğu yaratması sebebiyle kaybedilen süreler gecikme süreleri olmaktadır. Gecikme değeri, üç farklı durumun göz önünde tutularak hesaplanmasıyla elde edilir ve denklem 3.43'te belirtildiği gibi hesaplanır:

$$d = d_1 * (PF) + d_2 + d_3 \quad (3.43)$$

d : Her bir araç için kontrol gecikmesi (saniye/araç)

d_1 : Uniform kontrol gecikmesi (saniye/araç)

PF : İlerleme Düzeltme Faktörü

d_2 : Düzeltilen artmış gecikme (saniye/araç)

d_3 : Başlangıçta oluşan kuyruklanma gecikmesi (saniye/araç)

$$d_1 = \frac{0,5 * C * (1 - \frac{g}{c})^2}{1 - [\min(1, x) * \frac{g}{c}]} \quad (3.44)$$

x : Akımın doygunluk derecesi

$$PF = \frac{(1 - P) * f_{PA}}{1 - \frac{g}{c}} \quad (3.45)$$

PF : İlerleme düzeltme faktörü

P : Devre süresindeki yeşil süre boyunca gelen araçların oranı

f_{PA} : Devre süresindeki yeşil süre boyunca gelen araçlar için tamamlayıcı düzeltme faktörü

$$d_2 = 900 * T * [(x - 1) + \sqrt{(x - 1)^2 + \frac{8 * k * I * x}{c * T}}] \quad (3.46)$$

d_2 : Arttırılmış gecikme değeri (saniye/araç)

T : Analiz edilen süre (saniye)

k : Artan gecikme faktörü

I : Ölçüm düzeltme faktörü

Gecikme süreleri ortalama olarak bir kavşak için de denklem 3.47 ile hesaplanabilir:

$$d_I = \frac{\sum d_A * V_A}{\sum V_A} \quad (3.47)$$

d_I : Kavşak içindeki her bir araç için ortalama gecikme süresi (saniye/araç)

d_A : A yaklaşım kolu için ortalama gecikme süresi (saniye/araç)

V_A : A yaklaşım kolunun hacmi (araç/saat)

Kavşağa bağlanan herhangi bir kol için ortalama gecikme hesaplanmak istendiğinde denklem 3.48 kullanılır:

$$d_A = \frac{\sum d_i * V_i}{\sum V_i} \quad (3.48)$$

d_i : i. şerit için gecikme (saniye/araç)

V_i : i. şerit için düzeltilmiş akım (araç/saat)

İlk olarak verilen gecikme formülündeki d_3 gecikme değeri başlangıçta kavşakta bulunan gecikmeyi ifade eder. Eğer başlangıçta herhangi bir kuyruklanma yoksa bu değer sıfır olarak alınır.

3.2.5.2. Hizmet Düzeyinin Belirlenmesi

Hizmet düzeyinin belirlenmesi gecikme süresine bağlıdır ve aynı zamanda da kavşak performansını ifade etmektedir. Gecikme sürelerine göre hizmet düzeyleri Çizelge 3.11.' de verilmiştir:

Çizelge 3.11. Hizmet Düzeyi [33]

Hizmet Düzeyi	Araç Başına Düşen Kontrol Gecikmesi (saniye)
A	≤ 10
B	$10 < \dots < 20$
C	$20 < \dots < 35$
D	$35 < \dots < 55$
E	$55 < \dots < 80$
F	$80 < \dots$

Bu tabloya göre bir kavşakta araç başına düşen ortalama kontrol gecikmesi 10 saniyeden az ise o kavşağın A hizmet düzeyinde performansa sahip olduğu

değerlendirilir. Hizmet düzeyleri için, araç başına düşen kontrol gecikmesinin artması kavşak performansının yetersiz olduğunu gösterir.



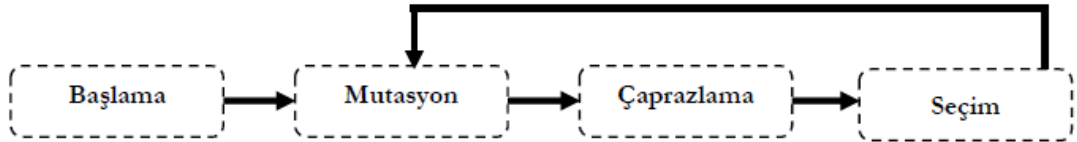
4. YAPAY ZEKA TEKNİKLERİ

4.1. Diferansiyel Gelişim Algoritması

Diferansiyel Gelişim Algoritması (DGA) doğa tabanlı, popülasyon temelli, gerçel değerlere dayalı olan, sezgisel optimizasyon yöntemlerinden biridir. Storn ve Price tarafından 1995 yılında ortaya atılmıştır [34]. DGA'da popülasyonun geliştirilmesinde genetik algorithmadan farklı olarak vektörlerin farklılıkları kullanılarak gelişim sağlanır. Çalışma prensibi olarak genetik algorithmaya yakındır, ancak genetik algorithmalarda çaprazlama, karşılaştırma, mutasyon adımları tek tek ve ayrı olarak yapıldığından optimizasyon süresi uzun olmaktadır.

Algoritmanın asıl ulaşmak istediği hedef, tanımlı ve gerçel değerli olan parametrelerin doğrusal olmayan ve türevi alınamayan fonksiyonlarda optimum değerlerini bulabilmektir. Bu algoritma, çok boyutlu ve yerel minimum veya maksimum noktalarına sahip problemlerde avantajlı olmaktadır.

DGA' da işlemler Şekil 4.1.' deki sıra ile yapılır.



Şekil 4.1. Temel Adımlar [35]

DGA' nın GA' ya benzemesine rağmen temelde içerdiği bazı farklılıklar vardır. Değişkenlerin gerçel değerlerinin kullanımında ve mutasyon aşamalarında görülen bu farklılıklara bakıldığında diferansiyel gelişim algoritmasının daha avantajlı olduğu görülür. Mutasyon aşamasında genetik algorithmada değişimler rastgele olurken, diferansiyel gelişim algoritmasında kromozomlar arasındaki farklar dikkate alınır. Bu durum da adım boyutunu belirlemede önemli bir paya sahip olur.

Diferansiyel gelişim algoritmasının avantajlarına bakıldığında; az sayıda kontrol parametresi kullanması, başlangıçta belirlenen parametrelerden bağımsız olarak global minimuma yaklaşması ve yerel minimumu hızla yakınsama durumu bu avantajlar arasında gösterilebilir.

4.1.1. Başlangıç Popülasyonu

Diferansiyel gelişim algoritmasının ilk basamağı olan başlangıç popülasyonunun belirlenmesi en önemli adımlardan biridir ve denklem 4.1 ile ifade edilmiştir. Öncelikle problemdeki değişkenin sayısı olan D ile kromozom boyutları belirlenir. Kromozom sayısı NP ise kullanıcıya kalmış bir durumdur ve 3'ten büyük bir değer olmak zorundadır.

$$X_{j,i}^0 = X_j^{min} + rand_j(0,1). (X_j^{max} - X_j^{min}) \quad (4.1)$$

X_j^{max} : Parametrenin üst sınır değeri

X_j^{min} : Parametrenin alt sınır değeri

i : $1, \dots, NP$ (NP : Popülasyon sayısı)

j : $1, \dots, D$ (D : Parametre sayısı)

Optimum popülasyon bilgimiz dahilindeyse bu formülü kullanmamız önem teşkil eder. Çünkü, başlangıçta elde edeceğimiz popülasyon optimum popülasyona yakın olmalıdır ancak önemli olan durum başlangıç popülasyonunun yakınsaklığı, optimum noktanın başlangıç popülasyonunun dışında konumlanmamış olduğundan emin olacağımız kadar geniş olmasıdır ki bu durumda da geniş bir alana sahip olduğu için yeteri miktarda varyans oluşturulmuş olur.

4.1.2. Mutasyon

Mutasyon işlemi, hali hazırda bulunan kromozomların genlerinde yapılan değişikliği ifade eder. Bu mutasyon yapılırken, yapılan mutasyonun farklı miktarına ve mutasyonun yönüne dikkat edilmesi gerekir. Gelişigüzel seçtiğimiz popülasyon bireyine aynı şekilde gelişigüzel seçtiğimiz iki adet vektörün ölçeklendirilmiş şeklini eklediğimiz bu mutasyon işleminde elde edilen değişimlerle oluşan mutasyonda kromozomu gösteren çözüm noktası, çözüm uzayında hareket halinde olur ve bu mutasyonun istenilen yere ulaşabilmesi için de miktar ve yön hareketleri önemli bir faktör olmaktadır.

Mutasyon yapılacağı sırada fark vektörü seçimi olurken bir veya iki adet seçim yapılır. Bu seçim yapılırken Price iki adet kullanmanın daha uygun mutasyon sayısı vereceğini ifade etmiştir. Eğer bir adet fark vektörü seçilecekse denklem 4.2 kullanılır:

$$X_i'^{(G)} = X_a^{(G)} + F(X_b^{(G)} - X_c^{(G)}) \quad (4.2)$$

$X_i'^{(G)}$: Mutant vektörü

$X_a^{(G)}$: Baz vektörü

G : Nesil numarası

F : Mutasyon katsayısı

$X_b^{(G)}$ ve $X_c^{(G)}$: Vektör farkı oluşturmak amacıyla gelişigüzel seçilen vektörler

DGA' da geliştirilen stratejiler ve bu stratejilerin bağlı olduğu kriterler vardır. Bunlar:

- Mutasyona uğrayacak vektör
- Fark vektörü sayısı
- Kullanılan çaprazlama tipi

Bu stratejiler $DGA/x/y/z$ şeklinde ifade edilirler. Burada:

- x : Mutant vektörünü meydana getirmek amacıyla seçilen baz vektörü
- y : Fark vektörü sayısı
- z : Çaprazlama tipini göstermektedir [36].

Price ve Storn on farklı strateji tipi önermişlerdir. Bunlar:

- DGA/rand/1/bin
- DGA/best/1/bin
- DGA/rand-to-best/1/bin
- DGA/rand/2/bin
- DGA/best/2/bin
- DGA/best/1/exp
- DGA/rand/1/exp
- DGA/rand-to-best/1/exp
- DGA/best/2/exp
- DGA/rand/2/exp

Bu işlemlerden rand işleminde baz vektörü gelişigüzel şekilde seçilmesi nedeniyle her bir kromozomun seçilme oranı eşit düzeyde olmaktadır. Ancak bu durum bir kromozomun pek çok kez seçilme ihtimali olmasına neden olmaktadır. Diğer yöntemlerden biri olan best işleminde baz vektörü olarak kullanılan vektör en iyi kromozomdur. Böylece hem yakınsama hem de erken yakınsama durumları mümkün olabilmektedir. Rand to best işlemi hem rand hem de best işlemlerinin ortaklaşa çalışması ile oluşur.

4.1.3. Çaprazlama

Araştırmanın daha iyi sonuçlanması amacıyla bulunmakta olan vektörlerle çaprazlama işlemi yapılarak yeni vektörler oluşturulur. Bu işlemde problemin çözümü olabilecek seçenek sayılarını arttırıp bu çözümlerin oluşturduğu kümenin arasından farklı yerlerden çözümün seçebilmesi sağlanır.

Çaprazlama işleminde, mutasyon işlemi bittikten sonra ortaya çıkan mutant vektörü ve hedef vektörünün birleştirilmesi ile deneme vektörü meydana getirilir. Çaprazlama metodu üç tanedir [37]. Bunlar:

- Binomial (iki terimli)
- Exponential (üstel)
- Aritmetik

4.1.3.1. Binomial Çaprazlama Metodu

Diferansiyel gelişim algoritmasında sıklıkla kullanılan binomial metodundaki çaprazlama işleminde mutant vektörü ile hedef vektörünün arasında olması, hedef vektörünün yinelenmemesi ve vektörlerden bir tanesinin mutlaka mutant vektörü olabilmesi amacıyla bu vektörlerin hepsi birbirinden ayrı olarak seçilir. Denklem 4.3 ile çaprazlama gerçekleştirilir:

$$X_i^{(G)} = \begin{cases} X_i^{(G)} & \text{if } rand_j(0,1) \leq C_r \text{ or } j = j_{rnbr(i)} \\ X_i^{(G)} & \text{if } rand_j(0,1) > C_r \text{ or } j \neq j_{rnbr(i)} \end{cases} \quad (4.3)$$

$X_i^{(G)}$ olarak ifade edilen deneme vektörü 0 ile 1 arasında bir değer alırken, $rnbr(i)$ ise 0 ile D arasında bir değer alır. p_m mutant vektörünün parametre olasılığı çaprazlama oranı ile farklı olduğu için vektörlerden birinin mutant vektörü olması sağlanır ve popülasyonun ihtimaline de bağlıdır. Bu ihtimal denklem 4.4 ile hesaplanır:

$$p_m = CR \left(1 - \frac{1}{D}\right) + \frac{1}{D} \quad (4.4)$$

İhtimalin oranı ile popülasyondaki parametre sayısını çarptığımız zaman, mutant vektöründen alınabilecek parametrelerin sayısını elde edilir. Matematik ifadesi denklem 4.5' de ifade edildiği gibidir [37].

$$E(L) = NP * p_m \quad (4.5)$$

4.1.3.2. Üstel Çaprazlama Metodu

Üstel metot, genetik algorithmada tercih edilen çaprazlama ile aynı olarak bir ya da iki noktadaki çaprazlama operatörü gibidir. Rastgele seçilen iki kromozom seçilir. Bu kromozomlar yeni birey üretmeye hazırdır. Bu iki kromozomun ilerisinde gelişigüzel bir nokta seçilir ve iki kromozomun birbirine yakın olması durumunda, aynı yeni birey oluşur. İki kromozomun birbirine uzak ise iki ayrı nokta seçilir. Biri mutant vektörü, öteki ise hedef vektörden alınmış olur [34].

Üstel çaprazlama metodunun matematiksel olarak ifadesi denklem 4.6 ile gösterildiği şekildedir:

$$X_i^{(G)} = \begin{cases} X_i^{(G)} & \text{if } j = (n)_D, (n+1)_D \dots (n+L-1)_D \\ X_i^G & \text{diğer} \end{cases} \quad (4.6)$$

n : Rastgele bir sayı (1 ile D arasında)

$(n)_D$: n/D bölümünün kalan ifadesi

4.1.3.3. Aritmetik Çaprazlama Metodu

Hem genetik algorithmada hem de diferansiyel gelişim algoritmasında kullanılan bu metotta hedef vektörü ile mutasyona uğramış vektör beraber çalıştırılır. Denklem olarak ifadesi denklem 4.7 ile gösterilmektedir:

$$X_i^{''(G)} = (1 - q)X_i^{(G)} + qX_i'^{(G)} \quad (4.7)$$

q : Ağırlık katsayısı (Mutant ve hedef vektör arasındaki denge sağlayıcıdır.)

4.1.4. Seçim

Diferansiyel gelişim algoritmasında yeni bir birey oluşturabilmek amacıyla bir aşama olan seçim aşamasına geçilir. Pek çok algoritma seçim aşamasında, sıralama ve oransal seçim yöntemlerini sıklıkla kullanır. Ancak diferansiyel gelişim algoritması bu yöntemleri kullanmaz. Diferansiyel gelişim algoritması, hedef vektörü ve deneme vektörünün uygunluk değerlerine bakarak yeni jenerasyona bir seçim yapar. Deneme vektörünün uygunluk değeri hedef vektörünün uygunluk değerine göre daha iyiye, deneme vektörü yeni jenerasyona geçer. Hedef vektörünün uygunluk değeri, deneme vektörünün uygunluk değerine göre daha iyi bir değere sahipse süregelen jenerasyon devam ettirilir. Bu durum denklem 4.8 ile ifade edilir:

$$X_i^{G+1} \begin{cases} X_i^{''(G)} & \text{if } f(X_i^{''(G)}) \leq f(X_i^{(G)}), \\ X_i^{(G)} & \text{diğer} \end{cases} \quad i = 1 \dots NP \quad (4.8)$$

Diferansiyel gelişim algoritmasında işlemler, istenilen kritere kadar devam eder. İstenilen elde edildiğinde durdurma gerçekleştirilir.

4.1.5. Diferansiyel Gelişim Algoritmasında Kontrol Parametreleri

Diferansiyel gelişim algoritmasında üç adet parametre vardır. Bunlar:

- NP : Popülasyon boyutu
- CR : Çaprazlama oranı
- F : Mutasyon katsayısı

Popülasyon boyutu için aralık NP için 4D ile 10D arasında, çaprazlama oranı için aralık 0,9 ile 1 arasında ve mutasyon katsayısı için aralık 0,4 ile 0,95 arasında olması gerektiği Mallipeddi ve arkadaşlarının çalışmaları sonucu belirlenmiştir [38].

4.2. Yapay Arı Kolonisi Algoritması

Doğada; arılar, karıncalar, kuşlar, balıklar ve bu tür sürü halinde yaşayan canlılar arasında tek başına yaşayan canlılardan farklı olarak bazı etkilenmeler ve değişimler olur. Bu etkilenmeler ve değişimler zamanla bilim insanlarının dikkatini çekmiş ve bu durumları göz önüne alıp günümüzdeki problemleri çözmek için sürü zekası yapay zeka tekniğini geliştirmişlerdir. Göz önüne alınan davranışlara örnek verecek olursak arıların kovan etrafında dolaşmaları, balıkların ve kuşların buldukları bölge ile gidecekleri yere göre hızlarını belirlemeleri, karıncaların geçtiği her yere pheromone adı verilen kimyasal içerikli bir madde salgılayarak kendisinden sonra gelen karıncalar için bilginin geçişini yapması önemli zeka örneklerindedir ve bir sürüde iki adet hususi görev bulunmaktadır ki bunlar;

- Kendi kendilerini organize edebilme yetenekleri (Self-organization)
- Mesai dağılımı

Self-Organization

Bir sürüdeki birilerin her biri diğer birimlerden aldığı bilgilere göre kendilerini organize eder ve düzenler. Komşuluk durumlarından, bilgilendirmelerden faydalanarak alınan bilgiler ile etkileşim haline geçerek tüm sürüyü etkilemiş olurlar.

Bonabeau ve arkadaşlarına göre self-organization durumunu dört başlıkta incelemişlerdir [40]:

- **Pozitif feedback**: Nektar durumu önemlidir ve ne kadar çok nektar varsa o kaynağa o kadar çok arı yönelir.
- **Negatif feedback**: Bir kaynakta nektar miktarı tükendiğinde oraya yönelen arı sayısı azalır.

- **Salınım**: Kaşif arılar salınım yapma özellikleri ile istedikleri düzende arama yapabilirler.
- **Coklu etkileşim**: Arılar kaynakta belleklerine kaydettikleri bilgileri diğer arılarla paylaşırlar.

Mesai Dağılımı

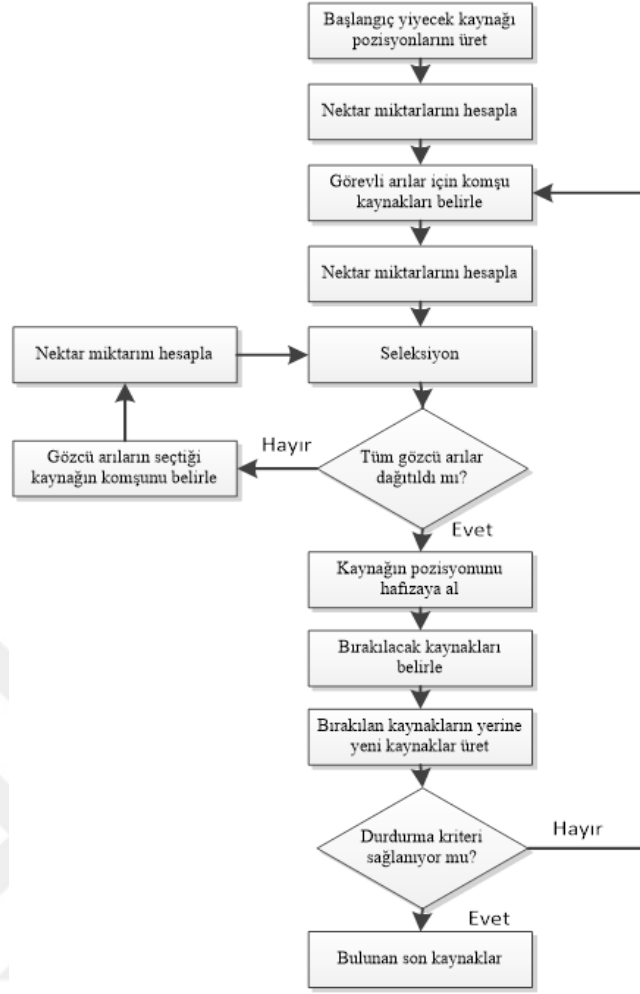
Sürü içerisinde bulunan tüm bireyler, senkronize bir şekilde kendilerine düşen görevleri yerine getirirler. Böylelikle topluca yapılan işler sonucu daha verimli çalışan sürü, bu şekilde çalışmayan sürülere göre daha iyi sonuçlar alırlar. Çözüm uzayında da bu durumun etkisi olumlu bir şekilde görülür.

