

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ELEKTRONİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ



TRAFİKTE KILAVUZLU YEŞİL DALGA

Nuri Yunus KOCADAĞ

ŞUBAT 2017

Elektrik Elektronik Anabilim Dalında Nuri Yunus KOCADAĞ tarafından hazırlanan TRAFİKTE KILAVUZLU YEŞİL DALGA adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Nihat İNANÇ

Ana Bilim Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Ata SEVİNÇ

Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Ebru ARIKAN ÖZTÜRK

Üye (Danışman) : Yrd. Doç. Dr. Ata SEVİNÇ

Üye : Yrd. Doç. Dr. Erdem DOĞAN

...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Mustafa YİĞİTOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

TRAFİKTE KILAVUZLU YEŞİL DALGA

KOCADAĞ, Nuri Yunus

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ata SEVİNÇ

Şubat 2017, 84 sayfa

Trafikte yeşil dalga sistemiyle, araçlar kavşak dizilerinde duraksamadan kavşaklar arası belirlenen hız limiti dâhilinde geçebilmektedirler. Yeşil dalga tıpkı bir sinyal dalgası gibi kavşaklardan daha ileri noktalara yayılır. Kılavuzsuz yeşil dalga ile sürücülerin durağan bir yeşil dalga hız limitine uyması istenir. Ancak araçlar trafikte yeşil dalga üzerinde ilerlerken kendi hızlarını çoğu zaman yeşil dalga hızına uyduramazlar. Bu yüzden birlikte hareket eden araç kümelerinde, kurala uymayan araçlardan dolayı bozulmalar meydana gelebilir. Trafiğin düzenini etkileyebilecek çok fazla değişken bulunmaktadır. Bir aracın bile dâhili veya harici faktörlere bağlı olarak oluşturduğu trafik düzenini bozucu durum, arkasından gelmekte olan tüm araçları etkileyebilmektedir. Kurulacak olan düzenleyici sistemin ulaşılabilirlik, kurulum maliyetinin düşük olması, tüm araçlar tarafından ortak kullanılabilmesi, kolay anlaşılır ve belirlenen hız kuralına uymayı teşvik edebilmesi gerekmektedir. Bu amaçlarla bu tezde sürücülere hedef gösteren, bilgilendiren görsel bir sistem önerilmektedir. Kılavuzlu yeşil dalga dediğimiz bu sistem, tekil araç içi bir uyarı sisteminden farklı olarak trafikteki tüm araçlar için ortak bir bilgi kaynağı oluşturmaktadır. Burada araçların üzerine çeşitli donanımlar eklenmeden, kişisel kullanımın ötesinde trafiği toplu olarak düzenlemek amaçlanmaktadır.

Kavşak noktaları arasındaki yolların şerit sayısına ve geometrik özelliklerine göre araçlar belirli süre aralıklarıyla kümelendirilmektedir. Kavşaklar arasındaki tüm trafik ağlarına kılavuzlu yeşil dalga sisteminin uygulanmasıyla, yollarda belirli bir hızla ilerlemekte olan yeşil dalga kılavuzu, araç kümelerine kırmızı ve yeşil LED’li işaretçilerle görselleştirilmektedir. Sürücülerin belirlenen kılavuz hızıyla ilerlemeleri sağlanarak kavşak noktalarında oluşan araç yoğunluğu azaltılacaktır. Böylece kavşaktan direkt doğrudan gidecek olan araçlar duraksamadan yollarına devam edebilecek, dönecek araçlar ise mecburen biraz bekletilerek kılavuza dâhil edilecektir. Bu tez çalışmasında hem dönüşlü hem dönüşsüz durumlar ayrı ayrı simüle edilerek kılavuzlu ve kılavuzsuz yeşil dalga sistemleri karşılaştırılmıştır. Sonuçta kılavuzlu yeşil dalga sisteminin kılavuzsuz yeşil dalga sisteminden çok daha verimli olduğu ve trafik akışını hızlandırdığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yeşil Dalga, Kılavuzlu Yeşil Dalga, Trafik Sinyalizasyon Optimizasyonu, Akıllı Trafik Sistemleri, Trafikte Güvenlik, 3D Trafik Modelleme, Trafik Simülasyonu.

ABSTRACT

GUIDED GREEN WAVE IN TRAFFIC

KOCADAĞ, Nuri Yunus

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Departments of Electrical and Electronics

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Ata SEVİNÇ

February 2017, 84 pages

With the green wave system in traffic, the vehicles can pass within the speed limit determined between the intersections without stopping at the intersection sequences. The green wave propagates farther from intersections, just like a signal wave. With the unguided green wave, it is desirable for the drivers to follow a static green wave speed limit. However, the vehicles usually can not adapt their speed to the green wave speed as they travel on the green wave in traffic. For this reason, there is a possibility that the groups of vehicles will be deteriorated due to the vehicles that do not comply with the rule. There are too many variables that can affect the flow of the traffic. Even just one vehicle's infraction due to internal or external causes may affect all the vehicles coming from behind. The regulatory system to be installed should be able to promote accessibility, low cost of installation, common use by all vehicles, easy understanding and compliance with established speeding rules. In accordance with these objectives, a visual system informing the drivers and showing them the target is proposed in this thesis. This system is called "guided green wave" and it creates a common source of information for all vehicles in the traffic unlike the warning systems installed into each vehicle individually. It is aimed here to organize the traffic collectively beyond the personal use without adding various equipment on the vehicles.

The vehicles are clustered with certain time intervals according to the number of lanes and geometrical characteristics of the roads between the intersection points. With the application of the guided green wave system to all the traffic networks among intersections, the green waveguide, which is traveling at a certain speed in the way, is visualized to the vehicle clusters with red and green LED indicators. By ensuring that the drivers go with the determined guidance speed, the vehicle intensity at the intersection points will be reduced. Thus, vehicles moving in straight direction from the intersection will be able to continue on their way without stopping; however, the turning vehicles will attend the guide after waiting a short time inevitably. In this thesis study, the guided and guideless green wave systems have been compared simulating the cases with and without turnings separately. As a result, the guided green wave system has been found to be much more efficient than the guided green wave system and to accelerate the traffic flow.

Key Words: Green Wave, Guided Green Wave, Traffic Signalization Optimization, Intelligent Traffic Systems, Safety in Traffic, 3D Traffic Modelling, Traffic Simulation

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca teşvik ve katkılarıyla rehber olan hocam, Sayın Yrd. Doç. Dr. Ata SEVİNÇ'e, desteklerini esirgemeyen Asya Trafik A.Ő. Genel Müdürü Sayın Mehmet Akif ÇELİK'e ve iş arkadaşlarıma, görsel verilerin oluşturulmasında yardımcı olan kardeşim Adem Said KOCADAĞ'a, araştırma ve önerileri için kardeşim Meryem Nur KOCADAĞ'a, manevi destekleriyle her zaman yanımda olan annem Melahat KOCADAĞ'a ve babam Tayfun KOCADAĞ'a teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Problem Tanımı.....	1
1.2. Literatür Özeti	2
1.3. Tezin Ana Hatları.....	5
2. TRAFİK SİNYALİZASYON SİSTEMİ	6
2.1. Kavşak Sinyalizasyon Sistemleri	8
2.1.1. İzole Sinyalizasyon Sistemi	8
2.1.2. Koordineli Sinyalizasyon Sistemleri:.....	9
2.2. Kavşak Çeşitleri	10
2.3. Trafik Sinyalizasyon Donanımları	11
2.3.1. Kavşak Kontrol Cihazı (KKC).....	11
2.3.2. Trafik Işıkları	12
2.3.3. Solar Flaşörler, Geri Sayıcılar ve Uyarı Tabelaları.....	13
2.3.4. Kamera, Sensör ve Loop Dedektörler	14

2.3.5.	Görsel Engelliler İçin Akustik Uyarı Cihazı.....	15
2.4.	Trafik Sinyalizasyon Tasarımında Kullanılan Değişkenler	15
2.4.1.	Devre	16
2.4.2.	Sinyal Fazı.....	16
2.4.3.	Devre Süresi	17
2.4.4.	Trafik Akımı.....	18
2.4.5.	Doygun Akım Oranı.....	19
2.4.6.	Etkin Yeşil ve Kırmızı Süresi	20
2.4.7.	Kavşakta İkilem Bölgesi Hesaplamaları	22
2.4.8.	Simülasyon.....	23
2.5.	Işıklı İşaret Donanımlarının Sahip Olması Gereken Özellikler	24
2.6.	Trafik Akış Optimizasyonu.....	24
2.7.	Kavşaklarda Trafik Sinyalizasyon Planlaması.....	26
2.8.	Akıllı Trafik Kontrol Sistemleri.....	26
2.9.	Türkiye ve Dünyada Yeşil Dalga Sistemi.....	28
2.10.	Bir Yeşil Dalga Işık Dizisinin Araç Trafikğine Etkisi.....	32
2.11.	Araç Yoğunluğuna Bağlı Olarak Türkiye ve Dünya’da Kaza İstatistikleri.....	35
3.	KILAVUZLU YEŞİL DALGA SİSTEMİ VE TRAFİK ÜZERİNDEKİ ETKİSİ.....	37
3.1.	Kılavuzlu Yeşil Dalga Fikrinin Görsel Simülasyon Ortamında 3D Olarak Modellemesi.....	38
3.1.1.	Wiedemann 1974 Araçların Birbirlerini İzlemesi.....	39
3.2.	Kılavuzlu Yeşil Dalga Sistemi Simülasyon Düzenlemeleri	43
3.3.	Kılavuzlu Yeşil Dalga Sisteminin Elektronik Tasarımı.....	46
4.	KILAVUZLU YEŞİL DALGA SİMÜLASYON SONUÇLARI VE TRAFİK - YOL GÜVENLİĞİNE ETKİSİ	50

4.1. Kılavuzlu ve Kılavuzsuz Yeşil Dalga Sistemlerinin Sadece Direkt Yönde ve Direkt-Dönüşlü Yönlerde Simülasyonunun Yapılarak Karşılaştırılması.....	53
4.2. Araç Hızı ve Yol Güvenliği Arasındaki İlişki.....	67
4.3. Değerlendirme.....	68
5. SONUÇ.....	72
KAYNAKLAR	73
EKLER.....	77
EK 1 Kılavuzlu ve Kılavuzsuz Yeşil Dalga Sistemlerinin Simülasyonlarında Kullanılan Sinyal Planı	77



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
2. 1. Yavaşlama, durma ve kalkış gecikmelerinin oluşturduğu toplam gecikme	7
2. 2. Kavşak çeşitleri	10
2. 3. Kavşak kontrol cihazı.....	12
2. 4. Trafik sinyal grubu.....	12
2. 5. Solar özellikli sinyal vericiler	13
2. 6. Kamera, radar, GPRS ve VMS ekipmanları	14
2. 7. Görüntüleme ve dinamik trafik kontrol sensörleri	14
2. 8. Akustik uyarı cihazı	15
2. 9. Faz sırası belirleme yöntemi	16
2. 10. Gerçekçi kuyruk analizi koşullarında kuyruk modellemesi	21
2. 11. Dalga etkisinin büyüyerek trafik düzenini bozması	22
2. 12. Trafik optimizasyon kontrol sistemi	24
2. 13. İki yönlü yollarda yeşil dalga koordinasyonu	30
2. 14. 2014 yılında trafik kazaları ölüm ve yaralanma istatistikleri	35
2. 15. 2013 yılında trafik kazaları ölüm istatistikleri	36
3. 1. PTV Vissim ile 3D trafik sinyalizasyon modellemesi	38
3. 2. Araç takip aşamaları	41
3. 3. Wiedemann (1974) araç davranışları	42
3. 4. Dört kavşak noktasına kılavuzlu yeşil dalga sisteminin uygulaması.....	44
3. 5. Simülasyonun 3 Boyutlu Görüntüleri	44
3. 6. Kılavuzlu ve kılavuzsuz yeşil dalga sistemlerinde kullanılan sinyal planı	45

3. 7. Kılavuzlu yeşil dalga görseli	47
3. 8. XBee iç yapısı	48
3. 9. Xbee modül	48
3. 10. Örgü ağı yapısı	49
3. 11. Kırmızı ve yeşil LED’li solar alüminyum işaretçi	49
4. 1. Simülasyondaki araç güzergâhları	50
4. 2. Sadece direkt yönde hareket edildiğinde seyahat sürelerinin karşılaştırması	62
4. 3. Direkt ve dönüş yönlerinde hareket edildiğinde seyahat sürelerinin karşılaştırması	62
4. 4. Sadece direkt yönde hareket edildiğinde ortalama gecikme süreleri	63
4. 5. Direkt ve dönüş yönlerinde hareket edildiğinde ortalama gecikme süreleri.....	63
4. 6. Sadece direkt yönde hareket edildiğinde kavşaklardaki saatlik ortalama CO emisyon değerleri (g)	64
4. 7. Hem direkt hem de dönüş yönlerinde hareket edildiğinde kavşaklardaki saatlik ortalama CO emisyon değerleri (g).....	64
4. 8. Sadece direkt yönde hareket edildiğinde kavşaklardaki toplam yakıt tüketimleri	65
4. 9. Hem direkt hem de dönüş yönlerinde hareket edildiğinde kavşaklardaki toplam yakıt tüketimleri	65
4. 10. Yol açısı ve viraj açısı arasındaki ilişki	68
Ek 1. 1. Kılavuzlu ve kılavuzsuz yeşil dalga sistemlerinin simülasyonlarında kullanılan sinyal planı	84

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

Sayfa

2. 1. Araçların boyutlarına göre sınıflandırılması	20
2. 2. Araç algılayıcı sensörler arası gerekli mesafeler	28
2. 3. KGM tarafından yayınlanan Türkiye’de araçların uyması gereken yasal hız sınırları	31
2. 4. 2014-2023 Ulusal Akıllı Ulaşım Sistemleri Strateji Belgesi Eki Eylem Planının 2014 Yılı Geliştirme Raporu	32
4. 1. Sadece direkt yönde araç hareketi olduğu durumda kılavuzsuz yeşil dalga sisteminin uygulanmasıyla elde edilen simülasyon sonucu	53
4. 2. Sadece direkt yönde araç hareketi olduğu durumda kılavuzsuz yeşil dalga sisteminin uygulanmasıyla elde edilen seyahat süreleri.....	54
4. 3. Sadece direkt yönde araç hareketi olduğu durumda kılavuzlu yeşil dalga sisteminin uygulanmasıyla simülasyon sonuçları	54
4. 4. Sadece direkt yönde araç hareketi olduğu durumda kılavuzlu yeşil dalga sisteminin uygulanmasıyla elde edilen seyahat süreleri.....	55
4. 5. Direkt ve dönüş yönlerinde araç hareketi olduğunda kılavuzsuz yeşil dalga sisteminin uygulanmasıyla elde edilen simülasyon sonucu	57
4. 6. Direkt ve dönüş yönlerinde araç hareketi olduğunda kılavuzsuz yeşil dalga sisteminin uygulanmasıyla elde edilen seyahat süreleri.....	58
4. 7. Direkt ve dönüş yönlerinde araç hareketi olduğunda kılavuzlu yeşil dalga sisteminin uygulanmasıyla elde edilen simülasyon sonucu	59
4. 8. Direkt ve dönüş yönlerinde araç hareketi olduğunda kılavuzlu yeşil dalga sisteminin uygulanmasıyla elde edilen seyahat süreleri.....	60
4. 9. Gecikme süresine göre karayolu kapasite sınıflandırması	66
4. 10. Sadece direkt yönde hareket edildiğinde iki sistemin karşılaştırılması	69

4. 11. Direkt ve dönüş yönlerinde hareket edildiğinde iki sistemin karşılaştırılması 70



KISALTMALAR DİZİNİ

3G	3. Nesil Evrensel Mobil İletişim Sistemi <i>3. Generation UMTS</i>
4G	4. Nesil Evrensel Mobil İletişim Sistemi <i>4. Generation UMTS</i>
AUS	Akıllı Ulaşım Sistemleri <i>Intelligent Transportation Systems</i>
AC	Alternatif Akım <i>Alternating Current</i>
ASIRT	Uluslararası Karayolları Güvenli Seyahat Derneği <i>Association For Safe International Road Travel</i>
CORSIM	Trafik Yazılımı Entegre Sistemi - Koridor Simülasyonu <i>Traffic Software Integrated System - Corridor Simulation</i>
CPU	Merkezi İşlemci Birimi <i>Central Processor Unit</i>
CO	Karbon Monoksit <i>Carbon Monoxide</i>
DC	Doğru Akım <i>Direct Current</i>
DMİ	Değişken Mesaj İşareti <i>Variable Message Sign</i>
EGM	Emniyet Genel Müdürlüğü <i>General Directorate of Safety</i>
GA	Genetik Algoritma <i>Genetic Algorith</i>
GPRS	Genel Radyo Servis <i>General Packet Radio Service Paketi</i>

GPS	Küresel Konumlama Sistemi <i>Global Positioning System</i>
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IR	Kızılötesi <i>Infrared</i>
ISM	Endüstriyel, Bilimsel ve Tıbbi Radyo Frekans Bandları <i>Industrial, Scientific and Medical Radio Bands</i>
JGnK	Jandarma Genel Komutanlığı <i>Gendarmerie General Command</i>
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü <i>General Directorate of Highways</i>
LDB	Lamba Sürücü Devresi <i>Lamb Drive Board</i>
LED	Işık Yayan Diyot <i>Light Emitting Diode</i>
Li-ion	Lityum-iyon pil <i>Lithium-ion Battery</i>
MALATACS	Çok Faktörlü İleri Bakışlı Adaptif Trafik Kontrol Sistemi <i>Multi Agent Look Ahead Traffic Adaptive Control System</i>
NOx	Azot Oksit <i>Nitrogen Oxides</i>
NSGA-II	Baskın Olmayan Sınıflandırılmalı Genetik Algoritma <i>Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II</i>
OECD	Ekonomik İşbirliği ve Kalkınma Teşkilatı <i>Organisation for Economic Co-operation and Development</i>
UART	Evrensel Asenkron Alıcı Verici Haberleşme Protokolü <i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter Communication Protocol</i>

PCU	Araç Birimleri <i>Passenger Car Unit</i>
PSU	Güç Kaynağı Birimi <i>Power Supply Unit</i>
RF	Radyo Frekansı <i>Radio Frequency</i>
RFID	Radyo Frekansı İle Tanımlama <i>Radio Frequency Identification</i>
SCATS	Sdney Koordine Adaptif Trafik Sistemi <i>Sdney Coordinated Adaptive Traffic System</i>
SCOOT	Bölünmüş Devre Süreli Ofset Optimizasyon Tekniği <i>Split Cycle Offset Optimization Technique</i>
TBS	Trafik Bilgi Sistemi <i>Traffic Information System</i>
TDC	Trafik Verisi Toplama <i>Traffic Data Collection</i>
TKM	Trafik Kontrol Merkezi <i>Traffic Control Center</i>
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu <i>Statistical Institute of Turkey</i>
VMS	Değişken Mesaj Sistemi <i>Variable Message System</i>
VOC	Uçucu Organik Bileşikler <i>Volatile Organic Compounds</i>
VISSIM	Şehir Trafik Simülasyon Modeli <i>Verkehr In Städten – SIMulationsmodel</i>

1. GİRİŞ

Karayollarındaki araç sayısı gün geçtikçe hızla artmaktadır. Araç sayısının artması, nüfusun yoğunlaştığı bölgelerde bekleme sürelerinin artmasına ve yollarda tıkanıklık oluşmasına sebep olmaktadır. Aynı zamanda ölümlü ve yaralanmalı kazalarda da artış görülmektedir.

Ülkemizde de özellikle büyük şehirlerde iş ve okula gidiş-geliş saatlerinde (pik saatler) trafikte uzun kuyruklar oluşmakta ve araçların trafikteki gecikme süreleri artmaktadır. Trafik tıkanıklığı genellikle aynı yolun kavşaklarda farklı istikametten gelen araçların sıra ile kullanılması sonucu olmakta ve yolun kapasitesinin araç gelişlerini taşıyamaması ile ortaya çıkmaktadır.

Yaşanabilecek bu olumsuzlukları azaltmak için farklı birçok denetleme ve cezalandırma uygulamaları yapılmaktadır. Yapılan bilimsel çalışmalar neticesinde teknolojik ilerlemeyle sıkışıklık yaşanan bölgelerde, yolların belirlenen noktalarına yerleştirilen sensörler ile anlık ölçümler yapılabilmektedir. Bu ölçüm ve istatistiksel veriler, akıllı ulaşım sistemlerinde (AUS) kullanılarak trafik işaretlerinin kontrolü, farklı stratejilerin uygulanması, alt sistemlerin stratejik olarak bilgilendirilmesi, internet yoluyla verilerin trafik yönetim merkezlerine iletilmesi, park yönetimi, tıkanıklık bilgisinin diğer sürücülere değişken mesaj göstergeleri (VMS - Variable Message System) ile aktarılarak alternatif güzergâhların kullanımının sağlanması gibi trafiğin daha etkin bir şekilde kontrol edecek sistemlerin koordinasyonu ile karayollarının kullanımı daha verimli bir hale getirilebilir.

1.1. Problem Tanımı

Trafikte araç yoğunluğunun arttığı kesişim noktalarında oluşabilecek kayıp zamanlar trafik yönetimi ve sinyal optimizasyonunun başarısı ile belirlenir. Kayıp sürelerin azaltılması amacıyla yeşil dalga sistemi günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır. Ancak bu sistemde bir kavşak noktasından hareket eden bir araç kümesinin sonraki kavşak noktasında, belirlenen yeşil dalga hızıyla geçmeleri bu kümedeki tüm araçlar için

mümkün olmamaktadır. Bunun sebebi ise araçların hızlarındaki düzensizliktir. Belirlenen yeşil dalga hızından yavaş veya daha hızlı olarak seyreden araçlar sonraki kavşak noktasında birikmelere yol açmakta ve kalkışları için gerekli olan zaman içerisinde de yeşil dalga hız kuralına uymakta olan araçlara engel olarak onların da hızlarını azaltmalarına neden olmaktadır. Bu düzensizlikler ise yeşil dalga sistemini ve kavşaklardaki düzenlemelerin olumsuz etkilenmesiyle sonuçlanmaktadır. Bu tezde bu probleme çözüm olarak kılavuzlu bir yeşil dalga sistemi öngörülerek ve uygulama önerileri simüle edilerek mevcut yeşil dalga sistemiyle karşılaştırılması amaçlanmıştır.

1.2. Literatür Özeti

Trafik akış modellemeleri ve yeşil dalga üzerine yapılan çalışmalardan bazıları şu şekilde özetlenebilir;

Lighthill ve Whitham 1955'te makroskopik trafik akış teorisinin temelini, trafiği bir kanal boyunca hareket eden akışkan olarak tanımlayarak bir makale yayınladılar. Bu makalede yol boyunca ilerlemekte olan araçların aralarında kayda değer bir boşluk olmadığı durum hakkında görüşlerini bildirdiler [1].

Webster 1950'lerde izole edilmiş kavşaklarda gecikme süreleriyle ilgili yaptığı çalışmalarda, teorik ve deneysel olarak gecikmeleri minimize etmek için doygunluk derecesine eşit bir sinyal periyodu belirleyip, kritik faz sürelerini bularak, sinyal fazlarını ayırmayı ispatlamıştır. Ancak trafik yoğunluğu, kavşak noktalarında doygunluk derecesinin yüksek olmasından dolayı artar. Bu sebeple optimum devre süresine sahip Webster'in eşitliği diğer gecikme fonksiyonlarına göre 30-40 s yüksek kalmaktadır [2].

Newell 1965'te hızlanma ve yavaşlama sırasında farklı sürücü davranışlarının etkisini inceleyen ilk kişi olmuştur. Sürücülerin hızlanırken araçların arasında bıraktıkları mesafenin yavaşlarken aralarında bıraktıkları mesafeden daha fazla olduğunu ortaya koymuştur. Newell'in modeli hızlanma ve yavaşlama arasındaki asimetriyi göstermektedir [3].

Miller tarafından 1963'te kavşak noktalarında devre süresinin bulunabilmesi için analitik çalışmalar yapılmıştır. Weiss ise 1974'te bu çalışmaların devamında trafik akışı esnasında yaşanan gecikmeleri hesaplayarak sürücülerin gecikmesini minimuma düşürmeyi amaçladı. Dört yönlü bir kavşağa giren araçların maksimum oranda geçişlerini tamamlayabilmeleri için devre süresi hesaplamasını, doymun akımın altında seçerek gerçekleştirmiştir [1].

Hillier (1965), sinyal işleyişinin yetersizliği nedeniyle araçların beklemelerine neden olan zamanı minimuma indirebilmek için bir çalışma yapmıştır. Hillier ve Lott (1966), trafik sinyal senkronizasyonu için kombinasyon metodunu ortaya çıkardılar. Bu metod ile araç gecikmelerinin %20 oranında azaltılabileceği gösterilmiştir [4].

Trafik sinyalizasyon sistemleri adaptif ya da sabit sistemlerle kontrol edilir. Sabit sistemlerde araç algılayıcı dedektör gibi sinyal planlarının düzenlenmesini sağlayan araç algılayıcı sistemler 1986'da Bergh ve Steen, 1988'de Vincent ve Peirce tarafından Kuzey Avrupa ve Kuzey Atlantik ülkelerinde kullanılmaya başlandı [5].

Webster (1985), sürücü reaksiyon süresi ve araçların durma ve kalkma anında yaşanan gecikmeleri sinyalle kavşaklarda hesaba katarak matematiksel bir model türetti. Bu model Webster gecikme fonksiyonu olarak bilinir. Fonksiyon simülasyon çalışmalarında gecikme sürelerini gerçekçi doğrulukla ifade eder. Bu fonksiyon ile kavşaklarda minimum gecikme süresi için optimum devre süresi belirlenebilmektedir [2].

Adaptif olmayan sinyal kontrol sistemlerinin sürekli olarak gelişmesine paralel olarak adaptif kontrol yöntemlerine araştırma ilgisi sürekli artmaktadır. 1980'de Sims ve Dobinson ve 1982'de Hunt, Robertson ve Royle tarafından geliştirilen adaptif kontrol sistemleri arasında Bölünmüş Devre Süreli Ofset Optimizasyon Tekniği (SCOOT - Split Cycle Offset Optimization Technique) ve Sdney Koordine Adaptif Trafik Sistemi (SCATS - Sdney Coordinated Adaptive Traffic System) bulunmaktadır. SCOOT ile şehir içindeki kavşaklarda gerçek zamanlı optimum sinyal koordinasyonu sağlanması hedeflenmektedir. SCOOT gerçek zamanlı olarak araç detektörleriyle haberleşerek akış ve doluluk bilgisini alır. Kavşaklardaki kuyruk uzunluklarını en aza indirmek için her bir sinyalde devre süresi, ofset ve sinyal süre aralıkları değiştirilmektedir [6].

SCATS, araç ve yaya algılama sensörleriyle SCOOT gibi sinyal optimizasyonu ve sinyal programları arası otomatik geçiş gibi özelliklere sahiptir. 25 ülkede yaklaşık 42000 kavşakta kullanılmaktadır [7].

Bisikletler için yapılan bisiklet yolları kullanıcıların motorlu araç trafiğinden ayrı olması trafikte oluşabilecek tehlikelerin önüne geçmektedir. Ancak kavşak noktalarında bisikletlilerin motorlu araçlarla karşılaşmaları minimum seviyeye indirilmeye çalışılmıştır. Bisikletliler için hız tavsiyeli yeşil dalga sistemi ilk olarak 2007 yılında Danimarka Odense’de yapılmıştır. İki kavşak arasına 350 metre mesafede 45 adet LED’li kılavuz ışığı ile bisiklet yolundaki yoğunluğa göre uyarlanan hız kılavuzu ile bisiklet sürücüleri kavşaklardan duraklamadan ve seyahat hızlarını değiştirmeden geçebilmektedir [8].

Günümüzde karayolları ulaşım ve taşımacılık amacıyla kullanılmakta ve trafikte tüm araçların etkileşim içinde olması, trafikte bir yönetim planlamasını zorunlu kılmaktadır. Geçmişten beridir kullanılan ulaşım yolları üzerinde insanların rahat, kısa sürede, güvenli ve çevre ile uyumlu bir şekilde seyahatlerini tamamlamaları için araç trafiğinin yönetim optimizasyonu ile ilgili bilimsel çalışmalar geliştirilmeye devam etmektedir.

