

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

EĞİM, HAVA ŞARTLARI VE YOLCULUK TÜRÜNÜN SARI IŞIK ANINDAKİ
SÜRÜCÜ DAVRANIŞINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Murat Hüseyin AKYÜZ

ARALIK 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**EĞİM, HAVA ŞARTLARI VE YOLCULUK TÜRÜNÜN SARI IŞIK ANINDAKİ
SÜRÜCÜ DAVRANIŞINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Murat Hüseyin AKYÜZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 / 10 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 02 / 12 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Şeref ORUÇ

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Eğim, Hava Şartları ve Yolculuk Türünün Sarı Işık Anındaki Sürücü Davranışına Etkilerinin İncelenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, vazgeçmeme müsaade etmeyen, umutsuzluğa düştüğüm anlarda dahi benden umudunu kesmeyen, tecrübesi ve birikimiyle yolumu aydınlatan, öğrencisi olmaktan onur duyduğum kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Şeref ORUÇ’a sabrı, emeği ve liderliği için en kalbi teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasının gerçekleşebilmesi adına, gençlik ve öğrencilik yıllarımdan geçtiği, çok sevdiğim, dünyanın merkezi konumundaki İstanbul’u adeta bir laboratuvar olarak bana açan İBB Trafik Şube Müdürlüğü’nün tüm personeline; başta Şube Müdürü Serap Çetinkaya hanımefendi olmak üzere, bir önceki Şube Müdürü Tuncay Önderoğlu’na, Müdür Yardımcısı Alican Yoloğlu’na, kıymetli kardeşim UYM görevlisi İbrahim Akgül’e, Sinyal Şefi Köksal Demirkaya’ya, İSBK Sinyal Şefi Sencer OKTAV’a, Bilgisayar Mühendisi Fatih Kahya’ya ve Uğur Akbaba’ya şükranlarımı sunarım.

Bilgisayar başında birlikte gece-gündüz demeden çalıştığımız Morecycle Technology’nin kurucusu kıymetli kardeşim Muhammet Taha Topallı’ya, benimle İstanbul’u sokak sokak gezen kardeşim Muhammet Güllük’e, desteklerini ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli arkadaşlarım Halil İbrahim Yurdgülü, Mehmet Arif Yalçın, Mehmet Akif Akbaş, Erman Çavdar, Mustafa Kara, Ufuk Başarkan, Seçkin Doğruer, Berna Aksoy, Halil Şentürk, Mustafa Onur Yüzer ve Ediz Boz’a ve daha ismini burada sayamadığım ancak bu çalışmada emeği olan tüm arkadaşlarıma şükranlarımı sunarım.

Aldığım tüm kararlarda beni sonuna kadar destekleyen ve benden yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen bir ailem olduğu için ne kadar şükretsem azdır. Başta babam Mustafa Akyüz, annem Seyhan Akyüz ve kardeşim Mehmet Salih olmak üzere, benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen tüm aileme müteşekkirim.

Derdimle hemhal olan, sabrını ve anlayışını benden esirgemeyen, birlikte her zorluğa göğüs gerdiğim, çok sevdiğim eşim Elif’e ve biricik canım kızım Hatice Betül’e minnettarım.

Murat Hüseyin AKYÜZ

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Eğim, Hava Şartları ve Yolculuk Türünün Sarı Işık Anındaki Sürücü Davranışına Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Şeref ORUÇ’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 02/12/2024

Murat Hüseyin AKYÜZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIV
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XVI
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Sarı Işık Problemi ve İkilem Bölgesi	3
1.3. Sürücü Davranışı	10
1.4. Ülkemizde Yapılan Çalışmalar ve Mevcut Durum	48
1.5. Çalışmanın Amacı, Önemi ve Kapsamı	49
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	51
2.1. Kavşak Seçim Kriterleri	51
2.2. Çevrimiçi Kavşak Taraması	52
2.3. Saha Çalışması	53
2.4. Seçilen Kavşakların Çalışma İçin Uygun Hale Getirilmesi	55
2.4.1. Görüntü Kalitesinde Yaşanan Problemlerin Giderilmesi.....	56
2.4.2. Sarı Işık Anının Tespit Edilememesi	56
2.4.3. Kamera Civarında Bulunan Ağaç Dallarının Görüşü Engellemeesi.....	57
2.4.4. Kamera Açılarının Kendiliğinden ya da Müdahale ile Değişmesi.....	57
2.4.5. Bağlantı Elemanlarında Yaşanan Problemler	58
2.5. Kayıt Aşaması	58
2.6. İhtiyaç Duyulan Parametrelerin Elde Edilmesi	59
2.6.1. Görüntü İşleme Uygulamaları.....	59
2.6.2. Python Programlama Dili.....	60
2.6.3. Elde Edilen Kamera Görüntülerinin, Görüntü İşlemeye Uygunluklarının Değerlendirilmesi	64
2.6.4. Kamera Görüntülerinin Analiz İçin Uygun Hale Getirilmesi.....	68

2.7.	Parametre Analizi	76
2.7.1.	Perspektif Dönüşümü ve Takip Algoritması.....	76
2.7.2.	Konum-Zaman Verilerinin Elde Edilmesi ve Filtreleme İşlemi	79
2.7.3.	Parametre Tespit Algoritması (Model Oluşturulması).....	86
3.	BULGULAR VE İRDELEME	97
3.1.	Elde Edilen Taşıt Verilerine Ait Temel İstatistik Bilgiler.....	97
3.1.1.	Günlere Göre Durma Geçme Sayıları	97
3.1.2.	Taşıt Tipine Göre Durma-Geçme Sayıları	99
3.1.3.	Saatlere Göre Durma-Geçme Sayıları.....	101
3.2.	Tip I İkilem Bölgesi Analizi.....	102
3.2.1.	Alibeyköy Kavşağı İçin Tip I İkilem Bölgesi Analizi	103
3.2.2.	Maslak Kavşağı İçin Tip I İkilem Bölgesi Analizi	107
3.3.	Y+R Değişiminin İkilem Bölgesi Oluşumuna Etkisi	109
3.4.	RLR ve Sarı Giriş Süresi Analizi	110
3.4.1.	Alibeyköy Kavşağı İçin Sarı Giriş Süresi Analizi	110
3.4.2.	Maslak Kavşağı İçin Sarı Giriş Süresi Analizi	112
3.4.3.	Alibeyköy Kavşağı İçin RLR Analizi	113
3.4.4.	Maslak Kavşağı İçin RLR Analizi	117
3.5.	Tip I İkilem Bölgesi, RLR ve Sarı Giriş Süresi Analiz Bulgularının Mukayeseli Olarak İrdelenmesi.....	118
3.6.	Tip II İkilem Bölgesi Analizi	121
3.6.1.	TTI ve DTI Parametrelerinin Sürücü Davranışına Etkisi	121
3.6.2.	Hava Şartlarının Sürücü Davranışına Etkisi	124
3.6.3.	Günlere Göre Yolculuk Türünün Sürücü Davranışı Üzerindeki Etkisi	125
3.6.4.	Saatlere Göre Yolculuk Türünün Sürücü Davranışına Etkisi	125
3.6.5.	Şerit Konumunun Sürücü Davranışına Etkisi	127
3.6.6.	Alibeyköy Kavşağında Taşıt Tipinin Sürücü Davranışına Etkisi	127
3.6.7.	Maslak Kavşağında Yaya Varlığının Sürücü Davranışına Etkisi	129
3.6.8.	Maslak Kavşağında Taşıt Tipinin Sürücü Davranışına Etkisi ve Nihai Model	129
3.6.9.	Alibeyköy Kavşağı İçin Nihai Model	130
3.6.10.	Maslak Kavşağı Modelinden Elde Edilen NRS Değerlerinin İrdelenmesi.....	131
3.6.11.	Tip II İkilem Bölgesi Sınırlarının İki Kavşakta Mukayeseli Olarak İrdelenmesi	134

4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	140
5. KAYNAKLAR	145
ÖZGEÇMİŞ	



Doktora Tezi

ÖZET

EĞİM, HAVA ŞARTLARI VE YOLCULUK TÜRÜNÜN SARI IŞIK ANINDAKİ SÜRÜCÜ DAVRANIŞINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Murat Hüseyin AKYÜZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Şeref ORUÇ
2024, 151 Sayfa

Sinyalize kavşaklarda sarı ışık yanmasıyla sürücüler, durmak ya da devam etmek arasında bir tercih yaparlar. İkilemin yaşandığı bu gibi durumlarda verilecek yanlış bir karar, kırmızı ışık ihlallerine ve neticesinde trafik kazalarına sebep olur. Bu çalışmanın temel amacı; kavşaklarda sarı ışık anında meydana gelen olayları anlamak, sürücü davranışına etki eden faktörleri, kural ihlallerini ve trafik kazalarının sebeplerini tespit etmek ve çözüm için öneriler sunmaktır. Bu kapsamda, düşük bütçeli ve mevcut kamu imkanlarının ortak kullanımını amaçlayan yeni bir yöntem geliştirilerek ihtiyaç duyulan hız, konum, TTI, ivme, taşıt tipi, şerit konumu gibi parametreler her bir taşıt için hızlı ve güvenilir bir şekilde tespit edilmiştir. Söz konusu parametreler yardımıyla sarı ışık ikilemi İstanbul için tanımlanmış; eğim, yolculuk türü, hava şartları, taşıt tipi gibi faktörlerin sürücü davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma neticesinde farklı koşullara sahip iki kavşakta devam kararı veren sürücülerin, benzer sarı ışık algısına sahip oldukları gözlenmiştir. Hava şartları, yolculuk türü ve taşıt tipinin sürücü davranışını etkilediği, negatif eğim ve hızın ise sürücü davranışını diğer faktörlere daha az duyarlı hale getirdiği tespit edilmiştir. Hem Tip I ikilem bölgesi davranışının, hem de Tip II ikilem bölgesi sınırlarının uluslararası literatürde bulunan sonuçlarla ciddi farklılıklar içerdiği ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: İkilem bölgesi, Sinyalize kavşak, Sarı Işık İhlali, Kırmızı Işık İhlali, TTI

PhD. Thesis

SUMMARY

ANALYSIS OF THE EFFECTS OF GRADE, WEATHER CONDITIONS AND TRIP TYPE ON DRIVER BEHAVIOR DURING THE YELLOW INTERVAL

Murat Hüseyin AKYÜZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Şeref ORUÇ
2024, 151 Pages

At signalized intersections, drivers make a stop/go decision during the yellow interval. In such situations, where a dilemma may occur, an incorrect decision can lead to red-light violations and, consequently, traffic accidents. The primary objective of this study is to understand the events occurring during the yellow interval at intersections, identify the factors influencing driver behavior, rule violations, and the causes of traffic accidents, and propose solutions. In this context, a new method was developed to achieve a low-cost approach and ensure the shared use of existing public resources. Using this method, parameters such as speed, position, TTI, acceleration, vehicle type, and lane information were rapidly and reliably determined for each vehicle. By utilizing these parameters, the yellow light dilemma was defined for Istanbul, and the effects of factors such as gradient, trip type, weather conditions, and vehicle type on driver behavior were analyzed. The study observed that drivers who decided to proceed at two intersections with different conditions had similar perceptions of the yellow light. It was determined that weather conditions, trip type, and vehicle type influence driver behavior, whereas negative gradients and speed make drivers less sensitive to other factors. Additionally, it was revealed that both the behavior in Type I dilemma zones and the boundaries of Type II dilemma zones differ significantly from the results found in the international literature.