Yapay arı kolonisi algoritması da bu sürü zekası tekniği örnek alınarak oluşturulmuş bir tekniktir [41]. Arıların kendilerine özel olan davranışları incelenmiş; yiyecek bulma, yiyecek arama ve edindikleri bu aramalardaki bilgileri aktarma ile kendi kendilerini yönetip aralarında iş bölümü yapmaları, ani değişen çevre gelişmelerine karşı uygun çözümler üretmeleri ile insanların da kendi problemlerini çözmede ve optimizasyonlarda yaşadıkları sorunlara çözüm aramada arıların bu zekaları bilim adamları tarafından geliştirilmiştir.

4.2.1. Arıların Doğası

Arılar doğada tek bir merkez tarafından yönetilmeyen, topluluk halinde yaşamlarını devam ettiren, sosyal olan canlı türlerinden biridir. Topluluk içerisinde her bir arının görevi vardır, bu görevler farklıdır ve belirlidir. Aralarındaki düzen hiyerarşiktir ve görevlerin dağıtılması ile de iş bölümü kusursuz işler. Çevrelerinde yüz yüze geldikleri pek çok sorun olmasına rağmen zekalarıyla bu problemlerin üstesinden gelirler.

Şekil 4.2’de arıların doğası şematize edilerek gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Arıların Doğası [42]

Topluluktaki her olay demokratik düzende işler. Arılar; en uygun yiyecek yerinin belirlenmesi, balın yapılması, besin kaynağından alınan nektar adı verilen malzemenin getirilmesi, saklanması, işlenmesi gibi pek çok işi en iyi şekilde yapan canlılardır. Yaşamın devamlılığı için arılar, doğada önemli bir yer teşkil ederler. Araştırmacılar da arıların bu zekalarından dolayı onları incelemişler ve yaptıklarını gündelik yaşamımıza katabilmek için de çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Bu incelemeleri yapabilmek ve nasıl bal üretimi yaptıklarını incelemek için cam bir fanusa arıları koyup açık bir şekilde gözlem yapmak istemişlerdir. Arılar, bu cam fanusun iç çeperine dış çevrenin görmemesi için petek örmeleri ile zekalarını bir kez daha ortaya koymuşlar [39].

Arı topluluklarının her birinde üç çeşit arı vardır [43]:

1) Kraliçe Arı (QueenBee):

Topluluktaki diğer arıların annesi konumundadır. Ana misyonu, kovandaki arıların devamlılığı ve bütünlüğüdür. Her kovanda bir adet kraliçe arı vardır ve bu kraliçe arı diğer dişi arılara oranla daha gelişmiştir ve yalnızca kraliçe arının üreme yeteneği bulunur. Kraliçe arının yaşam süresi 1-2 sene ile sınırlıdır. Bu süre içerisinde de yalnızca bir kez çiftleşebilir ve bu çiftleşme sırasında edindiği spermleri depolayabilir. Yaşamı boyunca da bu spermlerle ürer. Spermin tükenmesi durumunda kraliçe arı döllenmemiş yumurtalar üretir. Kovandaki diğer dişi arılar içerisinde bir arı kraliçe arı seçilerek üremenin devamlılığı sağlanmış olur. Eğer kovandaki arıların beslenmesi için gereken yiyecek artarsa kraliçe arı yumurtlamayı durdurur, yiyecek azaldığında ise yumurtlamayı artırır. Araştırmalar sonucunda, kraliçe arının bir günde yaklaşık 2000 yumurta ürettiği görülmüştür.

Kraliçe arı, üreme faaliyeti dışında kolonideki arıları bir arada tutmak, birliği ve bütünlüğü sağlamak amacıyla bir kimyasal sıvı salgılar. Bu sıvı o kolonideki diğer arılar tarafından algılanır ve bu sıvı etrafındaki toplanan arılar ile kraliçe arı arasındaki bütünlük sağlanmış olur.

2) Erkek Arılar (Drones):

Döllenmemiş yumurtalardan oluşan erkek arılar, dişi arılardan biraz daha iridir. Kolonideki diğer arıların babalarıdır ve 6 ay yaşarlar. Erkek arıların ana görevi kraliçe ile çiftleşmektir ve kraliçe arı ile çiftleşen erkek arı ölür. İğneleri ve besin toplamak için gereken organları da yoktur.

3) İşçi Arılar (Workers):

İşçi arılar da döllenmemiş yumurtalardan oluşan, dişi olup üreme kabiliyetine sahip olmayan, kolonideki en fazla göreve sahip olan ve kendi aralarında görev paylaşımı yapan arılardır. İşçi arıların yaşamları iki kısımdan oluşur:

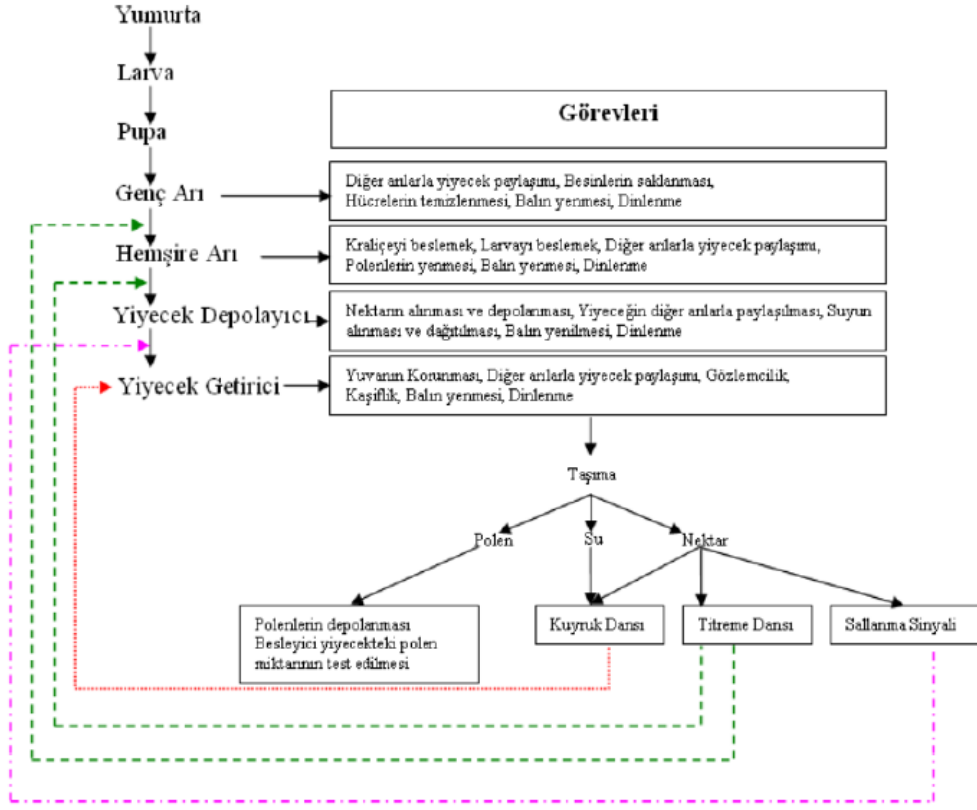
- İlk kısım: Yiyeceklerin toplanması, yiyeceklerin saklanması, kovan içinde ölen arıların kovan dışına taşınması, kovan güvenliği, kovan temizliği gibi işlerle birlikte kraliçe arının yumurtalarını koyduğu balmumu hücrelerin

yapımı ve kraliçe arı, erkek arı ve larvaların beslenmesinden de sorumludurlar.

- İkinci kısım: Yiyecek aramakla görevli olurlar.

Arı kolonisinin devamlılığı açısından kraliçe arı gelişimini bitirmesinin bir hafta sonrasında “çiftleşme uçuşu” (matingflight) adı verilen bir uçuş gerçekleştirir. Kraliçe arı çiftleşme uçuşuna geçmeden önce bir dans sergiler. Erkek arılar, uçuşa başlayan kraliçe arının peşinden giderler. Çiftleşme meydana gelir ve spermler kraliçe arıda depolanır. Bu depolama bölgesine de spermetica adı verilir.

Kraliçe arı, çiftleşmenin ardından döllenme ile yumurta meydana getirir. Bu yumurta zamanla larva ve pupa evresinden geçer. Arıların görev paylaşımı da yumurta evresiyle beraber başlar. Bu dönemlerde hemşire arılar tarafından beslenmeleri sağlanır ve beslenme şekli uygulanmasına bağlı olarak arının ilerideki görev edinimi belirlenir. Döllenmiş olan yumurtalar sadece dişi olacağı için bu beslenme süresi zarfında arı sütü verilme süresi ne kadar uzun olursa o yumurtanın kraliçe arı olması durumu ortaya çıkar. Bu durum Şekil 4.3.' te verilmiştir:



Şekil 4.3. Arı Görev Dağılımı [44]

4.2.2. Arıların Yiyecek Arama Davranışı

Arıların yaşamlarını devam ettirebilmeleri ve kolonilerinin devamlılığını sağlayabilmeleri için yiyecek bulmaları şarttır. Kovan içerisinde önceden buldukları yiyecekleri biriktirmeleri ile oluşturdukları kaynakları ve dışarıda buldukları kaynaklar çok önemlidir. Bu esnada arıların birbirleri ile olan iletişimleri ayrıca önem teşkil eder. Yiyecek arama davranışı, arının kovandan ayrılması ile başlayıp kovana polen, su, nektar gibi maddeleri getirmesi ile sonlanır. Kaynaktaki yiyecek azaldığında bu maddeleri bulabilmek için arılar ya rastgele kaynak aramak için uçuşa çıkarlar ya da birbirleriyle etkileşerek haberleşip zengin kaynakların olduğu bölgelere uçarlar.

Yiyecek arama modelinde Tereshko, 2000 yılında yaptığı çalışmalarda üç ana faktörün olduğunu belirtmiştir [41]. Bu faktörler aşağıda verilmektedir:

- Yiyecek kaynakları
- Görevli işçi arılar
- Görevsiz işçi arılar

Yiyecek Kaynakları

Bu kaynaklar; nektar, polen, bal gibi yiyecek maddeleri içeren kaynaklardır. Kaynaklar, pek çok özelliğe bağlı olmakla beraber bazıları kovana yakınlık, besinin miktarı, besinin çeşididir. Genel olarak ifade edildiğinde bu durumlar “zenginlik” olarak tanımlanır.

Görevli İşçi Arılar

Keşif sırasında bulunan kaynaktan alınan yiyecekleri kovana taşımakla görevli olan arılara görevli işçi arı denir. Bu görevle beraber yiyecekleri kovana getirdiğinde yiyeceğin kaynağıyla ilgili bilgileri kovandaki diğer arılara aktarma görevi de vardır.

Görevsiz İşçi Arılar

Nektar toplamak için kaynak arayan görevsiz işçi arılar ikiye ayrılır:

- Kaşif arılar
- Gözcü arılar

Kaşif arıların görevi, içsel dürtülme ya da çevresel etmenlere bağlı rastgele olarak yiyecek kaynağı aramaktır. Gözcü arıların görevi ise kovana yiyecek getiren görevli işçi arılardan aldıkları kaynak bilgilerini kullanmaktır.

Arıların topladıkları bilgileri birbirlerine aktarmaları çok önemlidir. Bu bilgi paylaşımını da dans aracılığı ile yapabilirler. Bu dans, kovanın dans için ayrılmış olan kısmında gerçekleşir. Bu alan arıların fazlaca bulunduğu bir bölgedir. Böylece burada aktarılan bilgiler pek çok arıya ulaşmış olur. Yiyeceğin kaynağı, kalitesi bu dans aracılığı ile aktarılır. İşçi arılar kaynaktan getirdikleri polen ve nektarları kovanda boşaltırlar. Ardından dans için ayrılmış olan kısma geçerler. Kalabalık olan bu bölümde kaynaktaki bilgileri, antenleri aracılığıyla gözcü arılara aktarırlar ve

onlar da bu kaynaklara doğru yola çıkarlar. Antenlerle bu bilgileri aktarmalarının sebebi arıların görme yetisinin olmamasıdır. Bu antenler sayesinde kaynağın kokusunu, tadını ve kaynağa olan mesafeyi aktarırlar. Yön tayini de diğer arılara verildikten sonra, arılar güneş ile aralarında bulunan açıyı hesaplarlar ve güneş battıysa bile arılar polarize ışıklar aracılığı ile güneşin nerede olduğunu her halükarda bilebilirler. Uzaklık hesaplaması yaparken tükettikleri enerji hesabını kullanırlar. Yükleri ne derece varsa o ağırlığa göre de uçuş yüksekliklerini ve uçuş hızlarını ayarlayarak enerji tüketimlerine bakarlar.

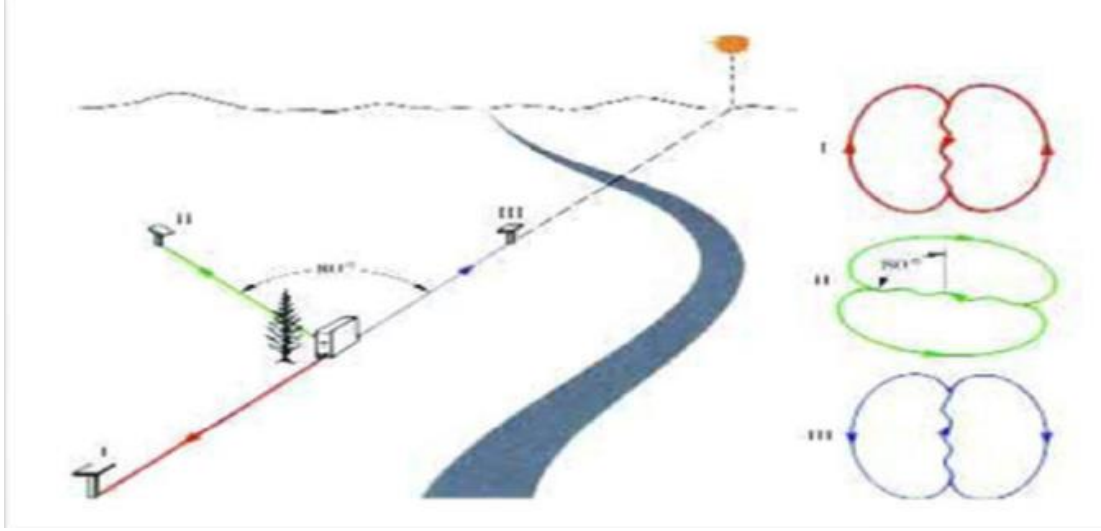
Arıların yaptığı danslar her bilgiye göre çeşitlilik gösterir. Bu dansı etkileyen en önemli durumlar olan nektarın tatlılığının yanı sıra havanın durumu, kaynağa olan uzaklık, nektarın ne kadar kolay çıkarıldığı, nektarın kıvamı, gün içerisinde hangi zaman diliminde nektarın çıkarıldığı, yiyeceğin genel hali, kalite değişimleri gibi etmenler de bu dansın çeşitliliğini etkiler. 3 farklı dans türü mevcuttur. Bunlar :

- Dairesel dans (Rounddance)
- Kuyruk dansı (Waggledance)
- Titreme dansı (Trembledance)

Dairesel Dans: Kaynak, kovana yakınsa kullanılır. Uzaklık 50 metre - 100 metre arasında ise kaynağın uzaklığı ve yönü bilgisi aktarılmaz.

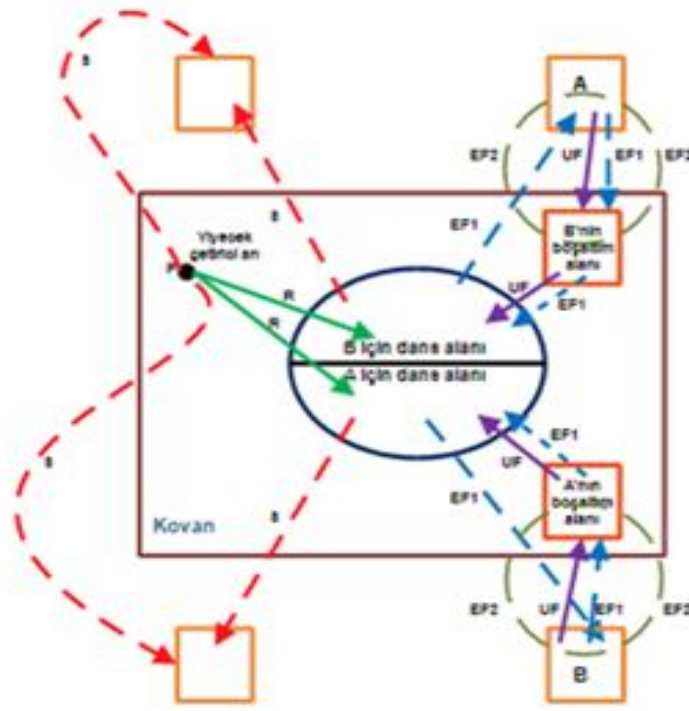
Kuyruk Dansı: Kaynağın kovana uzaklığı 100 metre – 10 kilometre arasında ise 8 şekline benzeyen kuyruk dansı bilgi aktarılmasında kullanılır. Arılar güneşin ışınlarından faydalanarak yer-yön tespiti yapabilmeleri en önemli olaydır. Enerji tüketimlerini, yiyecek ağırlığına ve mesafeye göre de ayarlarlar.

Titreme Dansı: Kovanın içerisinde çok miktarda nektar bulunduğu zaman, görevli işçi arıların bunların işleyeceklerini anlatmak için titreme dansı kullanır. Bu dans kovandaki yalnızca dans bölgesinde değil, kovanın her bölgesinde yapılabilir. Kaynak zenginse, arı getirdiği nektarı işleyeceğini petekte ayaklarını düzenli olmayan bir şekilde titreterek değişik yönlere hareket ederek anlatır. Bu dansın amacı; kovanın alabileceği kaynak miktarı ile yiyeceğin kaynaktan kovana taşınması arasındaki dengeyi sağlamaktır. Arıların yön bulmaları Şekil 4.4.' te gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Arıların Yer-Yön Bulmaları [45]

Bir kaynağın uzaklığı hakkında bilgi edinmek istersek, bu dansların tekrar sayılarına bakmamız gerekmektedir. Her tekrar 15 saniyede bir yapılır. Eğer bu dansın tekrarlanması daha az olursa kaynak daha uzakta demektir. Eğer kaynaktan kovana gelen arılar herhangi bir bilgi aktarımı yapmıyor ise, kaynağın kalitesiz olduğu anlaşılır ve diğer kovandaki arılar bu kaynağa gönderilmez. Arıların kaynak aramadaki tutumları Şekil 4.5.' te anlatılmıştır:



Şekil 4.5. Arıların Yiyecek Arama Davranışı [43]

Şekil 4.5.' te A ve B bulunmuş olan kaynakları göstermektedir. Aynı zamanda görevsiz işçi arılar kendi içlerinde ikiye ayrılarak yeni kaynaklar aramaya devam ederler. Bu görevsiz işçi arılar ya "S" ile ifade edilen kaşif arılar olup içlerinden gelen bir dürtü ile ya da çevresel faktörlerin etkilemesi ile yeni kaynaklar keşfederler ya da görselde "R" ile ifade edilen gözcü arılar olup kaynaktan gelen görevli işçi arıların danslarından edindikleri bilgilerle kaynağa giderler. Kaynaktan yiyeceği alan arının kovana döndükten sonra 3 tip davranış sergilemesi söz konusudur:

- 1) Kaynağa geri dönmeyip "UF" ile gösterilen görevsiz işçi arı olur.
- 2) Bilgiyi diğer arılara vermeden o kaynağa geri dönüş yapabilir. Bu arılar "EF 2" ile gösterilmiştir.
- 3) Dans aracılığı ile bilgiyi diğer arılara aktarıp tekrardan kaynağa geri dönüş yapabilir. Bu arılar "EF 1" ile gösterilmiştir.