Yeşil dalga sistemi ile belirlenen güzergâh boyunca yer alan kavşaklarda zaman senkronizasyonu sağlanır. Ardından araç sürücülerinin kavşaklarda durmadan yollarına devam edebilmeleri için ortalama bir hız belirlenir ve sürücülerin bu hıza uymasıyla dur-kalk yapmadan ve arkalarından gelen trafiği de etkilemeden yollarına devam etmeleri sağlanır. Ancak bu uygulamada sürücüler istenilen hız koridorunda olup olmadıklarını bilememektedirler. Sürücüler, kavşaklarda hız koridoruna sinyal periyodunun hangi anında girdiğini bilmeyip ilerideki kavşakta geçmesi için aracın hızını belirlenen hız koridorunda hareket etmemektedirler. Bu problem sistemin işleyişini ve verimini düşürmektedir. Aynı zamanda yeşil dalganın sadece belirlenen bir hız için statik olarak çalışmasına sebep olur. Yeşil dalga uygulaması eğer görsel ve anlık olarak sürücülere gerekli güvenlik önlemleri alınarak yol üzerine yerleştirilecek ışıklı donanımlarla bildirilirse, kavşaklarda birleşen kollardaki araç trafikleri, araçların duraksamadan yollarına güvenli bir şekilde devam edebilmesine imkân verebilir.

Durağan bir yeşil dalga yerine aktif değişken bir yeşil dalga sistemi kurulmasıyla farklı noktadaki trafik yoğunlukları ele alınarak kavşaklardaki araç başına ortalama gecikme süreleri düşürülebilecektir. Bu çalışmada belirli kılavuzlarla sürücüleri yeşil dalgaya uyduran bir sistem önerilerek, gecikme, çevresel zarar, yakıt tknetimi gibi olumsuzlukların azaltılmasıyla kavşak performansının arttırılması hedeflenmektedir.

1.3. Tezin Ana Hatları

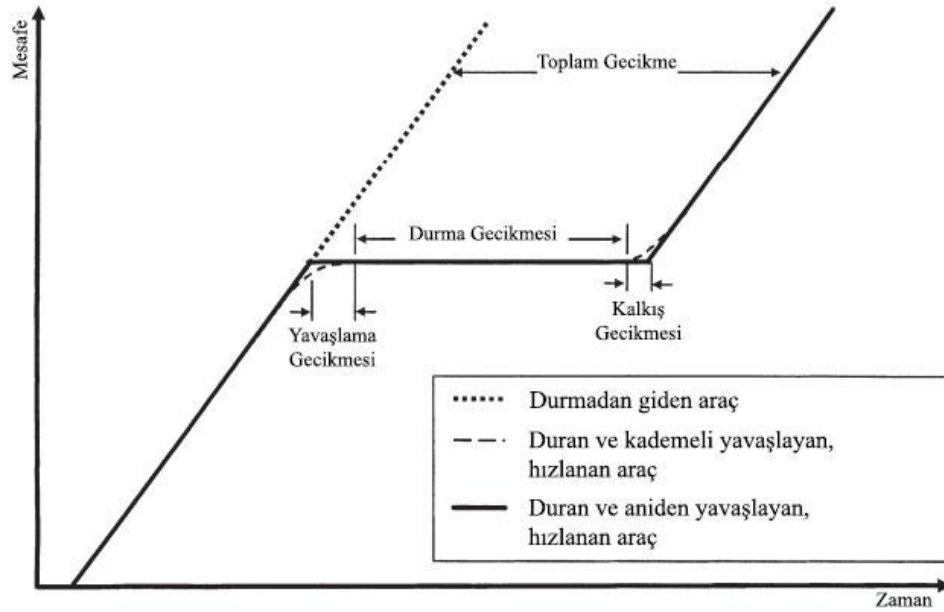
Tez çalışmasında, trafik sinyalizasyon sisteminin tanıtımı yapılarak trafik sinyalizasyon donanımları ve sinyal planlarının tasarımı aşamasına geçilecektir. Tasarım çalışmalarında simülasyon uygulamalarının kullanımı ve akıllı trafik kontrol sistemlerinin çalışma prensiplerine değinilerek trafik sinyalizasyon sistemlerinde optimizasyon amaçlı olarak kullanılmakta olan yeşil dalga sistemi anlatılacaktır. Ardından tezin nerisi olan kılavuzlu yeşil dalga sistemi açıklanıp trafik optimizasyonu üzerine getireceği yenilikçi yönleri yapılan simülasyon çalışmaları ve elde edilen raporlama sonuçlarıyla gösterilecektir. Son olarak da kılavuzlu yeşil dalga sisteminin değerlendirme ve sonuç görüşleri sunulacaktır.

2. TRAFİK SİNYALİZASYON SİSTEMİ

İki veya daha fazla karayolunun kesiştiği alana kavşak denir. Yolların kavşağa birleşen kısmı ise kavşak kolu olarak adlandırılır. Kavşaklarda kullanılan sinyalizasyon sistemlerinin hangi durumlarda gerekli olduğu yapılan bazı gözlemlerle ortaya koyulmuştur. Bu gereksinimler şu şekildedir:

- ✓ Tali yollardan anayola katılmak isteyen araçların gerekli boşluğu bulamaması,
- ✓ Kavşaklardaki işaretlemelere rağmen, ulaşım güvenliğinin sağlanamaması, sürekli veya birbirine benzer karakteristikte kazalar olması,
- ✓ Kavşaklardaki düzensiz hareketlerin beklemelere, tıkanıklıklara ve gecikmelere yol açması dolayısıyla kavşağın ekonomik kullanımının azalması, enerji ve zaman kaybına neden olması,
- ✓ Yayaların, emniyetli hareket imkânı bulamaması,
- ✓ Kavşağın fiziki ve geometrik yapısının bir işaretli işaretlemeyi gerektirmesi olarak sıralanabilir [9].

“Sinyalize kavşaklardaki gecikme, bir aracın bir kavşaktan sinyalizasyon sistemi olduğunda geçmesi için gereken zaman ile sinyalizasyon sistemi olmadığında kavşaktan durmadan geçmesi arasındaki zaman farkı olarak hesaplanır [10]. Şekil 2.1.’de gecikme süreleri mesafe ve zaman durumlarına göre gösterilmiştir.



Şekil 2. 1. Yavaşlama, durma ve kalkış gecikmelerinin oluşturduğu toplam gecikme [10]

Karayollarının araçlar tarafından verimli kullanılabilmesi için bekleme süresini düşürme, trafikteki araçların özellikle kavşak gibi araç trafiğinin yoğunlaştığı alanlarda anlık egzoz emisyon salınımının azaltılması, trafik kazası oluşma olasılığının azaltılması, sürücülerin psikolojik olarak kurallara uymalarının kendi avantajlarına olduğunun yönlendirilmesi gibi hususlar temel alınır. Sinyalizasyon optimizasyonu sistemleri de tüm bu sorunlara çözüm getirmeyi hedefler.

Sinyalizasyon sisteminin kurulmasının tehlike oluşturabileceği durumlar ise şu şekildedir:

- ✓ Trafiğin seyrek olduğu saatlerde gereksiz bekleme süresi olması,
- ✓ Belirli kaza tiplerinde artmalar olması
- ✓ Sinyalizasyon hatalarında sürücülerin sinyale olan uyumsuzluklarının artması,
- ✓ Işık süreleri doğru olarak ayarlanmamışsa meydana gelen gecikmelerden dolayı sürücülerde sabırsızlanmaların, sonuçta da ihlallerin artması, şeklinde sıralanabilir [9].

2.1. Kavşak Sinyalizasyon Sistemleri

Kavşaklarda kullanılan sistemler ve düzenlemeler şu şekildedir;

- Sabit süreli sinyalizasyon sistemleri,
- Tam veya yarı uyarmalı trafik sinyalizasyon sistemleri,
- Yeşil dalga koordinasyon sistemi,
- Sinyalizasyon sistemlerinde engellilere yönelik düzenlemeler,
- Toplu taşıma araçlarına yönelik sinyalizasyon düzenlemeleri,
- Trafikte oluşabilecek farklı durumlara karşı sinyalizasyon sistemlerinde düzenlemeler,
- Adaptif sinyalizasyon sistemleri,
- Trafik izleme ve kontrol merkezleri.

Sinyalizasyon sistemleri temelde iki tiptedir. Bunlar izole sistemler ve koordineli sistemlerdir.

2.1.1. İzole Sinyalizasyon Sistemi

Diğer sinyalizasyon sistemleriyle entegre olmaksızın tek başına çalışan sinyalizasyon sistemidir. Bu sistem sabit zamanlı, trafik uyarmalı, yaya uyarmalı, el ile kumandalı gibi farklı tiplerde gerçekleştirilebilir.

2.1.1.1. Sabit Zamanlı Sinyalizasyon Sistemi

Kavşağa farklı yönlerden gelen araç ve yayaların hazırlanan zaman senaryolarına göre uygun sıra ile geçiş hakkı verilmesidir. Bu süreler ortalama trafik yükü verilerine göre verilir. Bu yüzden bu sistemde istatistiki veriler önem taşımaktadır.

2.1.1.2. Trafik Uyarmalı Sinyalizasyon Sistemi

Devre süresi ve kırmızı, yeşil ışık sürelerinin kavşağa giren ve sensörler yardımıyla belirlenen trafik yoğunluğuna göre uyarlandığı sistemdir. Bu sistem yarı ve tam

uyarmalı olarak iki şekilde yapılır. Yarı uyarmalıda sensörler sadece tali yolda bulunur. Tali yoldaki araç sayısı belirli bir seviyeye ulaştığında ana yoldaki trafik akımı durdurulur ve tali yoldaki araçlara geçiş hakkı verilir. Ancak bu sistemde kaza oranları diğer sistemlere göre daha fazladır. Tali yollardaki bekleme süresinin belirsiz veya çok uzun olması, sürücülerin trafik ışıklarına uymamaları nedenleriyle belirsiz durumlar oluşmakta ve kazalar yaşanmaktadır. Ancak tam uyarmalı sistemlerde kavşaktaki tüm yönlerdeki yollara yerleştirilen sensörler tüm değişimleri izler ve böylece sinyal sürelerini otomatik olarak düzenler.

2.1.1.3. Yaya Uyarmalı Sinyalizasyon Sistemi

Genellikle bazı bağlantı yollarında, kavşak olmayan yerlerde, yola cephe olan okul, işyeri vb. toplu kullanım yeri yakınlarındaki yaya geçitlerinde kullanılır. Yayaların sinyalizasyon ışıklarına yerleştirilen yaya butonlarına basmasıyla yaya geçidi üzerindeki trafik akımı durdurulur ve yayalara geçiş hakkı verilir.

2.1.1.4. El İle Kumandalı Sinyalizasyon Sistemi

Taşıt ve yaya uyarmalı sistemlerin birleşimi gibi düşünülebilir. Eğer ölçüm sonuçlarında değişimler oluştuysa sabit zamanlı olarak düzenlenen sinyalizasyon sistemlerinin süreleri uzaktan RF, bluetooth, GPRS kumanda ile değiştirilebilir.

2.1.2. Koordineli Sinyalizasyon Sistemleri:

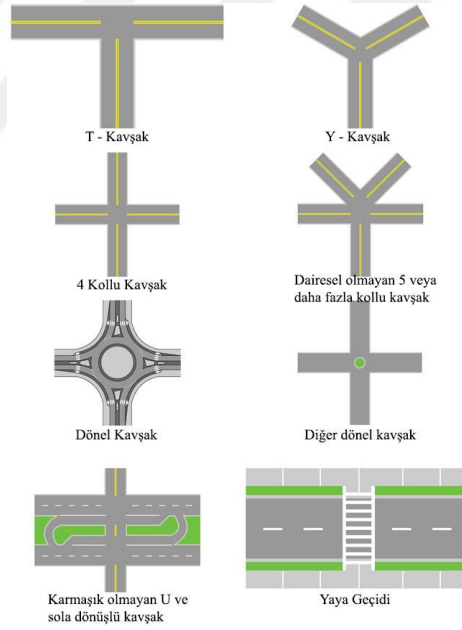
Anayol üzerindeki kavşaklardan birim zamanda mümkün olan maksimum sayıdaki aracın durmadan geçmesi amacıyla kavşakların birbirleriyle koordineli çalışmasını sağlayan sinyalizasyon sistemidir.

Trafik yönetimi uygulamalarında, araç trafiğinin özellikle belirli zaman aralıklarında yoğunlaştığı bölgelerde günümüzde statik (durağan) sistemlerden vazgeçilerek çeşitli noktalara yerleştirilen kamera veya sensörler yardımıyla dinamik olarak sürekli kendini yenileyen yönetim sistemlerine geçilmektedir.

Koordineli sinyalizasyon sistemleriyle araçların durma, bekleme ve yol verme zamanları ayarlanmaya çalışılır [11]. Sonuç olarak gereksiz bekleme sürelerinin azalması, yakıt tüketiminin düşmesine bağlı olarak emisyon değerlerinin azalması, yol ağlarının daha verimli ve güvenli kullanılması sağlanır.

2.2. Kavşak Çeşitleri

İki veya daha fazla farklı yönde olan yolların kesiştiği yerlere kavşak denir. Kavşaklar kol sayısına göre üç kollu (T ve Y kavşak), dört kollu ya da çok kollu olarak adlandırılırlar. Kavşaklardaki gecikme sürelerini azaltan diğer kavşaklar ise katlı kavşaklardır. Trompet tip, dönel tip, baklava tip, katlı tip olarak görsel şekline göre isimlendirilmektedirler. Şekil 2.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 2. 2. Kavşak çeşitleri

Her kavşak için sinyalizasyon planlaması ayrı olarak değerlendirilmekte yolların kullanım istatistiklerine göre seçimler yapılmaktadır.

2.3. Trafik Sinyalizasyon Donanımları

Trafik sinyalizasyon sistemi kavşağın gerektirdiği özelliklere göre başlıca kavşak kontrol cihazı, trafik sinyal grupları, geri sayıcılar, solar flaşörler, yol işaretçileri, uyarı tabelaları, kameralar, sensörler, araç varlık algılayıcılar ve akustik uyarı cihazlarından oluşmaktadır.

2.3.1. Kavşak Kontrol Cihazı (KKC)

Kavşak kontrol cihazları kavşaklarda, otoyol bağlantı noktalarında ve yaya geçitlerinde yer alan diğer kontrol cihazlarıyla bağlantılı ya da bağlantısız olarak çalışır. Bölgedeki günlük, haftalık ve aylık trafik yoğunluğu istatistiklerine göre trafik sinyalizasyon planı hazırlanır. Bu sinyal planına göre bilgisayar üzerinden kavşak kontrol cihazları kablo ile veya internet üzerinden programlanır. KKC'lerdeki yazılım genellikle 32 bit ARM tabanlı işlemcilerle C programlama dili kullanılarak yapılmakta ve kavşak üzerindeki farklı yönlerde veya yaya sinyallerinde lamba çakışma önlemleri, lamba arızası, elektrik gerilimin genlik ve frekansındaki düşme ve yükselme gibi detaylar göz önünde bulundurulmaktadır. KKC, yönetim sisteminin DC elektrik enerjisini sağlayan güç kaynağı birimi (PSU - Power Supply Unit), sinyal programının çalıştırıldığı merkezi işlem birimi (CPU - Central Processor Unit), sinyal gruplarına enerji verilmesini sağlayan lamba sürücü kartı (LDB - Lamp Drive Board) ve yaya butonu, sensör gibi birimlerin bağlanıldığı giriş-çıkış (IO - Input-Output) kartlarından oluşmaktadır. Şekil 2.3.'te KKC elektronik kart ve sinyal grubu bağlantı ekipmanları görülmektedir.



Şekil 2. 3. Kavşak kontrol cihazı

2.3.2. Trafik Işıkları

Trafik ışıkları, trafik akışını denetleyebilmek amacıyla kavşaklara, yaya geçitlerine ve gerekli görülen diğer yerlere yerleştirilmiş kırmızı, sarı, yeşil ışıklar yardımıyla gerekli ikazların kolay anlaşılabilir şekilde tasarlandığı sinyalizasyon cihazlarıdır. Kırmızı ışık aracın durmasını, kırmızı-sarı ışık kalkışa hazırlanılmasını, yeşil ışık kalkış yapıp yola devam edilmesini ifade eder. Yeşil flaş ve ardından yanan sarı ışık ise yeşil süresinin bitmek üzere olduğunu bildirir. Şekil 2.4.'te yüksek lümen/watt değerlerine sahip LED'li trafik ışığı sinyal grupları görülmektedir.



Şekil 2. 4. Trafik sinyal grubu

Oluşan araç yoğunluğu, gece saatlerinde azalıp iş çıkış saatlerinde artması gibi günün farklı saat dilimleri içinde değişkenlikler gösterir. Adaptif trafik sinyal kontrolörü, araçların kavşaklara varışının sensörler ve kameralar vasıtasıyla belirlenerek trafik sinyallerinin zamanlamasının sürekli olarak değişkenlik gösterdiği sistemdir. Trafiğin yoğun olduğu bölgede yeşil ışık, yoğunluğun az olduğu bölgede ise kırmızı ışık süresi uzatılır. Böylece trafiğin güvenli şekilde kesintisiz olarak akışı sağlanır.

2.3.3. Solar Flaşörler, Geri Sayıcılar ve Uyarı Tabelaları

Güneşten radyasyon yoluyla yayılan ışık enerjisi monokristal, polikristal veya farklı yapıda ve verimliliğe sahip güneş pilleri aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürülerek akülere şarj edilir. Depolanan bu elektrik enerjisi trafik işaret ekipmanlarında farklı amaçlarla kullanılır. Şekil 2.5.'te solar flaşörler, geri sayıcılar ve solar özellikli hız tespit sistemi yer almaktadır.



Şekil 2. 5. Solar özellikli sinyal vericiler

2.3.4. Kamera, Sensör ve Loop Dedektörler

Trafiğin düzenlenmesi ve kontrol edilebilmesi için kurulan akıllı sistemlere veri sağlayan kameralar ve çeşitli sensörler, trafik planlama işini kolaylaştırmaktadır.

Şekil 2.6.'da farklı kamera, sensör, uyarı ekranları ve ekipmanlar yer almaktadır.



Şekil 2. 6. Kamera, radar, GPRS ve VMS ekipmanları



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 2. 7. Görüntüleme ve dinamik trafik kontrol sensörleri

Şekil 2.7. a,b,c,d’de çok sayıda ölçüm sensörün birlikte kullanıldığı görüntü işleme, anlık video yayını yapabilen, termal özelliğiyle her türlü hava koşulundan etkilenmeden çalışabilen ekipmanlar görülmektedir. Şekil 2.7. e’de ise araç varlık algılama sensör birimi görülmektedir.

2.3.5. Görsel Engelliler İçin Akustik Uyarı Cihazı

Görsel engelli kişilerin trafikte güvenle hareket edebilmeleri için kaza olma riskinin yüksek olduğu kavşaklarda yaya sinyallerinin üzerine yerleştirilen, trafik sinyallerinin kırmızı ve yeşil renklerinde ayrı frekanslarda, dış mekân sesinden 5 dB fazla olarak 30 – 90 dB aralığında sesli uyarı yapan sistemler kullanılmaktadır. Şekil 2.8.’de görsel engelliler için kullanılan akustik uyarı cihazı görülmektedir.



Şekil 2. 8. Akustik uyarı cihazı

2.4. Trafik Sinyalizasyon Tasarımında Kullanılan Değişkenler

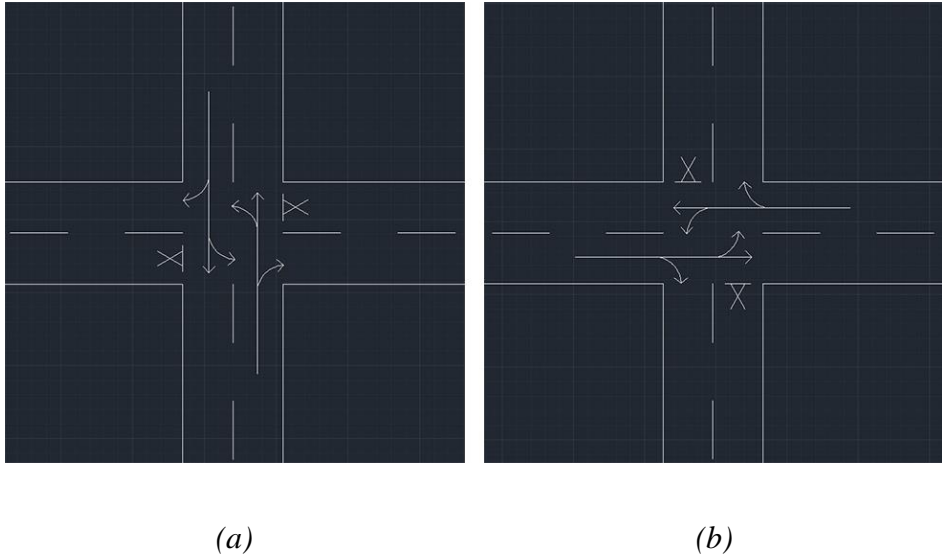
Sinyalizasyon hesaplamaları yapılırken kullanılan simülasyon programlarında, sinyal döngüsü, sinyal periyodu, trafik akış oranı, sinyal fazı, doymuş akım ve sinyalizasyon planları gibi parametreler veya değişkenler kullanılır. Şimdi bunların tanımlamaları verilecektir.

2.4.1. Devre

Bir devre, belirlenen sinyalizasyon planı gereğince her yöne geçiş hakkı verildikten sonra tekrar en başa dönülmesiyle gerçekleşen döngüdür. Farklı yönlerdeki sinyal planlarının birleşimiyle oluşan sinyal planı, pasif sinyalizasyon sistemlerinde bazı durumlarda gereksiz bekleme ve bazı yönlerdeki araç trafiğinin ciddi şekilde artmasına sebep olmaktadır. Anlık toplanan gerçek verilere göre sinyalizasyon programını düzenleyen aktif sistemlerde sinyal devre süresi ve faz süreleri değişkenlik göstermektedir. Bu sayede aktif sistemler ile trafik yönetimi iyileştirilmektedir.

2.4.2. Sinyal Fazı

Farklı yönlerden kavşağa giren araçlara hangi sıra ve süre ile geçiş hakkı verileceğinin yöntemidir. Genelde bir sinyalize kavşak çok sayıda faza sahip olabilir. Dört kollu bir kavşakta 2 fazdan 8 faza kadar sinyal faz sırası verilebilir. Aktif sistemlerde sinyal planı oluşturulurken gerçek zamanlı trafik talepleri göz önünde bulundurularak her fazın ne kadar süre alacağı ve örneğin, bir yönde hiç araç yoksa diğer fazlara geçilmesine karar verme gibi düzenlemeler belirlenmelidir. Basit bir izole kavşakta 2 faz için gerekli süreler verilip daha sonra diğer fazlar için modelleme yapılabilir.



Şekil 2. 9. Faz sırası belirleme yöntemi

Şekil 2.9.'da dört kollu bir kavşakta araçlar için farklı istikamet yönleri çizilmiştir. Bu istikametler için istenilen faz ve süreler gerçek zamanlı olarak veya her yöndeki ortalama istatistiksel veriler dikkate alınarak sabit olarak belirlenebilir. Şekil 2.9. a ve b'de eğer sağ ve sola dönüş yoksa 2 faz, dönüşler varsa bir yönden giden araçların direkt, sağ ve sol dönüşleri aynı fazda düşünülürse toplam 4 yön için 4 sinyal fazı oluşturulur. Ya da sağa dönüşler hariç sola dönüş ve direkt gidiş yönleri için ayrı bir faz verilerek bir devre süresi boyunca 8 sinyal fazı oluşturulur.

2.4.3. Devre Süresi

Bir devrenin tamamlanması için geçen süreye denir. Adaptif sinyalizasyon sistemlerinde kavşağın içindeki ve yaklaşık 80-100 metre uzaklıkta yer alan sensörlerle kavşağa gelmekte olan araç miktarları, kavşağın yoğunluğu gibi verilerle devre süresi değiştirilebilmektedir.

Optimum devre süresi için doğrusal regresyon analiziyle belirlenen model şöyledir:

Devre süresi= $aX + b$ (a ve b katsayı, X bağımsız değişken)

$X = L/(1-Y)$,

X: Bağımsız değişken olan X, her sinyal periyodunda toplam kayıp zamanın kavşağın doluluk oranına oranıdır.

L: Toplam kayıp zaman ($L=nI+R$),

Y: Doygunluk derecesi olarak tanımlanır. Kavşağın belirlenen sürede mümkün olan maksimum araç geçişi doygun akım değeridir. Doygunluk derecesi ise belirlenen süre içerisinde geçen araç sayısının doygun akım değerine oranıdır. ($Y=q/s$),

n: Faz sayısı,

I: Her fazdaki ortalama kayıp zaman,

R: Her devre süresinde tüm sinyaller kırmızı olduğunda geçen zaman,

q: Saat başına geçen araç yaklaşımında araç akım talebi (araç/saat),

s: Doygun akım değeri (araç/saat),

Bu dönüşümlerle doğrusal regresyon tekniği uygulanarak devre süresi şöyle bulunabilir;

$$\text{Devre Süresi} = 2.97X + 12.87$$

$$= (2.97L/(1-Y))+12.87 \quad [12]$$

Webster tarafından bulunan optimum devre süresi ise şu şekildedir;

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

Doygun akım altındaki durumlarda denklem (1)'deki Webster'in gecikme formülü kullanılabilir.

$$d = 0.9 \left[\frac{c(1 - \lambda)^2}{2(1 - \lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1 - x)} \right] \quad (2)$$

d : Kavşağın kısmi şerit grubunda araç başına gecikme süresi (s/araç),

λ : Etkin yeşil süresinin devre süresine oranı ($\lambda=g/c$),

x : Doygunluk derecesi (gerçek akımın maksimum akıma oranı $x = \frac{g}{\lambda s}$),

C_0 : Optimum devre süresi (s),

c : Devre süresi (s),

g : Ölçülen fazın etkin yeşil süresi (Bir sinyal döngüsü boyunca etkili olan, araçların başlangıç kaybı düşünülerek hesaplanan yeşil süresine denir.) [13].

Denklem 2'nin ilk kısmı düzgün bir geçiş için trafikte varsayılan gecikmeyi temsil eder. İkinci kısım ise rastgele giden araçlardan dolayı oluşan gecikmedir [13].

2.4.4. Trafik Akımı

Trafik akımı, aktif sinyalizasyon sistemlerindeki bulanık mantık algoritmaları oluşturulurken faydalanılan verilerdendir. Kavşağa farklı yönlerden birim zamanda gelen araç miktarını ifade eder.

Trafik akımı= araç/saat,

Trafik Hızı= km/saat,

Trafik yoğunluğu= araç/km olduğundan,

Trafik akımı= Trafik hızı × Trafik yoğunluğu olarak ifade edilebilir.

2.4.5. Doygun Akım Oranı

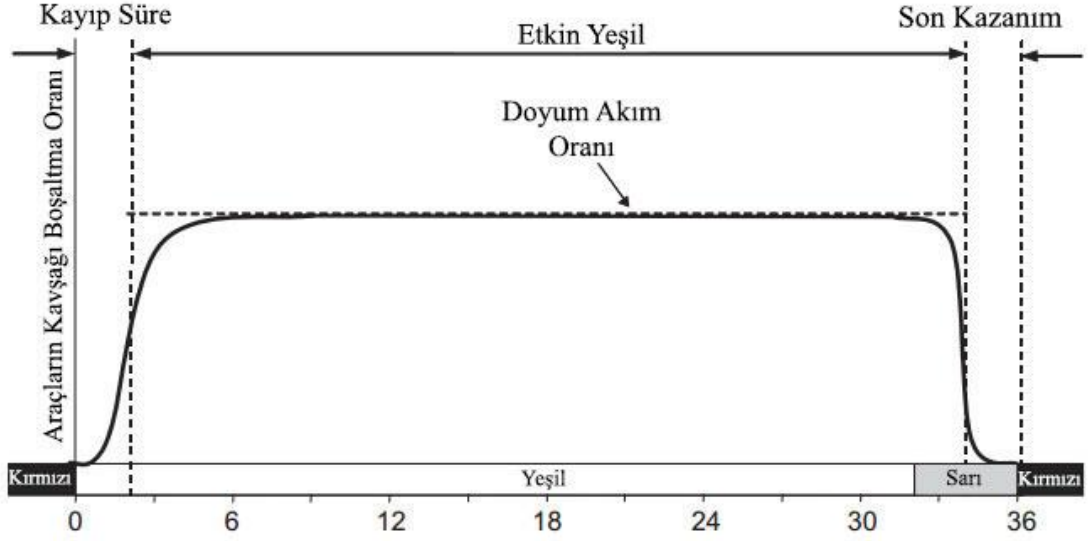
Doygun akım oranı, kavşağın fiziki yapısına, şeritlerin sayısına ve uzunluğu diğer araçlardan büyük olan araçların yüzdesi ile araçların hızına bağlıdır. Kavşakta yoğun trafikte araç sayısı ile yapılan testte her yön için 1 saat boyunca geçiş hakkı verilirse geçebilecek araç sayısıdır ($s=\text{araç/saat}$). Bu aşamada sinyalizasyon veya kuyruk uzunlukları gibi olumsuz etkilerin olmadığı düşünülür. Kavşağa giren bir yöndeki gerçek akım değerinin kapasite değerine oranı ise doyma derecesidir. Kavşağın kapasitesi ise gerçek sinyal zamanlarını dikkate alarak yapılan doyma akım oranının düzenlenmiş halidir. Çünkü kavşaklarda hiç bir faza 1 saat gibi bir süre verilmez. Örneğin, bir faza 1 saat içinde 20 dakika yeşil süresi veriliyorsa aslında o yönün gerçek kapasitesi doyma akım oranının 1/3'ü kadar olmaktadır. Kapasite (PCU/saat) hesaplanırken $c=(g/C).s$ formülasyonu kullanılır. Araç sayısı hesabı ise farklı boyutlardaki araçları katsayı olarak sınıflandırma yolu olan binek otomobil birimi (PCU- Passenger Car Unit) ile belirlenir. Çizelge 2.1.'de trafikteki araçların PCU değerlerinin 0.2-3.5 arasında değiştiği belirtilmiştir.