Key Words: Dilemma zone, Signalized intersection, Yellow Light Running (YLR), Red Light Running (RLR), TTI

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. “Dur” (Cannot Go) ve “Devam Et” (Cannot Stop) Bölgeleri.....	5
Şekil 2. X_c ve X_s ’ye bağlı olarak ortaya çıkabilecek tüm bölgeler.....	5
Şekil 3. Tip I ve Tip II İkilem Bölgeleri	9
Şekil 4. Sarı Işık Problemi – Literatür Şeması.....	10
Şekil 5. Kentucky’deki sürücüler için hıza bağlı Tip II ikilem bölgesi eğrileri (Zegeer, 1977).....	11
Şekil 6. $V=70$ km/sa hız değerinde, $\dot{I}m$ ve Hm ’nin Sarı + Koruma Süresine göre değişimi.....	15
Şekil 7. Lineer regresyon ve lojistik regresyon eğrilerinin karşılaştırılması (Seufert, 2014)	16
Şekil 8. Parametre varyasyon katsayılarına göre yeşiller arası sürenin hassasiyeti (Easa, 1993).....	21
Şekil 9. İkilem bölgesi oluşmadığı durumda, sabit V_o ve farklı W değerleri etkisinde τ_{min} parametresinin değişimi (Gazis, Herman, & Maradudin, 1960).....	23
Şekil 10. İki farklı dağılım metodu kullanılarak önerilen prt modelleri (Rakha vd., 2007).....	28
Şekil 11. Yavaşlama ivmesinin taşıt yaklaşım hızına göre dağılımı (Gates vd., 2007).....	29
Şekil 12. Yavaşlama ivmesi ve hız parametrelerinin ikilem bölgesi uzunluğu üzerindeki etkileri ($prt=1,5$ s; $I=3$ s; $W=25$ m), (Mercan, 2023).....	32
Şekil 13. Taşıtların durma çizgisine olan mesafelerine göre durabilme ihtimallerinin gözlem verisi ve modelleme sonuçlarına göre karşılaştırılması (GT: saha çalışması verileri, FMR: bulanık mantık sonuçları), (Hurwitz vd., 2012).....	34
Şekil 14. Taşıtların durma veya devam etme ihtimallerinin durma çizgisine olan mesafeye göre dağılımı (İki çalışma karşılaştırmalı olarak verilmiştir), (Hurwitz vd., 2012).....	34
Şekil 15. Mesafe ve hız ve temelli bulanık mantık modellemesi ($ft.$ ve ft/s^2)	35
Şekil 16. Saatlik ortama trafik ve saatlik sarı ışık ihlalleri arasındaki ilişki (Lu vd., 2015).....	38
Şekil 17. Karlı olan ve olmayan günler için uydurulan regresyon eğrilerinin trafik etkisinde karşılaştırılması (Lu vd., 2015).	39
Şekil 18. Kırmızı ışık ihlallerinin analizi için Li vd. tarafından oluşturulan kavramsal çerçeve.....	41

Şekil 19.	İki aşamalı lojistik regresyonun kavramsal gösterimi (Li, Jia, & Shao, 2016).	41
Şekil 20.	Farklı sürüş koşullarının devam et kararının verilmesindeki etkileri (Choudhary & Velaga, 2019)	42
Şekil 21.	Taşıtların durma ihtimalinin, farklı geometrideki iki kavşağa ve durma çizgisine olan mesafeye göre dağılımı (Pathivada & Perumal, 2019).....	43
Şekil 22.	Taşıtların durma ihtimalinin mesafe ve taşıt tipine bağlı olarak dağılımı (Pathivada & Perumal, 2019)	43
Şekil 23.	Farklı parametrelerin mesafeyle birlikte durabilme ihtimaline etkisi (Chauan vd. 2021).....	46
Şekil 24.	Sürücülerin durabilme ihtimalinin, durma çizgisine olan mesafe ve farklı hız grupları etkisi altında incelenmesi (Mercan, 2023).....	49
Şekil 25.	İBB Trafik Müdürlüğü Bünyesindeki Ulaşım Yönetim Merkezi.....	52
Şekil 26.	17008 numaralı Sahilyolu Cevizli Kavşağına ait referans ölçümü	54
Şekil 27.	Seçilen kavşakların trafik haritası üzerindeki yaklaşık konumları	55
Şekil 28.	Direklere montajı yapılan projektörler (solda) ve sarı ışık tahmini yapılan yaya üniteleri (sağda).....	57
Şekil 29.	Budama işlemi yapılan 21055 numaralı Derbent (Maslak) kavşağına ait görüntü.....	57
Şekil 30.	OpenCV Bilişenleri	61
Şekil 31.	Görüntünün ızgaralara ayrılarak tahmin yapılması (URL-7, 2024)	62
Şekil 32.	Sınırlayıcı kutu ve çizim parametreleri (URL-7, 2024).....	63
Şekil 33.	NMS Algoritması çalışma prensibi (URL-8, 2024)	63
Şekil 34.	19013 numaralı Dragos Sahilyolu isimli kavşağa ait görüntüde yaşanan problemler	65
Şekil 35.	31020 numaralı Erciyeskent kavşağına ait görüntü.....	66
Şekil 36.	33020 ve 33023 numaralı kavşaklara ait görüntüler.....	67
Şekil 37.	29019 numaralı Kamiloba kavşağına ait görüntü	68
Şekil 38.	11039 numaralı Alibeyköy kavşağına ait sinyalize kavşak projesi	69
Şekil 39.	11039 numaralı Alibeyköy kavşağına ait faz diyagramı	70
Şekil 40.	11039 numaralı Alibeyköy kavşağına ait görüntü.....	71
Şekil 41.	RGB Renk Küpü (Gonzales & Wintz, 1987)	72
Şekil 42.	Renklerin RGB ve HEX değerleri (URL-11, 2024)	72
Şekil 43.	OrtRGB programına ait görseller	73
Şekil 44.	Oluşturulan görüntü kesme programının arayüzü ve istenen parametreler	75
Şekil 45.	21055 numaralı Derbent (Maslak) kavşağına ait perspektif dönüşümü	77

Şekil 46.	11039 Alibeyköy kavşağı için etiketleme işlemi.....	78
Şekil 47.	Oluşturulan ara model sonucu elde edilen yeni etiket karesi örneği	79
Şekil 48.	Bir taşıtın kamera görüntüsü üzerinde oluşturduğu yörünge izi.....	80
Şekil 49.	Bir taşıtın hareketini gösteren gürültülü veri örnekleri (Nauman vd., 2024).....	81
Şekil 50.	17017 numaralı kavşaktan yağmurlu bir günde alınan görüntüdeki salınımın giderilmesi	82
Şekil 51.	Pendik kavşağında meydana gelen sapmaya ait görüntüler	83
Şekil 52.	Analog bir alçak geçiren Butterworth filtresinde filtre derecesindeki artışın frekans yanıtı üzerindeki etkisi (Jasim vd., 2020)	84
Şekil 53.	Sarı ışık anında duran bir taşıta ait konum farkı-zaman verilerinin filtre çıktısı ile karşılaştırılması	85
Şekil 54.	Analiz kapsamı dışında bırakılan bir taşıta ait hız-zaman grafiği	86
Şekil 55.	21055 numaralı Derbent (Maslak) kavşağına ait analiz görüntüsü	87
Şekil 56.	Parametre tespit algoritması yardımıyla gerçekleşen olayların konum ve zaman eksenlerine göre tanımlanması	89
Şekil 57.	Duran taşıtlar için belirlenen doğrusal ivme fonksiyonu.....	93
Şekil 58.	Oluşturulan Parametre Tespit Programı Arayüzü.....	96
Şekil 59.	Alibeyköy kavşağı için günlere göre duran-geçen taşıt sayıları.....	98
Şekil 60.	Maslak kavşağı için günlere göre duran-geçen taşıt sayıları	99
Şekil 61.	Alibeyköy kavşağı için taşıt tipine göre duran-geçen taşıt sayıları	100
Şekil 62.	Maslak kavşağı için taşıt tipine göre duran-geçen taşıt sayıları	100
Şekil 63.	Alibeyköy kavşağı için saatlere göre duran-geçen taşıt sayıları.....	101
Şekil 64.	Maslak kavşağı için saatlere göre duran-geçen taşıt sayıları.....	102
Şekil 65.	Alibeyköy kavşağına ait Tip I ikilem bölgesi analiz sonuçları.....	103
Şekil 66.	Alibeyköy kavşağı için Tip I İkilem Bölgesi – Sınırlandırılmış Analiz.....	104
Şekil 67.	Alibeyköy kavşağı dur bölgesinde olan taşıtlar için Tip I ikilem bölgesi sınırlandırılmış analiz verilerinin saatlere göre dağılımı	105
Şekil 68.	Alibeyköy kavşağı dur bölgesinde olan taşıtlar için Tip I ikilem bölgesi sınırlandırılmış analiz verilerinin günlere göre dağılımı	106
Şekil 69.	Alibeyköy kavşağına ait Tip I ikilem bölgesi analiz sonuçları.....	107
Şekil 70.	Maslak kavşağı için Tip I İkilem Bölgesi – Sınırlandırılmış Analiz.....	108
Şekil 71.	Maslak kavşağında olası Y+R değişimlerinin ikilem bölgesi oluşumuna etkisi.....	110
Şekil 72.	Alibeyköy kavşağında devam eden tüm taşıtlar için sarı giriş süresinin histogramı	111

Şekil 73.	Alibeyköy kavşağında devam eden tüm taşıtların sarı giriş süresi dağılımı.....	111
Şekil 74.	Maslak kavşağında devam eden tüm taşıtlar için sarı giriş süresinin histogramı	112
Şekil 75.	Maslak kavşağında devam eden tüm taşıtların sarı giriş süresi dağılımı.....	113
Şekil 76.	Alibeyköy kavşağında devam kararı veren sürücülerin, taşıt tipine göre RLR dağılımı	114
Şekil 77.	Alibeyköy kavşağında devam kararı veren sürücülerin, bulundukları Tip I bölgesine göre RLR dağılımı.....	115
Şekil 78.	Opsiyon bölgesinde bulunup devam eden taşıtlara ait sarı giriş süresi histogramı	116
Şekil 79.	RLR - koruma süresi ilişkisi.....	116
Şekil 80.	Maslak kavşağında devam kararı veren sürücülerin, taşıt tipine göre RLR dağılımı	117
Şekil 81.	Maslak kavşağında devam kararı veren sürücülerin, bulundukları Tip I bölgesine göre RLR dağılımı.....	118
Şekil 82.	YLR vakalarının Tip I modeli bölgelerine göre dağılımı ve mukayeseli gösterimi	119
Şekil 83.	Alibeyköy ve Maslak kavşakları için sarı giriş süresi dağılımının mukayeseli olarak gösterimi.....	120
Şekil 84.	Alibeyköy kavşağı ortalama Tip II ikilem bölgesi sınırları.....	122
Şekil 85.	Maslak kavşağı ortalama Tip II ikilem bölgesi sınırları.....	123
Şekil 86.	Sabah ve diğer saatlerdeki sürücülerin TTI'ya göre durabilme ihtimalleri.....	126
Şekil 87.	Otomobil ve taksi sürücülerinin TTI'ya göre durabilme ihtimalleri	128
Şekil 88.	Maslak kavşağında devam eden taşıtların hız dağılımı	132
Şekil 89.	Alibeyköy ve Maslak kavşakları durabilme ihtimalinin TTI'ya göre değişimi ($TTI \leq 10$ s olan taşıtlar)	134
Şekil 90.	Alibeyköy ve Maslak kavşaklarında durabilme ihtimalinin DTI'ya göre değişimi.....	135
Şekil 91.	Her iki kavşakta duran taşıtların hız-mesafe dağılımlarının karşılaştırılması.....	136
Şekil 92.	Her iki kavşakta duran taşıtların mesafeye göre % dağılımlarının karşılaştırılması.....	137
Şekil 93.	Her iki kavşakta devam eden taşıtların hız-mesafe dağılımlarının karşılaştırılması.....	137
Şekil 94.	Her iki kavşakta devam eden taşıtların mesafeye göre % dağılımlarının karşılaştırılması.....	138