4.2.3. Yapay Arı Kolonisi Algoritmasının Basamakları

Yapay Arı Kolonisi Algoritması, arıların davranışları gözlemlenerek 2005 yılında Derviş Karaboğa tarafından geliştirilen bir algoritmadır. Karaboğa, bu algoritmayı geliştirirken beraberinde aşağıda detayları verilen birtakım genellemeler ve kabuller yapmıştır [43].

- Her bir görevli arı yalnızca bir kaynaktan nektar alabilir. Böylelikle toplam kaynağın adedi, toplam görevli arı sayısına eşit kabul edilir.
- İşçi arıların sayısı gözcü arılara eşittir.
- Kaynakta nektar bittiği zaman, o kaynakla ilgilenen, arı kaşif arıya dönüşür.

İlgilenilen problemde, çözümünün uygunluğunu ise nektar miktarı temsil ettiğinden dolayı en fazla nektarın olduğu kaynak en iyi çözüm olur. Bu kabuller sayesinde de ilgilenilen problemin çözümü açısından maksimum ya da minimum olan nokta, en fazla nektar bulunan kaynak olur.

Algoritma çalışma prensibi ise aşağıdaki şekilde verilmektedir.

- Yiyeceğin aranması aşamasında kaşif arılar araştırmak için kovandan ayrılırlar.
- Kaşif arılar uygun nektarı bulduklarından artık kaşif arılıktan çıkıp görevli arı olurlar ve nektarları toplamaya başlarlar. Bu topladıkları nektarları kovana getirirler.
- Görevli arıları tekrar kaynağa dönerek nektar taşımaya devam edebilecekleri gibi kovanın dans bölümünde gözcü arılara kaynak bilgisi iletmek amacıyla dans da ederler. Gözcü arılara iletilen bu bilgi aracılığı ile kaynağa yönelen arılar çözüm noktası için bir yakınsama durumu oluştururlar. Topladığı kaynakta bulunan nektar bittiği zaman kaşif arı olur ve tekrar kaynak aramaya devam eder. Bu durum optimum noktaya kadar devam eder. Buna göre algoritmanın temel adımları şu şekilde sıralanabilir:

- 1) Başlangıç yiyecek kaynak bölgelerinin üretilmesi

- 2) Tekrar
- 3) İşçi arıların yiyecek kaynağı olan bölgeye gönderilmesi
- 4) Olasılıksal seçim için olasılık değerlerinin görevli arıların verdiği bilgiye göre bulunması
- 5) Gözcü arıların bulunan olasılık verilerine göre yiyecek kaynağı bölgesi seçmeleri
- 6) Kaynağı bırakma kriteri : Limit ve kaşif arı üretimi
- 7) Olana kadar devam et

4.2.3.1. Başlangıç Yiyecek Kaynak Bölgelerinin Üretilmesi

Algoritmanın hatasız olarak işlemesi için bu aşama denklem 4.9' da gösterildiği gibi düzgün olarak meydana getirilmelidir. Kaynak arama işlemi rastgele olarak gerçekleştirilmektedir. Başlangıçta oluşturulan parametrelerin alt-üst sınır aralığında rastgele çözüm noktaları meydana gelir.

$${}^0x_j = \min x_j + \text{rand}(0,1)(\max x_j - \min x_j) \quad (4.9)$$

0x_j : Üretilen kaynak ($i:1, \dots, SN$; $j:1, \dots, D$)

SN : Kaynak sayısı

D : Değişken sayısı

$\min x_j$: Parametre alt sınırı

$\max x_j$: Parametre üst sınırı

Yiyecek kaynağı bulunmasının ardından algoritma devamı işçi arıların yiyecek kaynağı olan bölgeye gönderilmesi ile devam eder.

4.2.3.2. İşçi Arıların Yiyecek Kaynağı Olan Bölgeye Gönderilmesi

Algoritmada, işçi arıların sayısı kaynak sayısına eşit olarak kabul edilir. Her bir arı bir kaynaktan sorumludur ancak kaynağa giden arılar etrafta duran komşu kaynaklara da bakarlar ve eğer kaynağı beğenirlerse bu kaynağı da kaydederler. Var olan kaynağın etrafındaki komşu olarak aranan yeni kaynağın matematiksel ifadesi denklem 4.10' de verilmektedir:

$$v_{ij} = x_{ij} + Q_{ij}(x_{ij} - k_{ij}) \quad (4.10)$$

x_{ij} : Var olan yiyecek kaynağı

v_{ij} : Var olan kaynağın etrafındaki komşu olarak aranan yeni kaynak

Q_{ij} : [-1,1] aralığında rastgele değişen bir sayı

$i:1,\dots,SN$

$j:1,\dots,D$

x_{ij} ve k_{ij} arasındaki fark azaldıkça optimum çözüme erişilir. Çünkü x_{ij} parametresindeki değişmelerde meydana gelen miktar azalacak olup, çözümlerin birbirine benzemesi durumu söz konusu olacaktır.

v_{ij} için belirli sınırlar mevcut olup bu sınırlar denklem 4.11 ile verilmektedir:

$$v_{ij} = \begin{cases} x_j^{min}, & v_{ij} < x_j^{min} \\ v_{ij}, & x_j^{min} \leq v_{ij} \leq x_j^{max} \\ x_j^{max}, & v_{ij} > x_j^{max} \end{cases} \quad (4.11)$$

v_{ij} değerinin bu sınırların dışına çıkılması durumunda tekrar bu sınırlar içerisine getirilir. Bu sınırlarda eğer yeni bir kaynak bulunması dahilinde bu kaynağın kalitesi hesap edilir. Bu kalite için uygunluk değeri adı verilen değer kaynaklara verilir. Uygunluk değerinin ifadesi denklem 4.12 ile gösterilmektedir.

$$fitness_i = \begin{cases} \frac{1}{1 + f_i} & , \quad f_i \geq 0 \\ 1 + abs(f_i) & , \quad (f_i) < 0 \end{cases} \quad (4.12)$$

f_i : v_{ij} değerinin maliyet değeri

$fitness_i$: i 'nin uygunluk değeri

Yeni bulunan komşu kaynak, eğer mevcut olan kaynaktan iyi ise bu kaynak kaydedilir, en iyi kaynağı hafızaya alan bu yöntem açgözlü seçme işlemi adını alır. Bu durum gerçekleşmezse var olan kaynaktan yiyecek alımı gerçekleşmeye devam eder.

4.2.3.3. Olasılıksal Seçilim İçin Olasılık Değerlerinin Görevli Arıların Verdiği Bilgiye Göre Bulunması

Kovanda bekleyen gözcü arılara, görevli arılar kaynaktan aldıkları bilgileri kovana gelerek iletirler. Gözcü arı, bu bilgilerin içerisinde en çok nektara sahip yani uygunluk değeri en fazla olan kaynağı seçip ona yönelecektir. Bu durum çoklu etkileşimin bir kanıtıdır. Kaynakların seçilme olasılığı, olasıksal seçilim işlemi için uygunluk değerinin bulunmasının ardından denklem 4.13 bağıntısı ile bulunur.

$$p_i = \frac{fitness_i}{\sum_{j=1}^{SN} fitness_j} \quad (4.13)$$

p_i : Kaynağın seçilmesinin olasılığı

Olasılıksal seçilim için rulet tekerleği, stokastik örnekleme, turnuva vb. yöntemler kullanılarak yapılabilmektedir. YAKA' da kullanılan seçim işlemi rulet tekerleği yöntemidir. Tekerlekteki her bir bölgenin, her bir dilimin açısı ve uygunluk değeri doğru orantılı olur.

4.2.3.4. Gözcü Arıların Bulunan Olasılık Verilerine Göre Yiyecek Kaynağı Bölgesi Seçmeleri

Bir önceki başlıkta elde edilen yiyecek kaynaklarının elde edilme ihtimalleri ile gözcü olan arılar yiyecek kaynaklarına giderler, seçim yaparlar ve uygunluk değeri hesaplamasında önceki değerden daha iyi bir değer elde ederlerse hafızalarına kaydettikleri eski değeri silip yeni değeri kaydederler. Eğer elde ettikleri değer daha düşük çıkarsa sayaç arttırılır ve döngü olarak hesabın devamını sağlarlar. Bu durum, bütün gözcü arıların tamamen bir yiyecek kaynağı bulmasına kadar sürer.

4.2.3.5. Kaynağı Bırakma Kriteri : Limit ve Kaşif Arı Üretimi

Gözcü arılar ve görevli arılar bu yiyecek kaynağı arama serüvenini tamamlamasının akabinde sayaç kontrol edilir. Bu sayaçlardan; bir arının yiyecek kaynağını kullanıp kullanmadığı, o yiyecek kaynağında nektarın bitip bitmediği anlaşılır. Bu sayaç limit olan değeri aştığı zaman arı kendine başka yiyecek kaynağı aramalıdır. Çünkü sayacın limit değeri aşması durumu o yiyecek kaynağında yiyeceğin azaldığını ya da bittiğini bu nedenle de artık yararlı olamayacağını anlatır. Böylelikle görevli arılar kaşif arı olurlar ve yeni yiyecek kaynağını rastgele olarak ararlar. Bırakılan yiyecek kaynağı için bir eşik değeri kullanılır ve buna limit adı verilir. Yapay Arı Kolonisi Algoritması'nda döngüde yalnızca kaşif arının çıkmasına izin vardır.

5. METODOLOJİ

5.1. VISSIM Simülasyon Programı

PTV GmbH tarafından geliştirilen VISSIM (Verkehr in *Städten*-Simulation: Traffic in Towns–Simulation) hem şehirlerin gerçekçi bir şekilde modellenmesi hem de şehirlerarasında hem yayaların ve trafiğin modellenmesini amaç edinen davranışsal temelli zamana dayalı mikroskobik bir simülasyon programıdır. Toplu taşımalarında modellenebildiği bu sistemde trafiğin nasıl aktığı görsel olarak da simülasyon ortamında izlenebilmektedir. Bu programın kalibrasyon işlemi Karlsruhe Teknik Üniversitesi tarafından yapılmıştır [46].

VISSIM, kullanılan diğer simülasyon programlarına göre pek çok imkan sağlamaktadır. Örneğin; bütün simülasyon boyunca kontrol parametreleri ile trafiğin hareketleri hakkında bilgi verir ve an an izlenir. Günümüzdeki trafikteki detektörlerden elde edilen mikroskobik akım ile ilgili parametreleri bilgisayar ortamında üretebilir.

Şehir içi ve şehirlerarası trafiği pek çok farklı yol yapılandırmaları ile ışıklı trafik işaretleri, duraklar gibi çeşitli durumlara göre analiz yapabileceğinden dolayı şehir içi trafik durumlarında yapılacak kontroller ve düzenlemelerin performanslarını görebilmek adına için kullanılabilir önemli programlardan biridir.

VISSIM'in uygulama alanlarından bazıları aşağıda sıralanmıştır.

- Trafiğin yönetilmesi
- Kapasitede yaşanan değişimlerden dolayı analiz yapılması
- Ulaşımı geliştirilmesi
- Yol ayırımı olan yerlerin düzenlenmesi
- Toplu taşıma düzeni ve simülasyonudur.

VISSIM, trafiğin şerit değiştirme, seyirde yapılan değişiklikler gibi durumları ayarlayabilme imkanı verirken aynı zamanda da birden çok şerit içeren bir yolda taşıt davranışı ile birlikte hem aynı şeritte birbirini takip eden taşıtların birbirlerine olan etkilerini hem de yan şeritteki komşu taşıtların etkilerini de göz önüne alır. Simülasyon, sinyalize olarak kontrol edilen bir kavşağa gelen taşıtın dur çizgisine 100 metre mesafeden daha az bir uzaklık kaldığında taşıtın başka bir şeride geçmesine müsaade eder. Böylece, gerçek hayatta tek bir şeritte uzunca kuyrukların oluşması gibi gerçekçi olmayan bir durumun simülasyonda da gerçekleşmesi önlenir.

Sürücü ve taşıt biriminin davranışı VISSIM’de ele alınan konulardan biridir. Bu davranışlar hem sürücünün kendi kişisel davranışına hem de taşıt kapasitesi denilen parametreye bağlıdır. Sürücü ve taşıt biriminin davranışsal özelliklerini tespit etmek amacıyla her bir sürücü-taşıt birimine özgü üç grup şeklinde gösterilen faktörlere nazaran değerlendirir [46].

- **Taşıtın Teknik zellikleri:**

Bu zellikler şu şekilde sıralanabilir;

- 1) Maksimum hız
- 2) Uzunluk
- 3) Hızlanma potansiyeli
- 4) Anlık hız
- 5) Anlık ivme
- 6) Anlık konum

- **Sürücü- Taşıt Biriminin Davranışı:**

Sürücü- taşıt biriminin davranış özellikleri arasında aşağıdaki maddeler yer alır.

- 1) Sürücü hafızası
- 2) Sürücünün istediği hız

- 3) Yürürlükte olan hıza göre olan hızlanma
- 4) Sürücünün psikolojik ve fiziksel hassasiyeti (agresif veya uyumlu olması vb.)

- **Trafiğin Çevresel Referansları:**

Trafiğin çevresel referansları ise aşağıda sıralanmıştır.

- 1) Önde yol almakta olan ve onu takip eden taşıtların kendi buldukları şerit ile bitişik olan şeride göre tespit edilen bağımsız hareket sınır değerleri ile ilgili referanslar.
- 2) Yürürlükte olan yol ile hemen ardından gelen kavşağa yönelik tespit edilen referanslar.
- 3) Bir sonraki gelecek olan trafik ışığı göre tespit edilen referanslar.

5.2. VISSIM' in Özellikleri

VISSIM bir mikro benzetim programı olup sisteme girilen birleşim geometrisi ile sinyalizasyon özelliklerini ön plana alarak motorlu taşımacılık, malların nakliyesi, toplu taşıma, yayalar ve bisikletliler gibi bütün bileşenleri sayesinde modelleme yapar. Her kullanıcıya göre farklı durumları karşılayabilmesi amacıyla tasarlanmıştır. Sürücülerin nitelikleri, taşıt parametreleri, yolların bağlantıları, sinyal denetçileri, emisyon modelleri gibi içerdiği pek çok ara birim vardır. Aynı zamanda hem kırsal altyapıların hem de şehir içi altyapıların analizini en kapsamlı şekilde yapabilmektedir.

- Kavşak Geometrisi: VISSIM simülasyon programında herhangi bir düğüm noktası modellemek mümkündür. Bu modelleme gerekse basit kavşaklardan gerekse sinyal kontrollü düğüm noktalarına, yaya etkileşimi ile toplu taşımada araçlara verilen öncelikleri dahil tüm kesişim noktaları ile yapılır.
- Sinyal Kontrolü: Trafik sinyallerinde ve akışlarında VISSIM oldukça etkili bir programdır.

- Multimodal Sistemler: Mevcut olan bütün nakliye modlarını içeren ve etkileşimlerini simülasyonda gösterebilmektedir. VISSIM’de çeşitli modeller kullanılarak yol seçimi, şeritlerin seçimi, şerit değiştirme veya taşıtların takip davranışlarını en doğru şekilde taklit edilir. Bu durumlar yerel koşullara da uyarlanabilir. 82 adet farklı senaryo durumu en gerçekçi biçimde modellenir.
- Toplu Taşıma: PTV Visum’dan VISSIM’e aktarılabilen toplu taşıma sistemleri rahatlıkla simüle edilebilir. Toplu taşıma hatları, farklı taşıt türleri, zaman çizelgeleri, duraklar, bekleme süreleri bu program aracılığı ile tanımlanır.
- Otoyol Trafığı: Otoyollardaki farklı hizmet düzeylerinin değerlendirilmesi, yolculuk müddeti, sıranın uzunluğu vb. makroskopik değişkenler ile değerlendirilen bir durumdur. Bir araya getirilen geometriler ve mikroskobik davranış modelleri sayesinde VISSIM daha gerçekçi sonuçlar vermektedir.
- Emisyon Modellemesi: TNO’dan VERSIT ve EnViVer adı verilen egzoz emisyon modelini kullanan VISSIM ile araçların yörüngelerini ve simülasyondan elde edilen diğer bilgilere beraber kirletici olan emisyonlar hesaplanır.
- Özel Bir Senaryonun Test Edilmesi: VISSIM, çeşitli hız sınırlamaları olan veya olmayan otoyollarda veya şehir trafiği içerisinde araçları test edebilmeleri için otomobil üreticilerine olanak sağlar ve her an kullanılabilir çeşitli trafik senaryoları hazırlayarak dünyanın herhangi bir yerinde o bölgenin yerel koşullarını da dahil ederek, istediğiniz hava koşulunda simülasyonu gerçekleştirebilir.

5.3. Optimum Devre Süresi Modellerinin Geliştirilmesi

Optimum devre süresi tahmin modellerini geliştirmek için her bir trafik durumuna ait devre süresi diferansiyel gelişim algoritması kullanılarak minimum gecikmeyi verecek şekilde belirlenmiştir. HCM gecikme bağıntısını kullanarak amaç

fonksiyonu oluşturulan DGA' da gecikme değerinin minimize edilmesi amaçlanmıştır. Denklem 5.1 ile amaç fonksiyonun ifadesi, Çizelge 5.1. ile DGA' da kullanılan kontrol parametreleri verilmektedir.

$$D_{best} = \min \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{q_i} \quad (5.1)$$

d_i : i kolundaki gecikme değeri

q_i : i kolundaki trafik akım miktarı

n : Kavşaktaki toplam kol sayısı

Çizelge 5.1. DGA Kontrol Parametreleri

Popülasyon Boyutu (Np)	30
Çaprazlama Oranı (CR)	0,90
Mutasyon Katsayısı (F)	0,95
Mutasyon Strateji	DE/best/1/exp
Max. İterasyon Sayısı	2000

266 farklı trafik durumuna göre 6 farklı optimum devre süresi tahmin modelleri oluşturulmuş ve bu modellerde Webster model formu ile diğer formlar tercih edilmiştir. Geliştirilecek model formları denklem 5.2 -5.7 ile verilmiştir.

$$C = \frac{(aL + b)}{(1 - cY)} \quad (5.2)$$

$$C = \frac{(aL + b)}{(1 - cY)} + d \quad (5.3)$$

$$C = aLe^{bY^c} + d \quad (5.4)$$

$$C = aLe^{bY} + c \quad (5.5)$$

$$C = aL^bY^c \quad (5.6)$$

$$C = aL^2 + bY^2 + cLY + d \quad (5.7)$$

Burada C optimum devre süresini, L kayıp zamanları, Y toplam kritik akımlar oranını ifade etmekte olup, a,b,c ve d değerleri ise model katsayılarıdır.

Yapay Arı Kolonisi Algoritması yaklaşımıyla model katsayılarının belirlenmesinde ortalama mutlak yüzdesel hataların (OMYH) minimum edilmesi amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Buna göre, DGA yaklaşımıyla her bir trafik durumu için minimum gecikmeyi veren devre süresi referans alınan devre süresi olup, YAKA yaklaşımı kullanılarak tahmin edilen optimum devre süreleri arasındaki yüzdesel fark amaç fonksiyonunun değerini vermektedir. Amaç fonksiyonunun matematiksel ifadesi denklem 5.8 ile verilmiştir.

$$F(x) = \sum |(Copt_{DGA} - Copt_{YAKA})/Copt_{DGA}| * 100 \quad (5.8)$$

YAKA algoritmasıyla modellerin optimize edilmesinde algoritmanın kontrol parametrelerinin doğru bir şekilde tayin edilmesi önem arz etmektedir. Farklı parametre değerleri kullanılarak yapılan çözümler sonucunda anlaşılmıştır ki, bulunan katsayılar da bir fark olmamakta sadece algoritmanın optimum çözüme yaklaşmasındaki süresinde değişiklik meydana gelmektedir. Buna göre en kısa sürede ve en düşük hata oranıyla çözüm veren kontrol parametrelerinin değerleri belirlenmiş olup, bu kontrol parametreleri Çizelge 5.2.' de verilmiştir.