Çizelge 2. 1. Araçların boyutlarına göre sınıflandırılması

ARAÇ TİPİ	PCU DEĞERİ	ARAÇ TİPİ	PCU DEĞERİ
Bisiklet	0.2	Otobüs	2.0
Motosiklet	0.4	Ağır Vasıta, Römorklu Araçlar	3.0
Binek otomobil	1.0	Çift Dorseli Araçlar	4.0
Hafif Ticari Araç	1.0	Metrobüsler (17m)	3.2
Kamyonet	2.0	Tramvaylar	3.5

2.4.6. Etkin Yeşil ve Kırmızı Süresi

Sürücülerin trafik sinyalizasyon sisteminin değişimine gösterdiği reaksiyonlar ve araçların hızlanma, yavaşlama karakteristiklerinden kaynaklanan gecikmeler, gecikme tahmin modelinde Şekil 2.10.'da gösterildiği gibi kavşak kesişim noktalarının fiili aralıkları yerine etkin sinyal aralıkları ile tanımlanır. Sürücüler yeşil fazın sonuyla sarı fazın bir bölümünde kavşaklara girmeye devam ederler. Sarı ışıkta ilerlemeye devam eden araçlar yeşil uç kazancı oluştururken, kırmızıdan yeşile dönerken kalkışta kaybedilen zaman ise yeşil başlangıç gecikmesini oluşturur.



Şekil 2. 10. Gerçekçi kuyruk analizi koşullarında kuyruk modellemesi [10]

$$g_i = G_i + Y_i - t_L = G_i + (y + r_h) - t_L$$

g_i : i fazı için etkin yeşil süre (s),

G_i : i fazı için sinyal planında belirlenen gerçek yeşil süre (s),

Y_i : Sarı ve kırmızı sürelerin toplamı (s),

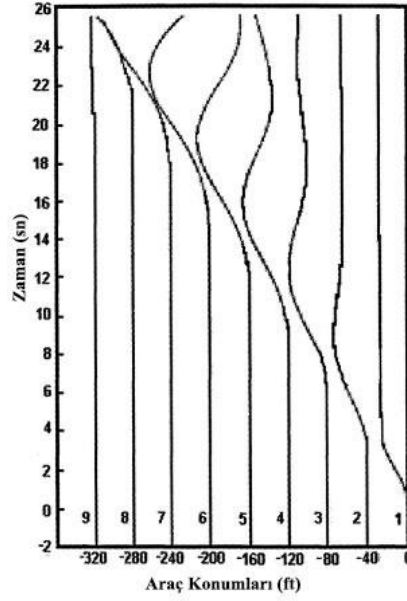
t_L : Toplam kayıp süre (s),

r_h : Kırmızı ışık süresi (s),

y : Sarı ışık süresi (Yeşil ışıktan kırmızı ışığa dönerken geçen süre).

Etkin kırmızı süresi ise kayıp zaman ile kırmızı sürenin toplamı olarak ifade edilebilir.

Hızlanma ve yavaşlama arasında asimetric sürücü davranışları bulunmaktadır. Araçlar arasındaki mesafe hızlanırken daha çok, yavaşlarken ise daha az olmaktadır. Bir noktada yavaşlamaya başlayan bir aracın oluşturduğu yavaşlama etkisi bir dalga gibi yayılarak arkasından gelen araçların da yavaşlamasına sebep olur.



Şekil 2. 11. Dalga etkisinin büyüyerek trafik düzenini bozması [14]

Şekil 2.11.'de 0 noktasındaki trafik düzenini etkileyen bir durum olduğunda zaman ilerledikçe bu etki 0 noktasından geriye ilerlemekte ve trafik düzeninde bozulmaya sebep olmaktadır.

2.4.7. Kavşakta İkilem Bölgesi Hesaplamaları

Kavşaklarda sinyal planı işlerken fazların değişim anlarında sürücüler ışıkta durma ya da geçme ikileminde kalabilirler. Bu sebeple sarı ve kırmızı ışık sürelerinin seçiminde güvenlik amaçlı bir süre bırakılır. Bu süreler hesaplanırken aşağıdaki formüller kullanılır;

$$y = t_r + \frac{V}{2a + 2gG} \quad (1)$$

$$AR = \frac{w + l}{V} \quad (2)$$

t_r : Sürücülerin reaksiyon zamanı(genellikle 1 s kabul edilir),

V : Belirlenen hız (m/s),

a: Araçların yavaşlama oranı (genellikle 3.048 m/s^2),

g: Yerçekimi sabiti (9.81 m/s^2),

G: Yaklaşım kolu eğimi,

AR (All red): Fazlar arası geçişlerde tüm fazlarda ortak olarak yanan kırmızı süresi (Kavşağın temizlenme süresi 6 saniyeyi geçmemelidir),

w: Gidilen yönün kesiştiği yolun yol genişliği (m),

l: Aracın uzunluğu (Ortalama 6.096 m) [15].

Örnek olarak 90 km/saat hız için sarı süresi şu şekilde bulunabilir;

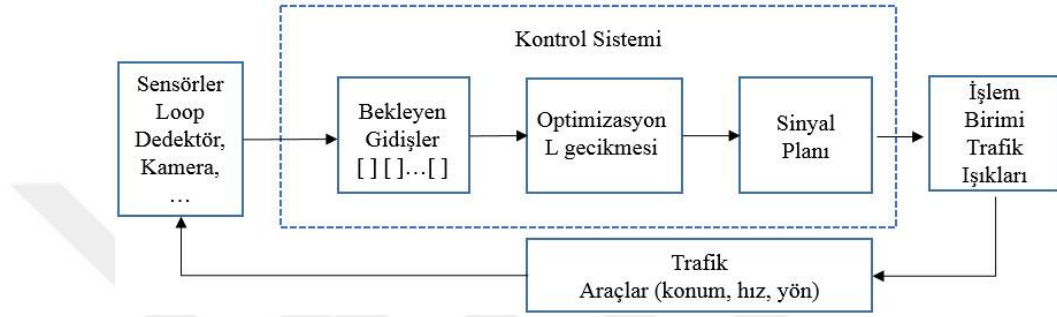
Sarı Süresi= $1 + [90 / (3.6 \times 2 [3.048 + 9.81 \times 0])] = 4.1 \text{ s}$ olarak bulunur.

2.4.8. Simülasyon

Bir sorunun ortadan kaldırılabilmesi için bulunan çözümün gerçekten işe yarayıp yaramadığını önceden deneyebilmek önemlidir. Bu sebeple farklı sorunları analiz edebilmek için geliştirilen simülasyonlar vardır. Simülatörler farklı fazlardaki trafik ışıklarının sürelerinin ve trafik yoğunluğunun rastgele değiştirilmesiyle oluşabilecek karmaşık problemlerin analiz edilmesinde sıklıkla kullanılan araçlardır. PTV Vissim, SIDRA, TransModeler, TRANSIMS, CORSIM, SimTraffic, AIMSUN, ARTIST, UTRAN gibi trafik simülatörleri kullanılarak sinyalizasyon sistemlerinde planlanan senaryoların simülasyonları gerçekleştirilir. Simülasyonlar, anayol, otoyol, toplu taşıma, yaya gibi çok çeşitli alanlarda kurulan senaryoların denenerek doğru bir sonuca ulaşılmasını sağlar. Tez çalışmasında, mevcut ve önerilen yeşil dalga planlarının simülasyon çalışmaları ve elde edilen verilere göre düzenleme işlemleri, PTV Vissim ile yapılmıştır. Vissim trafik modellemesi, mikro ölçekli olarak sürücülerin davranışlarına göre gerçekçi planlamaların oluşturulduğu bir simülatördür.

2.5. Işıklı İşaret Donanımlarının Sahip Olması Gereken Özellikler

Işıklı işaret donanımları, belirlenen planlar dâhilinde çalışan sinyal grupları, hız bilgilendirme sinyalleri, video mesaj sistemleri, yol aydınlatmaları, yol işaretçileri, ve kablosuz haberleşmeli solar sistemler olarak örneklendirilebilir. Sistem planlaması içinde karar verme yapıları ise Şekil 2.12.'deki gibidir.



Şekil 2. 12. Trafik optimizasyon kontrol sistemi [16]

2.6. Trafik Akış Optimizasyonu

İnsanların taşıma ya da hedefledikleri konuma varmak için motorlu veya motorsuz araçlarla kullandıkları güzergâhlarda araç trafiği günden güne artmaktadır. Trafik kontrolü ilk olarak 1890'lı yılların sonlarında gerekli görülmeye başlandı. 1910 yılında Chicago'da Earnest Serrine, ilk otomatik trafik kontrol sisteminin patentini aldı. Bu sistemde “STOP”(dur) ve “PROCEED”(ilerle) kelimelerinin ışıksız hali kullanılıyordu. [17].

Büyük şehirlerde yapılan istatistiksel araştırmalar yollardaki araç miktarının aşırı arttığını ancak yol kapasitesinin sınırlı olduğunu göstermiştir. Ulaşım altyapısının özellikle metropollerde yetersiz olması, oluşan trafik sıkışıklığından kaynaklanan vakit kaybı, hava kirliliği, verimsiz kullanılan yakıt gibi olumsuz sonuçları da beraberinde getirir. Her geçen gün trafiğe karışan araç sayısının artışı göz önüne alınarak artan talep doğrultusunda kapasiteyi arttırmaya yönelik farklı fikirler üzerinde optimizasyon çalışmaları devam etmektedir.

Trafik akış optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu aşağıdaki verilerin trafik ağındaki ölçümleriyle ifade edilebilir;

- Her aracın ortalama gecikme süresi,
- Maksimum bireysel gecikme,
- Durmakta olan araçların yüzdesel ifadesi,
- Ortalama bir yolculuk süresince yaşanan durma sayısı,
- Kavşakların veya sistemin genel olarak işleyişi,
- Sistem üzerinde ortalama ve maksimum seyahat süresi [1].

Birçok sektör trafik yönetimi üzerine odaklanarak mevcut stratejilerden daha etkili çözümler aramaktadır. Trafikteki araç yoğunluk talepleri doğrultusunda optimizasyon algoritmaları ile trafik ışık sinyallerinin optimum sürelerle kontrolü sağlanmaktadır.

Şekil 6’da analog ve dijital verilerin sensörlerden alınan bilgilere göre sinyal planlarını düzenleyip sinyal gruplarına ileterek trafiği düzenleyen kontrol sisteminin algoritması gösterilmektedir.

Trafik tıkanıklığı trafik ışıklarının sürelerinin ve faz sıralamasının uygun şekilde düzenlenmesiyle minimum seviyeye düşürülebilir. Yani trafik ışıkları yolların ve dolayısıyla trafik akışının kapasitesinin artırılmasına yardımcı olabilir. Günümüzde yapılan adaptif dönüşümler gelecek ihtiyaçlarına cevap veremeyebilir. Bu yüzden geleceğe yönelik çok sayıda değişkenleri içeren adaptif trafik kontrol sistemi optimizasyonları üzerine çalışma yapılması gerekmektedir. Van Katwijk tarafından geliştirilen Çok Faktörlü İleri Bakışlı Adaptif Trafik Kontrol Sistemi’nde (MALATACS- Multi-Agent Look-Ahead Traffic-Adaptive Control) sinyal planlarının optimizasyonu, kontrol sistemindeki dinamik programlayıcı tarafından yapılır. Trafik akışı trafikteki tüm araçların birbirleriyle etkileşimde olduğu çok fazla değişkene sahip bir sistem bütünüdür. Trafik akışı ve bununla ilgili problemler istatistiksel ve doğrusal olmayan dinamikler açısından incelenmiştir. Ulaşım sisteminde ilginç dinamik davranışlar bulunmuştur. Bir aracın durmasıyla arkasındaki araçları etkilemesi veya kaza gibi durumların meydana gelmesi gibi dinamik olarak her an gerçekleşebilecek ve trafik yoğunluğunu etkileyebilecek bu gibi dinamik olasılıklar planlamaya katılarak optimizasyon işlemi gerçekleştirilir.

2.7. Kavşaklarda Trafik Sinyalizasyon Planlaması

Kavşaklarda sinyalizasyon planlaması istatistiksel araç yoğunluk bilgisine göre yapılmaktadır. Belirlenen optimum devre süresine göre kavşaktaki her bir yön için yetecek kadar faz süreleri belirlenir. Günlük, haftalık, aylık ve yıllık olarak oluşturulan sinyal planlarıyla aynı zamanda adaptif sisteme uyum sağlayarak sensörlerden gelen bilgilere göre farklı planlar arası geçiş yapılabilir.

“Amerikalı William Phelps Fnou'nun, sinyal vericileri kullanarak trafiğin kontrolünde bilimsel bir yaklaşım getirmiş ilk kişi olduğu iddia edilmektedir. Fnou, ilk kez 1926'da İngiltere'de Wolverhampton'daki bir kavşakta 3 renkli bir sinyal verici cihaz kurmuştur.” [18].

2.8. Akıllı Trafik Kontrol Sistemleri

Akıllı trafik kontrolü modern ulaşım sisteminin önemli bir konusudur. Ancak, şehir içi ulaşım sisteminin büyük kısmında önceki merkezi yönetim metotları ile hem iletişim hem de sürelerin hesaplanmasında zorluklar yaşanmaktadır. Eğer ortak trafik koordinasyon kararlarını vermede, ağın tamamı için az sayıda gözlem varsa bağımsız kontrol zor olmaktadır [19]. Akıllı trafik sistemlerinin temelini oluşturan optimizasyon kontrol sistemleri iki türlü yapılmaktadır. Bunlar daha çok teorik çalışmalar olan statik optimizasyonlu sistemler ve çevresel verilere göre değişim gösterebilen dinamik optimizasyonlu sistemlerdir. Statik optimizasyonlu çalışmalara ilk örnek, 1992'de Foy, Benekohal ve Goldberg tarafından kavşaklarda optimum ya da optimuma yakın trafik sinyal zamanlaması geliştirmek için genetik algoritmanın bu problem üzerine uygulamasıdır. Amaçları daha az gecikmeyle kavşak geçişlerini kolaylaştırmaktı. Statik optimizasyona diğer bir örnek ise 2010'da Hua, Yunfeng ve Xiaoguang'ın kavşakların doygunluk noktasının altında bir sinyal süresi düzenlemesini amaçlayan bir optimizasyon modeli geliştirmeleridir. Bu kontrol sistemi ile izole sinyalizasyon kavşaklarda araçların ortalama gecikme, durma sıklığı ve kuyruk uzunluğu azaltılmaya çalışılmıştır. Bu optimizasyon için baskın olmayan sınıflandırılmalı genetik algoritma (NSGA-II) kullanılmıştır [20].

Dinamik optimizasyon sistemi olarak, Saka, Anandalingam ve Garger kavşaklarda optimum döngü ve yeşil faz uzunluklarının belirlenebilmesini sağlamak amacıyla iki yenilikçi olasılıklar içeren trafik sinyal optimizasyonu araştırdılar. Bu problemi çözmek için simülasyon ve dinamik programlamayı birlikte kullandılar. [21]

Şehir içi trafik yönetimi ve planlarında sinyal kontrol sistemi, trafik sıkışıklığı ve kaza gibi anlık darbe etkilerini azaltmada önemli rol oynamaktadır. Adaptif ve pasif olmak üzere iki tip kontrol yöntemi vardır. Aralarındaki temel fark, trafik durumundaki değişikliğe gerçek zamanlı olarak sinyal sürelerinde tepki gösterip gösteremeyeceğidir. İki sisteme de araç varlık algılayıcı dedektörler eklenerek performansları artırılabilir. Adaptif olmayan kontrol sistemlerinin etkinliğinin artırılması için yer altına yerleştirilen araç varlık algılayıcı sensör ile yapılan araç algılama buna örnek olarak verilebilir. Adaptif kontrol sistemlerinin geliştirilmesinde ise, bulanık mantık (fuzzy logic) yöntemleri kullanan, kendi kendine çözüm üretebilen sistemler ön plana çıkmaktadır. Bu sistemler kavşakta bir polis memuru var gibi trafiği düzene sokmaya çalışır. Bunu ise farklı sensörlerden gelen geri bildirimlerle sinyal sürelerini değiştirerek gerçekleştirir.

Araç varlık algılayıcı sensörlerin konumlandırılması gereken yerlere karar verilirken:

$I_D = (ZL + t_{nE}) \times V$ formülü kullanılır [22].

I_D : Dedektörün sinyal vericilere olan uzaklığı (m),

ZL : Birlikte hareket etmekte olan araç grubundan arkadan gelmekte olan aracın saniye olarak uzaklığıdır.(2-3 s),

t_{nE} : Verilen ZL zaman boşluğu değerinin geçilmesinden sonra sinyalizasyon sistemi tarafından diğer faza geçilmesine karar süresi,

V : Güzergâhta gidilmesi istenilen hız limiti (km/saat).

Çizelge 2. 2. Araç algılayıcı sensörler arası gerekli mesafeler [22]

V	ZL = 2 s olduğunda	ZL = 3 s olduğunda
	Dedektör Mesafesi	
30 km / saat	15 m	25 m
40 km / saat	20 m	35 m
50 km / saat	30 m	40 m
60 km / saat	35 m	50 m
70 km / saat	40 m	60 m

Bazı durumlarda tek dedektör ile sonuç alınamayabilir. Çünkü bazı araçlar ZL süresi içinde sisteme dâhil olsalar bile daha sonra yavaşlayabilir veya durabilir. Bu sebeple diğer dedektörün tam sinyal grubunun olduğu yere yerleştirilmesi gerekmektedir [22]. Çizelge 2.2.'de farklı araç hızları için dedektörlerin yerleştirilmesi gereken mesafeler verilmektedir. Araç algılayıcı dedektör yerine kamera ile görüntü işleme tekniği kullanımı, 150-200 m gibi daha uzak mesafelerden görüntü alınıp anlık olarak işlenebilmesi nedeniyle büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Kameralarla sinyal planlarına müdahalede bulunulabilmektedir. Ayrıca IR sensörlü radar, ultrasonik radar, kamera gibi ekipmanlarla kombine edilerek plaka tespit sistemi vasıtasıyla araçların trafik kurallarına uyup uymadıkları tespit edilebilmektedir.

2.9. Türkiye ve Dünyada Yeşil Dalga Sistemi

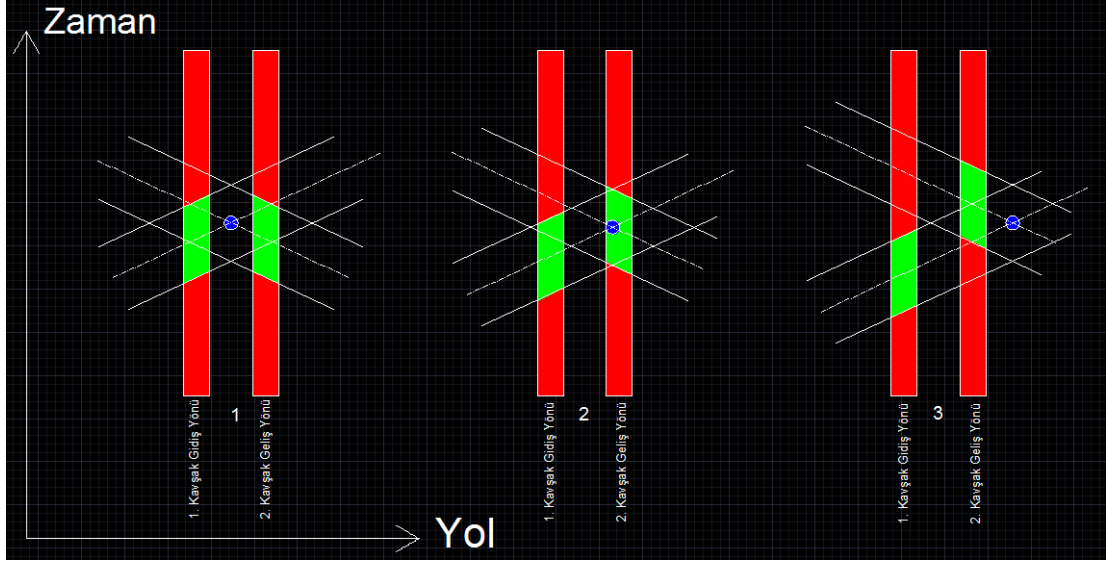
Yeşil dalga sistemi, belirli bir hızda ilerleyen araçların kavşak noktalarından durmadan geçebildikleri birbiriyle uyumlu kavşaklar ile gerçekleşir. Yeşil dalga planlaması yapılırken trafikte sadece bireysel motorlu araçları değil aynı zamanda toplu taşıma araçlarını, yaya ve bisiklet sürücülerini, itfaiye, polis, ambulans gibi trafikte olan tüm unsurları dikkate almak gerekmektedir. Yeşil dalga ile tüm trafik sisteminde yolculuk sürelerinin kısaltılması, yakıt tüketiminin, çevresel gürültü ve emisyon salınımının azaltılması hedeflenmektedir. Bunun için kavşaklarda tüm yönlerin yoğunlukları

hakkında istatistiksel bilgi sahibi olarak sinyal programları yapılması gerekir. Genel olarak yapılan araştırmalarda motorlu araçlar için tasarlanan yeşil dalga sistemlerinde uygulama yapılacak kavşaklar arası uzaklığın 750 - 1000 m gibi mesafelerde olması tavsiye edilmektedir. Mesafe uzadıkça araç grupları farklı hızlarda hareket ettiklerinde birbirinden kopacak ve kavşaklarda araçların birikmesine sebep olarak sonraki fazlarda gelecek olan araçların yavaşlamasına sebep olacaklardır. Böylece sistemin uygulanabilirliği azalacaktır. Yeşil dalgaya uymak isteyen araçların kavşaklarda belirlenen yeşil süresinin başı ve sonu arasında kalan alan içerisinde hareket etmeleri gerekir. Yol zaman grafiğinde yeşil dalga aralığındaki alanın ortasından çizilen doğrunun eğimi ile araçların gitmeleri gereken ortalama hız (V_i) bulunur. Uygulamanın başarılı olması için araçların takip etmeleri gereken hız aralığı şu şekilde olmalıdır;

$$0.85 \times \text{Azami } V \leq V_i \leq \text{Azami } V$$

Trafik'te yeşil dalganın uygulanabilmesi araçların kavşağa girme özellikleri, kavşak aralığı ve sinyal sürelerinin doğru ayarlanabilmesine bağlıdır. Yeşil dalga uygulanan güzergâhlarda ağır taşıtların çok olması, yüksek eğimli rampalar, dar açılı virajlar, zemindeki bozukluklar gibi yolun fiziksel özelliklerindeki olumsuzluklar araçların seyir hızının düşmesine sebep olur. Bu gibi problemler de süre hesaplaması yapılırken dikkate alınmaktadır. Her kavşakta farklı yönlerdeki trafik düzenlemesine ayrılan kısa faz süreleri toplamı, sistem periyoduna eşit olmalıdır.

Yeşil dalganın ön koşullarından biri de bütün kavşaklarda devre sürelerinin eşit olmasıdır. Bu yüzden devre sürelerindeki en küçük sapmaların bile giderilmesi gerekir. Hem gidiş hem de geliş yönleri için yeşil dalga uygulanan tasarımlar için ise aynı sinyal planı geğerli olursa, örneğin iki yöne de geğiş hakkı verildiğinde, kavşaktan dönmek isteyecek olan araçlar kavşakta birikecek, böylece kavşak içindeki araç yoğunluğu, yeşil dalganın kullanıldığı yolları dahi etkilemeye başlayacaktır. Ters durumda, yani iki yönde de kırmızı yandığında ise kavşak içleri asgari seviyeye inecektir. Kavşaklarda özellikle sola dönüşler için farklı bir faz planı yapılmak isteniyorsa gidiş ve gelişteki direkt yönleri faz sıralarının birbirinden uzaklaştırılması gerekir. Bu sayede kavşaktan sola dönüş faz sırasını direkt dönüşlerin arasında planlanmasıyla dönüş yapacak araçların daha az bekleyerek yollarına devam etmesi sağlanabilir.



Şekil 2.13. İki yönlü yollarda yeşil dalga koordinasyonu

Şekil 2.13.'te görüldüğü gibi iki yönde de yeşil dalga uygulanan araç kümesi aynı kavşakta karşılaşır ve dönüşlerin engelleneceği görülmektedir. Şekilde görülen mavi noktalar gidiş ve geliş yönündeki araçların karşılaşma ihtimallerinin en yüksek olduğu yerleri temsil etmektedir. 1. ve 2. çizimde araçlar kavşaklarda veya kavşaklara çok yakın noktalardan aynı anda geçmektedirler. Ancak zaman çizelgesinin biraz daha kaydırıldığı 3. Çizimde ise araçlar kavşaktan uzakta bir noktada maksimum sayıda karşılaşmaktadırlar.

Bir kavşaktan başka bir kavşağa hareket eden yeşil dalga araç gruplarının kavşağa yaklaşım hızlarından ± 5 km/saat sapma olmaması için LED'li veya ışısız hız levhaları kullanılır. Yeşil dalga uygulamalarında 40 km/saat altındaki hız tavsiyelerine sürücülerin uymadığı bu sebeple hız limitlerinin daha yukarı çekilmesi gerektiği görülmüştür [23].

Araçların Türkiye'de yerleşim yeri içi, yerleşim yeri dışı ve otoyollarda uyması gereken yasal hız sınırları Çizelge 2.3.'te gösterilmektedir.

Çizelge 2. 3. KGM tarafından yayınlanan Türkiye’de araçların uyması gereken yasal hız sınırları [24]

Araç Cinsi	Yerleşim Yeri	Yerleşim Yeri Dışı		Otoyollar
		Şehirler Arası Çift Yönlü Karayolu	Bölünmüş Yol	
Otomobil (M1), (M1G)	50	90	110	120
Minibüs (M2)	50	80	90	100
Otobüs (M2-M3)	50	80	90	100
Kamyonet (N1), (N1G)	50	80	85	95
Panelvan (N1)	50	85	100	110
Kamyon(N2 N3), Çekici(N2 N3)	50	80	85	90
Motosiklet (L3)	50	80	90	100
Motosiklet (L4, L5, L7)	50	70	80	80
Motorlu Bisiklet (L1, L2,L6), Motorsuz Bisiklet	30	45	45	Giremez
Tehlikeli madde taşıyan araçlar ve özel yük taşıma izin belgesi veya özel izin belgesi ile karayoluna çıkan araçlarda (Belgelerinde aksine bir hüküm yoksa)	30	50	50	60
Lastik tekerlekli traktörler	20	30	40	Giremez
Arızalı bir aracı çeken araçlar	20	20	30	40
İş makineleri	20	20	20	Yolun yapım, bakım veya işletilmesinden sorumlu kuruluştan izin alınmadan giremez.

Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı tarafından yayınlanan Ulusal Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS) Strateji Belgesi Eki Eylem Planının Geliştirme Raporunda 2014-2023 yılları arasındaki hedeflerin trafik ışık ve işaretlerinin, trafik akış verimliliğini geliştirecek şekilde düzenlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiş faaliyetler Çizelge 2.4.’te gösterilmektedir.

Çizelge 2. 4. 2014-2023 Ulusal Akıllı Ulaşım Sistemleri Strateji Belgesi Eki Eylem Planının 2014 Yılı Geliştirme Raporu [25]

Büyükşehir Belediyesi	KKC SAYISI	ARAÇ VARLIK ALGILAYICI SENSÖRLÜ KAVŞAK SAYISI	SABİT SÜRELİ YEŞİL DALGA BULUNAN KAVŞAK	ADAPTİF YEŞİL DALGA SİSTEMİ BULUNAN KAVŞAK
ANKARA	795	32	102	
BALIKESİR			3	
BURSA	285		70	
ERZURUM				2
KONYA			43	45
KAHRAMANMARAŞ			4	
İZMİR	39 Adet Adaptif			
SAKARYA	1 Adet Adaptif			

Mevcut yeşil dalga sisteminde kavşak kontrol cihazlarına yerleştirilen GPS alıcılar ile zaman senkronizasyonu sağlanır. Ardından kavşaklar arasında sürücülerin gitmeleri istenilen hıza göre yeşil süresi belirlenir ve teorik olarak sürücüler bu hıza uyduğunda tüm kavşaklardan yeşil ışıkta geçecekleri varsayılır.