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Amerika’da gerçekleşen kaza ölümlerinin dağılımı	1
Tablo 2. İdeal güvenlik koşullarına yakın olarak kurgulanan bir kavşakta; hız, sarı + koruma süresi ve ikilem bölgesi arasındaki ilişki.....	6
Tablo 3. Görece olumsuz şartlar dikkate alınarak kurgulanan bir kavşakta; hız, sarı + koruma süresi ve ikilem bölgesi arasındaki ilişki.....	7
Tablo 4. Erken dönem araştırmacıların tespit ettiği hıza bağlı ikilem bölgesi sınırları (Zegeer, 1977)	12
Tablo 5. Hızdaki değişimin hızlanma ivmesine olan etkisi	14
Tablo 6. İdeal güvenlik şartlarına yakın olarak kurgulanan bir kavşakta; Hm, İm, Sm ve Xc’nin hız ve sarı + koruma süresiyle ilişkisi	14
Tablo 7. Agresiflik için ikinci aşama süreç sınıflandırması.....	25
Tablo 8. Sürücünün nihai agresiflik durumunun belirlenmesi.....	26
Tablo 9. Sarı ışık anında kuyruk başında olan sürücülerin hız ve cinsiyete göre karar dağılımı.....	26
Tablo 10. 2007 yılında Wisconsin’de yapılan çalışmanın bulguları.....	29
Tablo 11. Yavaşlama ivmesinin farklı parametrelere göre istatistik olarak değerlendirilmesi	33
Tablo 12. Yavaşlama ivmesinin istatistiksel analizi ve geçmiş çalışmalarla karşılaştırılması.....	35
Tablo 13. Farklı araştırmacıların taşıt yaklaşım hızına göre önerdikleri Tip II ikilem bölgesi sınırları	36
Tablo 14. İntikal reaksiyon süresi için 2014 yılı öncesi yapılan çalışmalara ait bilgiler ve bulunan sonuçlar (Zhang vd., 2014).....	37
Tablo 15. Karlı olan ve olmayan günlerden alınan veri yardımıyla elde edilen regresyon sabitleri.....	39
Tablo 16. Modellemeler için seçilen parametreler ve tanımlamaları.....	44
Tablo 17. Önceki yıllarda sürüş simülatörü ile yapılmış çalışmaların özeti ((Pawar, Pathak, & Patil, 2022).	47
Tablo 18. Seçilen kavşaklara ait geometrik özellikler (ölçüler)	54
Tablo 19. Alibeyköy kavşağı için günlere göre duran-geçen ve toplam taşıt sayıları.....	97
Tablo 20. Maslak kavşağı için günlere göre duran-geçen ve toplam taşıt sayıları	98
Tablo 21. Tip I İkilem Bölgesi Analizi İçin Seçilen Parametreler ve Yapılan Kabuller	103

Tablo 22.	Farklı Y+R süreleri neticesinde Tip I ikilem bölgesi oluşturan taşıtlar.....	109
Tablo 23.	Alibeyköy kavşağı için yapılan TTI ve DTI modellerinin sonuçları.....	122
Tablo 24.	Maslak kavşağı için yapılan TTI ve DTI modellerinin sonuçları.....	123
Tablo 25.	Alibeyköy kavşağı için hava şartlarının etkisinin incelenmesi.....	124
Tablo 26.	Maslak kavşağı için hava şartlarının etkisinin incelenmesi.....	124
Tablo 27.	Alibeyköy kavşağı için hafta içi ve hafta sonu günlerin analiz sonuçları	125
Tablo 28.	Maslak kavşağı için hafta içi ve hafta sonu günlerin analiz sonuçları	125
Tablo 29.	Alibeyköy kavşağında sabah saatleri ve diğer saatler arasında yapılan lojistik regresyon analiz sonuçları	126
Tablo 30.	Maslak kavşağında sabah saatleri ve diğer saatler arasında yapılan lojistik regresyon analiz sonuçları	127
Tablo 31.	Sağ şerit ve diğer şeritler arasında yapılan lojistik regresyon analizi sonuçları.....	127
Tablo 32.	Alibeyköy kavşağında farklı taşıt tipleri için yapılan lojistik regresyon analizi sonuçları	128
Tablo 33.	Maslak kavşağında yaya etkisi için yapılan lojistik regresyon analizi sonuçları.....	129
Tablo 34.	Maslak kavşağında farklı taşıt tipleri için yapılan lojistik regresyon analizi sonuçları ve nihai model	129
Tablo 35.	Alibeyköy kavşağı için oluşturulan nihai model	130
Tablo 36.	Elde edilen NRS değerlerinin geçmiş yıllarda yapılan çalışmalar ile karşılaştırılması.....	131
Tablo 37.	m parametresi sınırlandırılarak kurulan modeller ait bilgiler	133
Tablo 38.	Devam eden taşıtların DTI dağılımının %15,%50 ve %85 değerleri	138

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AASHTO	: Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği
a	: Hızlanma ivmesi
DTI	: Durma Çizgisine Olan Mesafe
DZ	: İkilem Bölgesi
d	: Yavaşlama ivmesi
dk	: Dakika
EDS	: Elektronik Denetleme Sistemi
FHWA	: Amerikan Federal Karayolu İdaresi
FPS	: Saniyedeki Kare Sayısı
ft/s ²	: Feet/saniye ²
GHM	: Gazis, Herman & Maradudin
ITE	: Ulaştırma Mühendisleri Enstitüsü
İBB	: İstanbul Büyükşehir Belediyesi
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
km	: Kilometre
L	: Taşıt boyu
MLL	: Makine Öğrenme Kütüphanesi
m	: Metre
mph	: Mil/saat
NHTSA	: Amerikan Ulusal Karayolu Trafik Güvenliği İdaresi
NumPy	: Sayısal Python Kütüphanesi
OpenCV	: Açık Kaynak Bilgisayarlı Görü Kütüphanesi
OZ	: Opsiyon Bölgesi
prt	: İntikal reaksiyon süresi
R	: Koruma süresi
RLR	: Kırmızı Işıқта Geçme
s	: Saniye
sa	: Saat
TTI	: Durma Çizgisine Olan Süre
UYM	: Ulaşım Yönetim Merkezi

V	: Taşıt Yaklaşım Hızı
W	: Kavşak Derinliği
XC	: Taşıtın kavşağı güvenle terk edebileceği maksimum mesafe
Xs	: Taşıtın güvenle durabilmesi için gereken minimum mesafe
Y	: Sarı Işık Süresi
Y+R	: Sarı ışık + Koruma süresi
YLR	: Sarı Işıқта Geçme
YOLO	: Sadece Bir Kere Bak Algoritması



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Trafik kazaları sebebiyle her yıl dünya genelinde yaklaşık olarak 1,19 milyon insan ölmekte ve 20 ila 50 milyon arasında insan tehlikeli şekilde yaralanmaktadır (URL-1, 2024). Kavşaklar karayolları uzunlukları dikkate alındığında boyut olarak çok küçük elemanlar olmalarına karşın, içerdikleri trafik karmaşası sebebiyle bu kazaların sıklıkla yaşandığı bölgelerdir. Bu sebeple, karayollarının en tehlikeli kesimlerinden biri olarak adlandırılırlar. Her yıl bu yol kesimlerinde yaşanan kazalar, birçok insanın yaralanmasına ve ölmesine neden olmaktadır (Road Safety Annual Report, 2018; Komol vd., 2022; Pagomenos vd., 2023).

Trafik kazalarının kavşaklara düşen payı farklı ülkeler ve farklı yıllar için değişkenlik gösterebilmekle birlikte elde edilen sonuçlar, bu payın ülke farketmeksizin dikkate alınmasını gerekli kılar. Ülkemizde 2023 yılında gerçekleşen 235.071 adet ölümlü ve yaralanmalı trafik kazasının 122.794 tanesi (%52,24) kavşaklarda meydana gelmiştir (KGM, 2024). Yine Amerikan Federal Karayolu İdaresi'nin (FHWA) 2018-2022 yılları için yayınladığı veriler; kavşaklarda meydana gelen trafik kazası ölümlerinin tüm karayollarındaki ölümlerin yaklaşık dörtte birine, yaralanmaların ise tüm yaralanmaların yaklaşık yarısına tekabül ettiğini ortaya koymaktadır (Tablo 1), (URL-2, 2024).

Tablo 1. Amerika'da gerçekleşen kaza ölümlerinin dağılımı

YIL	Toplam Trafik Kazası Ölümleri	Kavşak Bağlantılı Ölümler	Oran (%)
2018	36835	10148	27,54
2019	36355	10273	28,25
2020	39007	10720	27,48
2021	42939	11799	27,48
2022	42514	12036	28,31

Farklı yön ve doğrultudaki karayollarının kavuştuıkları noktaların toplandığı alanlara kavşak adı verilir (Kelimenin kökeni: kavuş>kavuşmak>kavuşak>kavşak). Kavşağı ulaşan farklı kollardaki sürücüler bu alanları eş zamanlı olarak kullanmak isteyeceklerinden, kesişimlerin olması kaçınılmazdır. Bu bağlamda kavşaklar, farklı yön ve doğrultuda gelen trafik akımlarının kesiştiğı ve önceden belirlenmiş olan kurallara uygun bir düzenle yönetildikleri yol parçalarıdır. Üzerlerinde barındırdıkları trafiğın türü ve yoğunluğu, geometrik koşullar, kent içi veya kent dışı olması gibi farklılıklar sebebiyle; sinyalizasyon, denetimsiz, eşdüze, katlı ve yuvarlak ada gibi birçok farklı türde tasarlanır ve uygulanır. Farklı doğrultudaki akımların kavşak geçiş düzenlerinin ışıklı ve renkli işaretlerle sağlandığı kavşaklar, sinyalizasyon kavşaklarıdır (Yardı, 2017).