Çizelge 5.2. YAKA Kontrol Parametreleri

Kolonideki işçi ve gözcü arı sayısı(Np)	50
Yiyecek kaynağı sayısı	Np/2
Terkedilmiş kaynak sayısı limiti	100
Max. İterasyon sayısı	1000

Farklı kayıp zamanlar ve trafik durumları göz önüne alınarak oluşturulan 266 adet veri kullanılarak modellerin katsayıları belirlenmiştir. Geliştirilen model formlarının YAKA yaklaşımı ile optimize edilmesi sonucu belirlenen her modele ait katsayı değerleri Çizelge 5.3. ile verilmiştir.

Çizelge 5.3. Geliştirilen Optimum Devre Süresi Tahmin Modellerinin Katsayıları

Kat sayılar	Denklemler 5.2	Denklemler 5.3	Denklemler 5.4	Denklemler 5.5	Denklemler 5.6	Denklemler 5.7
<i>a</i>	1,78	1,93	0,85	0,33	25,53	0,18
<i>b</i>	6,69	8,59	2,94	3,81	0,69	68,08
<i>c</i>	0,87	0,85	1,43	17,78	1,48	2,06
<i>d</i>		-4,68	15,31			1,46

Geliştirilen her bir modelin OMYH değerine bakıldığında sırasıyla 9.73, 9.61, 9.01, 9.25, 16.03, 14.72 olarak bulunmuştur. OMYH değerlerinden de anlaşıldığı gibi son iki model yüksek hata değerlerine sahip olup, bu model formları dikkat edilmemiştir. Webster model formunda olan ilk iki model ile en düşük OMYH değerine sahip olan üçüncü model seçilerek VISSIM simülasyon programı vasıtasıyla modellere ait gecikme değerleri elde edilmiştir. Denklem 5.2, 5.3 ve 5.4 olarak adlandırılan modeller bundan sonra Model 1-2-3 olarak adlandırılacaktır.

Kayıp zaman 4 saniyedeki elde edilen 38 farklı trafik durumundan ilk on trafik durumuna ait gecikme ve devre süresi değerleri Çizelge 5.4.' te örnek gösterim için verilmiştir. Diğer trafik durumlarına ve kayıp zamanlara ait değerler Ekler bölümünde yer almaktadır.

Çizelge 5.4. Kayıp Zaman 4 sn İçin Gecikme ve Devre Süresi Değerleri (sn)

Trafik durum	Faz Sayısı	Sarı	Heryön kırmızı	Kayıp zaman	Copt Webster	C DGA	Devre Süreleri			Gecikme Değerleri				
							Model 1	Model 2	Model 3	DGA	Webster	Model 1	Model 2	Model 3
1	2	1	1	4	14	20	17	15	20	10,8	10,49	11,02	10,81	10,83
2	2	1	1	4	15	21	18	16	20	11,5	11,21	11,9	11,68	11,37
3	2	1	1	4	16	24	19	17	21	16,6	15	15,71	16,11	15,67
4	2	1	1	4	17	21	20	19	22	15,3	15,67	15,88	15,44	16,25
5	2	1	1	4	18	20	21	20	23	16,2	15,53	15,82	16,19	16,39
6	2	1	1	4	20	21	23	22	24	16,8	17,52	17,5	17,05	17,09
7	2	1	1	4	18	30	21	20	23	23,8	22,46	22,98	22,75	22,59
8	2	1	1	4	20	26	23	22	24	22,8	21,53	21,85	21,35	22,1
9	2	1	1	4	22	23	25	24	25	21,1	21,4	21,86	21,4	21,86
10	2	1	1	4	24	22	27	26	27	21	21,46	21,86	22,36	21,86

Geliştirilen model formlarının YAKA yaklaşımı ile optimize edilmesi sonucu belirlenen her 3 modele ait katsayı değerleri Çizelge 5.5.' te verilmektedir.

Çizelge 5.5. Belirlenen Optimum Devre Süresi Tahmin Modellerinin Katsayıları

Katsayılar	Model 1	Model 2	Model 3
<i>a</i>	1,78	1,93	0,85
<i>b</i>	6,69	8,59	2,94
<i>c</i>	0,87	0,85	1,43
<i>d</i>		-4,68	15,31

Buna göre önerilen optimum devre süresi modelleri denklem 5.9- 5.11 ile verilmektedir.

$$C = \frac{1,78L + 6,69}{1 - 0,87Y} \quad (5.9)$$

$$C = \frac{1,93L + 8,59}{1 - 0,85Y} - 4,68 \quad (5.10)$$

$$C = 0,85Le^{2,94Y^{1,43}} + 15,31 \quad (5.11)$$

5.4. Geliştirilen Optimum Devre Süresi Modellerinin Simülasyon Ortamında Performansları

VISSIM simülasyon programında 4 kollu bir kavşağın modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Geometrik özellikleri belirlenen kavşak modeli VISSIM üzerinde oluşturulmuş ve yapılan kabuller maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

- Kavşak kollarında her bir kol iki şeritli olarak kabul edilmiştir.
- Şerit genişliği olarak 3,5 m tercih edilmiştir.
- Kavşak kollarında herhangi bir eğim değeri kullanılmamıştır.
- Her bir kolun uzunluğu 500 m olarak alınmıştır.
- Her koldan gelen taşıt hacimleri sağ, sol ve düz yönlerde hareket edebilmektedir.

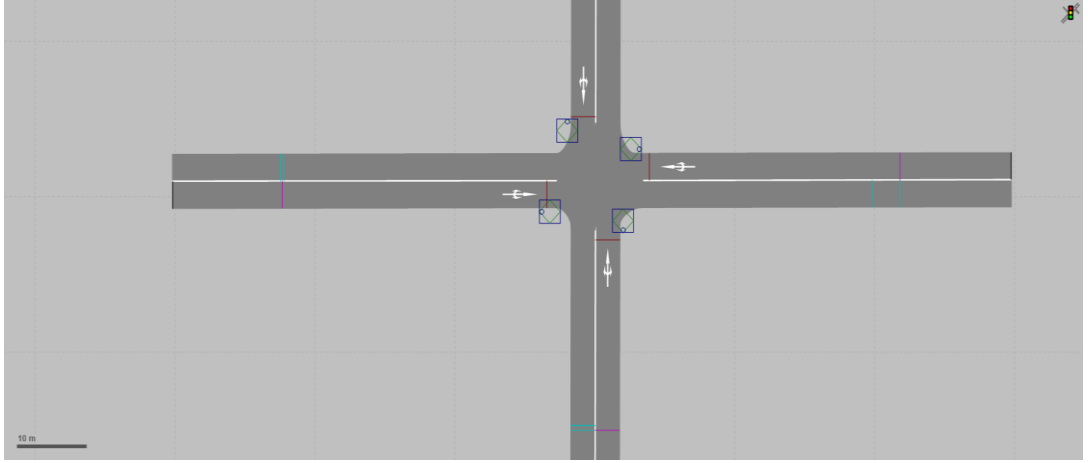
- Gelen trafik hacimleri %70 otomobil, %20 kamyon, pick-up vs. ve %10 otobüs olarak belirlenmiştir.

Kavşak üzerinde sinyalizasyon sistemi kurulmuş olup, 2 fazda işletilecek şekilde ayarlanmıştır. 1. fazda doğu-batı yönündeki kollardan gelen trafik hacimleri, 2. fazda kuzey-güney yönünden gelen trafik hacimlerinin hareketi sağlanmaktadır. 4 kollu olarak oluşturulan sinyalizasyon kavşakta farklı trafik durumlarının değerlendirilebilmesi için 180 araç/saat ile 1440 araç/saat arasında değişen farklı trafik hacimleri belirlenmiştir. Kavşak kollarının boşalımı esnasında ortalama taşıt aralıkları 2 sn kabul edildiğinden doygun akım 1800 araç/saat olarak hesaplanmış ve kayıp zaman süresinin 4 sn. ile 10 sn. arasında değişen farklı trafik durumları oluşturulmuştur. VISSIM üzerinde oluşturulan kavşak belirlenen trafik hacimleri ve devre süresine göre simüle edilerek gecikme değerleri elde edilmiştir. Kayıp zaman 4 saniyedeki elde edilen 38 farklı trafik durumundan ilk on trafik durumuna ait veri seti Çizelge 5.6. ile gösterilmiştir. Diğer trafik durumlarına ve kayıp zamanlara ait değerler Ekler bölümünde yer almaktadır.

Çizelge 5.6. Kayıp Zaman 4 sn İçin Farklı Trafik Durumları

Trafik durum	Faz		Her yön kırmızı	Kayıp zaman	Doygunluk Akımı	Doygunluk			
	Sayı	Sarı				q1	q3	q2	q4
1	2	1	1	4	1800	180	180	180	180
2	2	1	1	4	1800	180	180	270	270
3	2	1	1	4	1800	360	360	180	180
4	2	1	1	4	1800	360	360	270	270
5	2	1	1	4	1800	360	360	360	360
6	2	1	1	4	1800	360	360	450	450
7	2	1	1	4	1800	540	540	180	180
8	2	1	1	4	1800	540	540	270	270
9	2	1	1	4	1800	540	540	360	360
10	2	1	1	4	1800	540	540	450	450

Geometrik özelliklere göre VISSIM üzerinde oluşturulan kavşak Şekil 5.1. ile gösterilmiş ayrıca kavşağın 3 boyutlu görüntüsü Şekil 5.2.' de verilmiştir.



Şekil 5.1. 4 kollu sinyalizasyon kavşak



Şekil 5.2. 3 boyutlu 4 kollu sinyalizasyon kavşak

VISSIM simülasyon programında farklı trafik atama numaralarının kullanılması ile farklı sürücü davranışları ve geliş oranların elde edilmesi sağlanmaktadır. Bu nedenle her bir trafik durumuna ait gecikme değerinin belirlenmesinde tek bir simülasyondan alınan gecikme değerinin kullanılması yerine farklı atama numaraları kullanılarak elde edilen gecikme değerlerinin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

Böylece 266 farklı trafik durumuna ait olan gecikme değerleri Webster optimum devre süresi modeline ve geliştirilen 3 farklı model formuna göre elde edilmiştir. VISSIM programında sarı ve her yöne kırmızı sürelerinin tam sayı olarak girilebilmesinden dolayı 1.5 ve 2.5 sn sarı sürelerin olduğu trafik durumlarında gecikme değerleri hesaplanamamıştır. Bu nedenle 2 fazda işletilen kavşak üzerinden

kayıp süreleri 4, 6, 8 ve 10 sn olan trafik durumlarının gecikme değerleri elde edilmiştir.



6. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Tez içerisinde yaptığımız çalışmaların doğruluklarını değerlendirebilmek amacıyla modellerden elde edilen sonuçların performansları karşılaştırılmıştır. Bu değerlendirmelerde ortalama karesel hataların karekökü (OKHK), ortalama mutlak yüzdesel hatalar (OMYH) ve belirleme katsayısı (R^2) performansların değerlendirilmesinde kullanılmıştır.

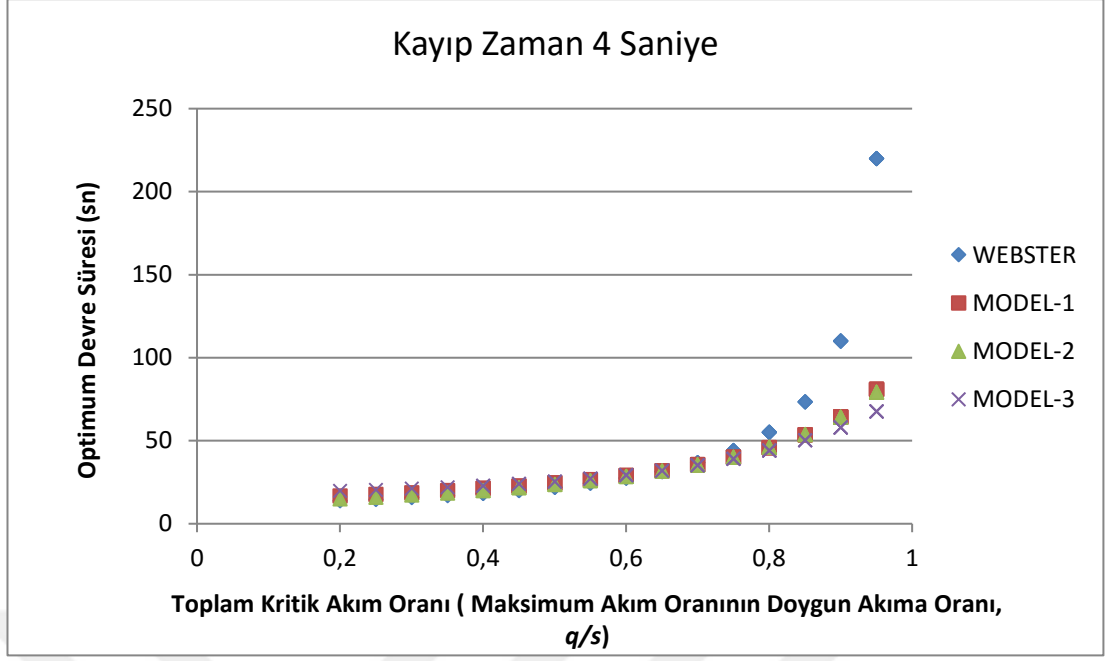
$$OKHK = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{n=1}^m (C_{DGA} - C_{YAKA})^2} \quad (6.1)$$

$$OMYH = \frac{1}{m} \left| \sum_{n=1}^m ((C_{DGA} - C_{YAKA})/C_{DGA}) \right| * 100 \quad (6.2)$$

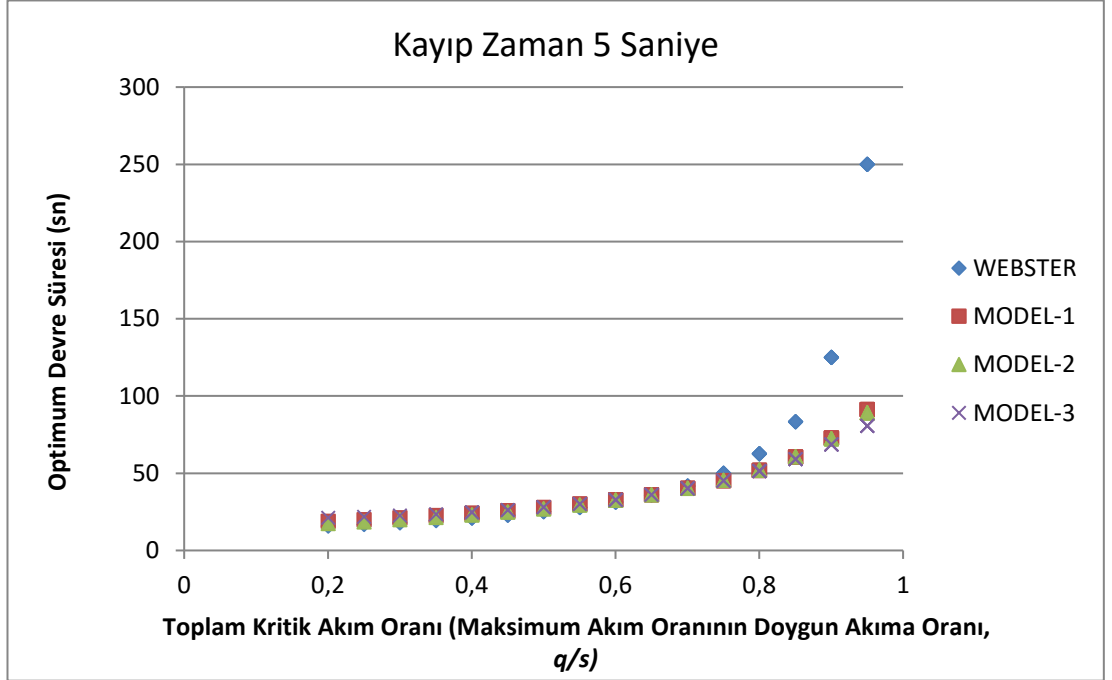
$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_1^m (C_{DGA} - C_{YAKA})^2}{\sum_1^m (C_{DGA} - C_{ortalama})^2} \right] \quad (6.3)$$

Çalışmalarda belirlenen ve ortaya konan 3 farklı model performans açısından değerlendirmeye alınmış ve Webster modeli olarak adlandırılan, literatürde kabul gören model ile karşılaştırılmıştır. Aynı zamanda farklı kayıp zamanlara göre oluşturulan modeller yüzdesel hatalar farkına bağlı olarak genel model formları ile mukayese edilmiştir.

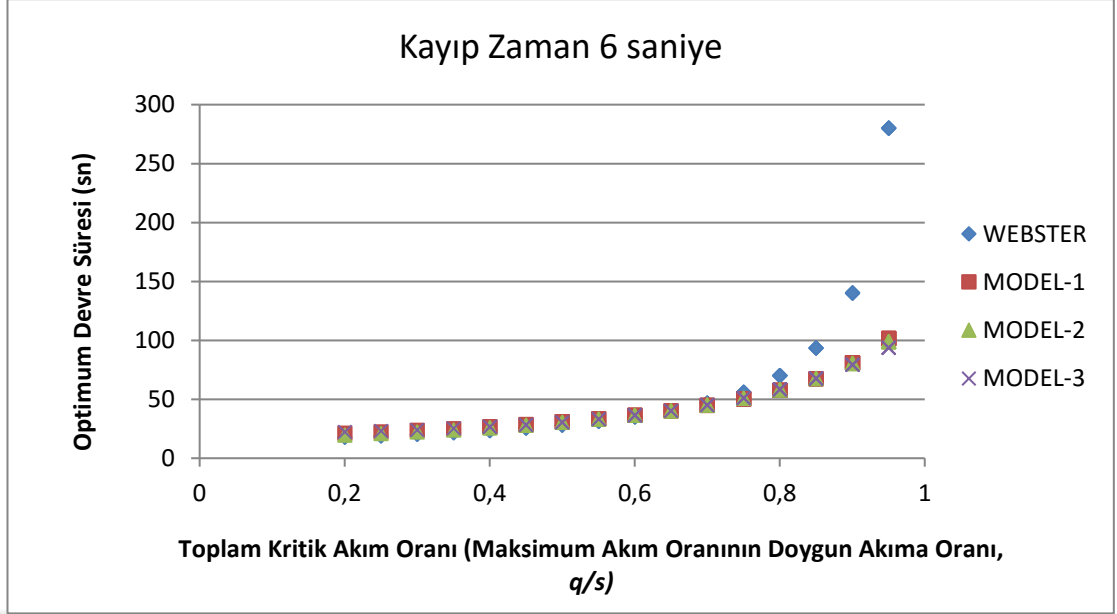
Aşağıdaki Şekil 6.1.- 6.7. arasındaki şekillerde kayıp zamanlara göre toplam kritik akım oranına karşılık gelen optimum devre süresi Webster modeli, Model-1, Model-2, Model-3 için karşılaştırılmıştır.