2.10. Bir Yeşil Dalga Işık Dizisinin Araç Trafikine Etkisi

Sonsuz bir dizi kavşaktan geçen araç akışı göz önünde bulundursun ve her aracın diğer araçları geçmek için engellendiği kabul edilerek yolun küçük bir kısmında bir araç ve önündeki araç arasındaki mesafenin l_{min} olduğu varsayalım. Bir araç eğer önünde herhangi bir engel ve sinyal grubu yoksa V hızıyla gider. Yolda ilerlerken aradan geçen minimal zaman l_{min}/V kadar olur. Taşıt trafiğini tek boyutlu bir düzlemde

düşünelim. Yolun küçük bir kısmı minimum adım olarak düşünülürse, bu alan bir araçla doldurulur veya boş kalır. Bu alanda araçların çakışması engellenerek hariç tutulan hacim etkisi hesaba katılmış olur. Trafik ışıkları periyodik olarak M mesafesiyle konumlandırıldığında, düzlemdeki alanlar yukarıdan aşağıya $1, 2, 3, \dots, n, n+1, \dots$ olarak numaralandırılır.

Ayrıca araçlar da en öndekinden en arkadakine $1, 2, 3, \dots, i, i+1, \dots, N$ olarak numaralandırılır. Senkronize sistemde tüm trafik lambaları kırmızıdan yeşile $(1-S_p)T_s$, $(S_p T_s)$ olarak düzenlenen bir zaman periyodunda geçmektedir. $S_p T_s$ yeşil süresi ve $1-S_p T_s$ ise kırmızı süresidir (S_p : Yeşil süresinin devre süresine oranı, T_s : devre süresi). Yeşil dalga sisteminde birbirini takip eden iki kavşak belirli bir gecikme süresiyle fazlarını değiştirir. Trafik ışıklarının değişimi yeşil bir dalganın geriye doğru yayılması gibidir. Eğer bir araç kavşağa geldiğinde kırmızı ışık yanıyorsa durur ve yeşil yanınca geçer fakat bir araç kavşağa geldiğinde yeşil yanıyorsa durmadan aynı hızla geçer.

i aracının nM bölgesindeki trafik ışığından hemen sonra $nM+1$ bölgesine ulaştığını varsayalım. i aracının ulaşma süresi ($t(i, nM+1)$) şu şekilde bulunur:

$$t(i, nM+1) = t(i, nM) + l_{\min}/V + (r(i, nM) - t(i, nM)) \times H(t(i, nM) + n t_{\text{offset}} - (\text{int}((t(i, nM) + n t_{\text{offset}})/t_s) t_s) - S_p t_s) \quad (1)$$

$$r(i, nM) = (\text{int}((t(i, nM) + n t_{\text{offset}})/t_s) + 1) \cdot t_s - n t_{\text{offset}} \quad (2)$$

$$t(i, nM+1) = \max [t(i, nM + 1), t(i-1, nM+2)] \quad [26]$$

$H(T)$ heaviside fonksiyonudur. $T \geq 0$ iken $H(T)=1$ ve $T < 0$ iken $H(T)=0$ dir. $H(T)=1$ iken trafik lambası kırmızıdır.

T, R sembolleri genel denklem tanımlamalarında kullanılırken t, r sembolleri ise belirlenen aralıklarda yapılan işlemler için kullanılmıştır. Denklemlerde verilen $\text{int}(\text{integer-tamsayı})$ ifadesi sayının yuvarlatılarak bir tam sayı yapılacağını belirtir.

Eğer $H(T)=0$ ise lamba yeşildir. $r(i, nM)$ kırmızıdan yeşile geçme süresidir. İlk denklemin üçüncü ifadesi ($r(i, nM) - t(i, nM)$), nM bölgesindeki ışık kırmızı ise aracın burada durduğu süredir. Eğer i aracı $i-1$ aracına ulaşırsa geçmez.

2. denklemde geçilemeyen durumlar için eşitlik verilmiştir. Herhangi bir sinyal yoksa i aracının $nM + m$ ($1 < m \leq M$)'e gelmesi için zaman;

$$t(i, nM + m) = t(i, nM + m - 1) + l_{min}/V \quad (3)$$

$$t(i, nM + m) = \max[t(i, nM + m), t(i - 1, nM + m + 1)]$$

3. denklemde yer alan ilk eşitlikte bir araç diğer araçlar tarafından engellenmiyorsa birim zamanda l_{min}/V hareketiyle gerçekleşen yer değiştirme süresi verilir. 3. denklemin ikinci eşitliğinde geçişin olmadığı durumu gösterir. Araç ilerledikçe iterasyon sayısı birer birer artar. İterasyonlar yoldaki ilerleme durumlarını ifade eder. Dolayısıyla varış zamanı (1)-(3) denklemleri yinelenerek hesaplanabilir. l_{min}/V zamanını referans V_0 hızına bölerek boyutsuz varış zamanı elde edilir.

$$T(i, nM + 1) = T(i, nM) + V_0/V + (R(i, nM) - T(i, nM)) \quad (4)$$

$$\times H(T(i, nM) + nT_{offset} - (\text{int}((T(i, nM) + nT_{offset})/T_s)T_s) - S_p T_s)$$

$$R(i, nM) = (\text{int}((T(i, nM) + nT_{offset})/T_s) + 1) \cdot T_s - nT_{offset} \quad (5)$$

$$T(i, nM + 1) = \max[T(i, nM + 1), T(i - 1, nM + 2)] \quad (6)$$

$$T(i, nM + m) = T(i, nM + m - 1) + \frac{V_0}{V} \quad 1 < m \leq M, \quad (7)$$

$$T(i, nM + m) = \max[T(i, nM + m), T(i - 1, nM + m + 1)]$$

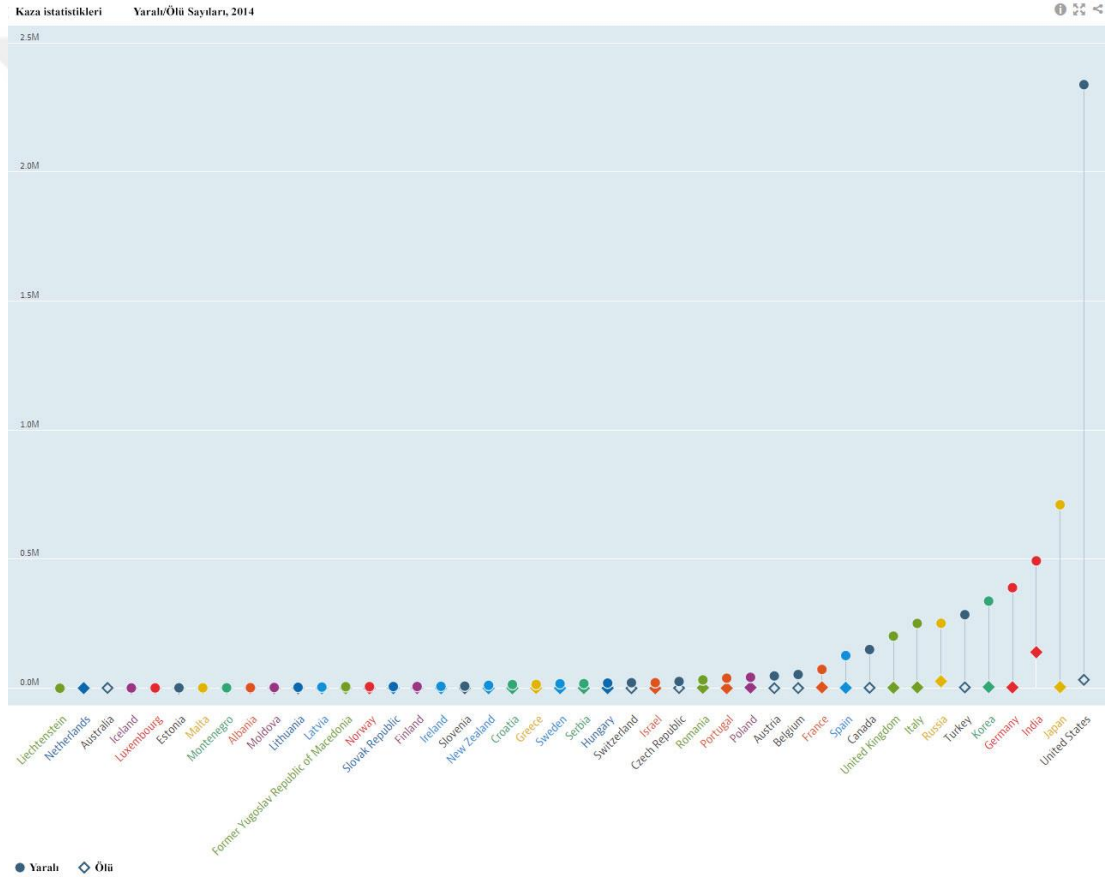
$$T(i, n') = \frac{t(n')V_0}{l_{min}}, \quad R(n') = \frac{r(n')V_0}{l_{min}} \quad (8)$$

$$T_s = \frac{t_s V_0}{l_{min}}, \quad T_{offset} = \frac{t_{offset} V_0}{l_{min}} \quad (9)$$

Genellikle iki trafik ışığı arasındaki mesafe veya aracın ortalama hızı kavşaktan kavşağa değişir. Yeşil dalga sistemlerinde mesafe ve hızdaki değişimi hesaba katmak gerekmektedir [26].

2.11. Araç Yoğunluğuna Bağlı Olarak Türkiye ve Dünya’da Kaza İstatistikleri

Trafik kazalarından dünya genelinde yıllık yaklaşık 518 milyar \$ maddi kayıpta oluşmaktadır [27]. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) tarafından Emniyet Genel Müdürlüğü (EGM) ve Jandarma Genel Komutanlığından (JGnK) edinilen verilerine göre 2015 yılında Türkiye’de gerçekleşen trafik kazalarında 7530 kişi hayatını kaybederken ölümlü kazaların %66.8’i gündüz, %30.2’si gece ve %3’ü alacakaranlıkta olmuştur [28]. OECD tarafından yayınlanan 2014 yılı trafik kazaları yaralı ve ölü sayılarıyla ilgili 34 ülkeye ait istatistik sonuçları Şekil 2.14.’te verilmiştir.

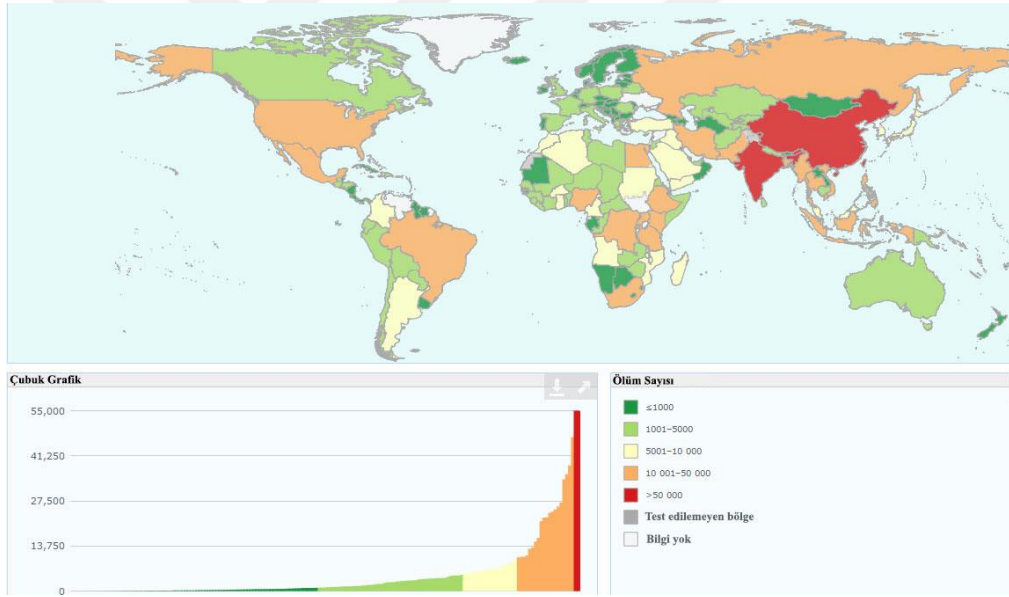


Şekil 2. 14. 2014 yılında trafik kazaları ölüm ve yaralanma istatistikleri [29]

ASIRT(Association For Safe International Road Travel) istatistik verilerine göre trafik kazalarında dünyada yılda yaklaşık 1,3 milyon ve günde ise ortalama 3287 insan ölmekte, 20-50 milyon insan ise yaralanmakta veya sakat kalmaktadır. Ölümün yarısından fazlası 15-44 yaş aralığında meydana gelmektedir. İnsanların hayatlarını kaybetmesinin sebebi olarak şu an 9. sırada bulunan trafik kazalarının, eğer önlemler alınmazsa 2030 yılında 5. sıraya kadar yükseleceği öngörülmektedir [30].

Dünya Sağlık Örgütü (WHO) tarafından 2013 yılı dünyada gerçekleşen trafik kazalarındaki ölümlerle ilgili yayınlanan harita Şekil 2.15.'te gösterilmektedir.

Birleşmiş Milletler (BM) tarafından 2011-2020 yılları arasında karayolu güvenliği eylem planında “Karayolu kazalarından kaynaklanan ölümlerin, 2020 yılına kadar küresel düzeyde önce sabitlenmesi, daha sonra azaltılması” amaçlanmıştır.



Şekil 2. 15. 2013 yılında trafik kazaları ölüm istatistikleri [31]

Türkiye’de ise BM hedefleri doğrultusunda 13 Temmuz 2010 tarihli resmi gazetede yayımlanan ve yürürlüğe giren 6001 sayılı Karayolları Genel Müdürlüğü’nün (KGM) teşkilat ve görevleri hakkındaki kanun ile Trafik Güvenliği Dairesi Başkanlığı kurulmuştur [32].

3. KILAVUZLU YEŞİL DALGA SİSTEMİ VE TRAFİK ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Kılavuzlu yeşil dalga sistemi trafiğin sadece kavşak noktalarındaki tek bir noktada trafik ışıklarıyla kontrolünün yeterli bulunmaması sonucu ortaya çıkmış yeni bir fikirdir. Bu çalışmaya esas fikir ilk olarak 2008 yılında Kırıkkale Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü öğrencisiyken Cerem Cem Aslan tarafından ortaya atılmıştır. Aslan'ın fikir sahibi olduğunun belgesi de 2012 yılı sonundaki Tekno Girişim Sermayesi Desteği başvurusudur. 2014 yılında İtalya'da araçların yakıt tüketimini azaltmak için yapılan benzer bir proje çalışması başlatıldığının duyulmasıyla bu fikrin ar-ge çalışmasına önem verilerek bu tez çalışma konusu seçilmiştir [33]. Bu sistem ile trafik hızı ve düzeni sürekli olarak kontrol edilerek sürücüler anlık olarak uyarılmaktadır. Kavşaklar arasındaki yollar üzerinde gidilmesi gereken hız bilgisi, yol üzerindeki kırmızı ve yeşil LED'li işaretçilerle sürücülere bildirilir. Mevcut yöntemlerdeki gibi yol üzerindeki araç yoğunluğu bilgisi alınarak farklı sinyal planlarına göre kılavuz hızları ayarlanırsa yöntemin etkinliği artırılmış olur. Kılavuz hız bilgisi kavşağa giren tüm yönler için düzenlenmektedir. Oluşturulan kılavuz hızları araç yoğunluğuna göre her yön için değişiklik gösterebilir. Bu şekilde aktif kontrol sistemleriyle uyumlu çalışan sistem sayesinde sürücüler, trafik akışından bağımsız olarak değil de trafik düzeninin sağlanması amacıyla belirli hedefler doğrultusunda ilerleyeceklerdir. Sinyal planı dâhilinde yeşil dalga koridoruna alınacak olan araç sayısı, süre hesabıyla belirlenmektedir. İstatistiksel verilerden elde edilen yoğunluk bilgisi ile veya anlık olarak elde edilen sayım sonuç bilgilerinin oluşturduğu istatistiksel bilgilere göre optimum devre süresi belirlenir. Bu süre yeşil dalga uygulanacak olan tüm kavşak noktalarında aynı olmalı ve zaman senkronizasyonu GPS ile sağlanmalıdır. Belirlenen devre süresi boyunca kavşağın kol sayısına göre süreler her yön için gerekli oranlarda bölünür. Elde edilen süreler ile araçlar tek bir noktada bekletilir ve belirli aralıklarla sisteme dâhil edilir. Belirlenen yeşil dalga koridoruna girebilen araç kümesi yol üzerindeki LED'li kılavuza uyararak direkt istikamette gittiği takdirde duraksamadan yoluna devam edebilecektir. Dönüşlerde ise sola dönüş yapan araçlar kesişen trafiği bekledikten sonra arkasından gelmekte olan araç kümesinden daha önce kalkış yaparak girdiği yolun kılavuz hızını yakaladığında

arkasından gelmekte olan araç kümesine dâhil olacaktır. Sağa dönüş yapan araçlar ise yine arkalarından gelmekte olan kılavuzu güvenlik mesafesine kadar bekleyecek ve kalkışlarını yapıp kılavuzla ilerleyen araç kümesine dâhil olacaklardır. Kılavuz uygulamasının trafik akışına, gecikme sürelerine, emisyon oranlarına ve yakıt tüketimine etkisi Bölüm 4.1.'de yer alan simülasyon sonuçları kısmında kılavuzsuz yeşil dalga sistemiyle karşılaştırılarak sunulmuştur.

3.1. Kılavuzlu Yeşil Dalga Fikrinin Görsel Simülasyon Ortamında 3D Olarak Modellemesi

Bu tez çalışmasında, kılavuzlu yeşil dalga sisteminin uygulanabilirliğinin ve trafik düzenine katkısının incelenebilmesi için simülasyon ortamında deneme işlemleri yapılmıştır.



Şekil 3. 1. PTV Vissim ile 3D trafik sinyalizasyon modellemesi [34]

Sistemin 3D olarak modellenmesinde PTV Vissim trafik simülasyon programı kullanılmıştır. Vissim modeli ve yazılımı Fellendorf ve Vortisch tarafından 2001'de yapılmıştır. Araçların bireysel davranışlarına dayalı mikro ölçekli bir trafik simülatörüdür. Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi yaya ve araçlar için tasarlanan farklı düzenlemelerin simülasyonu yapılabilmektedir. Vissim ile yeni rotalar tanımlanabilir veya ölçekli olarak harita üzerinden var olan yollar kullanılarak trafik modellemesi

yapılabilir. Mikro ölçekli modelleme ile araçların, yayaların gidecekleri yönler ve hızları, hangi yönden ne kadar aracın hangi yönlere ne oranda gideceği, araç tipi seçimi, araçların ivme-hız düzenlemesi, otobüs durak noktaları, sinyal planları, belirlenen aralıklarda süre, hız, emisyon ölçümlerinin yapılabilmesi gibi trafikteki pek çok bilgi detaylarla elde edilir. Simülatördeki araçların davranışları Wiedemann araç takip modellerine göre gerçekleşmektedir.

3.1.1. Wiedemann 1974 Araçların Birbirlerini İzlemesi

Vissim'de temel olarak 1974'te Wiedemann tarafından geliştirilen psikolojik ve fiziksel sürücü davranışlarını kullanılmaktadır. Her bir sürücü ve aracı karakterize eden özellikler üç kategoriye ayrılabilir. Aracın teknik özellikleri, sürücü - araç ünitelerinin davranışı ve karşılıklı bağımlılığı olarak belirtilebilir.

○ Aracın Teknik Özellikleri

Simülasyon ortamında oluşturulan planların denemelerinin yapılabilmesi için araçların uzunluk, azami hız, potansiyel hızlanma, ağıdaki gerçek konum, gerçek hız ve ivme gibi özellikleri düzenlenebilir, farklı senaryolara göre sonuçlar gözlemlenebilir.

○ Sürücü ve Diğer Araçların Davranışı

Sürücünün psiko-fiziksel duyarlılık eşikleri, agresif sürüş, tahmin etme kabiliyeti, sürücü belleği, mevcut hız ve sürücünün istediği hıza bağlı hızlanma ivmesi gibi kavramların birleşimidir.

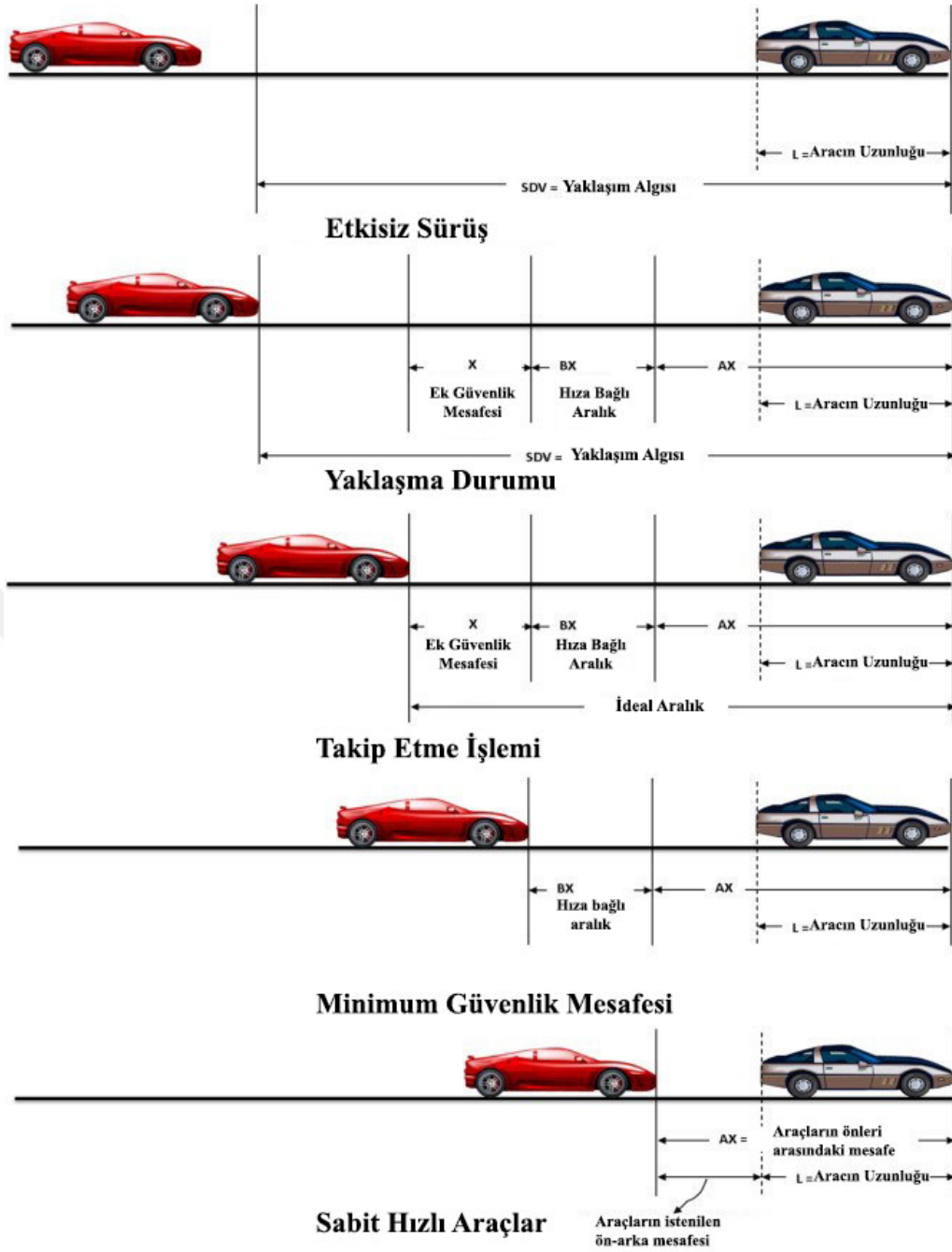
○ Sürücü ve Diğer Araçların Karşılıklı Bağımlılığı

Sürücünün gitmekte olduğu şeritte, önünde gitmekte olan takip ettiği araçların referans noktaları, bulunduğu güzergâh ve sonraki kavşağın referans bilgisi, bir sonraki trafik sinyalinin referansı araçlar arasındaki bağımlılığı etkileyen unsurlardır. Bu modelin temeli, yavaş hareket eden bir aracın bireysel algı eşiğine ulaşmasıyla arkasından gelen daha hızlı hareket eden bir araç sürücüsünün yavaşlamaya başladığı noktalar arasındaki ilişkidir. Arkadaki araç, önündeki aracın hızını tam olarak

belirleyemediğinden, başka bir algı eşiğine ulaştıktan sonra önündeki aracın kendi hızından fazla olmaya başlama anına kadar önündeki aracın hızının altına düşecektir. Bu, yinelemeli bir ivme ve yavaşlama işlemi ile sonuçlanır.

Wiedemann modeli, Şekil 3.2.'deki gibi bir sürücünün dört sürüş modundan birinde olabileceğini temel almaktadır:

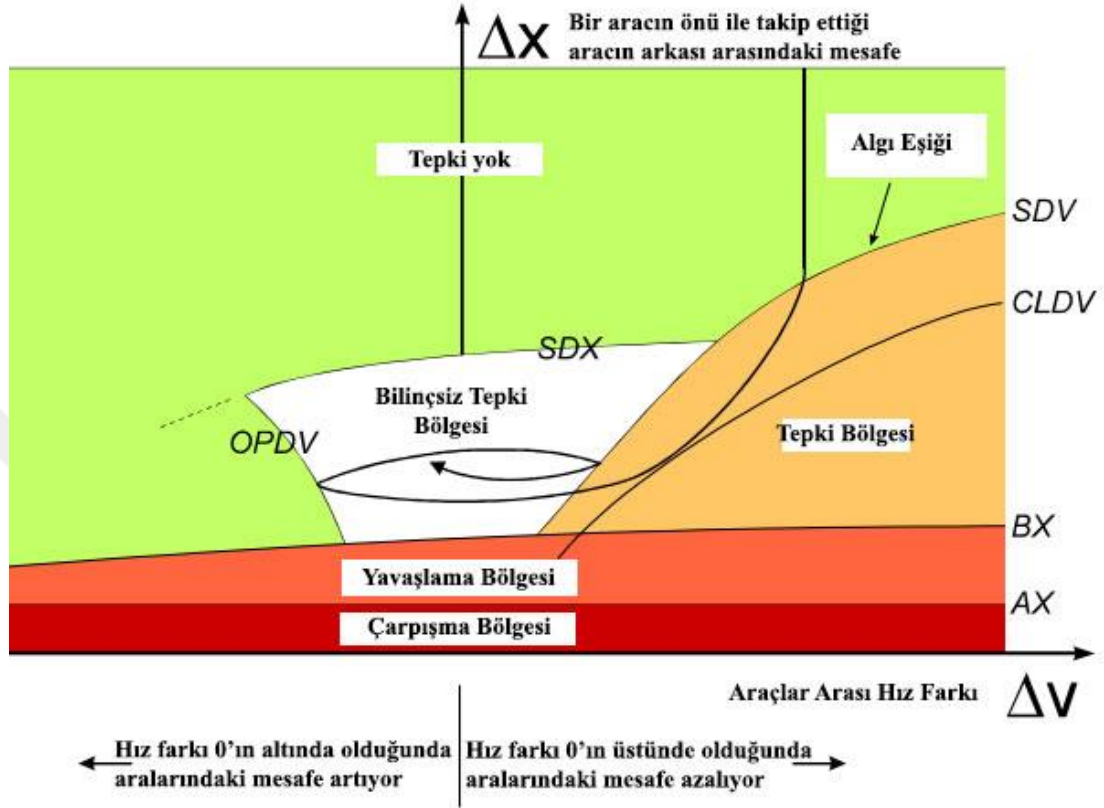
- **Serbest Sürüş:** Bu modda sürücü, arzuladığı belirli bir hıza ulaşmayı ve bu hızda ilerlemeyi hedefler. Gerçekte serbest sürüş hızı sabit tutulamaz, ancak istenilen hıza yaklaşılır.
- **Yaklaşma:** Sürücünün hızını, önündeki aracın daha düşük olan hızına göre uyarlaması sürecidir. Yaklaşan sürücü, istenilen araçlar arası emniyetli mesafeye ulaştığı anda iki aracın hız farkının sıfır olması için yavaşlar.
- **Takip:** Sürücü, önündeki arabayı hızlanma veya yavaşlama olmadan izler. Emniyet mesafesini sabit tutar ve hız farkı sıfıra yaklaşır.
- **Frenleme:** Öndeki araba ile mesafe istenilen emniyet değerinin altına düşerse, yavaşlama uygulanır. Bu durum, öndeki arabanın hızını ani bir şekilde değiştirmesi veya üçüncü bir arabanın takip ettiği şeridini, gözlenen sürücünün şeridine geçerek değiştirirse ortaya çıkabilir.