Sinyalizasyon uygulaması; diğere birçok avantajının yanında, kavşaklardaki trafik karmaşasına bir düzen getirerek güvenliğın sağlanmasına katkı sunan, dünya çapında kabul görmüş ve bir asrın üzerinde tarihi olan önemli bir uygulamadır (McShane, 1999). Montaj ve operasyonel açıdan doğru şekilde tasarlanan sinyalizasyon uygulamaları, kavşak güvenliğini önemli ölçüde artırabilmektedir. Bununla birlikte, gereksiz ve uygun olmayan şekilde yapılan sinyalizasyon uygulamaları güvenliğı artıramayacağı gibi, düşük kapasite ve mobilite problemlerini de beraberinde getirecektir. Sinyalizasyon kavşak tasarımında esas amaç; kapasite ve mobilite artışı ile birlikte güvenliğın de önemli ölçüde sağlanabilmesidir (FHWA, 2013). Amerikan Ulusal Karayolu Trafik Güvenliğı İdaresi'nin (NHTSA) 2009 yılı için yayınladığı raporda, ülke genelinde meydana gelen 5.505.000 adet trafik kazasının 1.158.000 tanesinin (%21) sinyalizasyon kavşaklarda gerçekleştiğı ve bu kazalarda 372.299 insanın (%24) öldüğü ya da yaralandığı bildirilmiştir (NHTSA, 2012). Yine ülkemizde 2023 yılında 7030 ölümlü/yaralanmalı trafik kazasının kırmızı ışık veya görevlinin dur işaretine uyulmaması sebebiyle gerçekleştiğı dikkate alındığında, sinyalizasyon uygulamalarının trafik kazalarını önlemek konusundaki yeterliliğinin tartışılabilceğı ortadadır (EGM, 2024).

Kırmızı ışık ihlalleri, sinyalizasyon kavşaklarda kazalara sebebiyet veren ve sürücülerin sıklıkla tekrarladıkları en önemli trafik ihlallerinden biridir. İstatistiklere göre her 3,5 dakikada bir kırmızı ışık ihlali yapılmakta ve kavşaklarda meydana gelen tüm kazaların yaklaşık %2,5'i kırmızı ışık ihlalleri sebebiyle meydana gelmektedir. Kırmızı ışık ihlallerini, sarı ışık sonrası isteyerek veya istemeyerek yapılan ihlaller ve kırmızı ışık yandıktan sonra bilerek yapılan ihlaller şeklinde iki ana başlık altında toplamak mümkündür (Zhang vd., 2016). Yine Baugley (1988) kırmızı ışık ihlallerini üç alt başlıkta toplamıştır. Birinci tip

ihlaller, kavşağı kırmızı ışık yanmadan önce terk edebilecek durumda olup, kendi kararsızlıkları veya önlerindeki sıkışık trafik sebebiyle bunu gerçekleştiremeyen sürücülerini içerir. İkinci tip ihlaller, sürücülerin sarı ışığı gördükleri anda ikilem bölgesi denilen dur ya da devam et kararlarının ikisinin de yanlış olacağı bölgede olmaları sebebiyle gerçekleşen kırmızı ışık ihlallerini içerir. Üçüncü tip ihlallerde ise; kırmızı ışık sebebiyle konforlu bir şekilde durabilecek olan sürücülerin agresif davranarak kırmızı ışık ihlali yapmaları söz konusudur (Elmitiny vd., 2010). Her iki sınıflandırma incelendiğinde; sarı ışık anında sürücülerin verdikleri kararın doğruluğu ve karar verme hızlarının etkili olduğu, amiyane tabiriyle sürücülerin “insafına” kalan, hatta bazı durumlarda sürücünün dur ya da devam et kararının her ikisinin de hatalı olduğu (ikilem bölgesi problemi), sinyalizasyon kavşaklarının bir çeşit yapısal kusuru olarak nitelendirilebilecek ve sonucu kırmızı ışık ihlalleri ve trafik kazaları olan bir durumun varlığından söz edilebilir.

1.2. Sarı Işık Problemi ve İkilem Bölgesi

Trafik ışıkları, trafik akımını kontrol etmek amacıyla kavşaklara dikey ya da yatay olarak yerleştirilen; içerdiği sarı, kırmızı ve yeşil ışıklar yardımıyla trafik akımını kontrol eden elektronik cihazlardır. Erken dönem trafik ışıkları yeşil ve kırmızı olmak üzere iki renkten oluşmakta ve elektronik bir sistem henüz icat edilmediğinden, renk geçişleri bir polis ya da operatör yardımıyla manuel olarak yapılmaktaydı. 1920 yılında polis memuru William Potts tarafından sarı ışık da dahil edilerek üç renkli olarak tasarlanan ve Detroit’te (A.B.D.) dört kollu bir kavşağa yerleştirilen trafik ışıklarında sarı ışığın devreye eklenmesindeki temel motivasyon; sürücülerin kendilerini durmaya veya kalkışa hazırlamasından ziyade, bu dört kollu kavşakta görev yapan Potts’un farklı kollardaki faz geçişlerini yönetebilmesi için ek süreye ihtiyaç duymasıydı (Pollard, 2008).

Bir sinyalizasyon kavşakta sinyalizasyon devresi, faz düzenlemesi ve devre süresi ile yeşil süre dağılımının belirlenmesinden oluşan iki temel aşama ile projelendirilir. Faz düzenlemesi kesişen akımların sırasını, yeşil süreler ise her akımın geçiş süresini belirlemek için yapılır. Her kol için kırmızı, kırmızı + sarı, yeşil ve sarı ışık sabit ya da trafik yoğunluğuna göre değişken sürelerde uygulanır. Bir kavşak kolu için bu dört farklı durumun yansıtıldığı toplam süreye devre süresi adı verilir. Devre süresi, sinyalizasyon sisteminin teknolojik altyapısına göre sabit ya da değişken olabilir. Her koldaki yeşil süreler ve devre süresinin tayinine göre sinyalizasyon kavşakları “statik” veya “dinamik” olarak çalıştırılabilir. Yeşil süreler, her koldaki

kapasite/kullanım oranları ile önceden ve sabit (statik), video gözlem sistemleri ve/veya çeşitli sensörler kullanılarak yoğunluğun anlık belirlenmesi ile de anlık ve değişken (dinamik) olarak hesaplanabilir. Tüm bu sinyalizasyon sistemlerinde kavşak güvenliği;

a) Bir kolda yeşil yanarken diğer kollarda mutlaka kırmızı yanması,

b) Bir devre içerisinde tüm kolların kırmızı olduğu bir koruma süresinin bulunması, şeklinde iki temel prensibin uygulanması ile sağlanır (Yardım, 2017).

Sarı ışık anında durma çizgisine yaklaşan bir sürücü “dur” ya da “devam et” kararı vermek durumundadır. Bu noktada; sürücünün vereceği hatalı bir “durma” kararı; konforsuz ani bir durmaya, durma çizgisinin ötesinde (kavşak içerisinde) durmaya ve arkadan çarpışmalı kazalara, agresif bir “devam et” kararı ise kırmızı ışık ihlali ve sonucunda dik açılı (yandan çarpışmalı) kazalara neden olabilir. Sürücünün vereceği bu kararın doğruluğu; taşıtın durma çizgisine olan mesafesi, yaklaşım hızı, taşıt ve kavşak boyu, hızlanma-yavaşlama ivmeleri ve kritik süreler (sarı, koruma ve intikal-reaksiyon süreleri) yardımıyla deterministik olarak belirlenebilir (Gazis vd., 1960).

Taşıtın güvenle durabilmesi için gereken minimum mesafe olan “ X_s ” ve kavşağı güvenle terk edebileceği maksimum mesafe olan “ X_c ” aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$X_s = v \cdot prt + \frac{v^2}{2d} \quad (1)$$

$$X_c = v \cdot (Y + R) + \frac{a \cdot (Y + R - prt)^2}{2} - (W + L) \quad (2)$$

Burada;

v : Taşıt yaklaşım hızını (m/s),

prt : İntikal reaksiyon süresini (s),

d : Sabit yavaşlama ivmesini (m/s²),

Y : Sarı ışık süresini (s),

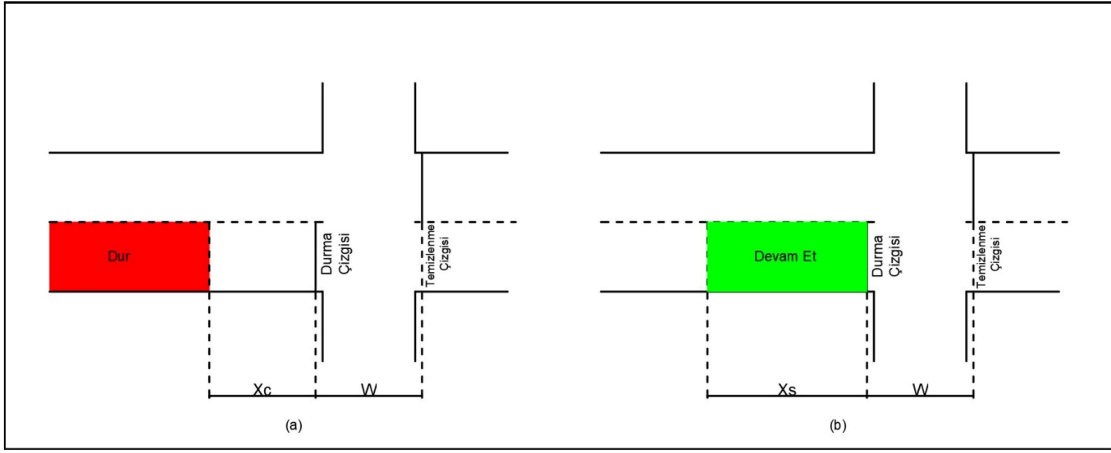
R : Koruma süresini (s),

a : Sabit hızlanma ivmesini (m/s²),

W : Kavşak derinliğini (m) ve

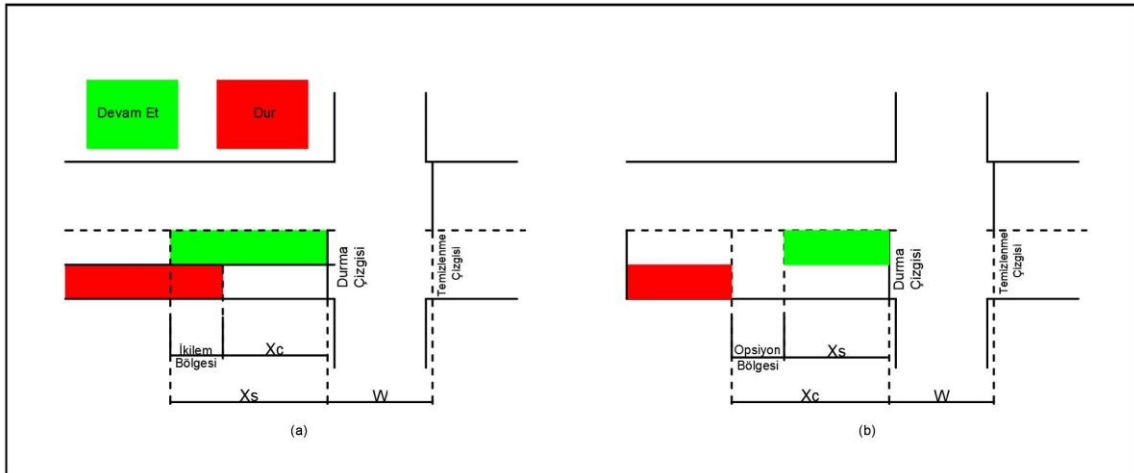
L : Taşıt boyunu (m) ifade etmektedir.

Denklem 1 ve 2’nin bir sonucu olarak, sarı ışık anında kavşak koluna yaklaşan her taşıt için bir “dur” bölgesi (Cannot Go) ve bir “devam et” bölgesi (Cannot Stop) ortaya çıkacaktır.