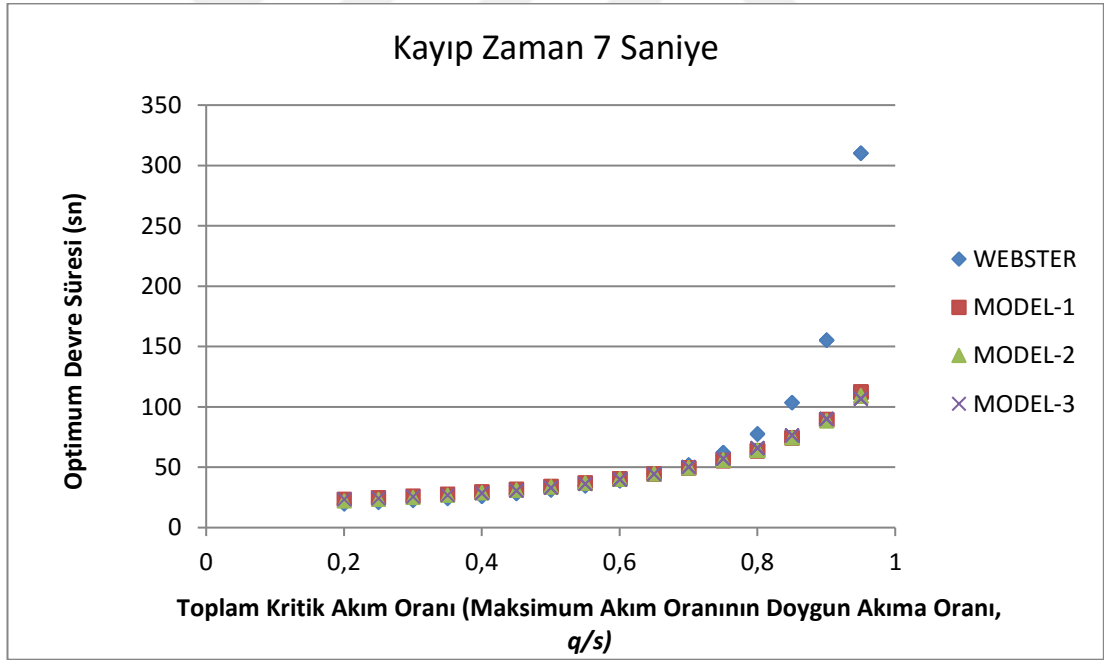
Şekil 6.1. Toplam Kayıp Zaman 4 Saniye İken Webster ve Geliştirilen Modeller İçin Optimum Devre Süreleri



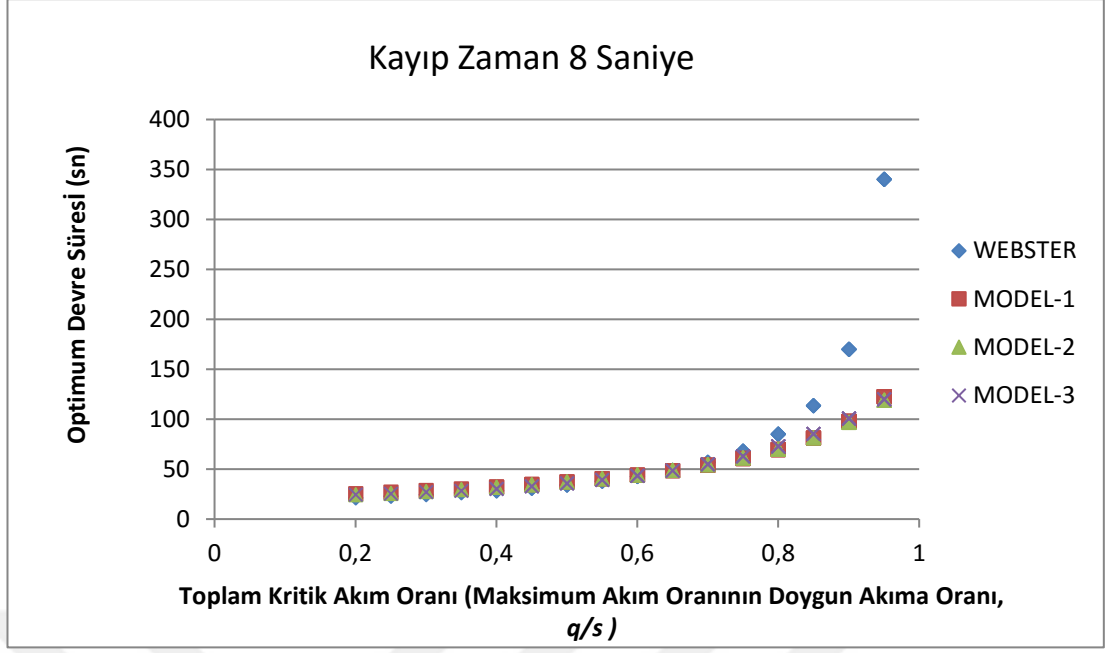
Şekil 6.2. Toplam Kayıp Zaman 5 Saniye İken Webster ve Geliştirilen Modeller İçin Optimum Devre Süreleri



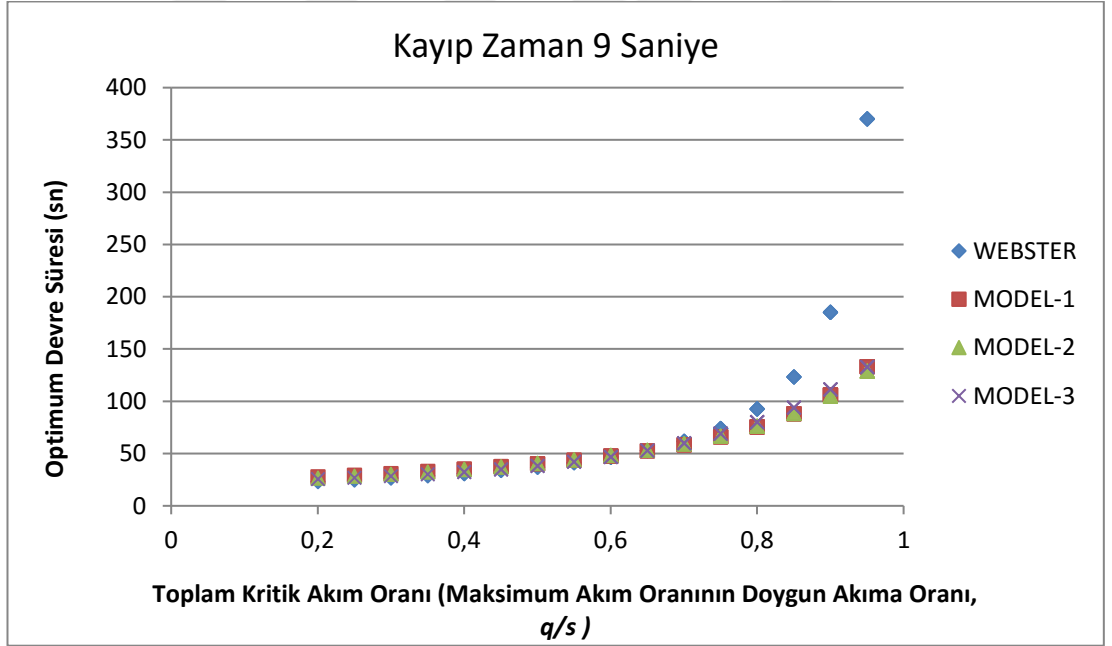
Şekil 6.3. Toplam Kayıp Zaman 6 Saniye İken Webster ve Geliştirilen Modeller İçin Optimum Devre Süreleri



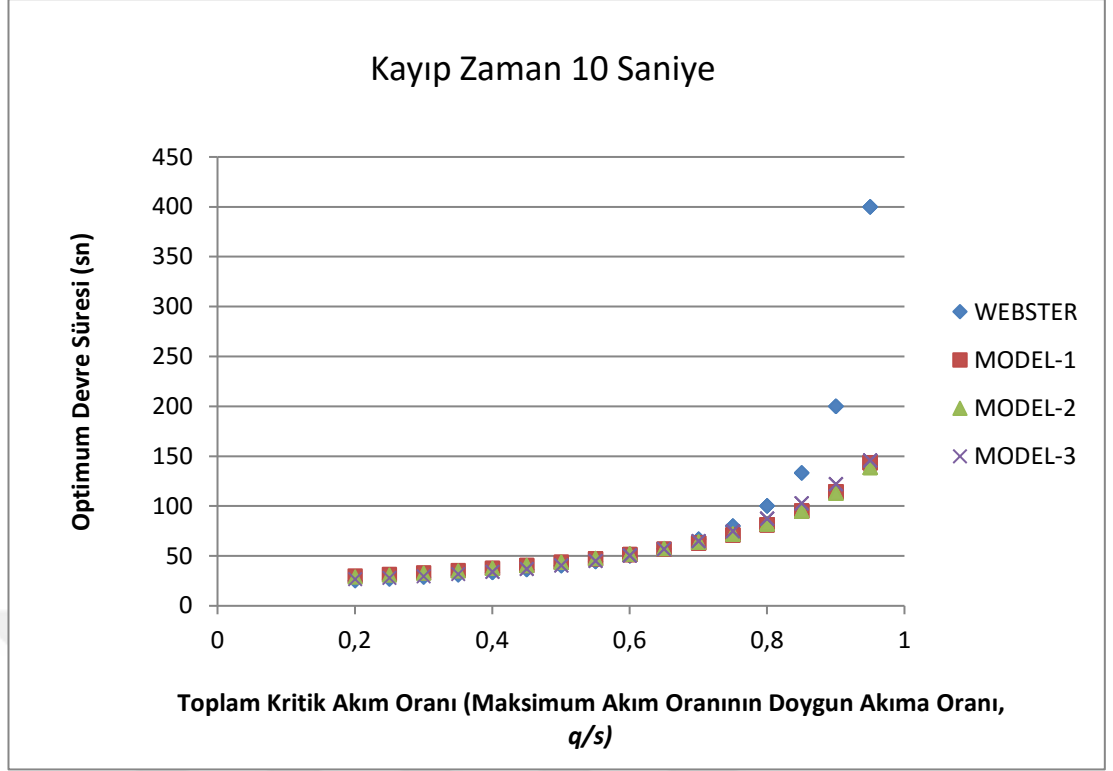
Şekil 6.4. Toplam Kayıp Zaman 7 Saniye İken Webster ve Geliştirilen Modeller İçin Optimum Devre Süreleri



Şekil 6.5. Toplam Kayıp Zaman 8 Saniye İken Webster ve Geliştirilen Modeller İçin Optimum Devre Süreleri



Şekil 6.6. Toplam Kayıp Zaman 9 Saniye İken Webster ve Geliştirilen Modeller İçin Optimum Devre Süreleri



Şekil 6.7. Toplam Kayıp Zaman 10 Saniye İken Webster ve Geliştirilen Modeller İçin Optimum Devre Süreleri

Yukarıdaki Şekil 6.1.- 6.7.' ye bakıldığında kayıp zamanların her birinde toplam kritik akım oranı 0,8 seviyesine kadar Webster formülü ile Model-1, Model-2 ve Model-3'ün birbirine yakın devre süresi değerleri verdiği görülmektedir. Bunun nedeni her bir kola gelen akım değerlerinin düşük olması ve sonucunda da gecikme değerinin daha az çıkmasıdır.

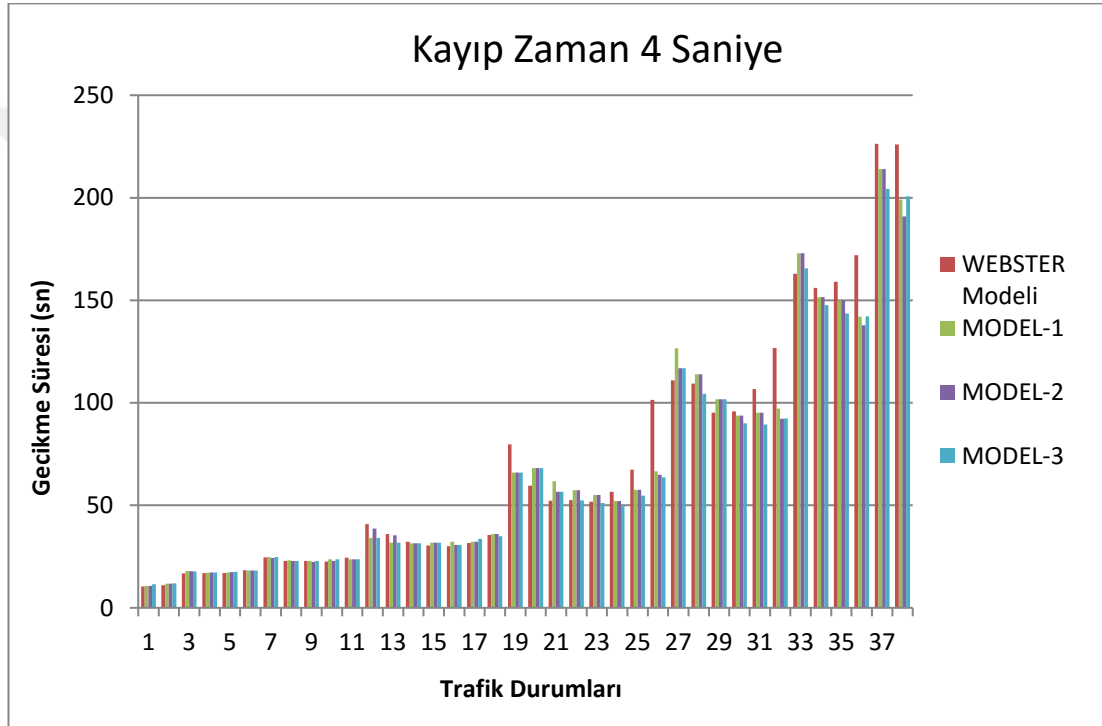
Kritik akım oranı 0,8 ve daha yüksek değerlerde Webster modelinde diğer modellere göre sapma görülmüş ve kritik akım oranı 1'e yaklaştıkça Webster modeli çok yüksek devre süreleri önermiştir. Diğer modeller tüm kritik akım oranlarında genel olarak birbirine yakın değerlere sahip olmuştur. Böylece Webster formülünün artan akım oranlarında optimum sonucu vermediği gözlemlenmiştir.

Webster modeli ile geliştirilen 3 farklı model formuna ait optimum devre süreleri tahminine göre elde edilen OKHK, OMYH ve R^2 istatistiki değerleri Çizelge 6.1.' de verilmiştir.

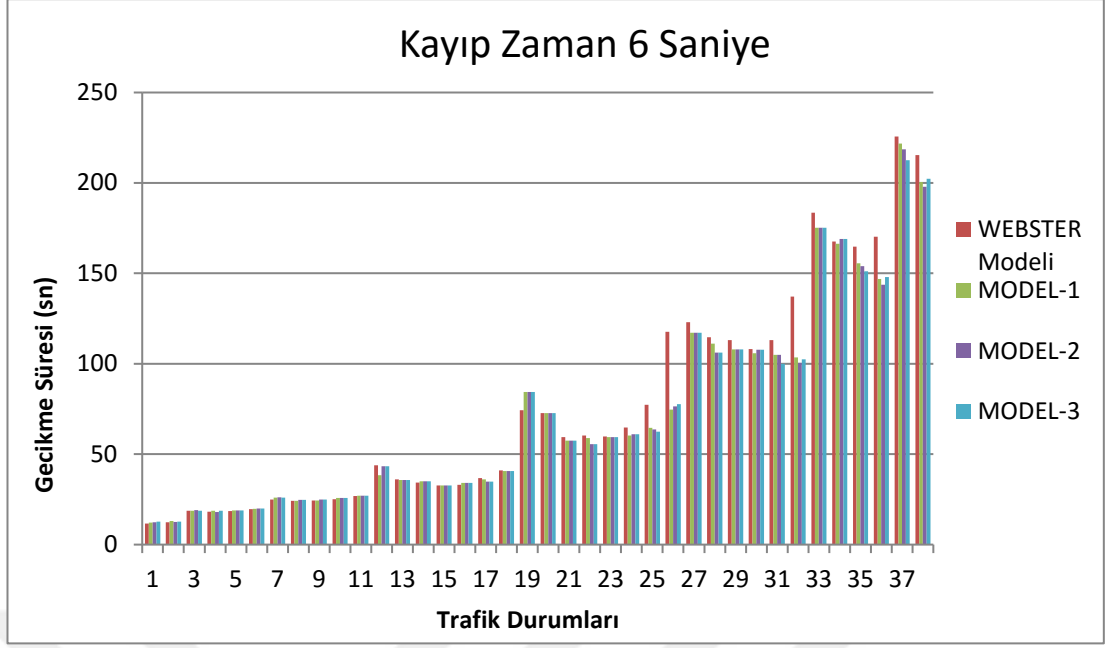
Çizelge 6.1. Optimum Devre Süreleri Tahminine Göre İstatistikî Bulgular

	Webster	Model 1	Model 2	Model 3
OKHK	4,35	0,61	0,59	0,86
OMYH	37,48	9,73	9,01	14,71
R²	0,701	0,904	0,914	0,866

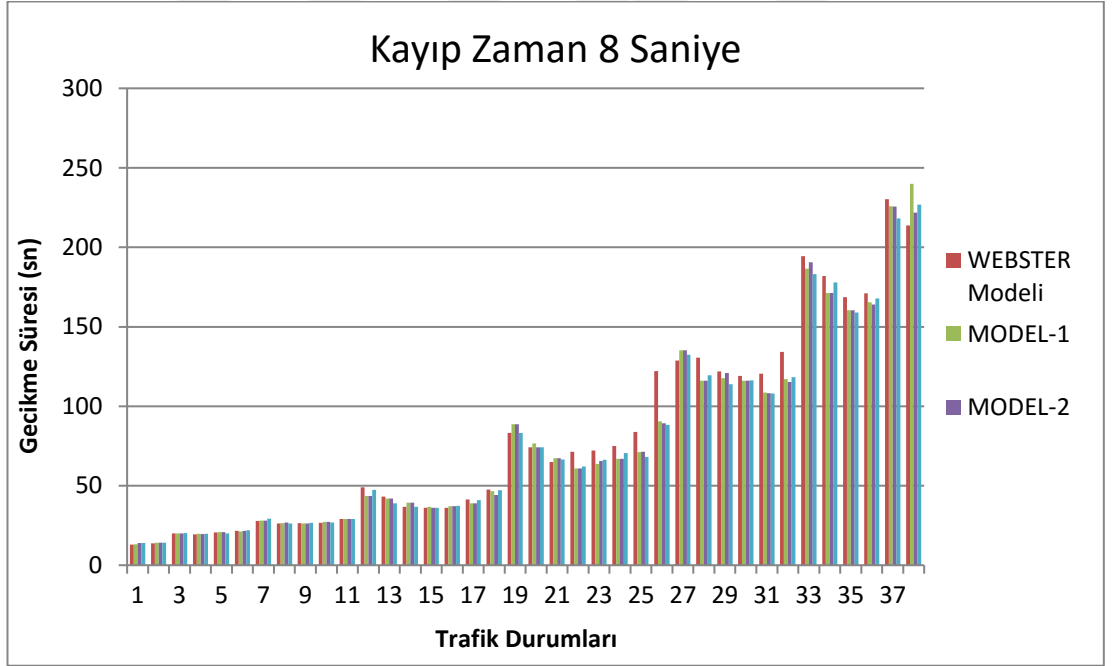
Aşağıdaki Şekil 6.8.- 6.11. arasında farklı kayıp zamanlarda farklı trafik durumları için gecikme değerlerinin karşılaştırılması görülmektedir:



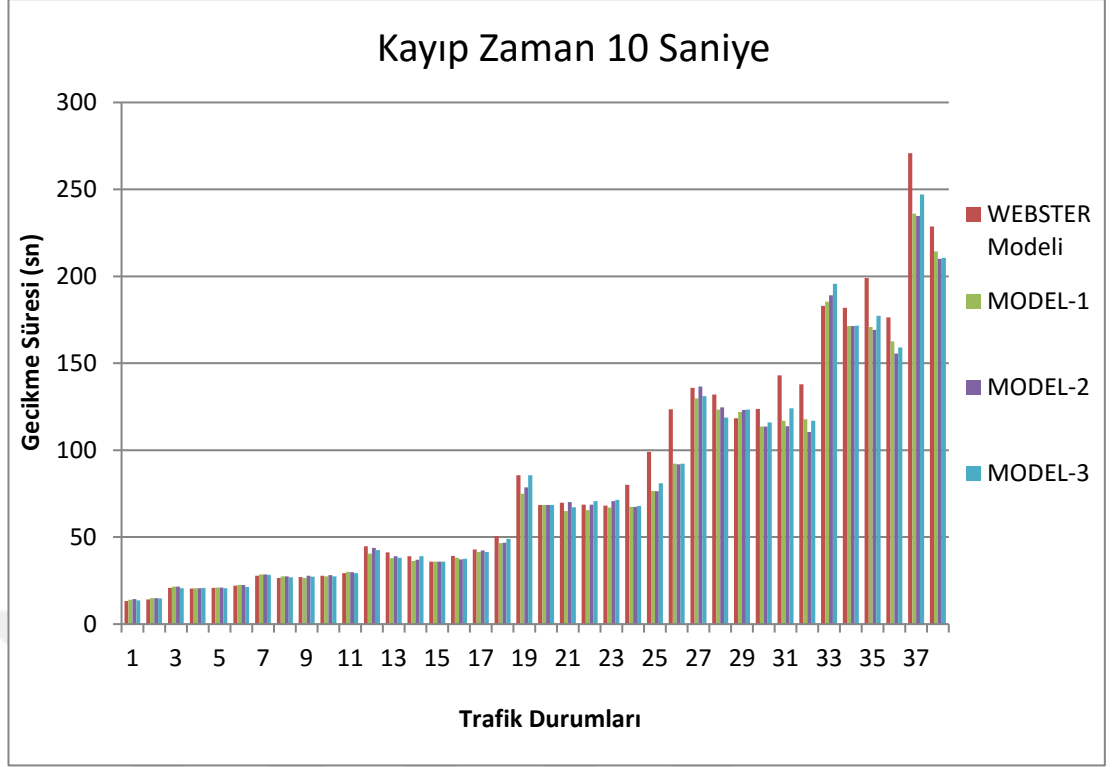
Şekil 6.8. Toplam Kayıp Zaman 4 Saniye İken Webster ve Geliştirilen Modeller İçin Gecikme Değerleri



Şekil 6.9. Toplam Kayıp Zaman 6 Saniye İken Webster ve Geliştirilen Modeller İçin Gecikme Değerleri



Şekil 6.10. Toplam Kayıp Zaman 8 Saniye İken Webster ve Geliştirilen Modeller İçin Gecikme Değerleri



Şekil 6.11. Toplam Kayıp Zaman 10 Saniye İken Webster ve Geliştirilen Modeller İçin Gecikme Değerleri

Geliştirilen 3 farklı model formuna ait gecikme değerleri tahminlerine göre elde edilen OKHK ve OMYH istatistiki değerleri Çizelge 6.2.' de verilmiştir:

Çizelge 6.2. Gecikme Değerleri Tahminlerine Göre İstatistiki Bulgular

	Webster	Model 1	Model 2	Model 3
OKHK	11,79	0,34	0,29	0,34
OMYH	7,67	3,64	3,51	3,92

Kayıp zaman 4, 6, 8 ve 10 için trafik durumlarındaki gecikme değerleri yukarıdaki şekillerde incelenmiştir. Kayıp zaman 5, 7 ve 9'da sarı süreleri ondalıklı değerler olduğundan ve simülasyona ondalıklı değerler girilemediğinden bu kayıp sürelerdeki gecikme değerleri incelenememiştir.