Şekil 3. 2. Araç takip aşamaları [35]

Sürücü, araçlar arasındaki hız farkı ve mesafede belirli bir sınıra ulaşır ulaşmaz, bir moddan diğerine geçebilir. Örneğin, küçük bir hız farkı ancak küçük mesafelerde gerçekleştirilebilir. Ancak büyük hız farklılıkları olduğunda önündeki araca yaklaşan sürücüler daha önce tepki vermeye zorlar.

Araçlar arası hız farklılıklarını algılama ve mesafeleri tahmin etme, araç yoğunluğunun yanı sıra arzulanan hızlar ve güvenlik mesafeleri arasında değişir.



Şekil 3.3.'te bir aracın farklı eşik noktalarına girdiğinde sergilediği davranış ok işaretiyle gösterilmektedir. Ok işareti yukarıdan aşağıya doğru takip edildiğinde söz konusu aracın önündeki bir araca yaklaştığını algıladığı (iki araç arasındaki mesafe olan ΔX , söz konusu araç ile aradaki hız farkının artması yani pozitif bir ΔV olması sebebiyle azalıyor) ve Yaklaşım Algı Eşiği (SDV)'ne girerek hızını düşürmeye başladığı gösterilmektedir. Araç daha sonra Tepki Eşiği (CLDV)'ne yaklaşır ve yavaşlama ivmesini daha da arttırarak önündeki araçla olan mesafeyi arttırmaya çalışır. Araç daha sonra Hız Açılma Farkı Eşiği (OPDV), Maksimum Takip Mesafesi Eşiği (SDX) ve SDV eşikleri tarafından sınırlandırıldığı sürece önündeki otomobili takip eden bölümde devam eder.

OPDV eğrisi, esas olarak bilinçsiz reaksiyon bölgesine bir sınırdır. OPDV, sürücünün önündeki araçla arasındaki mesafenin zaman içinde arttığını fark ettiği eşik noktasını temsil eder. Araçlar arasındaki mesafe arttığında, sürücü istediği ilerlemeyi sağlamak için hızını arttırır. [37].

Trafik planlayıcıları, trafik plan strateji geliştirmelerinde sıklıkla simülasyon programlarını kullanmaktadırlar. Vissim'in sahip olduğu grafik arayüzü ile yol, kavşak, bağlantı gibi trafik düzenlemeleri rahatlıkla yapılabilmektedir [38].

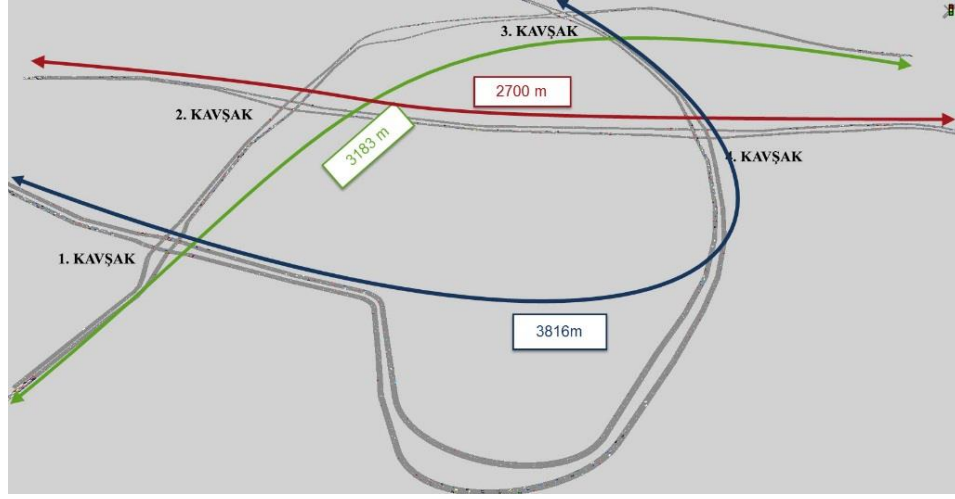
3.2. Kılavuzlu Yeşil Dalga Sistemi Simülasyon Düzenlemeleri

Bu tez çalışmasında, sinyalizasyon durumunu gözlemek için sıklıkla kullanılan simülasyon programlarından PTV Vissim ile örnek bir simülasyon ortamı oluşturularak Wiedemann 74 metodu kullanılmıştır. Bu metot sayesinde araçlar önlerindeki 4 aracı izleyerek hızlarını düzenlemektedirler.

Simülasyon ortamında 4 adet kavşak kullanılmıştır. Araçlar kavşaklarda toplam 10 farklı yöne gidebilecek şekilde güzergâhlar belirlenerek kılavuz hızı 40 – 90 km/saat arasında belirlenmiştir.

Kılavuzlu yeşil dalga sisteminin simülasyon ortamında incelenebilmesi için öncelikle harita üzerinde 4 kavşaklı bir bölge seçilerek yol çizimleri 3 şeritli olarak yapılmıştır. Her güzergâh için saatlik araç girişleri 1800-2100 araç/saat aralığında seçilerek buna uygun devre süresi 90 s ve kırmızı güvenlik süresi 5 s, sarı süresi 3 s olarak belirlendi. Ardından tüm yolların üzerine yaklaşık 50 m aralıklarla sürücülere kılavuz olacak sinyal vericiler yerleştirildi.

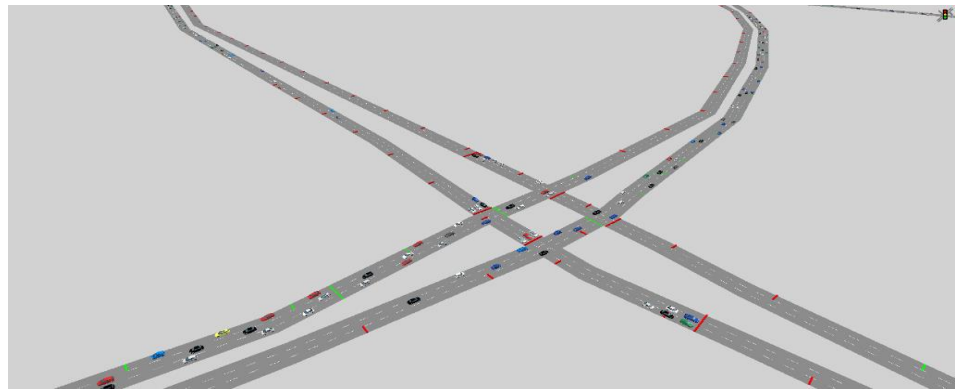
Şekil 3.4. ve Şekil 3.5. a ve b'de simülasyonu yapılan 4 kavşak noktası, kavşaklardaki trafik sinyal vericileri ve kılavuz sinyal vericileri görülmektedir.



Şekil 3. 4. Dört kavşak noktasına kılavuzlu yeşil dalga sisteminin uygulaması



(a)

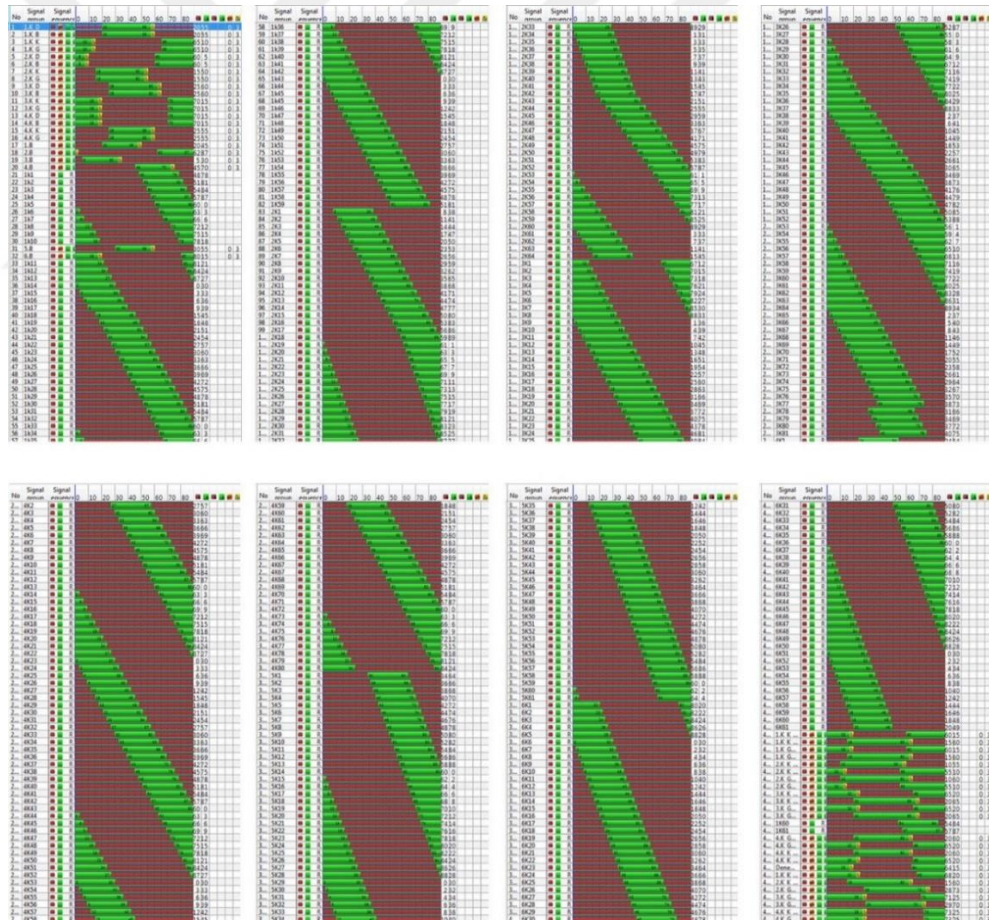


(b)

Şekil 3. 5. Simülasyonun 3 boyutlu görüntüleri

Simülasyon ortamında belirlenen faz sürelerine göre kavşak noktalarında paralel olan yönlere geçiş hakkı aynı anda verilerek her yönden gelen maksimum araç geçişine imkân sağlanmaktadır. Kılavuz sinyal vericilerinin süresi ise kavşakta verilen faz süresi kadar olmakta ve kılavuz hızına göre yeşil sinyal ilerlemektedir. Sürücüler bu kılavuzu izleyerek hızlarını düzenleyip, kılavuzun arka ucundaki kırmızı sinyale kadar gecikmemek için hızlarını arttırır veya ön ucundaki kırmızı sinyale kadar hızlı gitmemek için hızlarını azaltırlar. Bu şekilde oluşan kılavuzlu araç kümesi bir sonraki kavşak noktasından yine duraksamadan geçebilmektedir.

4 kavşaklı bu simülasyon ortamı için tasarlanan kılavuzlu yeşil dalga sisteminin sinyal planı Şekil 3.6.'da görülmektedir. Verilen bu sinyal planı EK-1'de büyütülmüş olarak verilmiştir.



Şekil 3. 6. Kılavuzlu ve kılavuzsuz yeşil dalga sistemlerinde kullanılan sinyal planı

3.3. Kılavuzlu Yeşil Dalga Sisteminin Elektronik Tasarımı

Kılavuzlu yeşil dalga sistemin gerçeğe uyarlanması amacıyla yapılması gereken elektronik çalışmalar şu şekilde özetlenebilir:

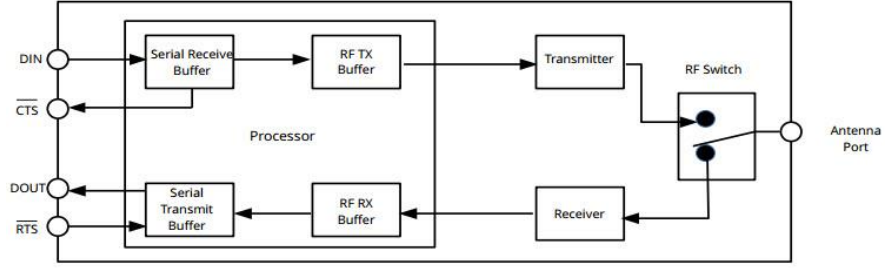
Geleneksel yeşil dalga yönteminde statik ya da adaptif yöntemler kullanılır. Adaptif yöntemde kavşakların yollardaki sensörlerle (loop, kamera vb.) iletişimi kablolu veya farklı güvenlik önlemleri olarak kablosuz sistemlerle (GPRS, 3G, 4G, GPS, RFID, ...) gerçekleştirilir. Statik sistemlerde ise sadece GPS kullanılarak zaman senkronizasyonu ile gerçekleştirilmektedir. Kılavuzlu yeşil dalga sistemi için GPS ve GPRS yapıları kullanılmalıdır. Sinyal planındaki değişikliklerin hızlı bir şekilde kılavuz işaretçilerine yayılabilmesi için ilk gönderilen ve alınan verinin yüksek veri aktarım hızına sahip 3G, 4G gibi teknolojilerle yapılması gerekmektedir. Bu şekilde kavşaklardaki sinyalizasyon durumu ve kılavuz işaretçilerinin anlık durumları internet üzerinden gerekli güvenlik önlemleri alınarak uzaktaki herhangi bir noktadan da izlenebilecektir. Kavşaklar arasındaki mesafe düşünülerek yoldaki şeritlere konumlandırılması düşünülen LED'li işaretçiler, kavşağın sinyal programına göre kırmızı ve yeşil renklerle yol üzerinde akan birer ışık dizisi oluşturacaktır. Sürücülerin dikkatini dağıtmayacak şekilde yola konumlandırılacak bu işaretçiler birbirleriyle ve kavşak kontrol cihazı ile anlık olarak haberleşme halinde olacaklardır. Bu şekilde senkronizasyon sağlanarak sürelerde kayma yaşanmayacak ve sistem kararlı çalışacaktır. İşaretçilerin ne kadar aralıklarla yerleştirileceğine karar verilirken birbirleriyle haberleşme araçlarının planlanması unutulmamalıdır. Şekil 3.7.'de kılavuzlu sinyal verici yol işaretçilerinin kesikli şerit çizgilerinin baş ve sonlarına yerleştirildiği bir görsel verilmiştir.



Şekil 3. 7. Kılavuzlu yeşil dalga görseli

Küçük modüllerin ana sistemlere bağlandığı bu gibi sistemlerde genellikle bir veri ağacı oluşturulur. Yani uzak iki uzak nokta arasında aktarılmak istenen veriler, aradaki diğer modüller üzerinden aktarılır. Örgü ağı (mesh network) denilen bu yapıda veriler hedefe ulaşana kadar modülden modüle geçerek ilerler. Bunu ise basit haberleşme yöntemlerinden tanınan ve sıklıkla kullanılan bluetooth, sigfox, 6LoWPAN, zigbee, wi-fi gibi haberleşme protokolleri ile yapabiliriz. RFID ile ise belirli mesafelere kadar ISM bandı gibi güvenlik önlemleri alınarak veri aktarımı yapılabilir.

ZigBee, IEEE 802.15.4 temelli olan düşük güç tüketimli, düşük maliyetli, düşük veri hızlı, wireless mesh network yapıları için açık genel bir standarttır. 300'den fazla şirket tarafından geliştirilmektedir. ZigBee ağları, kişisel alan ağı (PAN ID) olarak adlandırılır. ZigBee noktadan noktaya, noktadan çok noktaya örgü şeklinde çoklu ağ topolojilerini destekler. Ağırlıklı olarak 2,4 – 2,5 ghz güvenlik amaçlı ISM frekansında RF yoluyla 250 kbps hızında veriler aktarılmaktadır. Veriler UART protokolü üzerinden, RF kullanılarak tampon(buffer) belleklere gönderilir ve alınır. Şekil 3.8.'de ZigBee geliştirici bir firmanın ürünü olan XBee modülün iç yapısı verilmiştir.



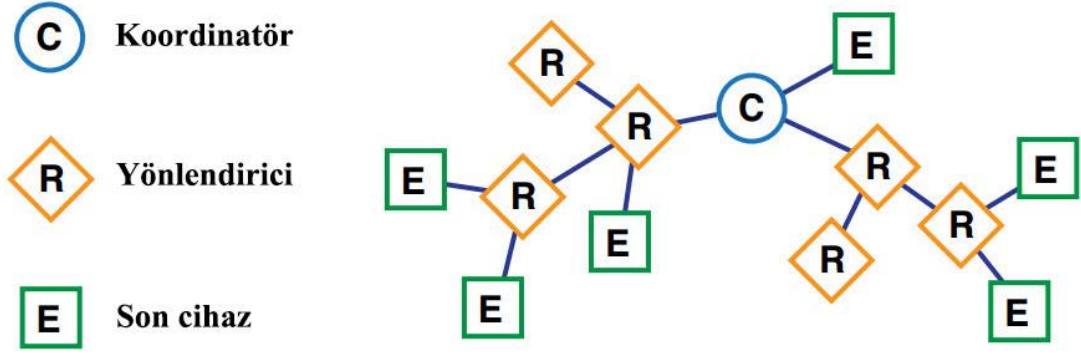
Şekil 3. 8. XBee iç yapısı [39]

XBee modüller arasında 90 metre'ye kadar haberleşme sağlanabilir. Daha düşük frekanslı 868-900 Mhz gibi ürünlerde aradaki mesafe daha da artmaktadır. 2.1-3.6V çalışma gerilimi ve hızlı veri aktarımında 45mA normal modda 33mA veri alırken ise hızlı modda 31mA normal modda 28mA'dır. Verilerin şifrelenmesi 128 bit AES metodu ile yapılmaktadır. Şekil 3.9.'da bir Xbee modülün görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3. 9. Xbee modül [39]

XBee haberleşmesinde kontrol noktası KKC olacaktır. Her bir modülün kendi 16 bit ID'si (Tanımlama Bilgisi) olduğundan KKC tarafından süre bilgisi XBee'nin veri dağıtım ve kontrol birimine kablolu veya kablosuz aktarılarak adresleme yapılması gerekmektedir. Adresleme yapıldıktan sonra yönlendirici modüller ile en uçtaki modüle kavşaktaki kırmızı ve yeşil süre bilgisi aktarılacaktır. Veri aktarılırken senkronizasyonun bozulmaması amacıyla belirli aralıklarla veriler gönderilecektir. Bu ise Şekil 3.10.'da görüldüğü gibi yönlendirici (router) olarak adlandırılan kontrolörden alınan verilerin son alıcı noktaya kadar doğru bir şekilde aktarılmasını sağlayan yönlendiricilerle gerçekleşmektedir.



Şekil 3. 10. Örgü ağı yapısı [40]

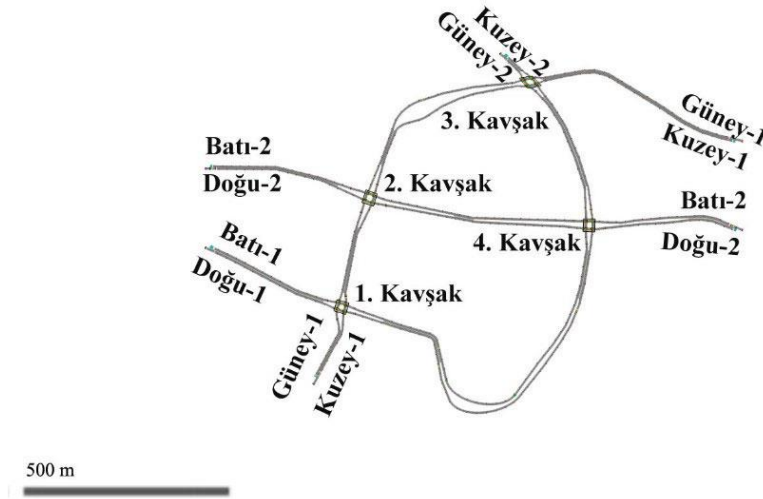
İşaretçilerin hem LED hem de haberleşme için harcayacağı enerji güneş pilleri ile karşılanabilir. Bu şekilde kurulacak olan kılavuz sistemi için şebeke elektriğinden bağımsız olarak çalışma sağlanabilecektir. AC - DC dönüşümü yapılmadan sistemde elektriksel enerjinin güneş pilleriyle üretilip Li-ion pillere depolanarak kullanılması planlanmaktadır. Şekil 3.11.'de kılavuzlu yeşil dalga sisteminde kullanılacak işaretçi örneği gösterilmektedir.



Şekil 3. 11. Kırmızı ve yeşil LED'li solar alüminyum işaretçi

4. KILAVUZLU YEŞİL DALGA SİMÜLASYON SONUÇLARI VE TRAFİK - YOL GÜVENLİĞİNE ETKİSİ

Kılavuzlu ve kılavuzsuz yeşil dalga sistemlerinin karşılaştırılması amacıyla Şekil 4.1.'de verilen 4 kavşağa ait simülasyonlarda araçlar Kuzey-1, Kuzey-2, Güney-1, Güney-2, Doğu-1, Doğu-2 ve Batı-2 olarak isimlendirilen rotalarda hareket ettirilmektedirler. Kavşaklardaki sinyal periyodu 90 s olarak ve her yön için kırmızı güvenlik süresi 5 s, sarı süresi 3 s ve yeşil süresi 35 s ve yeşil flaş süresi 2 s olarak belirlenmiştir. Kılavuzlu ve kılavuzsuz yeşil dalga ile yapılan sadece direkt yön ve hem direkt hem dönüşlü yönler için simülasyon çalışmalarının video görüntüleri bir video yükleme internet sitesi içeriğine eklenmiştir [43].



Şekil 4. 1. Simülasyondaki araç güzergâhları

Harekete başlayan saatlik tahmini araç sayıları, araçlar sadece direkt yönde hareket ettiklerinde tüm yönlerde 2100 araç/saat alınmıştır. Dönüşlü durumda ise Kuzey-1: 2100 araç/saat, Güney-1: 2100 araç/saat, Güney-2: 2100 araç/saat, Batı-2: 1800 araç/saat, Doğu-1: 2100 araç/saat, Doğu-2: 1800 araç/saat olarak alınmıştır. Harekete başlanan yönlerdeki araç sayısının %10-15'i dönüş noktalarında farklı yönlere dönüş yapmaktadır. Araçların ulaşabileceği ve hedefledikleri hızları ise kılavuzlu yeşil dalga sistemi için Kuzey-1 yönünde 50 – 60 km/saat, Güney-1 yönünde 50 - 90 km/saat,

Güney-2 yönünde 55 – 65 km/saat, Batı-2 yönünde 80 - 90 km/saat, Doğu-1 yönünde 50 – 65 km/saat ve Doğu-2 yönünde 80 km/saat olarak düzenlenmiştir. Karşılaştırmanın yapıldığı kılavuzsuz yeşil dalga sistemi için araç sayıları kılavuzlu sistemdeki araç sayıları ile aynı olarak girilmiştir.

Kılavuzsuz yeşil dalgalı sistemde araçların ulaşabileceği ve hedefledikleri hızları: Kuzey-1 yönünde 60 km/saat, Güney-1 yönünde 70 km/saat, Güney-2 yönünde 60 km/saat, Batı-2 yönünde 80 km/saat, Doğu-1 yönünde 55 km/saat ve Doğu-2 yönünde 80km/saat olarak düzenlenmiştir. Kılavuzsuz yeşil dalga hızına araçların yarısının uyduğu diğer yarısının ise ± 10 km/saat farklı hız hedefleriyle ilerledikleri varsayılmıştır.

Araçların hareket ettikleri yönler şu şekildedir:

Kuzey-1 yönünde harekete başlayan araçlar direkt yönde veya kavşaklarda sola dönerek 1. Kavşaktan Batı-1, 2. kavşaktan Batı-2, 3. Kavşaktan Kuzey-2, sağa dönerek 2. kavşaktan Doğu-2, 3. kavşaktan Batı-1, 1. Kavşaktan Kuzey-2 yönlerinde hareket etmektedirler.

Güney-1 yönünde harekete başlayan araçlar direkt yönde veya kavşaklarda sola dönerek 3. Kavşaktan Batı-1, 1.kavşaktan Kuzey-2, 2. Kavşaktan Doğu-2, sağa dönerek 3. Kavşaktan Kuzey-2, 2. Kavşaktan Batı-2, 1. Kavşaktan Batı-1 yönlerinde hareket etmektedirler.

Güney-2 yönünde harekete başlayan araçlar direkt yönde veya sağa dönerek 3. Kavşaktan Güney-1, 4. Kavşaktan Batı-2, 1. Kavşaktan Kuzey-1 yönüne hareket etmektedirler.

Batı-2 yönünde harekete başlayan araçlar direkt yönde veya sola dönerek 4. kavşaktan Batı-1, sağa dönerek 4. Kavşaktan Kuzey-2, 3. Kavşaktan Kuzey-1 yönlerine hareket etmektedirler.

Doğu-1 yönünde harekete başlayan araçlar direkt yönde veya sağa dönerek 1. kavşaktan Güney-1, 4. kavşaktan Doğu-2, 3. kavşaktan Kuzey-1 yönüne hareket etmektedirler.

Doğu-2 yönünde harekete başlayan araçlar direkt yönde veya sola dönerek 4. kavşaktan Kuzey-2 yönüne, sağa dönerek 3. Kavşaktan Güney-1, 4. Kavşaktan Batı-2, 1. Kavşaktan Kuzey-1 yönüne hareket etmektedirler.

Kılavuzlu yeşil dalga sisteminin kılavuzsuz yeşil dalga sistemiyle karşılaştırması, araç hareketinin sadece direkt yönde ve hem direkt hem de dönüş yönlerinde olduğu durumlar için sonuçlar elde edilerek yapılmıştır.

Simülasyon sonuç tablolarında yer alan terimlerin açıklamaları şu şekildedir:

TIMEINT (Time Interval): Simülasyon ölçümü yapılan zaman aralığı (s).

MOVEMENT: Araçların gitmekte olduğu güzergâhlar.

QLEN (Queue Length): Ortalama kuyruk uzunluğu (m).

VEHS(ALL): Araç sayısı.

LOS (Level Of Service): Kavşaklardaki geçiş durumunun değerlendirmesidir. A-F aralığındaki harflerle geçişlerin ne kadar iyi olduğunun derecelendirilmesidir.

LOSVAL (Level Of Service Value): A-F aralığındaki LOS değerinin 1-4 aralığındaki sayılar ile ifadesidir.

VEHDELAY (Delay Of All Vehicles): Kavşaklardaki ölçüm noktalarında araçların teorik olarak geçmesi gereken zamandan, saniye cinsinden ne kadar farkla gecikerek geçtiğini göstermektedir. Araçların belirtilen güzergâh noktalarında ilerlerken geçtikleri kavşaklarda ortalama olarak ne kadar gecikmeyle yollarına devam ettikleri olarak ifade edilebilir.

STOPDELAY (Stopped Delay): Her yön için kavşaktan geçen tüm araçların yaşadığı ortalama duraklama süresidir (s).

STOPS: Ortalama olarak duran araç sayısıdır.

EMISSIONCO: CO emisyon değeri (gram).

EMISSIONNOx: NOx emisyon değeri (gram).

EMISSIONVOC: VOC emisyon değeri (gram).

FUELCONSUMPTION: Yakıt tüketim değeri (gal).

TRAVTM(ALL): Araçların ortalama yolculuk süresi (s).

4.1. Kılavuzlu ve Kılavuzsuz Yeşil Dalga Sistemlerinin Sadece Direkt Yönde ve Direkt-Dönüşlü Yönlerde Simülasyonunun Yapılarak Karşılaştırılması

Tüm simülasyonlarda kavşak bölgelerinde ortalama kuyruk uzunluğu, araç sayısı, gecikme süresi, LOS sınıflandırması, emisyon miktarları gibi değerlerin ölçülmesi için dikdörtgenel bir alan belirlenmiştir. Ayrıca araçların gitmekte oldukları tüm güzergâhlarda seyahat süresinin ölçülmesi için yolların başlangıç ve bitiş noktalarına araç seyahat süresi algılayıcıları yerleştirilmiştir.

Kılavuzsuz yeşil dalga sistemiyle araçların dönüş yapmadan sadece direkt yönde hareket etmesiyle oluşan genel simülasyon sonucu ve seyahat süreleri Çizelge 4.1. ve Çizelge 4.2.'de görülmektedir.