Şekil 1. “Dur” (Cannot Go) ve “Devam Et” (Cannot Stop) Bölgeleri

Kavşağa yaklaşan her taşıt için hem X_c hem de X_s mesafeleri aynı anda kritik olacağından, bu iki uzunluğu birbirlerinden bağımsız olarak düşünmek olanaksızdır. Nitekim X_s ve X_c mesafelerinin eşit olmadığı durumlarda, yukarıda bahsedilen “dur” ve “devam et” bölgelerinin kesişmesi veya ayrışması söz konusudur. X_c ve X_s hesabında birçok farklı parametrenin etkili olduğu düşünülecek olursa (Denklem 1 ve 2), $X_c = X_s$ durumu gerçekleşmesi pek de mümkün olmayan, özel bir durum olarak tanımlanabilir. Bu yorumdan hareketle, sarı ışık anında kavşağa yaklaşan bir taşıt için, olası dört bölgenin varlığından söz edilmelidir.



Şekil 2. X_c ve X_s ’ye bağlı olarak ortaya çıkabilecek tüm bölgeler

$X_c > X_s$ gibi bir senaryoda (Şekil 2. (b)), sarı ışık anında kavşak kolunda bulunan bir taşıt için üç farklı bölgenin varlığında söz edilebilir. Sarı ışık anında, “devam et” bölgesi içerisinde bulunan bir taşıt hızını azaltmadığı takdirde kavşağı güvenle terk edebilecekken,

“dur” bölgesi içerisinde olan bir taşıt konforlu ve güvenli bir şekilde durabilecektir. Bu iki bölgenin arasında olan bir taşıt durma çizgisine X_s ’den daha uzak ve X_c ’den daha yakın olduğundan, sürücünün vereceği dur ya da devam et kararlarının her ikisi de doğru olacaktır. Sürücünün tercihinden bağımsız, söz konusu güvenli durum sebebiyle bu bölge “opsiyon bölgesi” olarak isimlendirilir.

$X_s > X_c$ gibi bir senaryoda, “dur” ve “devam et” bölgeleri birbirleriyle kesişmektedir (Şekil 2. (a)). Sarı ışık anında bu kesişim bölgesinde olan bir taşıtın durma çizgisine X_s ’den daha yakın ve X_c ’den daha uzak olması, sürücünün vereceği karardan bağımsız olarak durmayı veya devam etmeyi güvenli olmaktan çıkarır. Sürücünün tercihinden bağımsız olarak ortaya çıkan söz konusu ikili güvensiz durum sebebiyle bu bölge “ikilem bölgesi” (dilemma zone) olarak isimlendirilir. Konunun daha iyi anlaşılabilmesi adına Tablo 2’de; kavşak koşullarının güvenlik açısından ideal duruma yakın olduğu bir senaryo kurgulanarak, hız ve sarı + koruma süreleri değişken olacak şekilde bu dört bölgenin hesabı verilmiştir.

Tablo 2. İdeal güvenlik koşullarına yakın olarak kurgulanan bir kavşakta; hız, sarı + koruma süresi ve ikilem bölgesi arasındaki ilişki

$d=g/2$ (4,905 m/s ²) $p_{rt}= 0,75$ s $W=10m$; $L=4m$			Hızlanma İvmesi (a, m/s ²)							
			2,86	2,45	2,04	1,63	1,23	0,82	0,41	0
			Hız (V, km/sa)							
			50	60	70	80	90	100	110	120
Sarı + Koruma Süresi (Y+R, s)	3	Xs(m)	30,08	40,82	53,12	67,01	82,46	99,49	118,09	138,26
		Xc(m)	34,91	42,20	49,50	56,79	64,11	71,41	78,70	86,00
		DZ(m)	-4,83	-1,39	3,63	10,21	18,35	28,08	39,38	52,26
	4	Xs(m)	30,08	40,82	53,12	67,01	82,46	99,49	118,09	138,26
		Xc(m)	56,66	65,61	74,55	83,50	92,50	101,44	110,39	119,33
		DZ(m)	-26,58	-24,79	-21,43	-16,49	-10,04	-1,95	7,70	18,93
	5	Xs(m)	30,08	40,82	53,12	67,01	82,46	99,49	118,09	138,26
		Xc(m)	81,27	91,46	101,65	111,83	122,11	132,29	142,48	152,67
		DZ(m)	-51,19	-50,64	-48,52	-44,83	-39,65	-32,81	-24,39	-14,40

Tablo 2’de belirtilen ideale yakın güvenlik şartlarından kasıt, yavaşlama ivmesi (d), intikal reaksiyon süresi (prt), kavşak derinliği (W) ve taşıt boyu (L) gibi sabit olarak alınan parametrelerin, ikilem bölgesi uzunluklarını minimize edecek şekilde seçilmiş olmasıdır. Bu

amaçla; düşük konforlu bir yavaşlama ivmesi ($d=4,905 \text{ m/s}^2$), Karayolları Genel Müdürlüğü'nün (KGM) önerdiği intikal reaksiyon süresi ($\text{prt}=0,75 \text{ s}$) (URL-3, 2024), görece kısa bir kavşak derinliği ($W=10 \text{ m}$) ve yine görece kısa bir araç boyu ($L=4\text{m}$) olacak şekilde parametre seçimleri yapılmıştır. Tablo 2'de verilen DZ satırlarındaki pozitif değerler ikilem bölgesi uzunluklarını, negatif değerler ise opsiyon bölgesi uzunluklarını göstermektedir. Elde edilen veriler ışığında; ikilem bölgesi uzunluklarının hız ile doğru, sarı ışık ve koruma süreleri ile ters orantılı olduğu, 50 ve 60 km/sa gibi kent içi görece düşük hızların ikilem bölgesi oluşturmadığı, 100 km/sa ve üzeri hızlarda ise sarı ışık ve koruma sürelerinin artırılması ile birlikte ikilem bölgesi oluşumunun önüne geçilebileceği teorik olarak söylenebilir. Bununla birlikte; derinlikleri görece uzun olan bilhassa kent dışı kavşaklarda ($W=30\text{m}$), daha uzun taşıtlar için ($L=5\text{m}$), daha konforlu bir yavaşlama ivmesi ($d= 3,05 \text{ m/s}^2$) ve AASHTO'nun önerdiği (AASHTO, 2018) intikal reaksiyon süresi ($\text{prt}=1,5 \text{ s}$) (Wang vd., 2020; Fu vd., 2016) seçilerek kurgulanan görece düşük güvenli bir senaryoda, ikilem bölgesi probleminin daha belirgin bir hal alabileceği Tablo 3'te görülebilmektedir.

Tablo 3. Görece olumsuz şartlar dikkate alınarak kurgulanan bir kavşakta; hız, sarı + koruma süresi ve ikilem bölgesi arasındaki ilişki

$d= 3,05 \text{ m/s}^2$ $\text{prt}= 1,5 \text{ s}$ $W=30\text{m} ; L=5\text{m}$			Hızlanma İvmesi ($a, \text{m/s}^2$)							
			2,45	2,04	1,63	1,23	0,82	0,41	0	0
			Hız ($V, \text{km/sa}$)							
			60	70	80	90	100	110	120	130
Sarı + Koruma Süresi ($Y+R, \text{s}$)	5	Xs(m)	70,54	91,15	114,29	139,96	168,16	198,89	232,15	267,94
		Xc(m)	63,34	74,72	86,09	97,53	108,91	120,29	131,67	145,56
		DZ(m)	7,20	16,43	28,19	42,43	59,25	78,60	100,48	122,38
	6	Xs(m)	70,54	91,15	114,29	139,96	168,16	198,89	232,15	267,94
		Xc(m)	89,81	102,32	114,84	127,45	139,97	152,48	165,00	181,67
		DZ(m)	-19,27	-11,17	-0,55	12,51	28,19	46,40	67,15	86,27
	7	Xs(m)	70,54	91,15	114,29	139,96	168,16	198,89	232,15	267,94
		Xc(m)	118,72	131,97	145,21	158,60	171,85	185,09	198,33	217,78
		DZ(m)	-48,19	-40,82	-30,92	-18,64	-3,69	13,80	33,82	50,16
	8	Xs(m)	70,54	91,15	114,29	139,96	168,16	198,89	232,15	267,94
		Xc(m)	150,09	163,65	177,21	190,98	204,54	218,11	231,67	253,89
		DZ(m)	-79,55	-72,50	-62,92	-51,02	-36,39	-19,22	0,48	14,05
	9	Xs(m)	70,54	91,15	114,29	139,96	168,16	198,89	232,15	267,94
		Xc(m)	183,91	197,38	210,84	224,59	238,06	251,53	265,00	290,00
		DZ(m)	-113,37	-106,23	-96,56	-84,63	-69,90	-52,64	-32,85	-22,06

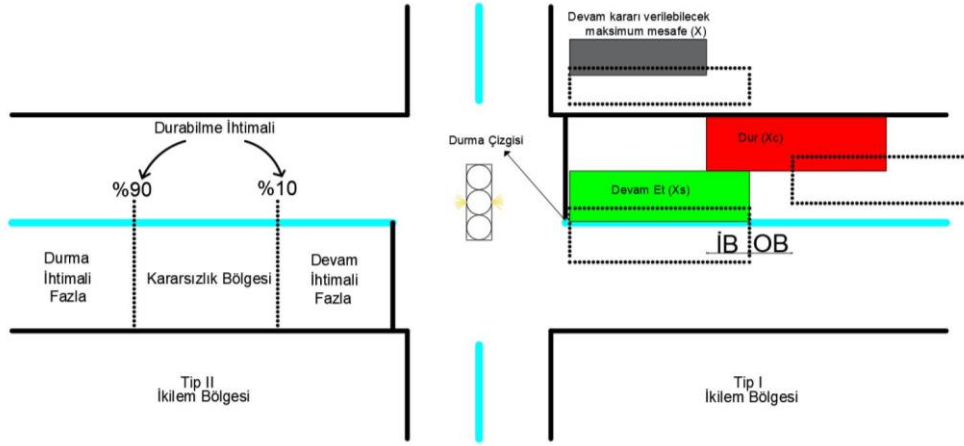
Tablo 3'te belirtilen şartlara sahip ve koruma süresi $R=2$ s olan bir kavşak için; kavşak kolundaki sarı ışık süresinin 3 saniye olarak belirlenmesi durumunda, 60 km/sa ve üzerindeki tüm hızlarda bir ikilem bölgesi varlığından söz edilebilir. Yine bu koşullar altında, sarı + koruma süresi artırılarak ikilem bölgesi oluşumunun teorik olarak engellenebileceği düşünülebilir. Ancak hâlihazırda zaten doğası gereği kapasite problemlerinin sıkça yaşandığı sinyalize kavşaklarda, 8 – 9 saniye gibi bir sarı + koruma süresinin ekonomik olarak uygulanabilir olmadığı ortadadır. Her iki tabloda kullanılan hızlanma ivmesi değerleri (a , m/s^2), Gazis vd. (1960) tarafından önerilen aşağıdaki ampirik bağıntı yardımıyla taşıt hızlarına bağlı olarak hesaplanmıştır

$$a(V_0) = \begin{cases} 4,90 - 0,147 V_0 & ; 0 \leq V_0 \leq 33,33 \text{ m / sn}, \\ 0 & ; V_0 > 33,33 \text{ m / sn} \end{cases} \quad (3)$$

Tablo 2 ve Tablo 3 yardımıyla deterministik olarak açıklanmaya çalışılan ikilem bölgesi probleminin tanımı; hızlanma ve yavaşlama ivmelerini sabit olarak kabul etmekte ve hepsinden önemlisi konuyu sürücü davranışından bağımsız, kinematik olarak ele almaktadır. Daha açık bir ifadeyle Denklem 1 ve 2'deki bağıntılar, bir taşıtın sarı ışık anında hangi bölgede olduğunu ve bulunduğu bölgede ne yapması gerektiğini tanımlamaktadır. Esasen sürücüler, sarı ışık anında hangi bölgede olduklarını bilmeyebilirler ve bunu bilmek gibi bir mecburiyetleri de yoktur. Teorik olarak, uygun sinyalizasyon süreleri yardımıyla ikilem bölgesi oluşumun önüne geçilebileceği bilinse de (Tablo 2 ve Tablo 3), o kavşak koluna özel olarak uygulanan sarı + koruma sürelerinden habersiz bir sürücü için sarı ışık anındaki “ikilemin” devam edebileceği ortadadır. Bu bağlamda, Crawford (1962) ve Herman (1963) yaptıkları öncü çalışmalar ile taşıtların durma çizgisine olan mesafelerini dikkate alarak farklı bir ikilem bölgesi tanımlamaya çalışmışlardır. Ancak sarı ışık probleminin mesafelerden bağımsız olarak istatistik olarak ele alınması ileriki yıllarda gerçekleşecektir (Li vd., 2016).