Kayıp zaman 4, 6, 8 ve 10 saniyeleri için verilen şekillere bakıldığında 25., 26., 31., 32., 35., 36.,37. ve 38. trafik durumlarında Webster modelinin Model-1, Model-2 ve

Model-3'e göre daha yüksek gecikme değerleri verdiği görülmektedir. Bu durum daha önce bahsedilen kritik akım oranı 0,8'den daha fazla dolduğunda Webster modelinde optimum devre süresinde oluşan ani artışla örtüşmektedir ve bu durum daha uzun devre süresiyle beraber daha fazla gecikme oluşmasını da doğurmuştur. Ancak Model-1, Model-2 ve Model-3 trafik durumlarında gecikme değerleri genel olarak birbirine yakın değerler vermiş ve Webster modelinden daha iyi çalıştığı görülmüştür.

Geliştirdiğimiz modellerin gecikme değerlerine bakıldığında doğunluk derecesi 1'e yaklaşan trafik durumlarında gecikme değerlerinde Webster'e göre düşüş gözlemlenmiştir. Gecikme değerinin düşmesiyle beraber kavşaklarda kapasitenin düşmesi, gereksiz bekleme dolayısıyla da yakıt tüketiminin artması engellenmiş olunacaktır ve buna bağlı olarak emisyon değerleri düşürülecek, sürücülerin trafikteki agresif davranışlarından kaçınması sağlanmış olunacaktır.

7. SONUÇLAR

Optimum devre süresi pek çok açıdan önem teşkil etmektedir. Optimum devre süresinin iyi belirlenememesi trafik miktarının, sürücülerin geriliminin, emisyon miktarının, kazaların, maddi manevi kayıpların artmasına sebep olabilir. Bu tez çalışması kapsamında optimum devre süresi tahmini için DGA ile beraber YAKA kullanılmış, öncelikle HCM'nin gecikme formülünü amaç fonksiyonu olarak kullanarak DGA ile farklı trafik durumlarına ait minimum gecikme değerlerine sahip optimum devre süreleri elde edilmiş, elde edilen bu optimum devre süreleri ile YAKA ile geliştirilen model katsayıları optimize edilerek Model-1, Model-2 ve Model-3 olarak adlandırılan 3 farklı model geliştirilmiştir. YAKA'ya göre optimizasyonu gerçekleştirilen modellerin sonuçları ile Webster modeline göre elde edilen sonuçlar; farklı kayıp zamanlarda ve farklı trafik durumlarında simülasyondan alınan ortalama gecikme değerleri ve analitik değerlerle hesaplanan veriler ile karşılaştırılarak, performans değerlendirilmesi yapılmıştır. 266 farklı trafik durumu kullanılmıştır. YAKA'ya göre geliştirilen modeller, Webster formülüne göre daha etkili sonuçlar vermiştir. Modellerin değerlendirilmesi aşamasında Model-1, Model-2 ve Model-3 için OKHY, OMYH ve R^2 değerleri, Webster modelinden daha iyi sonuçlar ortaya koyduğunu göstermiştir. Devre süresi için yapılan tahminlerde OKHK değerleri Webster için 4,35, Model-1 için 0,61, Model-2 için 0,59, Model-3 için 0,89 değerlerini; OMYH değerleri Webster için 37,48, Model-1 için 9,73, Model-2 için 09,01, Model-3 için 14,71 değerlerini; R^2 değerleri Webster için 0,701, Model-1 için 0,904, Model-2 için 0,914, Model-3 için 0,866 değerlerini verdiği görülmüştür. Gecikme süresi için yapılan tahminlerde ise OKHK değerleri Webster için 11,79, Model-1 için 0,34, Model-2 için 0,29, Model-3 için 0,34 değerlerini; OMYH değerleri Webster için 7,67, Model-1 için 3,64, Model-2 için 3,51, Model-3 için 3.92 değerlerini verdiği görülmüştür. Bu sonuçlardan görüldüğü üzere geliştirilen modeller Webster modelinde daha iyi çalışarak daha üstün bir performans sergilemiştir.

Başlangıçta düşük akım oranlarında Webster modeli, Model-1, Model-2 ve Model-3 birbirlerine yakın gecikme değerleri vermişlerdir ancak akım oranı artıp 1'e

yaklaştığı zaman Webster modeli diğer modellerden daha yüksek gecikme değerleri ortaya koymakta; Model-1, Model-2 ve Model-3 Webster modeline göre hem daha iyi sonuç verip hem de birbirlerine yakın gecikme değerleri vermektedirler. Geliştirilen 3 formül içerisinde de bu elde edilen verilere bakıldığı zaman Model-2'nin hem Webster modelinden hem de Model-1 ve Model-3'ten daha verimli olduğu, daha performanslı çalıştığı görülmüştür.

Yapılan bu tez çalışması ile sezgisel optimizasyon yöntemlerinin ulaştırma mühendisliği problemlerinden kavşaklardaki devre süresi optimizasyon sorununda çözüm olarak uygulanması sağlanarak mevcut modellerle karşılaştırılması ile performansları ortaya konulmuştur. Farklı yaklaşımların ve model formlarının devre süresi üzerinde etkili bir şekilde kullanılıp daha kolay ve pratik ulaşılabilir parametre değerleriyle daha düşük gecikme değerlerine sahip optimum devre süresi hesaplarının yapılabileceği sonuçlarla ortaya konulmuştur.

Kullanılan algoritmalarından YAKA algoritmasının geliştirmekte olan bir algoritmadır. Aynı zamanda farklı parametre eklemeleriyle yeni versiyonların geliştirilmesi sayesinde daha iyi performans verebilen modellerin üretilebilmesi mümkün olacaktır. Ayrıca parçacık sürü optimizasyonu, karınca algoritması, kurt algoritması, ateş böceği algoritması, kuş sürüsü algoritması vb. gibi farklı yaklaşımların da devre süresi optimizasyonu probleminde uygulanmasının mümkün olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Webster, F.V. (1958) Traffic Signal Settings, Road Research Technical Paperno:39. Road Resarch Laboratory.
- [2] Chang, T. H., & Lin, J. T. (2000). Optimal Signal Timing for an Oversaturated Intersection. Transportation Research Part B: Methodological, 34(6), 471-491.
- [3] Cheng, D., Messer, C. J., Tian, Z. Z., & Liu, J. (2003, January). Modification of Webster's Minimum Delay Cycle Length Equation Based on HCM 2000. In the 81st Annual Meeting of the Transportation Research Board in Washington, DC.
- [4] Lan, C. J. (2004). New Optimal Cycle Length Formulation for Premited Signals at Isolated Intersections Journal of Transportation Engineering, 130(5), 637-647.
- [5] Cheng, D., Tian, Z. Z., & Messer, C. J. (2005). Development of an Improved Cycle Length Over The Highway Capacity Manual 2000 Quick Estimation Method. Journal of Transportation Engineering, 131(12), 890-897.
- [6] Han, L. & J. M. (2007). Short or Long — Which Is Better?: Probabilistic Approach to Cycle Length Optimization. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (2035), 150-157.
- [7] Day, C., Bullock, D., & Sturdevant, J. (2009). Cycyle-length performance measures: revisiting and extending Fundamentals. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (2128), 48-57.
- [8] Singh, L., Tripathi, S., & Arora, H. (2009). Time optimization for traffic signal using genetic algorithm. International Journal of Recent Trends Engineering, 2(2), 4-6.

- [9] Ma, D., & Nakamura, H. (2010). Cycle length optimization at isolated signalized intersections from the viewpoint of emission. In *Traffic and Transportation Studies 2010* (pp. 275-284).
- [10] Zhao, L., Peng, X., Li, L., & Li, Z. (2011). A Fast Signal Timing Algorithm for Individual Oversaturated. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 12 (1), 280-283.
- [11] Dai, L. L., Sun, Z. L., Liu, D. B., & Li, Y. (2013). An Improved Method of Traffic Control Period Division for Intersection Based on Signal Cycle Calculation. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 253, pp. 1731-1735). Trans Publications.
- [12] Al-Kubaisi, M. I. (2012). Optimum Cycle Time Prediction for Signalized Intersections at Baghdad City. *Cankaya University Journal of Science and Engineering*, 9(2).
- [13] Dell'Orco, M., Baskan, O., & Marinelli, M. (2013). A Harmony Search Algorithm Approach for Optimizing Traffic Signal Timings. *PROMET-Traffic&Transportation*, 25(4), 349-358.
- [14] Dell'Orco, M., Baskan, O., & Marinelli, M. (2014). Artificial Bee Colony-Based Algorithm for Optimizing Traffic Signal Timings. In *Soft Computing in Industrial Applications* (pp. 327-337). Springer, Cham.
- [15] Çakıcı, Z. & Murat, Y. Ş., Sezgisel Optimizasyon Algoritmalarının Taşıt Gecikmesi Problemi Üzerine Uygulaması.7. Kentsel Altyapı Sempozyumu, 2015.
- [16] Zakariya, A. Y., Rabia, S. I. (2016). Estimating The Delay Optimal Cycle Length Based on a Time-Dependent Delay Formula. *Alexandria Engineering Journal*, 55(3), 2509-2514.

- [17] Sabar, N. R., Chung, E., Tsubota, T., & de Almedia, P. E. M. (2017). A Memetic Algorithm for Real World Multi-Intersection Traffic Signal Optimisation Problems. *Engineering Applications of Artificial Interlligence*, 63, 45-53.
- [18] Jovanović, A., Nikolić, M., Teodorović, D. (2017). Area-Wide Urban Traffic Control: A Bee Colony Optimization Approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 77, 329-350.
- [19] Batbat, T., Protein Yapısının Yapay Arı Kolonisi Algoritması ile Tahmini. Yüksek Lisans Tezi. Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2014.
- [20] Kartal, B., Yapay Arı Kolonisi Algoritması ile Finansal Portföy Optimizasyonu. Doktora Tezi. İstanbul Üniversitesi, İstanbul, 2015.
- [21] Özcan, M., Atölye Tipi Çizelgeleme Problemlerinde Evrimsel Algoritmalar ile Yapay Arı Kolonisi Algoritmasının Bütünleşik Bir Yaklaşımı. Doktora Tezi. Sakarya Üniversitesi, Sakarya, 2016.
- [22] Dilmaç, S., Elektrokardiyogram Verilerinin İyileştirilmiş Yapay Arı Kolonisi (MABC) Algoritması ile Analizi. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2017.
- [23] Başkan, Ö., Haldenbilen, S., Ant Colony Optimization Approach for Optimizing Traffic Signal Timings, *Ant Colony Optimization - Methods and Applications*, 205-220, 2011.
- [24] Çakıcı, Z., Sinyalize Dönel (Yuvarlakada) Kavşakların Tasarım Esaslarının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 2014.
- [25] Karayolları Genel Müdürlüğü, Karayolu Tasarımı El Kitabı, s.96–113, s.169–188, 2005.

- [26] Tekin Karagöz, G., Kent İçi Sinyalize Eşdüzey Kavşaklarda Sinyalizasyon Sisteminin Modellenmesi ile Trafik Akışının İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 2018.
- [27] Tuncuk, M., Karaşahin, M., Şehir İçi Eş Düzey Kavşak Geometrilerinin Ve Kazalara Etkilerinin İncelenmesi, İMO.
- [28] https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/61618/mod_resource/content/1/9.%20B%C3%B6l%C3%BCm%20-%20Kav%C5%9Fak%20Otopark%20ve%20yollar.pdf
- [29] Ayfer, M. Ö., 1977, Trafik sinyalizasyonu, T.C. Bayındırlık Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü Matbaası, Yayın No: 226, s.7-82.
- [30] Dağüstü, H. Ş., Trafik Yönetiminde Kavşak Trafiğinin Kontrolü İçin Bir Sinyal Zamanlama Modeli. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2010.
- [31] Webster, F.V., Cobbe, B.M., Traffic Signals, Road Research Technical Paper No.56, HMSO London, 1966.
- [32] Highway Capacity Manual (HCM), Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., Chapter 16 p.1–24, 2000.
- [33] Highway Capacity Manual (HCM), Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., Chapter 18 p.1–59, 2010.
- [34] Storn, R., Price, K., Differential Evolution - A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces, International Computer Science Institute, University of California, Technical Report TR-95-012, 1995.

- [35] Korkmaz, E., Yapay Zekâ Teknikleri Kullanılarak Sinyalize Kavşaklarda Gecikme Modelleri. Yüksek Lisans Tezi. Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2016.
- [36] Gürarlan, G., Yeraltısuyu Kirletici Kaynak Yerlerinin ve Boşalım Geçmişlerinin Diferansiyel Gelişim Algoritması Kullanılarak Belirlenmesi. Doktora Tezi. Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 2011.
- [37] Zaharie, D., Influence Of Crossover on the Behavior of Differential Evolution Algorithms, *Applied Soft Computing*. 9: 1126-1138, 2009.
- [38] Mallipeddi, R., Suganthan, P., Pan, Q., Tasgetiren, M., Differential Evolution Algorithm With Esemble of Parameters and Mutation Strategies, *Applied Soft Computing*.11: 1679-1696, 2011.
- [39] Çelenli Başaran, A. Z., Yapay Arı Kolonisi Algoritması İle Sharpe Performans Oranına Dayalı Portföy Optimizasyonu: BIST 30 Uygulaması. Doktora Tezi. On Dokuz Mayıs Üniversitesi, Çanakkale, 2018.
- [40] Bonabeau, E., Dorigo, M., Theraulaz, G. *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. New York, NY: Oxford University Press, 1999.
- [41] Tereshko, V., Reaction-Diffusion Model of a Honey Bee Colony's Foraging Behaviour, 6th International Conference on Parallel Problem Solving from Nature, London, 2000.
- [42] Karaboga, D. Akay, B., Ozturk, C., August. Artificial Bee Colony (ABC) Optimization Algorithm for Training Feed-Forward Neural Networks. In *International Conference on Modeling Decisions for Artificial Intelligence* (pp. 318-329). Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [43] Karaboğa, D., *Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları*, Nobel, İstanbul, 2014.

- [44] Akay, B., Nümerik Optimizasyon Problemlerinde Yapay Arı Kolonisi Algoritmasının Performans Analizi. Doktora Tezi. Erciyes Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2009.
- [45] Yahya, H., Bal Arısı Mucizesi, Araştırma Yayıncılık, İstanbul, 2006.
- [46] <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-vissim/use-cases/>



EKLER

EK 1. Kayıp zamanın 4 sn. ve 10 sn. arasında değiştiği farklı trafik durumlarına göre oluşturulmuş veriler.

Çizelge 1: Veriler

Trafik durum	Faz Sayısı	Sarı	Her yön kırmızı	Kayıp zaman	Doygunluk Akımı	q1	q3	q2	q4
1	2	1	1	4	1800	180	180	180	180
2	2	1	1	4	1800	180	180	270	270
3	2	1	1	4	1800	360	360	180	180
4	2	1	1	4	1800	360	360	270	270
5	2	1	1	4	1800	360	360	360	360
6	2	1	1	4	1800	360	360	450	450
7	2	1	1	4	1800	540	540	180	180
8	2	1	1	4	1800	540	540	270	270
9	2	1	1	4	1800	540	540	360	360
10	2	1	1	4	1800	540	540	450	450
11	2	1	1	4	1800	540	540	540	540
12	2	1	1	4	1800	720	720	180	180
13	2	1	1	4	1800	720	720	270	270
14	2	1	1	4	1800	720	720	360	360
15	2	1	1	4	1800	720	720	450	450
16	2	1	1	4	1800	720	720	540	540
17	2	1	1	4	1800	720	720	630	630
18	2	1	1	4	1800	720	720	720	720
19	2	1	1	4	1800	900	900	180	180
20	2	1	1	4	1800	900	900	270	270
21	2	1	1	4	1800	900	900	360	360
22	2	1	1	4	1800	900	900	450	450
23	2	1	1	4	1800	900	900	540	540
24	2	1	1	4	1800	900	900	630	630
25	2	1	1	4	1800	900	900	720	720
26	2	1	1	4	1800	900	900	810	810
27	2	1	1	4	1800	1080	1080	180	180
28	2	1	1	4	1800	1080	1080	270	270
29	2	1	1	4	1800	1080	1080	360	360
30	2	1	1	4	1800	1080	1080	450	450
31	2	1	1	4	1800	1080	1080	540	540

Çizelge 1: Veriler (Devam)

32	2	1	1	4	1800	1080	1080	630	630
33	2	1	1	4	1800	1260	1260	180	180
34	2	1	1	4	1800	1260	1260	270	270
35	2	1	1	4	1800	1260	1260	360	360
36	2	1	1	4	1800	1260	1260	450	450
37	2	1	1	4	1800	1440	1440	180	180
38	2	1	1	4	1800	1440	1440	270	270
1	2	1,5	1	5	1800	180	180	180	180
2	2	1,5	1	5	1800	180	180	270	270
3	2	1,5	1	5	1800	360	360	180	180
4	2	1,5	1	5	1800	360	360	270	270
5	2	1,5	1	5	1800	360	360	360	360
6	2	1,5	1	5	1800	360	360	450	450
7	2	1,5	1	5	1800	540	540	180	180
8	2	1,5	1	5	1800	540	540	270	270
9	2	1,5	1	5	1800	540	540	360	360
10	2	1,5	1	5	1800	540	540	450	450
11	2	1,5	1	5	1800	540	540	540	540
12	2	1,5	1	5	1800	720	720	180	180
13	2	1,5	1	5	1800	720	720	270	270
14	2	1,5	1	5	1800	720	720	360	360
15	2	1,5	1	5	1800	720	720	450	450
16	2	1,5	1	5	1800	720	720	540	540
17	2	1,5	1	5	1800	720	720	630	630
18	2	1,5	1	5	1800	720	720	720	720
19	2	1,5	1	5	1800	900	900	180	180
20	2	1,5	1	5	1800	900	900	270	270
21	2	1,5	1	5	1800	900	900	360	360
22	2	1,5	1	5	1800	900	900	450	450
23	2	1,5	1	5	1800	900	900	540	540
24	2	1,5	1	5	1800	900	900	630	630
25	2	1,5	1	5	1800	900	900	720	720
26	2	1,5	1	5	1800	900	900	810	810
27	2	1,5	1	5	1800	1080	1080	180	180
28	2	1,5	1	5	1800	1080	1080	270	270
29	2	1,5	1	5	1800	1080	1080	360	360
30	2	1,5	1	5	1800	1080	1080	450	450
31	2	1,5	1	5	1800	1080	1080	540	540
32	2	1,5	1	5	1800	1080	1080	630	630
33	2	1,5	1	5	1800	1260	1260	180	180
34	2	1,5	1	5	1800	1260	1260	270	270