Çizelge 4. 1. Sadece direkt yönde araç hareketi olduğu durumda kılavuzsuz yeşil dalga sisteminin uygulanmasıyla elde edilen simülasyon sonucu

TIMEINT	MOVEMENT	QLEN	VEHS(ALL)	PERS(ALL)	LOS(ALL)	LOSVAL(ALL)	VEHDELAY(ALL)	PERSDELAY(ALL)	STOPDELAY(ALL)	STOPS(ALL)	EMISSIONSCO	EMISSIONSNOX	EMISSIONSVOC	FUELCONSUMPTION	
0-3600	1-1: Kuzey-1@935.5-1: Kuzey-1@414.5	0,53	2059	2059	LOS_A	1	1,45	1,45	0,27	0,01	570,92	111,08	132,216	8,168	
0-3600	1-2: Güney-1@935.6-2: Güney-1@994.0	3,58	1925	1925	LOS_A	1	5,51	5,51	0,11	0,11	768,324	149,488	178,067	10,922	
0-3600	1-3: Batı-1@694.9-3: Batı-1@757.3	40,09	1949	1949	LOS_C	3	29,15	29,15	22,13	0,68	2114,77	411,457	490,118	30,254	
0-3600	1-4: Doğu-1@702.6-4: Doğu-1@765.1	0,22	2028	2028	LOS_A	1	1,53	1,53	0,05	0,01	603,547	117,428	139,878	8,634	
0-3600	2-1: Kuzey-1@924.5-1: Kuzey-1@989.3	1	11,11	7941	7941	LOS_A	1	9,26	9,26	5,54	0,2	4037,315	785,515	935,687	57,758
0-3600	2-2: Güney-1@363.7-2: Güney-1@429.7	0,26	2008	2008	LOS_A	1	1,81	1,81	0,03	0,01	595,999	115,96	138,129	8,526	
0-3600	2-5: Batı-2@1837.7-5: Batı-2@1898.7	26,81	1950	1950	LOS_C	3	22,6	22,6	17,32	0,41	1760,062	342,444	407,911	25,18	
0-3600	2-6: Doğu-2@798.9-6: Doğu-2@860.6	13,29	2001	2001	LOS_B	2	13,34	13,34	10,15	0,24	1348,888	262,445	312,618	19,297	
0-3600	3-7: Güney-2@152.4-7: Güney-2@220.2	0,17	2050	2050	LOS_A	1	1,18	1,18	0,26	0,01	534,788	104,05	123,942	7,651	
0-3600	3-8: Kuzey-2@1731.4-8: Kuzey-2@1797.6	2	10,13	8089	8089	LOS_A	1	9,59	9,59	6,83	0,16	4181,736	813,614	969,158	59,825
0-3600	3-11: Güney-1@1109.3-11: Güney-1@117	0,24	2083	2083	LOS_A	1	1,67	1,67	0,4	0,01	621,581	120,937	144,057	8,892	
0-3600	3-12: Kuzey-1@539.8-12: Kuzey-1@607.0	21,7	1849	1849	LOS_C	3	23,6	23,6	18,7	0,43	1539,46	299,523	356,785	22,024	
0-3600	4-5: Batı-2@723.2-5: Batı-2@781.3	0,07	1997	1997	LOS_A	1	1,01	1,01	0,02	0	526,133	102,366	121,936	7,527	
0-3600	4-8: Kuzey-2@932.0-8: Kuzey-2@996.8	42,1	1954	1954	LOS_C	3	33,72	33,72	26,63	0,66	2231,157	434,102	517,092	31,919	
0-3600	4-9: Batı-2@798.9-9: Batı-2@860.6	3	16,03	7883	7883	LOS_B	2	14,59	14,59	11,1	0,27	5043,622	981,306	1168,908	72,155
0-3600	4-9: Batı-2@723.2-5: Batı-2@781.3	0,45	2046	2046	LOS_A	1	0,93	0,93	0,2	0	507,633	98,767	117,649	7,262	
0-3600	4-6: Doğu-2@1922.1-6: Doğu-2@1980.8	15,55	2004	2004	LOS_B	2	13,06	13,06	9,85	0,21	1283,261	249,676	297,408	18,359	
0-3600	4-7: Güney-2@958.7-7: Güney-2@1022.7	16,8	2038	2038	LOS_B	2	13,95	13,95	10,62	0,24	1258,809	241,027	287,106	17,723	
0-3600	4-8: Kuzey-2@932.0-8: Kuzey-2@996.8	56,85	1908	1908	LOS_D	4	38,55	38,55	30,5	0,89	2424,112	471,644	561,811	34,168	
0-3600	4-8: Kuzey-2@932.0-8: Kuzey-2@996.8	22,41	7996	7996	LOS_B	2	16,27	16,27	12,5	0,33	5871,531	1142,387	1360,784	83,999	
3600-7200	1-1: Kuzey-1@935.5-1: Kuzey-1@414.5	0,27	2136	2136	LOS_A	1	1,31	1,31	0,15	0	590,452	114,88	136,843	8,447	
3600-7200	1-2: Güney-1@935.6-2: Güney-1@994.0	3,85	2153	2153	LOS_A	1	6,06	6,06	0,19	0,09	855,248	166,4	198,212	12,235	
3600-7200	1-3: Batı-1@694.9-3: Batı-1@757.3	42,34	2096	2096	LOS_C	3	29,39	29,39	22,05	0,73	2333,143	453,945	540,728	33,378	
3600-7200	1-4: Doğu-1@702.6-4: Doğu-1@765.1	0,22	2106	2106	LOS_A	1	1,63	1,63	0,03	0,01	633,737	123,302	146,875	9,066	
3600-7200	2-1: Kuzey-1@924.5-1: Kuzey-1@989.3	1	11,67	8491	8491	LOS_A	1	9,53	9,53	5,54	0,21	4405,68	857,185	1021,059	63,028
3600-7200	2-2: Güney-1@363.7-2: Güney-1@429.7	0,17	2136	2136	LOS_A	1	1,69	1,69	0,02	0,01	628,184	122,222	145,588	8,987	
3600-7200	2-5: Batı-2@1837.7-5: Batı-2@1898.7	34,4	2154	2154	LOS_C	3	25,95	25,95	19,94	0,48	2170,762	422,351	503,095	31,055	
3600-7200	2-6: Doğu-2@798.9-6: Doğu-2@860.6	14,83	2104	2104	LOS_B	2	14,05	14,05	10,7	0,25	1466,848	285,395	339,956	20,985	
3600-7200	3-7: Güney-2@152.4-7: Güney-2@220.2	0	2115	2115	LOS_A	1	1,03	1,03	0,12	0	537,072	104,495	124,472	7,683	
3600-7200	3-8: Kuzey-2@1731.4-8: Kuzey-2@1797.6	2	12,35	8509	8509	LOS_B	2	10,72	10,72	7,73	0,19	4741,002	922,427	1098,773	67,825
3600-7200	3-11: Güney-1@1109.3-11: Güney-1@117	0,27	2098	2098	LOS_A	1	1,58	1,58	0,32	0,01	621,526	120,926	144,045	8,892	
3600-7200	3-12: Kuzey-1@539.8-12: Kuzey-1@607.0	28,65	2127	2127	LOS_C	3	26,55	26,55	21,06	0,5	1926,104	374,75	446,393	27,555	
3600-7200	4-5: Batı-2@723.2-5: Batı-2@781.3	0,08	2154	2154	LOS_A	1	1,11	1,11	0,02	0	571,818	111,255	132,524	8,181	
3600-7200	4-8: Kuzey-2@932.0-8: Kuzey-2@996.8	45,42	2138	2138	LOS_C	3	33,3	33,3	26,34	0,66	2424,803	471,779	561,972	34,69	
3600-7200	4-8: Kuzey-2@932.0-8: Kuzey-2@996.8	18,6	8517	8517	LOS_B	2	15,66	15,66	11,95	0,29	5700,935	1109,195	1321,247	81,558	
3600-7200	4-5: Batı-2@723.2-5: Batı-2@781.3	0,38	2100	2100	LOS_A	1	0,86	0,86	0,15	0	516,783	100,547	119,769	7,399	
3600-7200	4-6: Doğu-2@1922.1-6: Doğu-2@1980.8	19,09	2112	2112	LOS_B	2	15,04	15,04	11,42	0,24	1474,875	286,957	341,816	21,1	
3600-7200	4-7: Güney-2@958.7-7: Güney-2@1022.7	18,33	2094	2094	LOS_B	2	14,74	14,74	11,27	0,26	1311,617	255,193	303,98	18,764	
3600-7200	4-8: Kuzey-2@932.0-8: Kuzey-2@996.8	60,96	2093	2093	LOS_D	4	37,41	37,41	29,32	0,89	2622,166	510,178	607,712	37,513	
3600-7200	4-8: Kuzey-2@932.0-8: Kuzey-2@996.8	24,69	8399	8399	LOS_B	2	17	17	13,03	0,35	6360,571	1237,536	1474,124	90,995	

Çizelge 4. 4. Sadece direkt yönde araç hareketi olduğu durumda kılavuzlu yeşil dalga sisteminin uygulanmasıyla elde edilen seyahat süreleri

Zaman Aralıkları	Seyahat Süresi Ölçümü Yapılan Rotalar	Toplam Araç Sayısı	Ortalama Seyahat Süresi	Seyahat Edilen Meseafe
0-3600	1: Doğu-1_Kuzey-2	1892	254,660671	3851,853319
0-3600	2: Kuzey-1_Kuzey-1	1993	189,445994	3137,449105
0-3600	3: Güney-2_Batı-1	1920	239,685355	3757,38013
0-3600	4: Güney-1_Güney-1	1934	182,799118	3191,062704
0-3600	5: Doğu-2_Doğu-2	2012	124,13375	2660,710877
0-3600	6: Batı-2_Batı-2	1989	116,301782	2654,923335
3600-7200	1: Doğu-1_Kuzey-2	2159	254,986067	3851,853319
3600-7200	2: Kuzey-1_Kuzey-1	2097	188,835285	3137,449105
3600-7200	3: Güney-2_Batı-1	2108	240,611421	3757,38013
3600-7200	4: Güney-1_Güney-1	2131	183,082065	3191,062704
3600-7200	5: Doğu-2_Doğu-2	2112	123,834737	2660,710877
3600-7200	6: Batı-2_Batı-2	2108	115,826852	2654,923335

Sadece direkt yönde hareket edildiğinde araçlar her kavşakta toplam 4 farklı yönde hareket etmektedir. 0-3600 s zaman aralığı simülasyonun 1. saatini, 3600-7200 s ise simülasyonun 2. saatini temsil etmektedir. Kavşaklarda her yön için ölçümler alınmakta ve farklı nitelikteki değerlerin genel ortalamasının bulunmasıyla istenilen kavşağa ait değerlendirmeler yapılabilmektedir. Araçların sadece direkt yönde hareketiyle elde edilen simülasyon sonuçları incelendiğinde kılavuzsuz yeşil dalgada saatlik ortalama kuyruk uzunluğu (QLEN) 10,13 - 24,69 m arasında, kılavuzlu durumda ise 0,46 - 1,87 m arasında olmaktadır.

Kavşaklardan geçen saatlik araç sayısı ise iki durumda da 8000 - 8500 araç arasında olmaktadır. Simülasyon tabloları incelenirken özellikle dikkat edilmesi gereken değerlerden olan ortalama gecikme süresi (VEHDELAY) kılavuzsuz 9.26 - 17 s arasında, kılavuzlu 0,52 - 1,28 s aralığında olmaktadır. Kılavuzlu yeşil dalgada araçlar bir kavşaktan geçtikten sonra diğer kavşakta da yeşil olduğu âna denk gelebilmeleri için kılavuz hızına uymaktadırlar. Kılavuzsuz yeşil dalga sisteminde sürücülerin yarısı yeşil dalga hızından ± 10 km/saatlik farklı hızlarda ilerlemesinden dolayı gecikme süreleri ve kuyruk uzunlukları artmaktadır. Kavşakların LOS değerleri incelendiğinde kılavuzsuz durumda A veya B olurken, kılavuzlu durumda gecikme süreleri 10 s'den küçük olduğu için tüm kavşaklarda A olmaktadır. LOS değerinin A olması kavşakta araç birikmesi olmadığını, trafik düzeninin istenen seviyelerde olduğunu belirtmektedir.

Bir kavşaktaki saatlik toplam yakıt tüketimi kılavuzsuz sistemde 57.74 - 91 galon, kılavuzlu sistemde 29,6 - 35,78 galon aralıklarında değişmektedir. İki sistemde de gecikme sürelerine paralel olarak yakıt tüketim değerleri ve dolayısıyla da emisyon miktarları da değişmektedir. Kavşak noktalarında biriken araçlar ortalama gecikme süresinin büyümesine sebep olmaktadır. Eğer bir kavşakta araç birikmesi giderek artıyorsa, gecikme süresi ve kuyruk uzunluğu da artacaktır. Simülasyonda toplam 4 kavşak olduğu için araçlar 6 farklı yöne gidebilmektedir. Seyahat sürelerinin ortalaması kılavuzsuz yeşil dalgada 236 s, kılavuzlu yeşil dalgada 185 s olarak gözlenmiştir.

Kılavuzsuz yeşil dalga sistemiyle araçların hem direkt hem de dönüş yönlerinde hareket etmesiyle oluşan genel simülasyon sonucu ve seyahat süreleri Çizelge 4.5. ve Çizelge 4.6.'da görülmektedir.

Çizelge 4. 6. Direkt ve dönüş yönlerinde araç hareketi olduğunda kılavuzsuz yeşil dalga sisteminin uygulanmasıyla elde edilen seyahat süreleri

Zaman Aralıkları	Seyahat Süresi Ölçümü Yapılan Rotal	Toplam Araç Sayısı	Ortalama Seyahat Süresi	Seyahat Edilen Mesafe
0-3600	1: Doğu-1_Kuzey-2	1251	326,557351	3849,653733
0-3600	2: Kuzey-1_Kuzey-1	618	230,604881	3137,442506
0-3600	3: Güney-2_Batı-1	1250	296,309337	3757,38013
0-3600	4: Güney-1_Güney-1	632	199,034755	3191,062704
0-3600	5: Doğu-2_Doğu-2	1164	141,876265	2660,710877
0-3600	6: Batı-2_Batı-2	931	137,913723	2654,923335
0-3600	7: Kuzey-1_Kuzey-2	381	270,558124	2943,722048
0-3600	8: Kuzey-1_Batı-1	362	240,66835	3078,177784
0-3600	9: Kuzey-1_Doğu-2	225	190,272316	2742,454573
0-3600	10: Kuzey-1_Batı-2	282	137,724999	1769,965121
0-3600	11: Batı-2_Batı-1	240	264,722412	3544,176027
0-3600	12: Batı-2_Kuzey-2	243	139,601193	1651,821301
0-3600	13: Batı-2_Kuzey-1	307	252,569044	3996,061503
0-3600	14: Güney-1_Kuzey-2	388	262,274528	3525,998522
0-3600	15: Güney-1_Batı-2	254	177,103295	3008,976828
0-3600	16: Güney-1_Batı-1	384	275,597551	4028,441689
0-3600	17: Doğu-1_Güney-1	220	69,314242	1043,950577
0-3600	18: Doğu-1_Doğu-2	204	255,270438	3561,2702
0-3600	19: Doğu-1_Kuzey-1	212	372,624595	4719,322797
0-3600	20: Doğu-2_Güney-1	189	117,461437	1702,75912
0-3600	21: Doğu-2_Batı-1	164	319,483456	4668,608713
0-3600	22: Güney-2_Güney-1	219	154,182453	2182,45135
0-3600	23: Güney-2_Batı-2	211	182,528796	2848,337221
0-3600	24: Güney-2_Kuzey-1	195	463,320041	5784,944357
0-3600	25: Güney-1_Doğu-2	289	261,280098	4127,156355
0-3600	26: Doğu-2_Kuzey-2	222	210,036795	2923,950166
3600-7200	1: Doğu-1_Kuzey-2	1413	320,892581	3849,653733
3600-7200	2: Kuzey-1_Kuzey-1	680	230,593636	3137,442506
3600-7200	3: Güney-2_Batı-1	1406	300,730205	3757,38013
3600-7200	4: Güney-1_Güney-1	709	196,607149	3191,062704
3600-7200	5: Doğu-2_Doğu-2	1203	163,825409	2660,710877
3600-7200	6: Batı-2_Batı-2	959	135,219412	2654,923335
3600-7200	7: Kuzey-1_Kuzey-2	402	249,538694	2922,137139
3600-7200	8: Kuzey-1_Batı-1	409	274,79136	3465,342285
3600-7200	9: Kuzey-1_Doğu-2	243	195,454489	2742,454573
3600-7200	10: Kuzey-1_Batı-2	319	140,226825	1770,001068
3600-7200	11: Batı-2_Batı-1	241	262,428212	3544,187236
3600-7200	12: Batı-2_Kuzey-2	238	138,130862	1651,821301
3600-7200	13: Batı-2_Kuzey-1	353	252,039909	3996,061503
3600-7200	14: Güney-1_Kuzey-2	396	248,759836	3467,998019
3600-7200	15: Güney-1_Batı-2	253	177,423612	3008,976828
3600-7200	16: Güney-1_Batı-1	408	275,110825	4005,156933
3600-7200	17: Doğu-1_Güney-1	225	69,133726	1043,950577
3600-7200	18: Doğu-1_Doğu-2	217	252,849083	3561,2702
3600-7200	19: Doğu-1_Kuzey-1	242	368,909465	4719,322797
3600-7200	20: Doğu-2_Güney-1	219	117,056305	1702,75912
3600-7200	21: Doğu-2_Batı-1	157	335,868391	4668,608713
3600-7200	22: Güney-2_Güney-1	228	153,247286	2182,45135
3600-7200	23: Güney-2_Batı-2	237	187,618364	2848,337221
3600-7200	24: Güney-2_Kuzey-1	236	472,092003	5784,944357
3600-7200	25: Güney-1_Doğu-2	297	271,071488	4126,933758
3600-7200	26: Doğu-2_Kuzey-2	247	239,641446	2923,869201

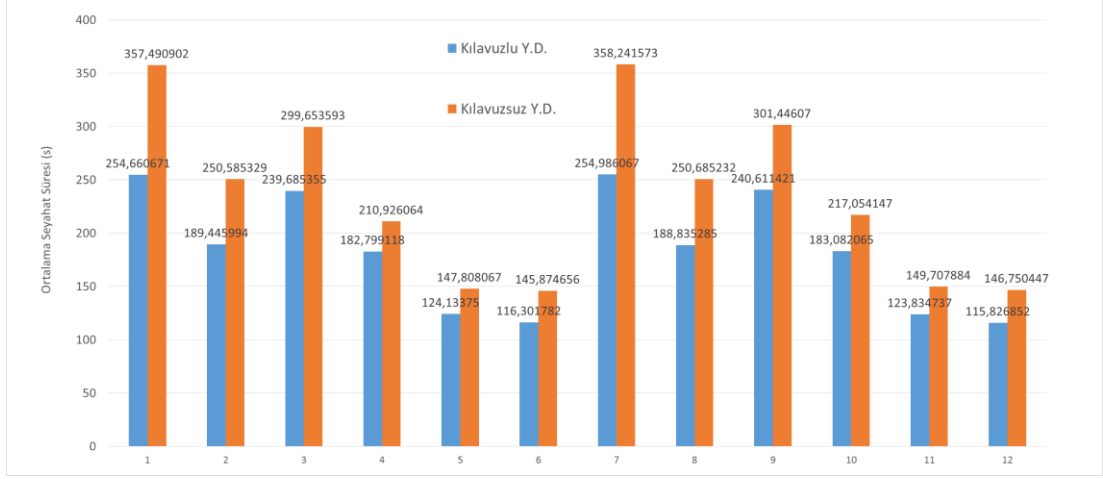
Çizelge 4. 8. Direkt ve dönüş yönlerinde araç hareketi olduğunda kılavuzlu yeşil dalga sisteminin uygulanmasıyla elde edilen seyahat süreleri

Zaman Aralıkları	Seyahat Süresi Ölçümü Yapılan Rotalar	Toplam Araç Sayısı	Ortalama Seyahat Süresi	Seyahat Edilen Mesefer
0-3600	1: Doğu-1_Kuzey-2	1271	256,535159	3851,853319
0-3600	2: Kuzey-1_Kuzey-1	625	189,600668	3137,442506
0-3600	3: Güney-2_Batı-1	1271	242,679061	3757,38013
0-3600	4: Güney-1_Güney-1	633	186,937719	3191,062704
0-3600	5: Doğu-2_Doğu-2	1160	128,744025	2660,710877
0-3600	6: Batı-2_Batı-2	927	122,9807	2654,923335
0-3600	7: Kuzey-1_Kuzey-2	360	216,279076	2901,611869
0-3600	8: Kuzey-1_Batı-1	389	229,748186	3252,358631
0-3600	9: Kuzey-1_Doğu-2	230	188,455557	2742,454573
0-3600	10: Kuzey-1_Batı-2	279	138,706768	1770,170802
0-3600	11: Batı-2_Batı-1	240	249,289989	3544,176027
0-3600	12: Batı-2_Kuzey-2	243	126,29773	1651,821301
0-3600	13: Batı-2_Kuzey-1	307	236,45905	3996,061503
0-3600	14: Güney-1_Kuzey-2	389	250,932774	3557,708032
0-3600	15: Güney-1_Batı-2	252	173,70446	3009,360989
0-3600	16: Güney-1_Batı-1	389	267,858807	4034,262389
0-3600	17: Doğu-1_Güney-1	212	110,207857	1043,960842
0-3600	18: Doğu-1_Doğu-2	204	257,513112	3563,469786
0-3600	19: Doğu-1_Kuzey-1	218	329,2974	4721,522383
0-3600	20: Doğu-2_Güney-1	183	147,985918	1702,75912
0-3600	21: Doğu-2_Batı-1	163	296,974852	4668,354171
0-3600	22: Güney-2_Güney-1	215	159,846136	2182,45135
0-3600	23: Güney-2_Batı-2	211	164,298444	2848,337221
0-3600	24: Güney-2_Kuzey-1	197	379,859872	5784,944357
0-3600	25: Güney-1_Doğu-2	288	243,067044	4127,146274
0-3600	26: Doğu-2_Kuzey-2	224	180,13496	2923,947871
3600-7200	1: Doğu-1_Kuzey-2	1421	257,337521	3851,853319
3600-7200	2: Kuzey-1_Kuzey-1	686	190,394944	3137,442506
3600-7200	3: Güney-2_Batı-1	1395	244,151874	3757,38013
3600-7200	4: Güney-1_Güney-1	709	185,617561	3191,062704
3600-7200	5: Doğu-2_Doğu-2	1216	129,31027	2660,710877
3600-7200	6: Batı-2_Batı-2	966	122,517902	2654,923335
3600-7200	7: Kuzey-1_Kuzey-2	432	223,073031	2954,755343
3600-7200	8: Kuzey-1_Batı-1	403	242,081499	3433,744321
3600-7200	9: Kuzey-1_Doğu-2	224	187,306086	2742,454573
3600-7200	10: Kuzey-1_Batı-2	322	152,598434	1770,221738
3600-7200	11: Batı-2_Batı-1	243	249,386989	3544,218394
3600-7200	12: Batı-2_Kuzey-2	236	126,809776	1651,821301
3600-7200	13: Batı-2_Kuzey-1	346	232,396102	3996,061503
3600-7200	14: Güney-1_Kuzey-2	393	243,289371	3461,910987
3600-7200	15: Güney-1_Batı-2	253	174,97626	3009,360989
3600-7200	16: Güney-1_Batı-1	404	264,968519	4001,061271
3600-7200	17: Doğu-1_Güney-1	226	110,056965	1043,960842
3600-7200	18: Doğu-1_Doğu-2	217	257,018077	3563,469786
3600-7200	19: Doğu-1_Kuzey-1	239	331,153808	4721,522383
3600-7200	20: Doğu-2_Güney-1	217	148,702725	1702,75912
3600-7200	21: Doğu-2_Batı-1	157	295,727312	4668,354171
3600-7200	22: Güney-2_Güney-1	225	158,217275	2182,45135
3600-7200	23: Güney-2_Batı-2	225	165,301276	2848,337221
3600-7200	24: Güney-2_Kuzey-1	231	384,124864	5784,944357
3600-7200	25: Güney-1_Doğu-2	298	239,348136	4126,922835
3600-7200	26: Doğu-2_Kuzey-2	249	181,180243	2923,903383

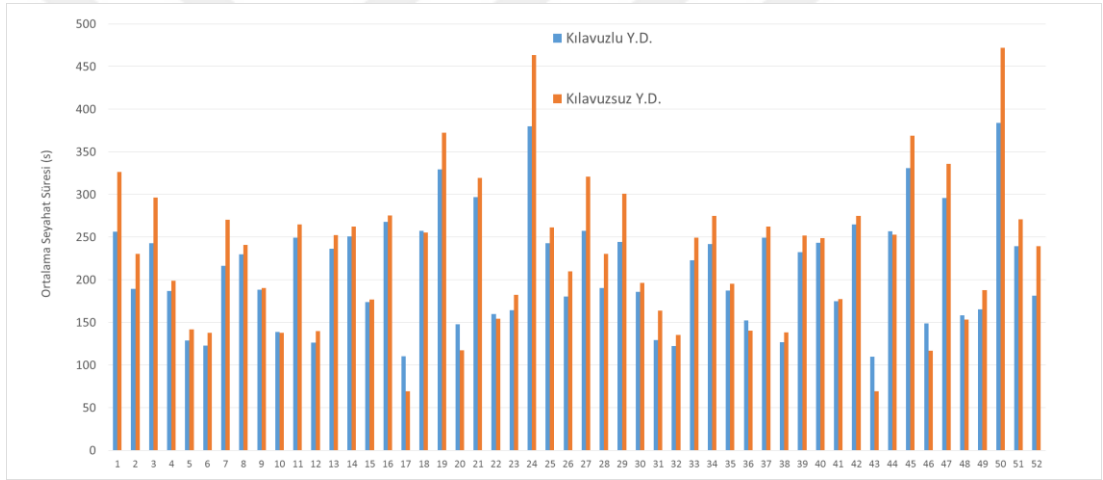
DönüŖlü durumda araçlar her kavŖakta toplam 10 farklı yönde hareket etmektedirler. Araçlar başladıkları noktalardan sağa veya sola dönerek toplam 26 farklı rota izlemektedir.

QLEN değeri kılavuzsuz yeŖil dalga ile 8,27 – 26,03 m, kılavuzlu 0,49 – 2,74 m arasında olmaktadır. VEHDELAY değeri kılavuzsuz 10,43 – 17,29 s aralığında kılavuzlu 2,37 – 4,82 s aralığındadır. KavŖaklardaki gecikme süreleri kılavuzsuz sistemde tüm kavŖaklarda 10 s'yi aŖtığı için LOS değeri B olmakta, kılavuzlu sistemde sadece direkt yöndeki araç hareketine göre biraz daha artmakta fakat yine de tüm kavŖaklarda 10 s'nin altında olduğu için LOS değeri A olmaktadır. Saatlik toplam yakıt tüketimi kılavuzsuz sistemde 61,1 – 97 galon, kılavuzlu 35,8 – 42,4 galon olarak gözlenmiŖtir. Tüm rotaların seyahat sürelerinin ortalaması alındığında kılavuzsuz sistemde 230 s kılavuzlu yeŖil dalga sisteminde 211 s olarak gözlenmiŖtir. İki sistem arasındaki seyahat süresi farkı kılavuzlu sistemde dönüŖ yapan araçların beklemesine rağmen 19 s olmaktadır. Kılavuzlu sistemde sağa dönüŖ yapan araçların kılavuza katılmaları için belirli bir süre beklemeleri gerekmektedir. Kılavuzlu ve kılavuzsuz yeŖil dalga sistemlerinin karŖılaŖtırmalarının yapıldığı simülasyon sonuç grafiklerinde mavi çubuklar kılavuzlu yeŖil dalgayı, turuncu çubuklar kılavuzsuz yeŖil dalgayı temsil etmektedir.

Sadece direkt yönde ve direkt-dönüŖlü kılavuzlu ve kılavuzsuz yeŖil dalga sistemlerinin seyahat sürelerinin karŖılaŖtırması Ŗekil 4.2. ve Ŗekil 4.3.'te gösterilmiŖtir.