Sarı ışık anında sinyalize bir kavşağa yüksek hızlarla yaklaşan ve karar vermek durumunda olan bir sürücünün kullandığı taşıt hakkındaki bilgisi; durmak veya devam etmek eylemlerinin yüksek hızlar ve çevre şartları etkisinde, taşıtın kapasite ve manevra limitlerinde gerçekleşecek olması sebebiyle sınırlı olacaktır. Her sürücünün bu koşulları

algılamadaki başarısı birbirinden farklı olacağından, benzer koşullar altında çok farklı sürücü davranışıyla karşılaşmak olasıdır. İlk kez 1974 yılında Ulaştırma Mühendisleri Enstitüsü (The Institute of Transportation Engineers – ITE) tarafından ortaya konan bu bakış açısı, yine aynı yıl yeni bir istatistik modelin ortaya çıkmasıyla tanımlanmıştır (ITE Technical Committee 18, 1974; Parsonson vd., 1974; Zegeer, 1977; Zimmerman, 2007). Bu modele göre, sarı ışık anında durma çizgisine yaklaşan sürücülerin durabilme ihtimalinin %10 ve %90 olduğu kesitler arasında kalan bölge, geçişlerde kararsızlığın olduğu yeni bir ikilem bölgesi olarak tanımlanır. Bu tarihten sonra ikilem bölgesi problemi, deterministik olarak tanımlanan “Tip I” ikilem bölgesi ve istatistiksel olarak tanımlanan “Tip II” ikilem bölgesi olacak şekilde iki ana başlık altında ele alınacaktır.

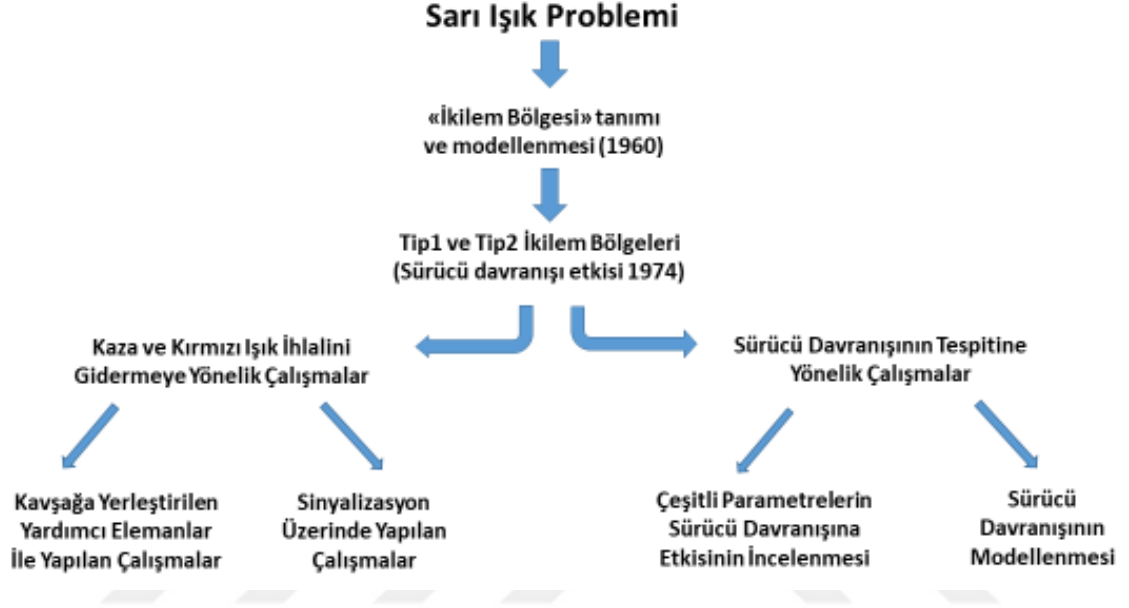


Şekil 3. Tip I ve Tip II İkilem Bölgeleri

Sarı ışık probleminin muğlak doğası ve davranış temelli olması, birçok araştırmacıyı bu konuda çalışmaya itmiştir. Yapılan çalışmaları iki grup halinde incelemek mümkündür.

- 1) Sürücü davranışının tespitine yönelik yapılan çalışmalar: Taşıt, yol ve sürücülere ait birçok parametrenin davranışa etkilerinin incelendiği çalışmalardır. Bu çalışmaları, amaçlarına göre iki farklı grupta toplamak mümkündür. Birinci grupta, söz konusu parametrelerin sürücü davranışına etkileri birlikte ve/veya ayrı incelenmektedir. Diğer grupta ise, etkili olduğu düşünülen parametreler yardımı ile sürücü davranışı modellenmeye çalışılmıştır.
- 2) Problemin giderilmesine yönelik yapılan çalışmalar: Sürücülerin ikilemden kurtarmayı ve kavşak güvenliğini sağlamayı hedefleyen çalışmalardır. Son yıllardaki teknolojik gelişmeler ile birlikte, bu amaçla yapılan çalışmaların sayısında bir artış

olduğu söylenebilir. Bu alanda çalışmaları, uygulanan yöntemlere göre: “Kavşağa Yerleştirilen Yardımcı Elemanlar ile Yapılan Çalışmalar” ve “Sinyalizasyon Sistemi Üzerinde Yapılan Çalışmalar” şeklinde iki alt grupta ele almak mümkündür. İlk grupta, kavşak kollarına yönlendirici ek elemanlar yardımıyla; ikinci grupta ise sinyalizasyon sisteminde yapılan bazı düzenlemeler ile sarı ışık probleminin giderilmesi hedeflenmiştir.

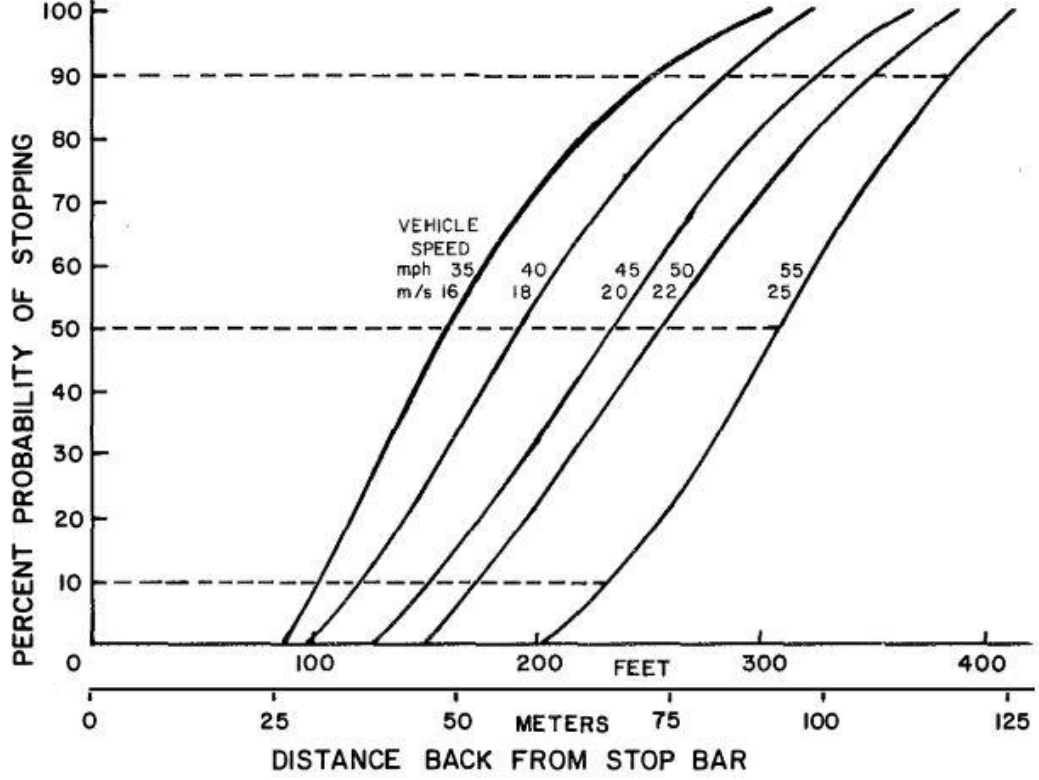


Şekil 4. Sarı Işık Problemi – Literatür Şeması

1.3. Sürücü Davranışı

Sürücülerin sarı ışık anında yaşadığı kararsız durum sebebiyle ilk kez 1974 yılında ortaya atılan Tip II ikilem bölgesi modeli, yaptığı kapsamlı saha çalışması ve geliştirdiği ölçüm metodu sebebiyle birçok araştırmacı tarafından (Rakha vd., 2007; Gates & Noyce, 2010; Rahman & Kang, 2021; Li vd., 2016; Pawar vd., 2022; Kang vd., 2020; Majhi & Senathipathi, 2020; Mohammed vd., 2021; Yang & Wang, 2016; Li & Wei, 2013) Zegeer’e atfedilir (Zegeer, 1977) ve Zegeer Metodu olarak da isimlendirilir. Zegeer 1977 yılında sarı ışık davranışını modelleyebilmek ve ikilem bölgesi problemine çözüm bulabilmek adına Kentucky’de yaptığı çalışmada, 9 farklı kavşaktan 2100 adet taşıta ait gözlem verisi toplamış ve Tip II ikilem bölgesi sınırlarını hız değişkenine bağlı olarak tespit etmeye çalışmıştır. Veri inceleme aşamasında, sarı ışık anında verilen kararlar hız parametresi temel alınarak gruplanmıştır. Taşıtların sarı ışık anındaki hızlarını; 17 ila 19 m/s (38 – 42 mph) arasında olanları 18 m/s (40 mph, 64,37 km/sa), 19 ila 21 m/s arasında olanları 20 m/s (ve devamı da

böyle) olacak şekilde gruplanmış ve gözlenecek maksimum hız değerini yaklaşık 25 m/s (55 mph, 88,51 km/sa) olarak belirlemiştir. Sonraki aşamada ise her bir hız grubunun durabilme ihtimalini mesafeye göre tespit ederek elde edilen sonuçları grafik olarak sunmuştur. (Şekil 5).