Çizelge 1: Veriler (Devam)

35	2	1,5	1	5	1800	1260	1260	360	360
36	2	1,5	1	5	1800	1260	1260	450	450
37	2	1,5	1	5	1800	1440	1440	180	180
38	2	1,5	1	5	1800	1440	1440	270	270
1	2	2	1	6	1800	180	180	180	180
2	2	2	1	6	1800	180	180	270	270
3	2	2	1	6	1800	360	360	180	180
4	2	2	1	6	1800	360	360	270	270
5	2	2	1	6	1800	360	360	360	360
6	2	2	1	6	1800	360	360	450	450
7	2	2	1	6	1800	540	540	180	180
8	2	2	1	6	1800	540	540	270	270
9	2	2	1	6	1800	540	540	360	360
10	2	2	1	6	1800	540	540	450	450
11	2	2	1	6	1800	540	540	540	540
12	2	2	1	6	1800	720	720	180	180
13	2	2	1	6	1800	720	720	270	270
14	2	2	1	6	1800	720	720	360	360
15	2	2	1	6	1800	720	720	450	450
16	2	2	1	6	1800	720	720	540	540
17	2	2	1	6	1800	720	720	630	630
18	2	2	1	6	1800	720	720	720	720
19	2	2	1	6	1800	900	900	180	180
20	2	2	1	6	1800	900	900	270	270
21	2	2	1	6	1800	900	900	360	360
22	2	2	1	6	1800	900	900	450	450
23	2	2	1	6	1800	900	900	540	540
24	2	2	1	6	1800	900	900	630	630
25	2	2	1	6	1800	900	900	720	720
26	2	2	1	6	1800	900	900	810	810
27	2	2	1	6	1800	1080	1080	180	180
28	2	2	1	6	1800	1080	1080	270	270
29	2	2	1	6	1800	1080	1080	360	360
30	2	2	1	6	1800	1080	1080	450	450
31	2	2	1	6	1800	1080	1080	540	540
32	2	2	1	6	1800	1080	1080	630	630
33	2	2	1	6	1800	1260	1260	180	180
34	2	2	1	6	1800	1260	1260	270	270
35	2	2	1	6	1800	1260	1260	360	360
36	2	2	1	6	1800	1260	1260	450	450
37	2	2	1	6	1800	1440	1440	180	180

Çizelge 1: Veriler (Devam)

38	2	2	1	6	1800	1440	1440	270	270
1	2	2,5	1	7	1800	180	180	180	180
2	2	2,5	1	7	1800	180	180	270	270
3	2	2,5	1	7	1800	360	360	180	180
4	2	2,5	1	7	1800	360	360	270	270
5	2	2,5	1	7	1800	360	360	360	360
6	2	2,5	1	7	1800	360	360	450	450
7	2	2,5	1	7	1800	540	540	180	180
8	2	2,5	1	7	1800	540	540	270	270
9	2	2,5	1	7	1800	540	540	360	360
10	2	2,5	1	7	1800	540	540	450	450
11	2	2,5	1	7	1800	540	540	540	540
12	2	2,5	1	7	1800	720	720	180	180
13	2	2,5	1	7	1800	720	720	270	270
14	2	2,5	1	7	1800	720	720	360	360
15	2	2,5	1	7	1800	720	720	450	450
16	2	2,5	1	7	1800	720	720	540	540
17	2	2,5	1	7	1800	720	720	630	630
18	2	2,5	1	7	1800	720	720	720	720
19	2	2,5	1	7	1800	900	900	180	180
20	2	2,5	1	7	1800	900	900	270	270
21	2	2,5	1	7	1800	900	900	360	360
22	2	2,5	1	7	1800	900	900	450	450
23	2	2,5	1	7	1800	900	900	540	540
24	2	2,5	1	7	1800	900	900	630	630
25	2	2,5	1	7	1800	900	900	720	720
26	2	2,5	1	7	1800	900	900	810	810
27	2	2,5	1	7	1800	1080	1080	180	180
28	2	2,5	1	7	1800	1080	1080	270	270
29	2	2,5	1	7	1800	1080	1080	360	360
30	2	2,5	1	7	1800	1080	1080	450	450
31	2	2,5	1	7	1800	1080	1080	540	540
32	2	2,5	1	7	1800	1080	1080	630	630
33	2	2,5	1	7	1800	1260	1260	180	180
34	2	2,5	1	7	1800	1260	1260	270	270
35	2	2,5	1	7	1800	1260	1260	360	360
36	2	2,5	1	7	1800	1260	1260	450	450
37	2	2,5	1	7	1800	1440	1440	180	180
38	2	2,5	1	7	1800	1440	1440	270	270
1	2	3	1	8	1800	180	180	180	180
2	2	3	1	8	1800	180	180	270	270

Çizelge 1: Veriler (Devam)

3	2	3	1	8	1800	360	360	180	180
4	2	3	1	8	1800	360	360	270	270
5	2	3	1	8	1800	360	360	360	360
6	2	3	1	8	1800	360	360	450	450
7	2	3	1	8	1800	540	540	180	180
8	2	3	1	8	1800	540	540	270	270
9	2	3	1	8	1800	540	540	360	360
10	2	3	1	8	1800	540	540	450	450
11	2	3	1	8	1800	540	540	540	540
12	2	3	1	8	1800	720	720	180	180
13	2	3	1	8	1800	720	720	270	270
14	2	3	1	8	1800	720	720	360	360
15	2	3	1	8	1800	720	720	450	450
16	2	3	1	8	1800	720	720	540	540
17	2	3	1	8	1800	720	720	630	630
18	2	3	1	8	1800	720	720	720	720
19	2	3	1	8	1800	900	900	180	180
20	2	3	1	8	1800	900	900	270	270
21	2	3	1	8	1800	900	900	360	360
22	2	3	1	8	1800	900	900	450	450
23	2	3	1	8	1800	900	900	540	540
24	2	3	1	8	1800	900	900	630	630
25	2	3	1	8	1800	900	900	720	720
26	2	3	1	8	1800	900	900	810	810
27	2	3	1	8	1800	1080	1080	180	180
28	2	3	1	8	1800	1080	1080	270	270
29	2	3	1	8	1800	1080	1080	360	360
30	2	3	1	8	1800	1080	1080	450	450
31	2	3	1	8	1800	1080	1080	540	540
32	2	3	1	8	1800	1080	1080	630	630
33	2	3	1	8	1800	1260	1260	180	180
34	2	3	1	8	1800	1260	1260	270	270
35	2	3	1	8	1800	1260	1260	360	360
36	2	3	1	8	1800	1260	1260	450	450
37	2	3	1	8	1800	1440	1440	180	180
38	2	3	1	8	1800	1440	1440	270	270
1	2	2,5	2	9	1800	180	180	180	180
2	2	2,5	2	9	1800	180	180	270	270
3	2	2,5	2	9	1800	360	360	180	180
4	2	2,5	2	9	1800	360	360	270	270
5	2	2,5	2	9	1800	360	360	360	360

Çizelge 1: Veriler (Devam)

6	2	2,5	2	9	1800	360	360	450	450
7	2	2,5	2	9	1800	540	540	180	180
8	2	2,5	2	9	1800	540	540	270	270
9	2	2,5	2	9	1800	540	540	360	360
10	2	2,5	2	9	1800	540	540	450	450
11	2	2,5	2	9	1800	540	540	540	540
12	2	2,5	2	9	1800	720	720	180	180
13	2	2,5	2	9	1800	720	720	270	270
14	2	2,5	2	9	1800	720	720	360	360
15	2	2,5	2	9	1800	720	720	450	450
16	2	2,5	2	9	1800	720	720	540	540
17	2	2,5	2	9	1800	720	720	630	630
18	2	2,5	2	9	1800	720	720	720	720
19	2	2,5	2	9	1800	900	900	180	180
20	2	2,5	2	9	1800	900	900	270	270
21	2	2,5	2	9	1800	900	900	360	360
22	2	2,5	2	9	1800	900	900	450	450
23	2	2,5	2	9	1800	900	900	540	540
24	2	2,5	2	9	1800	900	900	630	630
25	2	2,5	2	9	1800	900	900	720	720
26	2	2,5	2	9	1800	900	900	810	810
27	2	2,5	2	9	1800	1080	1080	180	180
28	2	2,5	2	9	1800	1080	1080	270	270
29	2	2,5	2	9	1800	1080	1080	360	360
30	2	2,5	2	9	1800	1080	1080	450	450
31	2	2,5	2	9	1800	1080	1080	540	540
32	2	2,5	2	9	1800	1080	1080	630	630
33	2	2,5	2	9	1800	1260	1260	180	180
34	2	2,5	2	9	1800	1260	1260	270	270
35	2	2,5	2	9	1800	1260	1260	360	360
36	2	2,5	2	9	1800	1260	1260	450	450
37	2	2,5	2	9	1800	1440	1440	180	180
38	2	2,5	2	9	1800	1440	1440	270	270
1	2	3	2	10	1800	180	180	180	180
2	2	3	2	10	1800	180	180	270	270
3	2	3	2	10	1800	360	360	180	180
4	2	3	2	10	1800	360	360	270	270
5	2	3	2	10	1800	360	360	360	360
6	2	3	2	10	1800	360	360	450	450
7	2	3	2	10	1800	540	540	180	180
8	2	3	2	10	1800	540	540	270	270

Çizelge 1: Veriler (Devam)

9	2	3	2	10	1800	540	540	360	360
10	2	3	2	10	1800	540	540	450	450
11	2	3	2	10	1800	540	540	540	540
12	2	3	2	10	1800	720	720	180	180
13	2	3	2	10	1800	720	720	270	270
14	2	3	2	10	1800	720	720	360	360
15	2	3	2	10	1800	720	720	450	450
16	2	3	2	10	1800	720	720	540	540
17	2	3	2	10	1800	720	720	630	630
18	2	3	2	10	1800	720	720	720	720
19	2	3	2	10	1800	900	900	180	180
20	2	3	2	10	1800	900	900	270	270
21	2	3	2	10	1800	900	900	360	360
22	2	3	2	10	1800	900	900	450	450
23	2	3	2	10	1800	900	900	540	540
24	2	3	2	10	1800	900	900	630	630
25	2	3	2	10	1800	900	900	720	720
26	2	3	2	10	1800	900	900	810	810
27	2	3	2	10	1800	1080	1080	180	180
28	2	3	2	10	1800	1080	1080	270	270
29	2	3	2	10	1800	1080	1080	360	360
30	2	3	2	10	1800	1080	1080	450	450
31	2	3	2	10	1800	1080	1080	540	540
32	2	3	2	10	1800	1080	1080	630	630
33	2	3	2	10	1800	1260	1260	180	180
34	2	3	2	10	1800	1260	1260	270	270
35	2	3	2	10	1800	1260	1260	360	360
36	2	3	2	10	1800	1260	1260	450	450
37	2	3	2	10	1800	1440	1440	180	180
38	2	3	2	10	1800	1440	1440	270	270

EK 2. Webster ve geliştirilen arama algoritmasına göre kayıp zamanın 4 sn. ve 10 sn. arasındaki trafik durumlarının devre süreleri

Çizelge 2: Devre Süreleri

Trafik durum	Faz Sayısı	Sarı	Her yön kırmızı	Kayıp zaman	Copt Webster	C DGA	Devre Süreleri		
							Model1	Model2	Model3
1	2	1	1	4	14	20	17	15	20
2	2	1	1	4	15	21	18	16	20
3	2	1	1	4	16	24	19	17	21
4	2	1	1	4	17	21	20	19	22
5	2	1	1	4	18	20	21	20	23
6	2	1	1	4	20	21	23	22	24
7	2	1	1	4	18	30	21	20	23
8	2	1	1	4	20	26	23	22	24
9	2	1	1	4	22	23	25	24	25
10	2	1	1	4	24	22	27	26	27
11	2	1	1	4	28	20	29	29	29
12	2	1	1	4	22	36	25	24	25
13	2	1	1	4	24	30	27	26	27
14	2	1	1	4	28	27	29	29	29
15	2	1	1	4	31	25	32	32	32
16	2	1	1	4	37	34	36	35	35
17	2	1	1	4	44	40	40	40	39
18	2	1	1	4	55	44	46	46	44
19	2	1	1	4	28	43	29	29	29
20	2	1	1	4	31	35	32	32	32
21	2	1	1	4	37	34	36	35	35
22	2	1	1	4	44	39	40	40	39
23	2	1	1	4	55	46	46	46	44
24	2	1	1	4	73	50	54	54	50
25	2	1	1	4	110	60	64	64	58
26	2	1	1	4	220	67	81	79	68
27	2	1	1	4	37	51	36	35	35
28	2	1	1	4	44	41	40	40	39
29	2	1	1	4	55	46	46	46	44
30	2	1	1	4	73	54	54	54	50
31	2	1	1	4	110	64	64	64	58
32	2	1	1	4	220	69	81	79	68
33	2	1	1	4	55	61	46	46	44
34	2	1	1	4	73	63	54	54	50

Çizelge 2: Devre Süreleri (Devam)

35	2	1	1	4	110	71	64	64	58
36	2	1	1	4	220	76	81	79	68
37	2	1	1	4	110	90	64	64	58
38	2	1	1	4	220	94	81	79	68
1	2	2	1	5	16	21	19	17	21
2	2	2	1	5	17	22	20	18	22
3	2	2	1	5	18	25	21	20	22
4	2	2	1	5	19	23	22	21	23
5	2	2	1	5	21	21	24	23	25
6	2	2	1	5	23	23	26	25	26
7	2	2	1	5	21	31	24	23	25
8	2	2	1	5	23	27	26	25	26
9	2	2	1	5	25	25	28	27	28
10	2	2	1	5	28	27	30	29	30
11	2	2	1	5	31	29	33	32	33
12	2	2	1	5	25	38	28	27	28
13	2	2	1	5	28	32	30	29	30
14	2	2	1	5	31	31	33	32	33
15	2	2	1	5	36	33	36	36	36
16	2	2	1	5	42	37	40	40	40
17	2	2	1	5	50	43	45	45	45
18	2	2	1	5	63	51	52	52	51
19	2	2	1	5	31	45	33	32	33
20	2	2	1	5	36	37	36	36	36
21	2	2	1	5	42	42	40	40	40
22	2	2	1	5	50	46	45	45	45
23	2	2	1	5	63	50	52	52	51
24	2	2	1	5	83	58	60	61	59
25	2	2	1	5	125	70	73	72	69
26	2	2	1	5	250	79	91	89	81
27	2	2	1	5	42	53	40	40	40
28	2	2	1	5	50	52	45	45	45
29	2	2	1	5	63	55	52	52	51
30	2	2	1	5	83	62	60	61	59
31	2	2	1	5	125	74	73	72	69
32	2	2	1	5	250	81	91	89	81
33	2	2	1	5	63	70	52	52	51
34	2	2	1	5	83	73,14	60	61	59
35	2	2	1	5	125	81	73	72	69
36	2	2	1	5	250	85	91	89	81
37	2	2	1	5	125	101	73	72	69

Çizelge 2: Devre Süreleri (Devam)

38	2	2	1	5	250	108	91	89	81
1	2	2	1	6	18	22	21	20	22
2	2	2	1	6	19	24	22	21	23
3	2	2	1	6	20	27	24	22	24
4	2	2	1	6	22	24	25	24	25
5	2	2	1	6	23	22	27	26	27
6	2	2	1	6	25	24	29	28	28
7	2	2	1	6	23	33	27	26	27
8	2	2	1	6	25	29	29	28	28
9	2	2	1	6	28	28	31	30	30
10	2	2	1	6	31	30	33	33	33
11	2	2	1	6	35	34	36	36	36
12	2	2	1	6	28	40	31	30	30
13	2	2	1	6	31	33	33	33	33
14	2	2	1	6	35	35	36	36	36
15	2	2	1	6	40	39	40	40	40
16	2	2	1	6	47	43	45	45	45
17	2	2	1	6	56	49	50	51	51
18	2	2	1	6	70	56	58	58	58
19	2	2	1	6	35	47	36	36	36
20	2	2	1	6	40	42	40	40	40
21	2	2	1	6	47	46	45	45	45
22	2	2	1	6	56	50	50	51	51
23	2	2	1	6	70	59	58	58	58
24	2	2	1	6	93	69	67	68	68
25	2	2	1	6	140	78	81	80	79
26	2	2	1	6	280	86	102	99	94
27	2	2	1	6	47	56	45	45	45
28	2	2	1	6	56	58	50	51	51
29	2	2	1	6	70	64	58	58	58
30	2	2	1	6	93	70	67	68	68
31	2	2	1	6	140	81	81	80	79
32	2	2	1	6	280	90	102	99	94
33	2	2	1	6	70	79	58	58	58
34	2	2	1	6	93	82	67	68	68
35	2	2	1	6	140	91	81	80	79
36	2	2	1	6	280	98	102	99	94
37	2	2	1	6	140	112	81	80	79
38	2	2	1	6	280	117	102	99	94
1	2	3	1	7	19	23	23	22	23
2	2	3	1	7	21	25	25	23	24
3	2	3	1	7	22	28	26	25	25

Çizelge 2: Devre Süreleri (Devam)

4	2	3	1	7	24	25	28	27	27
5	2	3	1	7	26	27	29	29	28
6	2	3	1	7	28	25	32	31	30
7	2	3	1	7	26	35	29	29	28
8	2	3	1	7	28	30	32	31	30
9	2	3	1	7	31	31	34	34	33
10	2	3	1	7	34	35	37	37	36
11	2	3	1	7	39	37	40	40	40
12	2	3	1	7	31	42	34	34	33
13	2	3	1	7	34	38	37	37	36
14	2	3	1	7	39	39	40	40	40
15	2	3	1	7	44	43	44	45	44
16	2	3	1	7	52	49	49	50	50
17	2	3	1	7	62	54	55	56	57
18	2	3	1	7	78	63	63	64	66
19	2	3	1	7	39	49	40	40	40
20	2	3	1	7	44	47	44	45	44
21	2	3	1	7	52	51	49	50	50
22	2	3	1	7	62	57	55	56	57
23	2	3	1	7	78	65	63	64	66
24	2	3	1	7	103	75	74	74	76
25	2	3	1	7	155	86	89	89	90
26	2	3	1	7	310	96	112	109	107
27	2	3	1	7	52	58	49	50	50
28	2	3	1	7	62	64	55	56	57
29	2	3	1	7	78	69	63	64	66
30	2	3	1	7	103	78	74	74	76
31	2	3	1	7	155	91	89	89	90
32	2	3	1	7	310	97	112	109	107
33	2	3	1	7	78	88	63	64	66
34	2	3	1	7	103	90	74	74	76
35	2	3	1	7	155	101	89	89	90
36	2	3	1	7	310	106	112	109	107
37	2	3	1	7	155	130	89	89	90
38	2	3	1	7	310	122	112	109	107
1	2	3	1	8	21	24	25	24	24
2	2	3	1	8	23	27	27	26	25
3	2	3	1	8	24	30	28	28	27
4	2	3	1	8	26	26	30	29	28
5	2	3	1	8	28	28	32	32	30
6	2	3	1	8	31	32	35	34	33
7	2	3	1	8	28	36	32	32	30

Çizelge 2: Devre Süreleri (Devam)