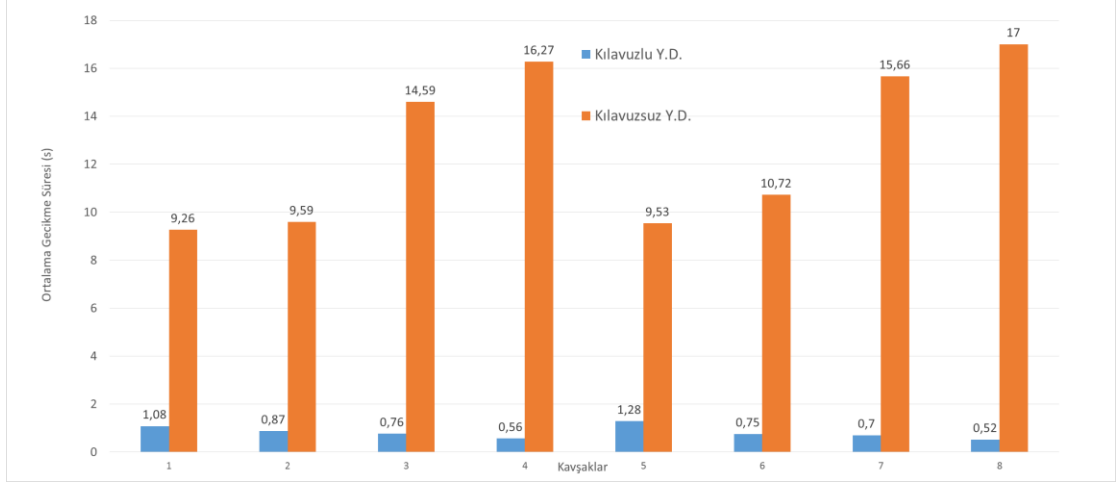


Şekil 4. 2. Sadece direkt yönde hareket edildiğinde seyahat sürelerinin karşılaştırması

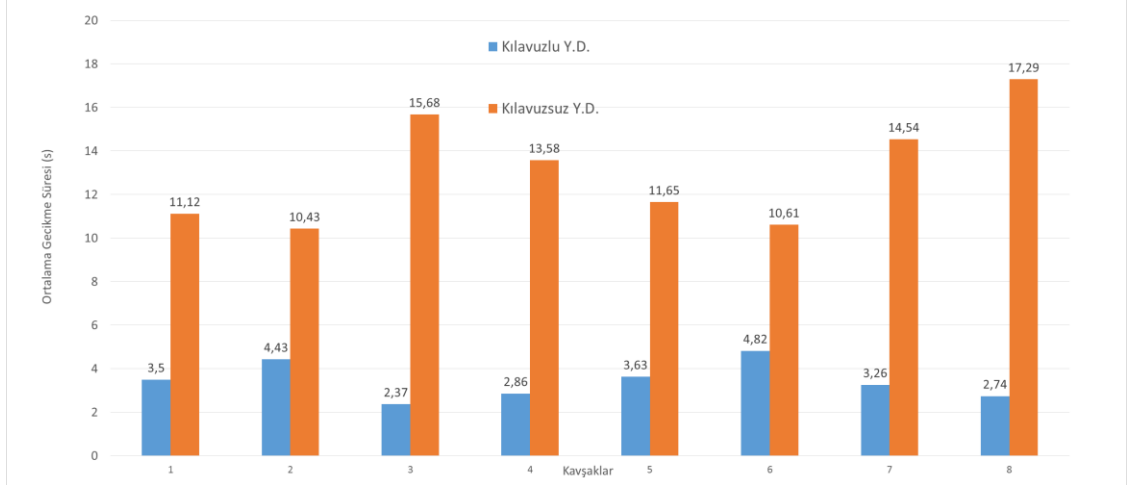


Şekil 4. 3. Direkt ve dönüş yönlerinde hareket edildiğinde seyahat sürelerinin karşılaştırması

Sadece direkt yönde ve direkt-dönüş yönlerinde kılavuzlu ve kılavuzsuz yeşil dalga sistemlerinin kavşaklardaki ortalama gecikme süreleri Şekil 4.4. ve Şekil 4.5.'te gösterilmiştir (4 kavşağın 1. saat simülasyon sonucu 1-4 aralığında, 2. saat simülasyon sonuçları ise 5-8 aralığında gösterilmektedir).

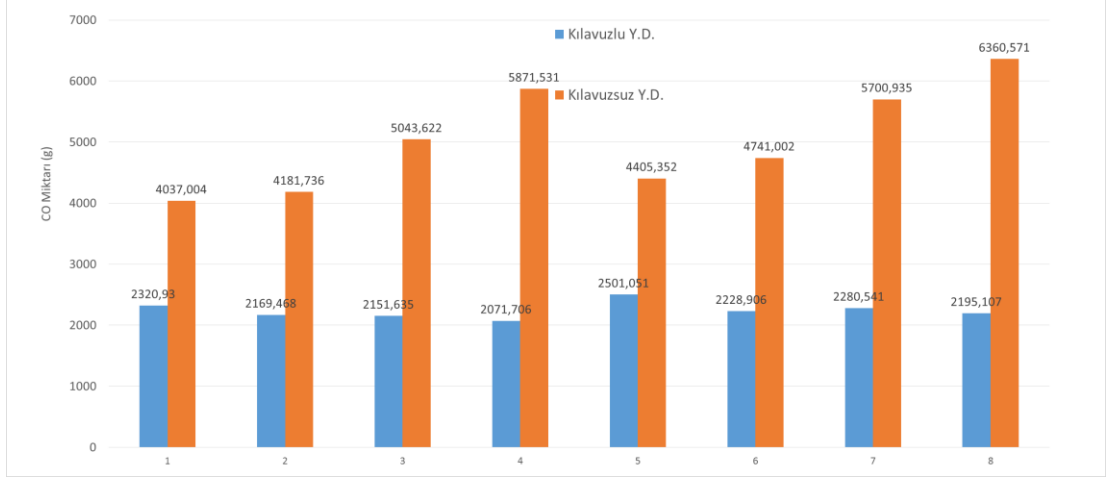


Şekil 4. 4. Sadece direkt yönde hareket edildiğinde ortalama gecikme süreleri

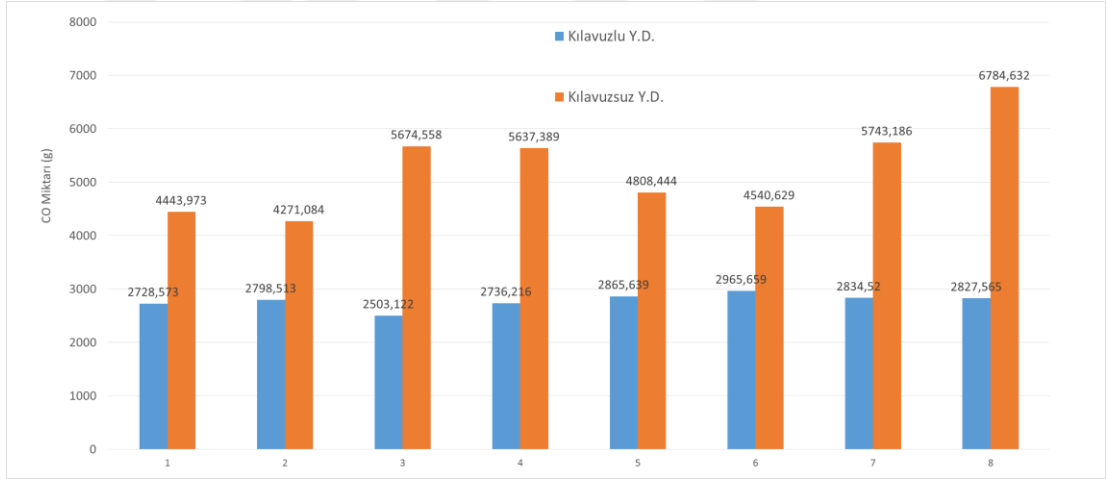


Şekil 4. 5. Direkt ve dönüş yönlerinde hareket edildiğinde ortalama gecikme süreleri

Kılavuzlu ve kılavuzsuz yeşil dalga sistemlerinin kavşaklardaki CO emisyon değerleri sadece direkt yönde ve hem direkt hem de dönüş yönlerinde akış olduğu durumda elde edilen simülasyon sonucu Şekil 4.6. ve Şekil 4.7.'de gösterilmektedir.



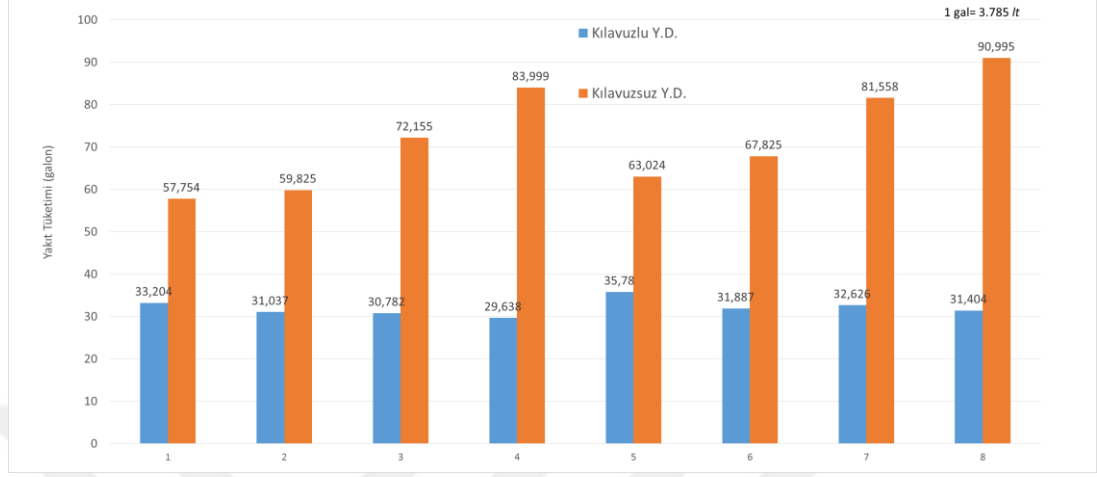
Şekil 4. 6. Sadece direkt yönde hareket edildiğinde kavşaklardaki saatlik ortalama CO emisyon değerleri (g)



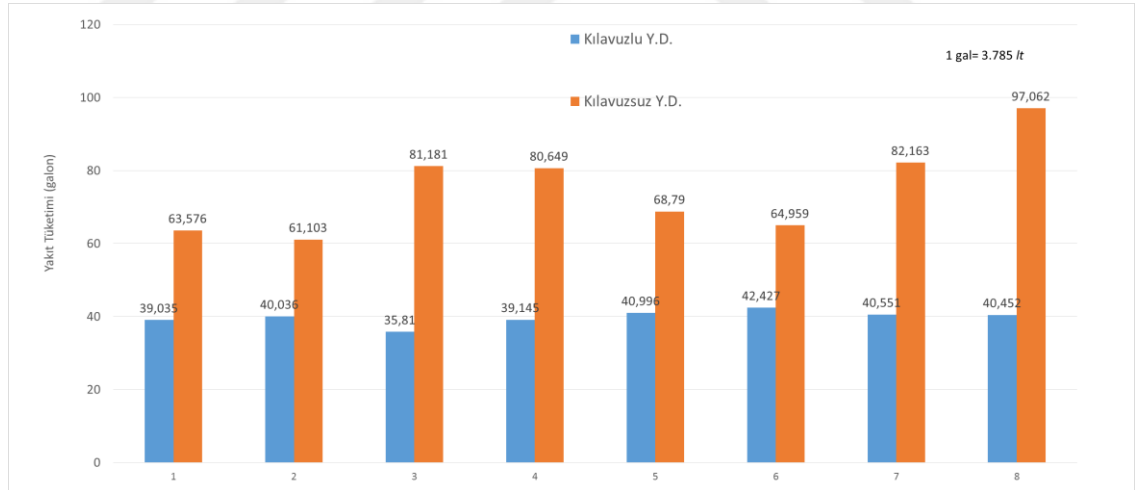
Şekil 4. 7. Hem direkt hem de dönüş yönlerinde hareket edildiğinde kavşaklardaki saatlik ortalama CO emisyon değerleri (g)

Kılavuzlu ve kılavuzsuz yeşil dalga sistemlerinin sadece direkt yönde ve hem direkt hem de dönüşlü yönlerde araç akışı ile elde edilen saatlik yakıt tüketim değerleri Şekil 4.8. ve Şekil 4.9.'da gösterilmektedir. Kılavuzlu yeşil dalga sistemi ile kılavuzsuz yeşil dalga sistemi sadece direkt yönde araç akışı ile test edildiğinde yakıt tüketim ve emisyon değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Fakat hem direkt hem de dönüş yönlerinde araç akışı olduğunda kılavuzlu yeşil dalga sisteminin yakıt tüketim

değerleri ve emisyon oranları kılavuzsuz yeşil dalgalı sisteme göre büyük oranda düştüğü görülmektedir.



Şekil 4. 8. Sadece direkt yönde hareket edildiğinde kavşaklardaki toplam yakıt tüketimleri



Şekil 4. 9. Hem direkt hem de dönüş yönlerinde hareket edildiğinde kavşaklardaki toplam yakıt tüketimleri

Belirlenen noktadaki dört kavşak için ölçüm noktalarından alınan sonuçlardan VEHDELAY ve LOSVAL değerlerine bakılarak sistemlerin verimliliği belirlenebilir.

Sinyalize kavşaklarda Karayolu Kapasite Sınıflandırması (HCM-Highway Capacity Manuel) 2010’da belirtilen LOS değerleri Çizelge 4.9.’daki gibidir.

Çizelge 4. 9. Gecikme süresine göre karayolu kapasite sınıflandırması [41]

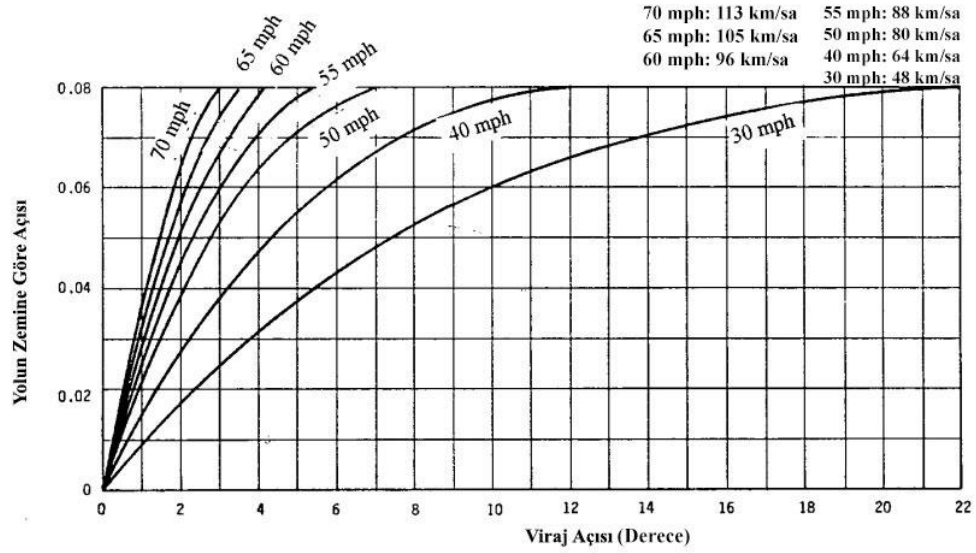
LOSVAL	Ortalama Araç Gecikme Süresi (saniye/araç)	Genel Açıklama
A	≤ 10	Serbest akış
B	>10-20	Kararlı Akış (Hafif gecikmeler)
C	>20-35	Kararlı Akış (Kabul edilebilir gecikmeler)
D	>35-55	Kararsız akışa yaklaşma (Tolere edilebilir gecikmeler)
E	>55-80	Kararsız akış (Tolere edilemez gecikmeler)
F	>80	Güçlükle devam eden akış (Sıkışık ve araç kuyruğu temizlenemiyor)

Normal sinyalizasyon planı ile araçların duraklama ve gecikme süreleri yüksek olmakta, buna bağlı olarak kuyruk uzunlukları artmakta ve güzergâhlar verimli kullanılamamaktadır. Böylece yakıt tüketim değerleri ve emisyon oranları da artmaktadır. Ancak kılavuzlu yeşil dalga yöntemiyle araçlar kendilerine verilen yeşil ve kırmızı sinyal kılavuzuna uyarak, yani kavşaklar arasında belirlenen hızlarla ilerleyerek gitmektedirler. Bu sayede araçlar kavşaklarda çok az gecikme ve duraksamayla daha az yakıt tüketimi ve emisyon oranlarıyla ilerleyebilmektedirler. Simülasyon sonuçları incelendiğinde sadece direkt veya dönüşlü durumda kılavuzlu yeşil dalga sisteminin tüm kavşaklarda VEHDELAY değeri 10 s’den küçük olduğu için LOSVAL değeri 1 (A) olmaktadır.

Kavşaklardaki gecikme süresinin sınıflandırma değerleri arasındaki belirgin farklılıklar kılavuzlu yeşil dalga sistemini kılavuzsuz yeşil dalga sistemine göre üstün kılmaktadır. Kılavuzlu yeşil dalga sistemi trafikte önemli bir unsur olan yayalar açısından da büyük yararlılıklar göstereceği öngörülmektedir. Kılavuzlu yeşil dalgaya uyan araçlar kümeler halinde ilerlediği için yayalar yolun karşısına geçmek için daha az bekleyecekler ve kılavuz işaretçilerini gözlemleyerek araç kümesinin kendilerine yaklaşımını algılayabileceklerdir. Böylece kılavuzlu yeşil dalga hem yayalar hem de araçlar tarafından ortak olarak kullanılabilir.

4.2. Araç Hızı ve Yol Güvenliği Arasındaki İlişki

Konumları birbirine bağlayan yol ve kavşakların planlaması yapılırken oluşturulan yol güzergâhına göre yol üzerinde, araçların dengelerinin bozulmaması için minimum açılarda hareket ederek ilerlemesi istenir. Araçların virajlarda savrulmasını önlemek için belirli açı ve genişlik düzenlemeleriyle yollar tasarlanır. Viraj noktalarında araç hızı arttıkça yüzeyle araç tekeri arasındaki sürtünme azalacağından dolayı aracın viraj dışına savrulması kolaylaşır. Bu sebeple sürücüler ilerledikleri güzergâhlarda belirlenen hız limitlerine uymalıdır. Şekil 4.10.'da yol ve viraj açılarının durumlarına göre maksimum araç hızları verilmiştir. Kılavuzlu yeşil dalga sistemiyle yolun hız limitine riayet edilerek kılavuz hızı oluşturulur. Sürücüler bu kılavuza uyduklarında hem hız kuralına uyarak kaza yapma riskini düşürecek hem de kavşak noktalarında duraksamadan devam edebileceklerdir.



Şekil 4. 10. Yol açısı ve viraj açısı arasındaki ilişki [42]

Kılavuzsuz geleneksel yeşil dalga sistemi uygulamalarında sabit olarak belirlenen yeşil dalga hızı ile araçların hareket etmesi istenir. Araçların hızlarının azalması sisteme dezavantaj olacağı için, genellikle viraj açısının düşük olduğu yollarda uygulanmaktadır. Kılavuzlu yeşil dalga sistemi ise hız düzenlemelerinin esnek olarak yapılabileceği bir sistemdir. Kılavuz hızları viraj yapısına göre değiştirilerek sürücülerin virajlardan güvenli bir şekilde çıkmaları sağlandıktan sonra kılavuz hızında tekrar düzenleme yapılmasıyla yeşil dalga sisteminin aksamasının önüne geçilebilecektir.

4.3. Değerlendirme

Bu çalışmada kılavuzlu yeşil dalga sisteminin belirlenen 4 kavşaklı bir sistem için gerçeğe yakın simülasyonu yapıldı. Simülasyon sonuçları incelendiğinde kılavuzlu yeşil dalga sisteminin sadece direkt yönde ve dönüşlü yönlerde araç hareketlerinin kılavuzsuz yeşil dalga sistemiyle karşılaştırması sonucunda belirgin bir şekilde önde olduğu görülmüştür. Araçlar sadece direkt doğrultuda hareket ettiğinde kılavuzlu ve kılavuzsuz yeşil dalgada elde edilen sonuçlar Çizelge 4.10.'da görüldüğü gibi sınıflandırma birimlerinin tamamında büyük farklılıklar olmaktadır. Araçlar direkt ve dönüş yönlerinde hareket ettiğinde ise Çizelge 4.11.'deki gibi kılavuzlu yeşil dalgalı

sistemde gecikme süreleri ve yakıt tüketim değerlerine bağlı olarak emisyon değerleri düşmekte, kuyruk uzunlukları azalmaktadır. Direkt ve dönüş yönlerine simülasyon uygulandığında elde edilen sonuçlara göre kılavuzlu yeşil dalga sistemiyle tüm kavşakların ortalaması alındığında bir kavşaktaki ortalama gecikme süresi 3,45 s ve kılavuzsuz yeşil dalgalı sistemde ise 13,1 s olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde yakıt tüketimi açısından bakıldığında, bir kavşakta ortalama saatlik yakıt tüketimi kılavuzlu sistemde 39,80 galon iken kılavuzsuz sistemde 74,93 galon olmaktadır.

Çizelge 4. 10. Sadece direkt yönde hareket edildiğinde iki sistemin karşılaştırılması

Araçların bir kavşakta 2 saatlik simülasyon sonucunda ortalama olarak oluşturduğu değerler	Kılavuzlu Yeşil Dalga	Kılavuzsuz Yeşil Dalga
Kuyruk Uzunluğu (m)	0,955	15,87
Gecikme süresi (s)	0,815	12,82
Ortalama seyahat süresi (s)	184	236
Yakıt tüketimi (gal)	32,04	72,14
CO emisyon miktarı (g)	2239,91	5042,8
NOx emisyon miktarı (g)	435,80	981,14
VOC emisyon miktarı (g)	519,12	1168,7

Çizelge 4. 11. Direkt ve dönüş yönlerinde hareket edildiğinde iki sistemin karşılaştırılması

Araçların bir kavşakta 2 saatlik simülasyon sonucunda ortalama olarak oluşturduğu değerler	Kılavuzlu Yeşil Dalga	Kılavuzsuz Yeşil Dalga
Kuyruk Uzunluğu (m)	1,60	15,88
Gecikme süresi (s)	3,45	13,1
Ortalama seyahat süresi (s)	211	230
Yakıt tüketimi (gal)	39,80	74,93
CO emisyon miktarı (g)	2782,47	5238
NOx emisyon miktarı (g)	541,36	1019,12
VOC emisyon miktarı (g)	644,86	1213,95

Görüldüğü gibi kılavuzlu yeşil dalga sistemi, kılavuzsuz yeşil dalga sistemine göre sadece direkt yönde hareket olduğunda kavşaklardaki gecikme sürelerini ortalama %93, ortalama seyahat süresini %22, emisyon değerlerini %55 oranında azaltmaktadır. Dönüştürüldüğünde ise gecikme süreleri %73, ortalama seyahat süresini %8, emisyon değerlerini ise %46 oranında azaltmaktadır. Gerek bu sayısal sonuçlarla, gerekse şehirlerin görünümünü değiştirmesiyle kılavuzlu yeşil dalga sistemi trafikte önemli gelişmeler sağlayacak niteliktedir. Ayrıca yaya açısından bakıldığında, yaya geçidi olmayan kavşaklar arası bölgelerde karşıdan karşıya geçişler son derece kolaylaşmaktadır. Çünkü kılavuzsuz durumda yaya geçmek için bir aracın arkasındaki geniş boşluğu beklerken daha arkadaki bir araç bu boşluğu kapatmak için yayayı düşünmeden hızlanmakta, daha sonra da grup halinde araçların gelmesiyle yayanın karşıya geçmesi iyice zorlaşmaktadır. Kılavuzlu sistemde ise o yolda araçların kırmızı dalgası ilerlerken yaya güvenle karşıya geçebilecektir.

Diğer taraftan sürücülerin yol görüşünü etkileyen havadaki değişimlerden daha az etkilenmeleri için yol üzerine yerleştirilen LED’li yol işaretçileri kavşak noktalarında oluşabilecek kaza risklerini azaltabilecektir. Tüm bu faydalarından dolayı kılavuzlu yeşil dalga sisteminin trafik yönetim sistemlerine entegre edilmesi son derece faydalı olacaktır.



5. SONUÇ

Bu tez çalışmasıyla kılavuzlu yeşil dalga uygulamasının trafik düzenine çok büyük yararlar sağlayacağı simülasyon çalışmalarıyla ortaya konulmuştur. Araçlar, sadece direkt yönde veya hem direkt hem de dönüş yönlerinde hareket ettirildiğinde kavşaklardaki gecikme süresinin kılavuzsuz yeşil dalgaya göre önemli oranda azaltıldığı, seyahat sürelerinin kısaldığı, yakıt tüketimi ve emisyon miktarlarının azaldığı gösterilmiştir. Ayrıca hız esnekliği kılavuzsuz yeşil dalgalı sistemlere göre büyük bir avantaj olmaktadır. Virajlı yollarda da kullanılabilecek olan kılavuz işaretçileri ile sürücülerin istenilen hız aralığında hareket edebilmeleri sağlanacaktır. Kılavuzlu yeşil dalga sistemi, mevcut sinyalizasyon planları değiştirilmeden bile sadece ilaveten yola kılavuz işaretçileri yerleştirilerek uygulanabilir. Her kılavuz işaretçisi, araçların belirlenen noktadan tavsiye edilen seyir hızıyla gittiklerinde kavşakta hangi renk ışıkla karşılaşacaklarını gösterecek şekilde ayarlanırsa kılavuzlu yeşil dalga sistemi amacına ulaşılmış olur. Böylece deneme süreci güvenle aşılabılır. Araçların gitmekte oldukları istikamete daha kısa sürede, daha düşük yakıt tüketimi ve emisyon oranlarıyla gitmelerini sağladığı gibi, yayalar açısından da karşıya geçişleri son derece kolaylaştıran bir düzenlemedir. Hava durumuna bağlı olarak gece veya gündüz yolun görünürlüğünü arttıracak ve kavşak noktalarında kaza risklerinin azaltılmasında etkili olabilecektir. Sürücüler sürüş stillerini geliştirerek araç akışının artması için gerekli olan kılavuz işaretçilerine uymak isteyeceklerdir. Yol üzerine uygulanacak olan farklı sensörlerle de uyum içinde çalışarak daha dinamik bir çalışma şekline kavuşturulabilecektir. Genel olarak büyük faydalar sağlayacak ve şehirlerin görünümünü değiştirecek nitelikteki bu uygulamanın hayata geçirilmesi tavsiye edilmektedir. Bunun için gerekli donanımsal ve uygulamalı faaliyetler ise daha ileri çalışma konusu olarak düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] C. G. Denos ve S. H. Frederick, *Traffic Theory*, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [2] D. Cheng , C. J. Messer, Z. Z. Tian ve J. Liu, Modification of Webster's Minimum Delay Cycle Length Equation Based on HCM 2000, *Paper Submitted to the Transportation Research Board for Presentation and Publication*, 2003.
- [3] D. Gazis, G. Newell, P. Warren ve G. Weiss, The Delay Problem for Crossing and n Lane Highway, New York: Proc. 3rd Intern. Symp. On Traffic Flow, 1967.
- [4] K. W. Huddart, The Importance Of Stops In Traffic Signal Progressions, *Transportation Research*, 143-150, 1969.
- [5] J. Jin, X. Ma ve I. Kosonen, An intelligent control system for traffic lights with simulation-based evaluation, *Control Engineering Practice*, 24-33, 2017.
- [6] J. Perrin, P. Martin ve B. Hansen, Connecting SCOOT to CORSIM: real-time signal optimization simulation, *IEEE*, 2001.
- [7] *Sydney Coordinated Adaptive Traffic System*, https://en.wikipedia.org/wiki/Sydney_Coordinated_Adaptive_Traffic_System (Erişim tarihi: 15.01.2017)
- [8] T. Andersen, Fredericia Kommune, City of Odense, 2007.
- [9] Ç. Varlıorpak, *Trafik ders notları*. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Matbaası, 1982.
- [10] D. Francois, H. Rakha ve Y. S. Kang, Comparison of delay estimates at under saturated and over saturated pre timed signalized intersections,

Transportation Research Part B: Methodological, 99-122, 2004.