Şekil 5. Kentucky'deki sürücüler için hıza bağlı Tip II ikilem bölgesi eğrileri (Zegeer, 1977).

Zegeer bu çalışma sonucunda, hemen tüm hızlar için sürücülerin durma ihtimali ile durma çizgisine olan mesafeleri arasında doğrusala yakın anlamlı bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Bu ilişkinin ortaya konması, Tip II ikilem bölgesinin sınırlarının oluşturulabilmesi ve sarı ışık anında bu sınırlar içerisinde bulunan taşıtlar için ek önlemler alınabilmesi adına oldukça önemlidir. Yine bu çalışma sonucunda; beklenildiği üzere, sarı ışık anında yan yana bulunan iki taşıttan yavaş olanının durma olasılığının hızlı olana göre daha fazla olduğu net bir şekilde gösterilebilmiştir. Benzer yıllarda yapılan Tip II ikilem bölgesinin sınırlarının tespiti yönelik çalışmaların sonuçları, Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Erken dönem araştırmacıların tespit ettiği hıza bağlı ikilem bölgesi sınırları (Zegeer, 1977)

Taşıt Yaklaşım Hızı			TİP II İKİLEM BÖLGESİ SINIRLARI (m)				
mph	m/s	km/sa	OLSON AND ROTHERY	WEBSTER AND ELLSON	PARSONSON	HERMAN	ZEGEER
30	13	48,28	29-52	24-41	30-53	27-53	-
35	16	56,33	31-65*	31-52*	32-65*	30-66*	31-77
40	18	64,37	34-78	38-62	34-76	34-79	37-86
45	20	72,42	50-96	47-77*	50-91	50-96*	46-99
50	22	80,47	67-114*	56-91	67-107	67-113	52-107
55	25	88,51	-	70-113*	73-122*	-	71-117
60	27	96,56	-	84-134	79-137	-	-
65	29	104,6	-	103-160	-	-	-
70	31	112,7	-	122-198	-	-	-

* Enterpolasyon yardımıyla bulunan veriler

Tip II ikilem bölgesinin sınırlarını %10 ve %90 olarak tanımlayan Zegeer'in modeli, ikilem bölgesi problemini sürücü davranışı gibi skolastik ve taşıt hızı gibi kinematik parametrelerle birlikte tanımlayabildiği için etkili bir modeldir. Ancak bir problemin modellenerek açıklanabilmesi, çok fazla verinin yüksek doğrulukta elde edilebilmesiyle ve görece hatalı olan bazı kabullerin yapılmasıyla mümkün olabilir. Zegeer'in çalışması da, bu kusurlar ve zorluklar bakımından istisna değildir. %10 ve %90 sınırlarının belirlenebilmesi için çok fazla veriye ihtiyaç duyulur. Yine bu sınırlar, sürücülerin durmak ve devam etmek eylemleri yardımıyla belirlenebildiğinden; durma çizgisine yaklaşan tüm sürücülerin hızlarına ve mesafelerine göre benzer tepkiler verecekleri kabul edilir. Daha açık bir ifadeyle, dolaylı yoldan da olsa, tüm sürücülerin aynı ikilemde kaldıkları kabulü yapılmaktadır. Gerçekte bazı sürücüler, trafik kurallarını ihlal etmemek adına ne pahasına olursa olsun durmak isteyebilirler. Benzer mantıkla bazı sürücülerin de kırmızı ışık ihlali yapmak pahasına devam etme kararı verebilecekleri söylenebilir. Özetle, her sürücünün "ikileminin" benzer şekilde olmayabileceği ortadadır.

Tip II ikilem bölgesinin erken dönem çalışmaları Tablo 4 yardımıyla incelendiği takdirde, araştırmacıların elde ettikleri ikilem bölgesi uzunluklarında çeşitli farklılıklar olduğu görülebilecektir. Yine Kang vd. (2020) yaptıkları çalışmada; birbirlerine yakın konumlarda bulunan benzer koşullara sahip kavşak kollarındaki ikilem bölgesi sınır ve uzunluklarının, ölçüm yapılan bölgeye özel birçok faktörün etkisinde (eğim, hız limiti,

trafikteki taşıt kompozisyonu) değişebileceğini ve bu değişimin konforsuz ani durmalara ve kırmızı ışık ihlallerinin artmasına sebep olabileceğini ortaya koymuşlardır.

Tip I ikilem bölgesi için Gazis vd. tarafından önerilen kinematik model (yazarlarının baş harfleri sebebiyle GHM modeli olarak da anılır) yardımıyla, X_c ve X_s mesafelerinin hesabı Denklem 1 ve 2’de verilmişti. Sürücünün kavşağı güvenle terk edebilmesi için tanımlanan X_c mesafesi; hız kaynaklı mesafe (Hm), ivme kaynaklı mesafe ($\dot{I}m$) ve kavşak derinliği ile taşıt boyundan oluşan sabit mesafeler (Sm) olmak üzere üç parça halinde incelenebilir.

$$X_c = \underbrace{v \cdot (Y + R)}_{Hm} + \underbrace{\frac{a \cdot (Y + R - prt)^2}{2}}_{\dot{I}m} - \underbrace{(W + L)}_{Sm} \quad (4)$$

Bir taşıtın hareket edebilmesi, motor tarafından üretilen çekim kuvvetinin harekete karşı koyan direnimlerden büyük olmasıyla mümkün olabilir. Çekim kuvveti ve direnimlerin arasındaki fark pozitif olduğunda taşıt ivmelenerek hızlanacak, tam tersi bir durumda ise taşıt negatif ivme etkisinde yavaşlayacaktır. Motor gücü, çekim kuvveti ve hız arasındaki ilişki, aşağıdaki bağıntı yardımıyla hesaplanabilir (Yardım, 2015).

$$N_m = Z_{tr} \cdot V \quad (5)$$

Burada; N_m taşıtın motor gücünü (Watt), Z_{tr} motris tekerlere gelen çekim kuvvetini (N) ve V ise taşıtın hızını (m/s) temsil etmektedir. Her taşıtın üretim aşamasında belirlenen maksimum bir motor gücü olduğundan, yüksek hızlarda daha az çekim kuvveti üretimi söz konusudur. Yine yüksek hızlarda; taşıtın hareketine karşı koyan direnimler de artacağından, taşıtın pozitif ivme üretmesi zorlaşır. GHM modelinin yayınlandığı araştırmada Gazis vd., sarı ışık anındaki ivme değerlerinin hızla değişimini gösteren Denklem 3’teki ampirik bağıntıyı önermişlerdir (Gazis vd., 1960).

Bu bağıntıya göre, kalkış anındaki bir taşıtın üretebileceği hızlanma ivmesi $4,90 \text{ m/s}^2$ (yaklaşık $g/2$) olurken, saatte 120 km’lik hıza sahip bir taşıtın sarı ışık anında üretebileceği hızlanma ivmesi değeri 0, yani ihmal edilebilecek düzeyde olmaktadır. Denklem 3’teki bağıntının farklı hız değerlerine göre sonuçları Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Hızdaki değişimin hızlanma ivmesine olan etkisi

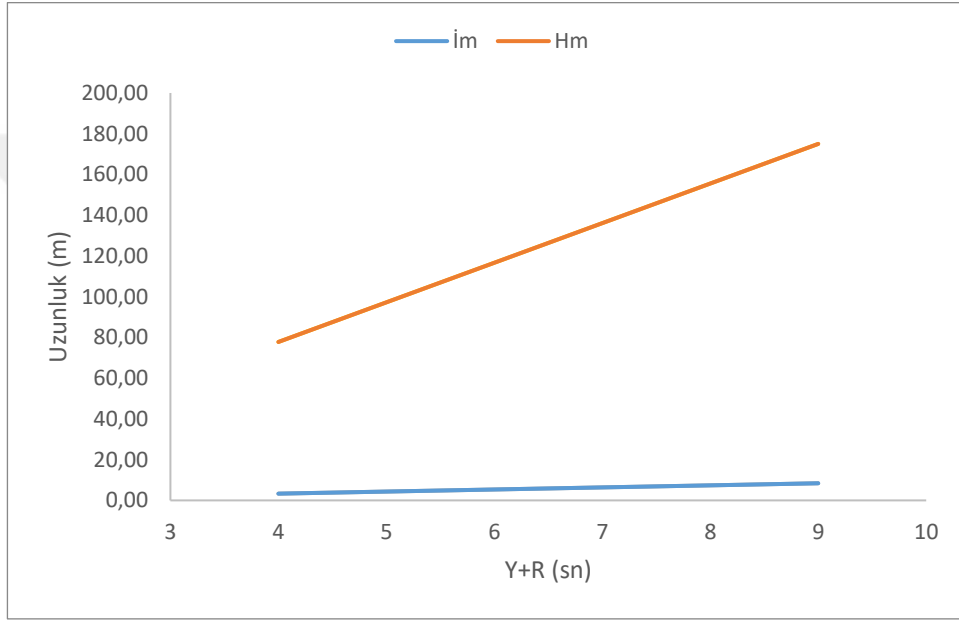
Taşıt Hızı (V_0 , km/sa)	Hızlanma İvmesi (a , m/s ²)
50	2,86
60	2,45
70	2,04
80	1,63
90	1,23
100	0,82
110	0,41
120	0,00

Yukarıda Tablo 2'nin oluşturulduğu ideal güvenlik şartlarına yakın olarak kurgulanan bir kavşakta; X_c 'nin bileşenleri olan H_m , $\dot{I}_m$ ve S_m mesafeleri farklı hız, ivme ve sarı + koruma süresi değerlerine göre Tablo 6'da hesaplanmıştır.