8	2	3	1	8	31	34	35	34	33
9	2	3	1	8	34	35	37	37	36
10	2	3	1	8	38	38	40	40	39
11	2	3	1	8	43	42	44	44	43
12	2	3	1	8	34	43	37	37	36
13	2	3	1	8	38	39	40	40	39
14	2	3	1	8	43	43	44	44	43
15	2	3	1	8	49	49	48	49	49
16	2	3	1	8	57	52	54	54	55
17	2	3	1	8	68	59	61	61	63
18	2	3	1	8	85	70	69	70	73
19	2	3	1	8	43	51	44	44	43
20	2	3	1	8	49	53	48	49	49
21	2	3	1	8	57	55	54	54	55
22	2	3	1	8	68	61	61	61	63
23	2	3	1	8	85	71	69	70	73
24	2	3	1	8	113	83	81	81	85
25	2	3	1	8	170	96	98	97	101
26	2	3	1	8	340	103	123	119	120
27	2	3	1	8	57	65	54	54	55
28	2	3	1	8	68	70	61	61	63
29	2	3	1	8	85	77,27	69	70	73
30	2	3	1	8	113	86	81	81	85
31	2	3	1	8	170	98	98	97	101
32	2	3	1	8	340	106	123	119	120
33	2	3	1	8	85	90	69	70	73
34	2	3	1	8	113	97	81	81	85
35	2	3	1	8	170	107	98	97	101
36	2	3	1	8	340	115	123	119	120
37	2	3	1	8	170	141	98	97	101
38	2	3	1	8	340	136	123	119	120
1	2	3	2	9	23	25	28	27	26
2	2	3	2	9	25	28	29	28	27
3	2	3	2	9	26	31	31	30	28
4	2	3	2	9	28	30	33	32	30
5	2	3	2	9	31	31	35	35	32
6	2	3	2	9	34	34	37	37	35
7	2	3	2	9	31	38	35	35	32
8	2	3	2	9	34	35	37	37	35
9	2	3	2	9	37	38	40	40	38
10	2	3	2	9	41	42	44	44	42
11	2	3	2	9	46	45	48	48	47

Çizelge 2: Devre Süreleri (Devam)

12	2	3	2	9	37	45	40	40	38
13	2	3	2	9	41	44	44	44	42
14	2	3	2	9	46	47	48	48	47
15	2	3	2	9	53	52	53	53	53
16	2	3	2	9	62	58	58	59	60
17	2	3	2	9	74	67	66	67	69
18	2	3	2	9	93	75	75	76	80
19	2	3	2	9	46	53	48	48	47
20	2	3	2	9	53	58	53	53	53
21	2	3	2	9	62	60	58	59	60
22	2	3	2	9	74	68	66	67	69
23	2	3	2	9	93	78	75	76	80
24	2	3	2	9	123	89	88	88	94
25	2	3	2	9	185	101	106	105	111
26	2	3	2	9	370	110	133	129	133
27	2	3	2	9	62	73	58	59	60
28	2	3	2	9	74	76	66	67	69
29	2	3	2	9	93	83	75	76	80
30	2	3	2	9	123	93	88	88	94
31	2	3	2	9	185	105	106	105	111
32	2	3	2	9	370	115	133	129	133
33	2	3	2	9	93	99	75	76	80
34	2	3	2	9	123	109	88	88	94
35	2	3	2	9	185	118	106	105	111
36	2	3	2	9	370	124	133	129	133
37	2	3	2	9	185	152	106	105	111
38	2	3	2	9	370	144	133	129	133
1	2	3	2	10	25	26	30	29	27
2	2	3	2	10	27	29	31	31	28
3	2	3	2	10	29	33	33	33	30
4	2	3	2	10	31	31	35	35	32
5	2	3	2	10	33	34	38	38	34
6	2	3	2	10	36	37	40	40	37
7	2	3	2	10	33	40	38	38	34
8	2	3	2	10	36	39	40	40	37
9	2	3	2	10	40	42	43	44	41
10	2	3	2	10	44	45	47	48	45
11	2	3	2	10	50	50	51	52	50
12	2	3	2	10	40	47	43	44	41
13	2	3	2	10	44	48	47	48	45
14	2	3	2	10	50	51	51	52	50
15	2	3	2	10	57	56	57	57	57

Çizelge 2: Devre Süreleri (Devam)

16	2	3	2	10	67	63	63	64	65
17	2	3	2	10	80	70	71	72	75
18	2	3	2	10	100	82	81	82	87
19	2	3	2	10	50	59	51	52	50
20	2	3	2	10	57	63	57	57	57
21	2	3	2	10	67	64	63	64	65
22	2	3	2	10	80	72	71	72	75
23	2	3	2	10	100	84	81	82	87
24	2	3	2	10	133	95	95	95	103
25	2	3	2	10	200	109	114	113	122
26	2	3	2	10	400	120	143	139	146
27	2	3	2	10	67	80	63	64	65
28	2	3	2	10	80	82	71	72	75
29	2	3	2	10	100	88	81	82	87
30	2	3	2	10	133	101	95	95	103
31	2	3	2	10	200	113	114	113	122
32	2	3	2	10	400	122	143	139	146
33	2	3	2	10	100	108	81	82	87
34	2	3	2	10	133	116	95	95	103
35	2	3	2	10	200	128	114	113	122
36	2	3	2	10	400	133	143	139	146
37	2	3	2	10	200	163	114	113	122
38	2	3	2	10	400	152	143	139	146

EK 3. Kayıp süreleri 4 sn, 6 sn, 8 sn ve 10 sn değerleri için elde edilen gecikme ve devre süresi değerleri

Çizelge 3: Devre Süresi ve Gecikme Değerleri

Trafik durum	Faz Sayısı	Sarı	Her yön kırmızı	Kayıp zaman	Copt Webster	C DGA	Devre Süreleri			Gecikme Değerleri				
							Model 1	Model 2	Model 3	DGA	Webster	Model 1	Model 2	Model 3
1	2	1	1	4	14	20	17	15	20	10,8	10,49	11,02	10,81	10,83
2	2	1	1	4	15	21	18	16	20	11,5	11,21	11,9	11,68	11,37
3	2	1	1	4	16	24	19	17	21	16,6	15	15,71	16,11	15,67
4	2	1	1	4	17	21	20	19	22	15,3	15,67	15,88	15,44	16,25
5	2	1	1	4	18	20	21	20	23	16,2	15,53	15,82	16,19	16,39
6	2	1	1	4	20	21	23	22	24	16,8	17,52	17,5	17,05	17,09
7	2	1	1	4	18	30	21	20	23	23,8	22,46	22,98	22,75	22,59
8	2	1	1	4	20	26	23	22	24	22,8	21,53	21,85	21,35	22,1
9	2	1	1	4	22	23	25	24	25	21,1	21,4	21,86	21,4	21,86
10	2	1	1	4	24	22	27	26	27	21	21,46	21,86	22,36	21,86
11	2	1	1	4	28	20	29	29	29	21,7	22,36	22,01	22,01	22,01
12	2	1	1	4	22	36	25	24	25	32,4	34,38	31,19	32,73	31,19
13	2	1	1	4	24	30	27	26	27	32,1	30,9	29,45	29,61	29,45
14	2	1	1	4	28	27	29	29	29	28,7	28,54	28,32	28,32	28,32
15	2	1	1	4	31	25	32	32	32	27,7	28,26	29,95	29,95	29,95
16	2	1	1	4	37	34	36	35	35	28,6	27,76	28,73	28,48	28,48
17	2	1	1	4	44	40	40	40	39	29,5	29,02	29,5	29,5	30,42
18	2	1	1	4	55	44	46	46	44	31,3	31,14	31,5	31,5	31,26
19	2	1	1	4	28	43	29	29	29	41,2	45,86	45,74	45,74	45,74
20	2	1	1	4	31	35	32	32	32	42,9	40,78	42,85	42,85	42,85
21	2	1	1	4	37	34	36	35	35	39,4	37,01	42,14	41,06	41,06
22	2	1	1	4	44	39	40	40	39	39,8	37,71	40,73	40,73	39,81
23	2	1	1	4	55	46	46	46	44	40,1	39,36	40,06	40,06	37,01
24	2	1	1	4	73	50	54	54	50	37,7	42,32	42,07	42,07	37,73
25	2	1	1	4	110	60	64	64	58	38,3	49,63	41,63	41,63	40,78
26	2	1	1	4	220	67	81	79	68	44	75,12	48,53	47,19	43,27
27	2	1	1	4	37	51	36	35	35	65,3	73,84	88,04	77,88	77,88
28	2	1	1	4	44	41	40	40	39	68,5	68,43	78,96	78,96	69,08
29	2	1	1	4	55	46	46	46	44	70,6	63,79	70,62	70,62	64,4
30	2	1	1	4	73	54	54	54	50	65,6	66,54	65,61	65,61	62,05
31	2	1	1	4	110	64	64	64	58	66,8	79,72	66,82	66,82	64,74
32	2	1	1	4	220	69	81	79	68	65,1	104,36	69,27	67,75	68,47
33	2	1	1	4	55	61	46	46	44	132	130,78	135,8	135,8	126
34	2	1	1	4	73	63	54	54	50	118	123,23	122,3	122,3	117
35	2	1	1	4	110	71	64	64	58	119	128,68	121,9	121,9	120,2
36	2	1	1	4	220	76	81	79	68	118	149,77	115,6	113,3	118,3

Çizelge 3: Devre Süresi ve Gecikme Değerleri (Devam)

37	2	1	1	4	110	90	64	64	58	196	193,08	181,8	181,8	172,5
38	2	1	1	4	220	94	81	79	68	174	202,08	170,1	164,4	175,7
1	2	2	1	6	18	22	21	20	22	12,6	11,78	12	11,97	12,57
2	2	2	1	6	19	24	22	21	23	13,8	12,17	13,44	12,15	14,01
3	2	2	1	6	20	27	24	22	24	17,6	17,65	17,38	17,49	17,38
4	2	2	1	6	22	24	25	24	25	17,2	17,34	17,62	17,16	17,62
5	2	2	1	6	23	22	27	26	27	18,1	17,02	18,13	17,76	18,13
6	2	2	1	6	25	24	29	28	28	17,7	17,94	18,5	18,16	18,16
7	2	2	1	6	23	33	27	26	27	25,7	23,08	23,74	25,58	23,74
8	2	2	1	6	25	29	29	28	28	22,9	23,35	22,9	23,02	23,02
9	2	2	1	6	28	28	31	30	30	23	23,02	22,96	23,06	23,06
10	2	2	1	6	31	30	33	33	33	23,2	23,8	24,56	24,56	24,56
11	2	2	1	6	35	34	36	36	36	24,6	24,34	24,2	24,2	24,2
12	2	2	1	6	28	40	31	30	30	33,3	34,76	34,56	35,9	35,9
13	2	2	1	6	31	33	33	33	33	31,5	32,4	31,46	31,46	31,46
14	2	2	1	6	35	35	36	36	36	30,8	30,8	31,02	31,02	31,02
15	2	2	1	6	40	39	40	40	40	30,5	30,77	30,77	30,77	30,77
16	2	2	1	6	47	43	45	45	45	29	30,91	30,24	30,24	30,24
17	2	2	1	6	56	49	50	51	51	32,7	34,23	31,55	32,69	32,69
18	2	2	1	6	70	56	58	58	58	35,2	36,89	33,84	33,84	33,84
19	2	2	1	6	35	47	36	36	36	42,5	49,4	51,35	51,35	51,35
20	2	2	1	6	40	42	40	40	40	46,8	48,43	48,43	48,43	48,43
21	2	2	1	6	47	46	45	45	45	44,9	38,87	40,07	40,07	40,07
22	2	2	1	6	56	50	50	51	51	42,3	43,2	42,31	42,42	42,42
23	2	2	1	6	70	59	58	58	58	40,6	44,02	43,6	43,6	43,6
24	2	2	1	6	93	69	67	68	68	43,9	50,45	43,34	43,92	43,92
25	2	2	1	6	140	78	81	80	79	48,8	59,88	47,36	45,87	45,9
26	2	2	1	6	280	86	102	99	94	51,3	84,98	54,19	51,62	55,33
27	2	2	1	6	47	56	45	45	45	87,2	86,76	75,06	75,06	75,06
28	2	2	1	6	56	58	50	51	51	81,4	81,87	75,01	71,01	71,01
29	2	2	1	6	70	64	58	58	58	81,3	81,77	77,1	77,1	77,1
30	2	2	1	6	93	70	67	68	68	78,2	79,84	73,67	80,17	80,17
31	2	2	1	6	140	81	81	80	79	77,2	95,73	77,21	79,62	74,72
32	2	2	1	6	280	90	102	99	94	84,1	112,55	82,29	80,53	76,65
33	2	2	1	6	70	79	58	58	58	144	153,66	142,7	142,7	142,7
34	2	2	1	6	93	82	67	68	68	140	139,73	138,9	145,1	145,1
35	2	2	1	6	140	91	81	80	79	135	147,53	129,6	127	124,1
36	2	2	1	6	280	98	102	99	94	129	151,85	128,5	126,1	123,8
37	2	2	1	6	140	112	81	80	79	204	205,06	189,3	186,3	182,6
38	2	2	1	6	280	117	102	99	94	190	196,1	178,5	179,3	178,6
1	2	3	1	8	21	24	25	24	24	14,4	12,91	13,85	14,39	14,39
2	2	3	1	8	23	27	27	26	25	13,8	15,06	13,8	14,94	14,37
3	2	3	1	8	24	30	28	28	27	19,7	17,88	18,08	18,08	18,81

Çizelge 3: Devre Süresi ve Gecikme Değerleri (Devam)

4	2	3	1	8	26	26	30	29	28	18,5	18,53	19,01	18,72	18,13
5	2	3	1	8	28	28	32	32	30	19,4	19,39	20,25	20,25	19,3
6	2	3	1	8	31	32	35	34	33	20,9	20,15	20,17	20,44	20,96
7	2	3	1	8	28	36	32	32	30	27	24,95	25,51	25,51	25,68
8	2	3	1	8	31	34	35	34	33	25,5	24,43	24,99	25,48	24,65
9	2	3	1	8	34	35	37	37	36	24,7	25,28	24,78	24,78	25,61
10	2	3	1	8	38	38	40	40	39	25,3	25,26	25,46	25,46	24,85
11	2	3	1	8	43	42	44	44	43	26,5	26,36	26,73	26,73	26,36
12	2	3	1	8	34	43	37	37	36	35,8	37,07	34,77	34,77	35,08
13	2	3	1	8	38	39	40	40	39	34,2	35,83	33,6	33,6	34,19
14	2	3	1	8	43	43	44	44	43	31,9	31,87	35	35	31,87
15	2	3	1	8	49	49	48	49	49	33,3	33,26	32,94	33,26	33,26
16	2	3	1	8	57	52	54	54	55	31,6	31,41	33,02	33,02	33,05
17	2	3	1	8	68	59	61	61	63	35,3	36,8	34,08	34,08	37,77
18	2	3	1	8	85	70	69	70	73	38,6	38,39	38,83	38,58	38,72
19	2	3	1	8	43	51	44	44	43	53,1	54,51	58,09	58,09	54,51
20	2	3	1	8	49	53	48	49	49	45	48,27	52,09	48,27	48,27
21	2	3	1	8	57	55	54	54	55	45	45,99	48,03	48,03	45,03
22	2	3	1	8	68	61	61	61	63	45,1	50,34	45,08	45,08	44,23
23	2	3	1	8	85	71	69	70	73	47,2	51,42	46,65	46,81	46,76
24	2	3	1	8	113	83	81	81	85	48,5	54,43	48,85	48,85	50,88
25	2	3	1	8	170	96	98	97	101	50,7	62,1	49,91	49,57	50,51
26	2	3	1	8	340	103	123	119	120	57,3	98,91	61,85	64,71	63,25
27	2	3	1	8	57	65	54	54	55	93,1	94,22	94,64	94,64	89,52
28	2	3	1	8	68	70	61	61	63	97,4	99,96	83,33	83,33	83,97
29	2	3	1	8	85	77,3	69	70	73	89,5	88,92	88,1	91,08	84,09
30	2	3	1	8	113	86	81	81	85	92,9	88,71	87,4	87,4	85,39
31	2	3	1	8	170	98	98	97	101	86,2	93,77	86,15	84,5	85,89
32	2	3	1	8	340	106	123	119	120	88,6	117,09	97,23	90,98	94,16
33	2	3	1	8	85	90	69	70	73	168	162,64	155	158,2	146
34	2	3	1	8	113	97	81	81	85	151	151,73	141,6	141,6	150,8
35	2	3	1	8	170	107	98	97	101	133	141,34	141,2	141,2	140,1
36	2	3	1	8	340	115	123	119	120	133	148,55	145,8	140	145,6
37	2	3	1	8	170	141	98	97	101	207	205,09	202,9	200,5	197,6
38	2	3	1	8	340	136	123	119	120	189	191,88	203,5	197,4	202,7
1	2	3	2	10	25	26	30	29	27	14	13,85	14,84	14,66	13,99
2	2	3	2	10	27	29	31	31	28	15,2	13,8	14,31	14,31	14,96
3	2	3	2	10	29	33	33	33	30	19,8	19,41	20,3	20,3	19,7
4	2	3	2	10	31	31	35	35	32	18,9	18,92	20,36	20,36	20,71
5	2	3	2	10	33	34	38	38	34	19,9	20,16	20,34	20,34	19,86
6	2	3	2	10	36	37	40	40	37	20,8	21,86	21,67	21,67	20,51
7	2	3	2	10	33	40	38	38	34	26	26,19	26,76	26,76	26,57
8	2	3	2	10	36	39	40	40	37	24,3	23,21	25,24	25,24	25,23

Çizelge 3: Devre Süresi ve Gecikme Değerleri (Devam)

9	2	3	2	10	40	42	43	44	41	27	24,57	24,73	26,75	26,97
10	2	3	2	10	44	45	47	48	45	26,8	26,2	26,14	26,37	26,75
11	2	3	2	10	50	50	51	52	50	27,2	27,39	28,54	27,47	27,39
12	2	3	2	10	40	47	43	44	41	35	35,2	34,79	38,12	36,29
13	2	3	2	10	44	48	47	48	45	35,3	36,48	33,49	35,32	32,99
14	2	3	2	10	50	51	51	52	50	34,9	33,58	34,91	32,08	33,58
15	2	3	2	10	57	56	57	57	57	35,1	31,97	31,97	31,97	31,97
16	2	3	2	10	67	63	63	64	65	35,8	37,67	35,82	31,48	33,65
17	2	3	2	10	80	70	71	72	75	37	38,48	37,95	39,69	37,47
18	2	3	2	10	100	82	81	82	87	40,5	42,84	38,64	40,49	42,17
19	2	3	2	10	50	59	51	52	50	49,1	54,1	53,1	46,88	54,1
20	2	3	2	10	57	63	57	57	57	45	47,53	47,53	47,53	47,53
21	2	3	2	10	67	64	63	64	65	49,1	49,47	44,93	49,07	47,42
22	2	3	2	10	80	72	71	72	75	48,7	48,71	47,97	48,71	46,56
23	2	3	2	10	100	84	81	82	87	49,6	50,59	49,33	51,32	48,85
24	2	3	2	10	133	95	95	95	103	49,1	58,82	49,05	49,05	51,94
25	2	3	2	10	200	109	114	113	122	52	76,12	53,74	55,85	57,11
26	2	3	2	10	400	120	143	139	146	63,3	107,56	70,37	67,17	71,95
27	2	3	2	10	67	80	63	64	65	105	96,07	89,79	98,12	93,08
28	2	3	2	10	80	82	71	72	75	95,7	98,52	92,79	98,5	87,73
29	2	3	2	10	100	88	81	82	87	102	92,76	91,15	91,22	98,15
30	2	3	2	10	133	101	95	95	103	91	97,44	84,62	84,62	92,9
31	2	3	2	10	200	113	114	113	122	85,6	118,11	89,24	85,63	100,9
32	2	3	2	10	400	122	143	139	146	97,1	120,5	99	94,03	98,15
33	2	3	2	10	100	108	81	82	87	155	157,54	151,4	156,7	169,3
34	2	3	2	10	133	116	95	95	103	154	154,67	143,7	143,7	148,7
35	2	3	2	10	200	128	114	113	122	149	174,8	143,3	141,9	157,6
36	2	3	2	10	400	133	143	139	146	139	153,08	144,1	137,1	142,6
37	2	3	2	10	200	163	114	113	122	197	243,26	207,1	204,6	222,2
38	2	3	2	10	400	152	143	139	146	176	203,96	196,5	193,2	193