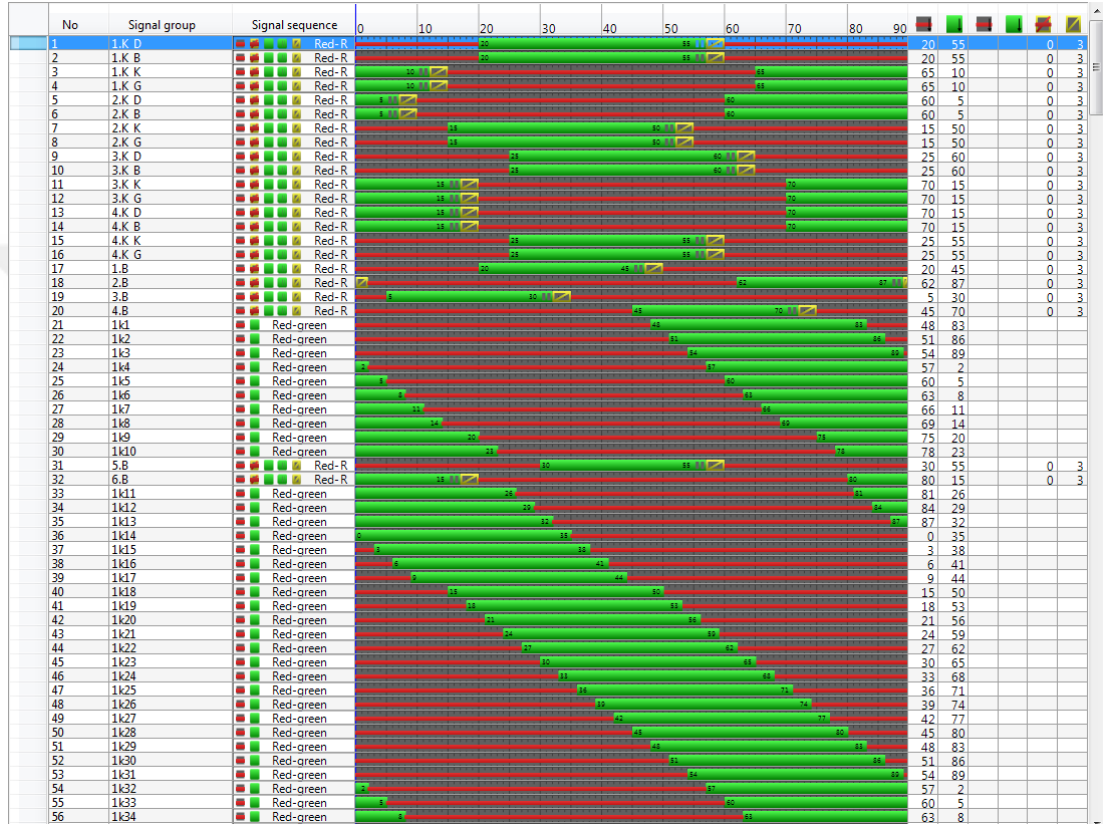
- [11] G. Canseven, *Ağır Araç Oranının Sinyalize Kavşak Kapasitesine Etkisi*, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek lisans Tezi, 2002.
- [12] M. I. Al-Kubaisi, Optimum Cycle Time Prediction for Signalized, *Çankaya University Journal of Science and Engineering*, 149-166, 2012.
- [13] F. Webster, *Traffic Signal Settings*, London: National government publication, 1958.
- [14] E. A. Herman, *Asymptotic Instability of a Platoon of Nine Cars*, 1958.
- [15] J. L. Pline, *Traffic Engineering Handbook*, Institute of Transportation Engineers, 1999.
- [16] T. Apostola, *A traffic signal optimization method for balancing*, 2014.
- [17] W. Waitoa, 2008, <http://www.pncc.govt.nz/content/5777/Road%20> (Erişim tarihi: 05.12.2016)
- [18] S. Pasagic ve A. Scukanac, *Historical Development Of Traffic Signs*, Promet - Traffic- Traffico, Zagreb , 1998 .
- [19] Y. Zhang ve G. Huang, Based on road green wave effect of collaborative strategy of signal timing fuzzy control, *Applied Mechanics and Materials*, pp. Vols. 321-324 1836-1841., 2013.
- [20] H. Hu, Y. Gao ve X. Yang, Multi-objective Optimization Method of Fixed-Time Signal Control of Isolated Intersections, *IEEE*, 2010.
- [21] A. A. Saka, A. Anandalingam ve N. J. Garber, Traffic signal timing at isolated intersections using simulation optimization, *WSC '86 Proceedings of the 18th conference on Winter simulation*, 795-801, 1986.
- [22] Bau- und Wohnungs Ministerium für Innere Bericht, Bundes Verkehr, 1992.

- [23] D. NIU ve J. SUN, Eco-Driving Versus Green Wave Speed Guidance for Signalized Highway Traffic: A Multi-Vehicle Driving Simulator Study, *Dening Niu and Jian Sun / Procedia - Social and Behavioral Sciences* 96, 1079-1090, 2013.
- [24] Trafik Güvenliği Dairesi Başkanlığı Mayıs 2015 Trafik Kazaları Özeti, 2015.
- [25] 2014-2023 Ulusal AUS Strateji Belgesi Eki Eylem Planın Geliştirme Raporu, 2014. <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2014/10/20141025-21-1.pdf> (Erişim tarihi: 07.10.2016)
- [26] T. Nagatani, Vehicular traffic through a sequence of green-wave lights, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 503-511, 2007.
- [27] WHO, World report on road traffic injury prevention, WHO, Geneva, 2004.
- [28] KGM, Trafik Kazaları Özeti, Trafik Güvenliği Dairesi Başkanlığı, 2016.
- [29] OECD, 2014. <https://data.oecd.org/transport/road-accidents.htm> (Erişim tarihi: 22.12.2016)
- [30] ASIRT, 2016. <https://asirt.org/initiatives/informing-road-users/road-safety-facts/road-crash-statistics> (Erişim tarihi: 13.09.2016)
- [31] WHO, Estimated number of road traffic deaths, 2013. http://gamapserver.who.int/gho/interactive_charts/road_safety/road_traffic_deaths/atlas.html (Erişim tarihi: 23.11.2016)
- [32] KGM, Trafik Güvenliği, Ankara, 2011.
- [33] P. d. Milano.İtalya/Milano Patent: MI2014A001024, 2014.
- [34] PTV Group, 2017. <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-uk/products/ptv-vissim/use-cases/junction-geometry/> PTV (Erişim tarihi: 18.01.2017)

- [35] U. Durrani, C. Lee ve H. Maoh , Calibrating the Wiedemann's vehicle-following model using mixed vehicle-pair interactions, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 227–242, 2016.
- [36] VISSIM 5.30-05 User Manual, 2011.
https://www.et.byu.edu/~msaito/CE662MS/Labs/VISSIM_530_e.pdf
(Erişim tarihi: 24.09.2016)
- [37] B. Higgs, M. Abbas ve A. Medina, Analysis of the Wiedemann Car Following Model over Different Speeds using Naturalistic Data, *ResearchGate*, 2011.
- [38] T. Tettamanti, A. Csikós, . I. Varga ve . A. Eleöd, Iterative Calibration of VISSIM Simulator Based on Genetic Algorithm, *Acta Technica Jaurinensis, Vol. 8, No. 2*, 145-152, 2015.
- [39] DIGI, XBee - XBee Pro RF Modules, 2009.
<https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-Datasheet.pdf> (Erişim tarihi: 12.11.2016)
- [40] DIGI, Wireless Mesh Networking ZigBee vs. DigiMesh, 2015.
https://www.digi.com/pdf/wp_zigbeevsdigimesh.pdf (Erişim tarihi: 17.12.2016)
- [41] Highway Capacity Manual (HCM). Transportation Research Board, New TRB Publication, ABD, 2011.
- [42] American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO, A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, Washington, 1990.
- [43] N. Y. KOCADAĞ, Kılavuzlu ve Kılavuzsuz Yeşil Dalga Simölasyonlarının Video Görüntüleri, <https://tinyurl.com/hsv5bl6> (Erişim tarihi: 25.02.2017).

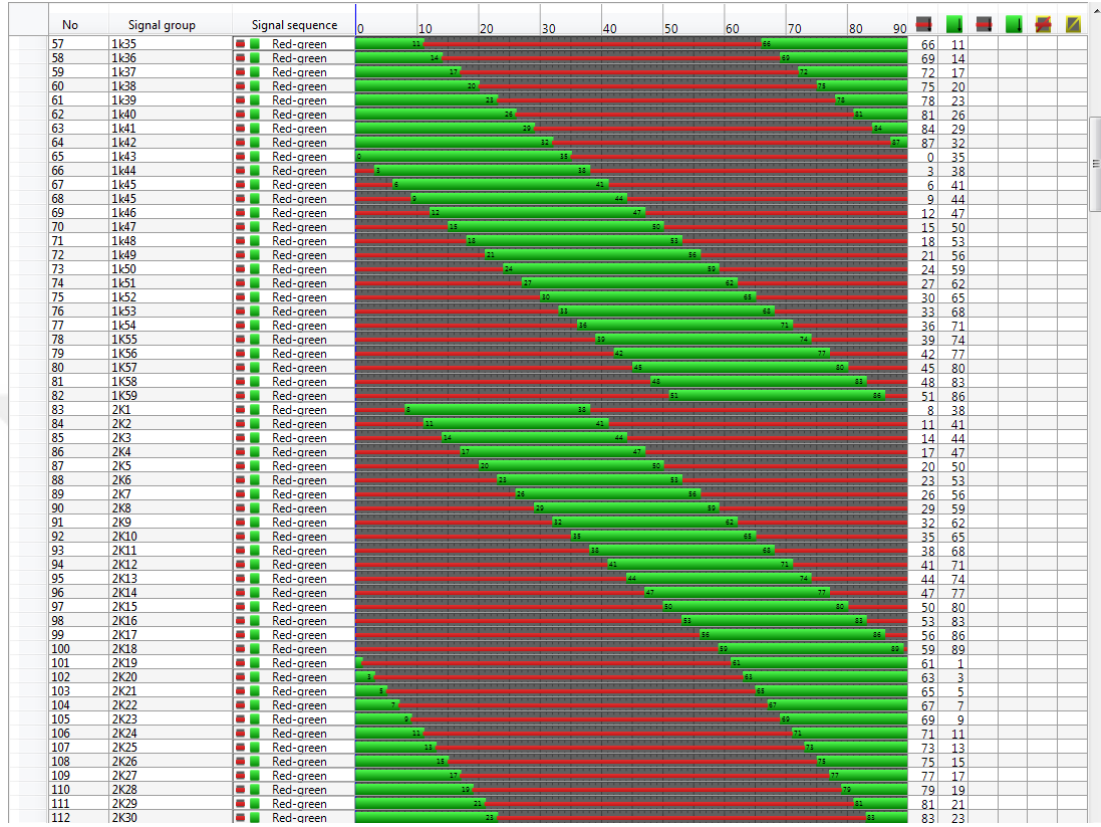
EKLER

EK 1 Kılavuzlu ve Kılavuzsuz Yeşil Dalga Sistemlerinin Simülasyonlarında Kullanılan Sinyal Planı



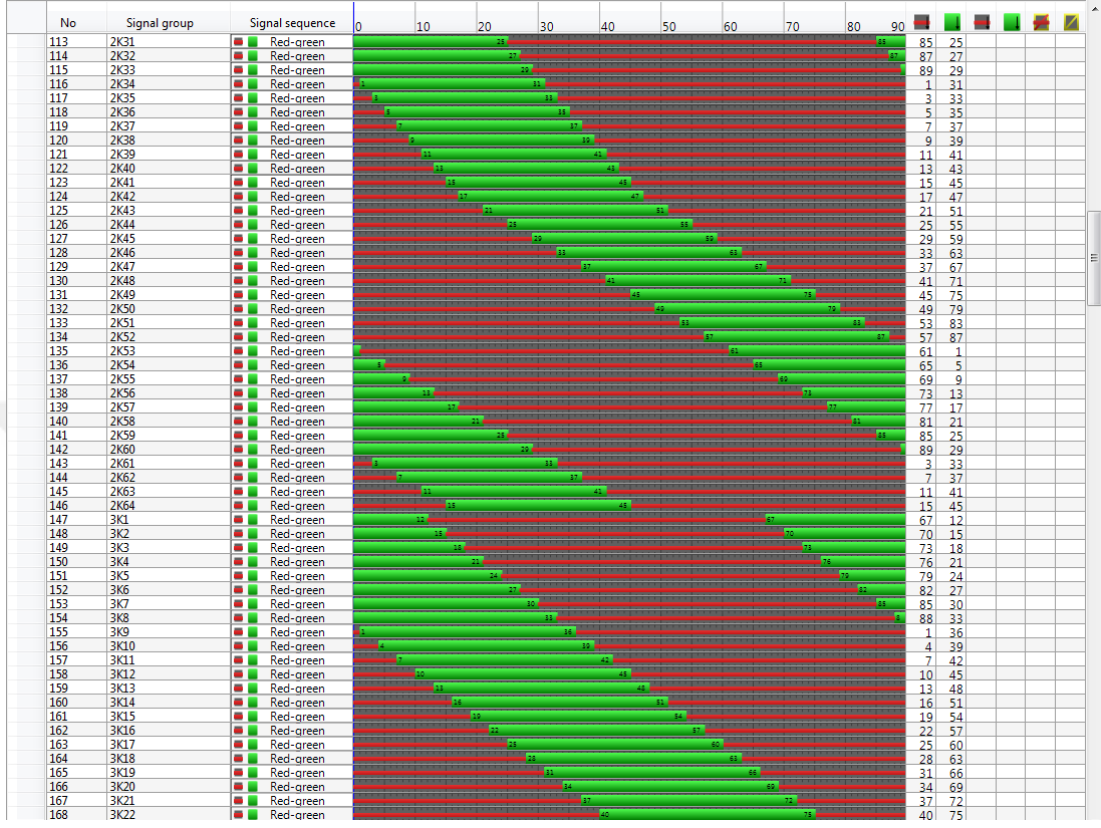
(a)

EK 1 (Devam) Kılavuzlu ve Kılavuzsuz Yeşil Dalga Sistemlerinin Simülasyonlarında Kullanılan Sinyal Planı



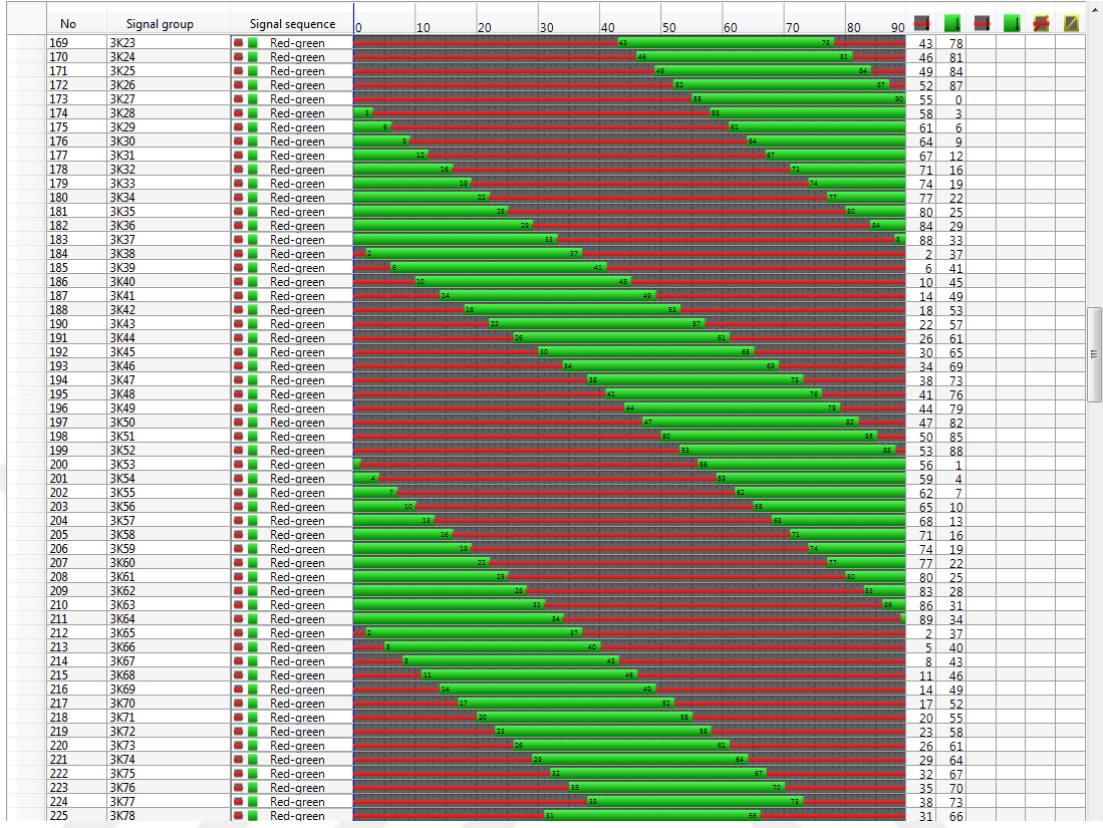
(b)

EK 1 (Devam) Kılavuzlu ve Kılavuzsuz Yeşil Dalga Sistemlerinin Simülasyonlarında Kullanılan Sinyal Planı



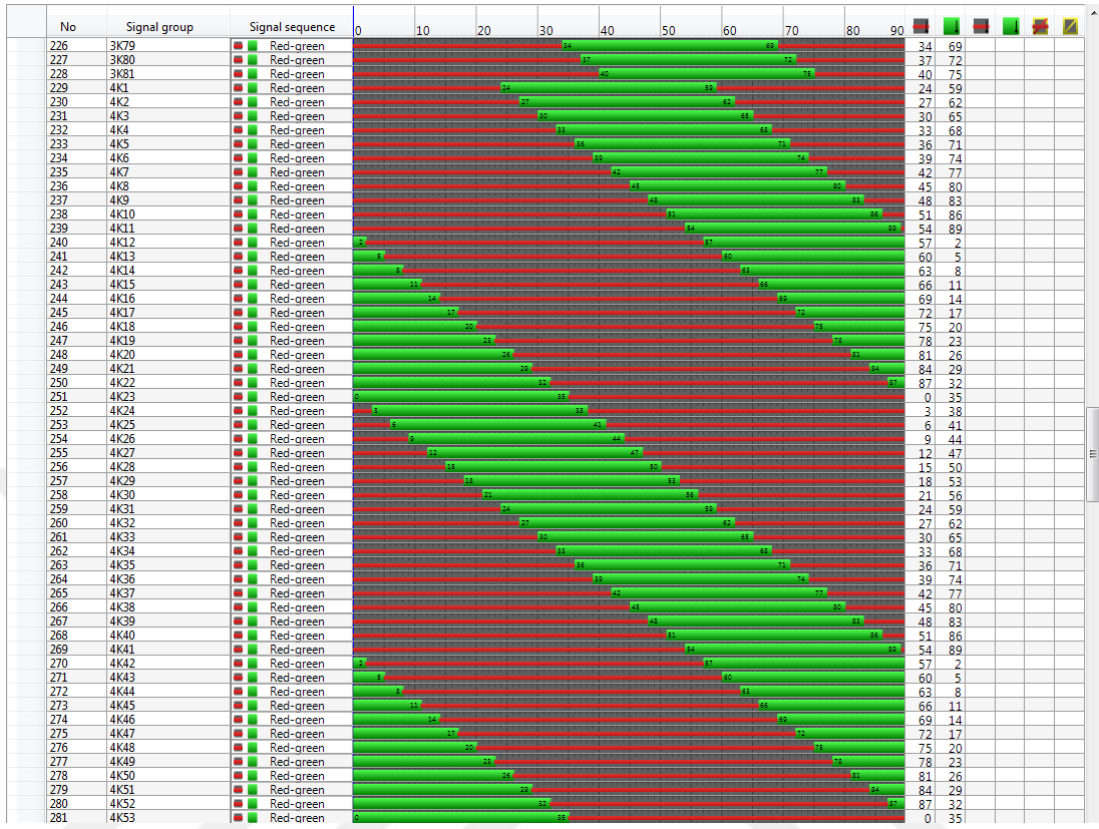
(c)

EK 1 (Devam) Kılavuzlu ve Kılavuzsuz Yeşil Dalga Sistemlerinin Simülasyonlarında Kullanılan Sinyal Planı



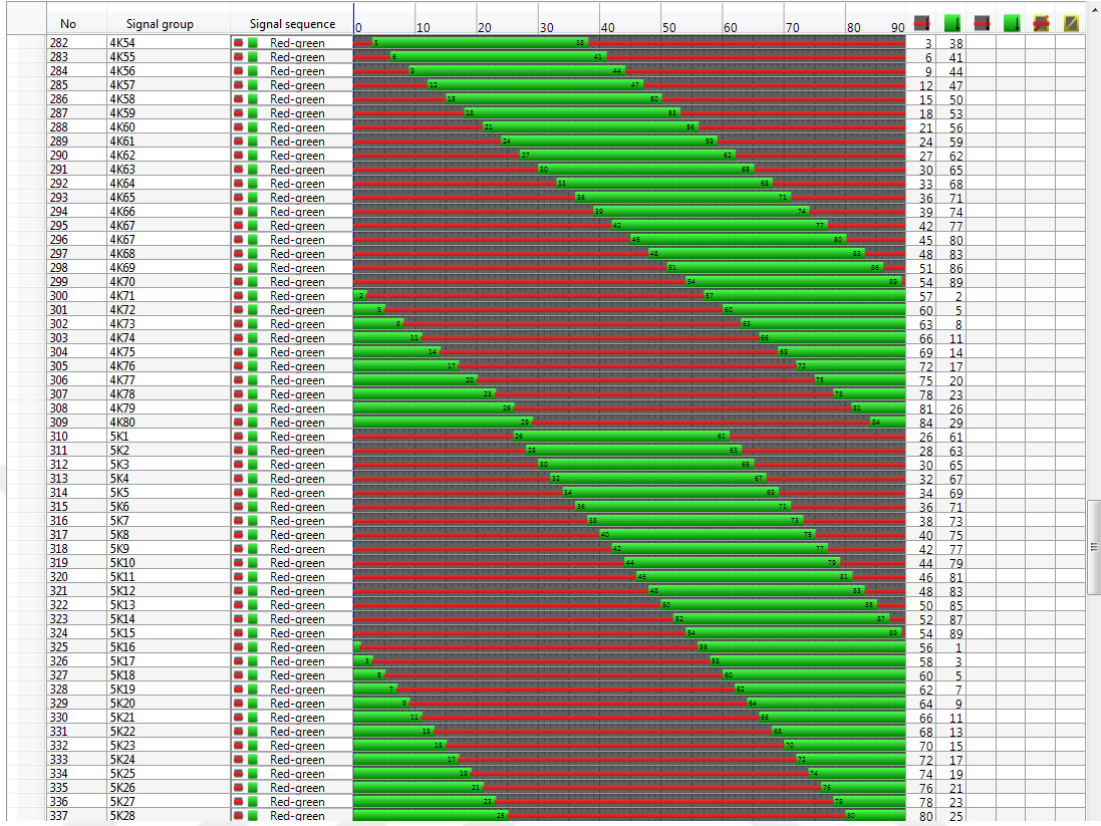
(d)

EK 1 (Devam) Kılavuzlu ve Kılavuzsuz Yeşil Dalga Sistemlerinin Simülasyonlarında Kullanılan Sinyal Planı



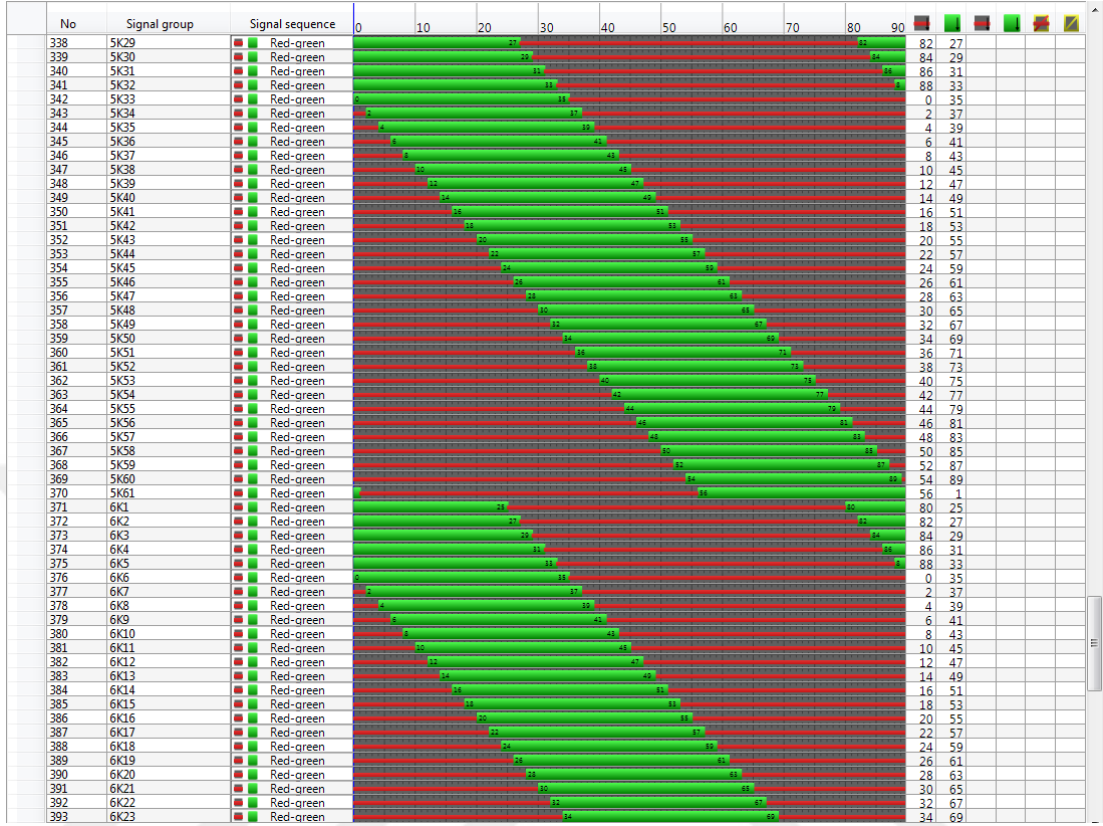
(e)

EK 1 (Devam) Kılavuzlu ve Kılavuzsuz Yeşil Dalga Sistemlerinin Simülasyonlarında Kullanılan Sinyal Planı



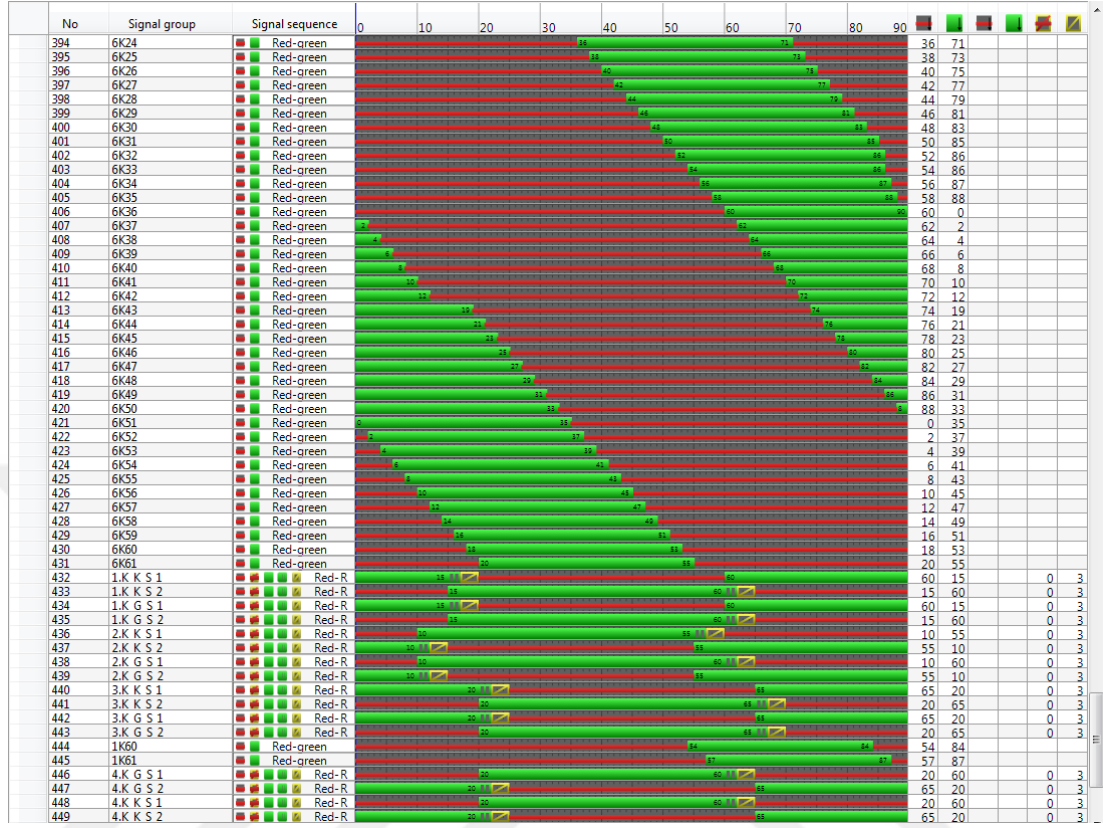
(f)

EK 1 (Devam) Kılavuzlu ve Kılavuzsuz Yeşil Dalga Sistemlerinin Simülasyonlarında Kullanılan Sinyal Planı



(g)

EK 1 (Devam) Kılavuzlu ve Kılavuzsuz Yeşil Dalga Sistemlerinin Simülasyonlarında Kullanılan Sinyal Planı



(h)



(i)

Şekil Ek 1. 1. Kılavuzlu ve kılavuzsuz yeşil dalga sistemlerinin simülasyonlarında kullanılan sinyal planı