Tablo 6. İdeal güvenlik şartlarına yakın olarak kurgulanan bir kavşakta; H_m , $\dot{I}_m$, S_m ve X_c 'nin hız ve sarı + koruma süresiyle ilişkisi

pr _t = 0,75 s W=10m ; L=4m			Hızlanma İvmesi (a , m/s ²)							
			2,86	2,45	2,04	1,63	1,23	0,82	0,41	0
			Hız (V , km/sa)							
			50	60	70	80	90	100	110	120
Sarı + Koruma Süresi (Y+R, s)	4	H_m (m)	55,56	66,67	77,78	88,89	100,00	111,11	122,22	133,33
		$\dot{I}_m$ (m)	4,65	3,98	3,32	2,65	2,00	1,33	0,67	0,00
		S_m (m)	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
		X_c (m)	46,20	56,65	67,09	77,54	88,00	98,44	108,89	119,33
	5	H_m (m)	69,44	83,33	97,22	111,11	125,00	138,89	152,78	166,67
		$\dot{I}_m$ (m)	6,08	5,21	4,34	3,46	2,61	1,74	0,87	0,00
		S_m (m)	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
		X_c (m)	61,52	74,54	87,56	100,57	113,61	126,63	139,65	152,67
	6	H_m (m)	83,33	100,00	116,67	133,33	150,00	166,67	183,33	200,00
		$\dot{I}_m$ (m)	7,51	6,43	5,36	4,28	3,23	2,15	1,08	0,00
		S_m (m)	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
		X_c (m)	76,84	92,43	108,02	123,61	139,23	154,82	170,41	186,00
	7	H_m (m)	97,22	116,67	136,11	155,56	175,00	194,44	213,89	233,33
		$\dot{I}_m$ (m)	8,94	7,66	6,38	5,09	3,84	2,56	1,28	0,00
		S_m (m)	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
		X_c (m)	92,16	110,32	128,49	146,65	164,84	183,01	201,17	219,33

Tablo 6 incelendiği takdirde; $\dot{I}m$ 'nin hız ile ters, sarı + koruma süresi ile doğru orantılı olduğu görülebilecektir. Bununla birlikte, düşük hızlarda görece daha büyük değerler alan $\dot{I}m$ 'nin, 50 km/sa hızlarda dahi X_c mesafesine olan etkisinin %10'lar mertebesinde olduğu söylenebilir. Bu durum sebebiyle birçok araştırmacı (Chang vd., 1985; Kang vd., 2020; Akgüngör & Mercan, 2021) GHM modeli için hızlanma ivmesi değerinin ihmal edilebilir bir parametre olduğunu belirtmiştir. Örnek olması açısından, $V=70$ km/sa'lık bir hız değeri için Tablo 6'daki koşullar altında Hm ve $\dot{I}m$ 'nin değişimi Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. $V=70$ km/sa hız değerinde, $\dot{I}m$ ve Hm 'nin Sarı + Koruma Süresine göre değişimi

Hızlanma ivmesinin ihmal edilebileceği varsayımından hareketle, X_c mesafesi aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$X_c = v \cdot (Y + R) - (W + L) \quad (6)$$

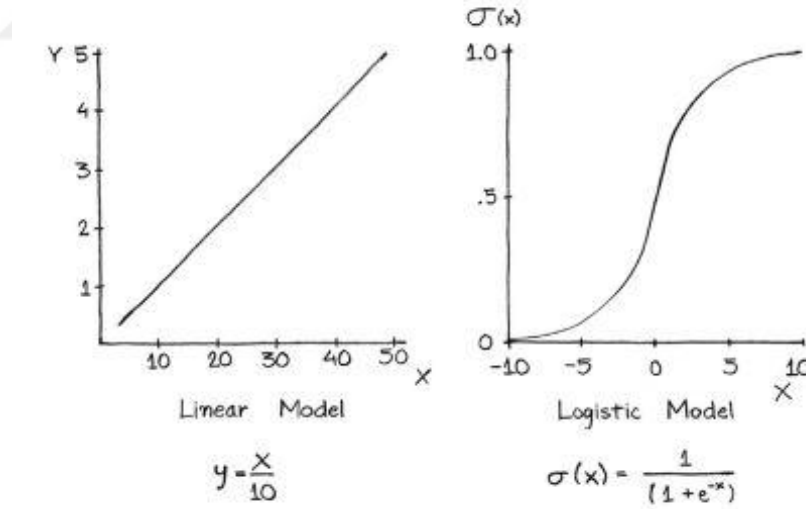
Sarı ışık anında durma çizgisine yaklaşan bir taşıt için, $X_c > X_s$ durumunda ikilem bölgesi problemi yaşanmayacaktır. $X_c=X_s$ sınır şartıyla sağlanan bu durum aşağıdaki denklemde gösterilmektedir.

$$v \cdot (Y + R) = v \cdot prt + \frac{v^2}{2d} + (W + L) \quad (7)$$

Denklem 7'nin her iki tarafı V ile bölünerek elde edilen $Y+R$, kavşakta uygulanması gereken minimum sarı + yeşil süre olarak tanımlanabilir (Chang vd., 1985).

$$(Y+R) = prt + \frac{v}{2d} + \frac{(W+L)}{v} \quad (8)$$

Lojistik regresyon analizi (Logistic Regression Analysis); evet-hayır, başarılı-başarısız, gerçekleşir-gerçekleşmez gibi kategorik olan ikili bağımlı değişkenlerin tahmini için kullanılan oldukça güçlü ve esnek bir yöntemdir. Tahmin yürütülecek bağımlı değişkenin sürekli bir değer yerine kategorik ve ikili olduğu durumlarda, lineer regresyonun çözemeyeceği birçok problemin analizi için başarıyla uygulanabilir. Sağlık, ekonomi, eğitim gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Lineer regresyonda olduğu gibi, birçok parametrenin katılımıyla birlikte bir model oluşturulabilir, ancak bu modelin çıktısı lineer regresyondan farklı olarak 0 ve 1 gibi ikili bir kategorik değişken olmalıdır. Bu yöntem ile sınırları 0 ile 1 arasında olan sigmoid (S) biçimli bir tahmin (olayın gerçekleşme ihtimali) eğrisi oluşturulabilmektedir (Şekil 7), (Seufert, 2014).



Şekil 7. Lineer regresyon ve lojistik regresyon eğrilerinin karşılaştırılması (Seufert, 2014)

Bir sürücünün sarı ışık anında vereceği kararı seçilen parametreler yardımıyla tahmin edebilmek, Tip II ikilem bölgesinin oluştuğu %10 ve %90 sınırlarını belirleyebilmek adına oldukça önemlidir. Bununla birlikte, sarı ışık anındaki sürücü davranışının en belirgin çıktısı olan dur veya devam et kararı, doğası gereği kategorik bir yapıdadır. Bahsedilen sebeplerden ötürü, sarı ışık anındaki sürücü davranışının tespiti amacıyla birçok

araştırmacı (Caird vd., 2007; Abdel-Aty vd., 2009; Hussain vd., 2020; Ali vd., 2021; Chang vd., 1985; Li vd., 2016; Gates T. J. vd., 2007; Papaioannou P. , 2007; Rakha vd., 2008; Gates & Noyce, 2010; Sharma vd., 2011; Hurwitz vd., 2012; Long vd., 2013; Elhenawy vd., 2015; Lu vd., 2015; Ren vd., 2016; Choudhary & Velaga, 2019; Pathivada & Perumal, 2019; Hussain vd., 2020; Zhang vd., 2021) yaptıkları çalışmalarda, ikili lojistik regresyon analizinden faydalanmışlardır.

Lineer regresyon modelinde, bağımlı değişken y , n adet bağımsız değişken yardımıyla tanımlanmak istendiği takdirde;

$$y = f(x) = c + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (9)$$

şeklinde lineer bir fonksiyondan faydalanılır. Burada c denklem sabitini ($x=0$ için y eksenini ile kesişim noktası, intercept), β_n ise n . bağımsız değişkenin regresyon katsayısını ifade eder. Denklem 9 sonucunda elde edilecek y değerleri, x_n bağımsız değişkenlerinin alacakları değerlere bağlı olarak $-\infty$ ila $+\infty$ arasında olabilir. Bağımlı değişkenin ikilem bölgesi problemindekine benzer şekilde (dur ya da devam et) kategorik olması durumunda alabileceği değerler 0 ila 1 arasında olmak durumundadır. Dolayısıyla Denklem 9'da lineer olarak verilen model, Denklem 10'daki şekliyle logaritmik olarak dönüştürülür.

$$\pi(x) = \frac{e^{f(x)}}{1 + e^{f(x)}} = \frac{1}{1 + e^{-f(x)}} \quad (10)$$

Denklem 10'da bulunan ve literatürdeki kullanımına benzer şekilde $\pi(x)$ notasyonu ile gösterilen ifade, kategorik olan bağımlı değişkeni ifade etmektedir. Denklem 10'un sağ tarafı, $f(x)$ fonksiyonunun alabileceği tüm değerler için 0'dan küçük ve 1'den büyük olamaz ($0 \leq \pi(x) \leq 1$). $f(x)$ değeri $+\infty$ 'a giderken bağımlı değişken $\pi(x)$ (örneğin sürücünün durma ihtimali) 1 değerine, tersi bir durumda ise 0 değerine yakınsar. Denklem 10'daki ifade, $e^{f(x)}$ ifadesi eşitliğin sol tarafında kalacak şekilde tekrardan düzenlenirse;

$$e^{f(x)} = \frac{\pi(x)}{1 - \pi(x)} \quad (11)$$

bağıntısı elde edilecektir (Hosmer & Lemeshow, 2013). Sarı ışık problemi özelinde, s kavşağa yaklaşan bir sürücü için $\pi(dur)$ ve $\pi(devam et)$ şeklinde iki ihtimalin varlığı söz konusudur. Bu sebeple $\pi(dur) + \pi(devam et) = 1$ eşitliği her zaman sağlanacaktır. Denklem 11'deki ifade, eşitliğin her iki tarafının e tabanında logaritması alınarak tekrar yazıldığı takdirde;

$$f(x) = \ln \left[\frac{\pi(dur)}{1 - \pi(dur)} \right] = \ln \left[\frac{\pi(dur)}{\pi(devam et)} \right] \quad (12)$$

ifadesi elde edilecektir. Burada logaritma fonksiyonu içinde verilen $[\pi(dur) / \pi(devam et)]$ ifadesine olasılık oranı (odds ratio) adı verilir (Norton & Dowd, 2018).

Chang vd. (1985), ABD'nin Virginia ve Texas eyaletlerinde yedi kavşak üzerinde yaptığı çalışmada; sürücülerin %85'inin frenleme anındaki intikal reaksiyon süresini 1,2 saniye, yavaşlama ivmelerinin ortalama ve medyan değerlerini sırasıyla 9,5 ft/s² (2,9 m/s²) ve 9,2 ft/s² (2,8 m/s²) olarak tespit etmiştir. Durma çizgisine görece uzak olan sürücülerin yakın olanlara göre daha fazla durma eğiliminde oldukları, hızlardaki artışın ise devam etme eğilimini artırdığı bu çalışma neticesinde elde edilen diğer bulgulardır. Yine bu çalışmada araştırmacılar ikilem bölgesinin sınırlarını, durma çizgisine olan süre (travel time to intersection stop bar – TTI) ile tanımlamışlar ve bu sürenin yaklaşık 2,5 – 5 saniye aralığında olduğunu tespit etmişlerdir. Sonraki yıllarda birçok araştırmacı (Zhang vd., 2014; Gates vd., 2012; Hurwitz vd., 2012; Sharma vd., 2011; Bonneson vd., 2002; Rahman & Kang, 2021) bu modelden faydalanmış ve ikilem bölgesi sınırlarının TTI cinsinden yaklaşık olarak 2,5 ila 5,5 saniye arasında olduğunu belirtmişlerdir. İkilem bölgesinin sınırlarının TTI aralığı üzerinden hesaplanması; sadece hız verisine ihtiyaç duyulması sebebiyle Zegeer'in metoduna nazaran oldukça kolaydır. Ancak bu yaklaşımla birlikte, tüm kavşak kollarındaki çevre şartlarının ve sürücü davranışlarının benzer olarak kabul edildiği unutulmamalıdır.

Chang vd. bahse konu çalışmada; bir taşıtın sabit yaklaşım hızı ve durma çizgisine olan mesafesi verileri yardımıyla, sürücünün durma veya devam etme ihtimalini, lojistik regresyon kullanarak 0,05 anlamlılık düzeyinde (p=0,05) Denklem 13'te modellemiştir.

$$Durma\ Olasılığı = \frac{1}{1 + e^{2,083 - 2,755 \cdot (\frac{DONSETY}{100}) + (0,071 \cdot ASPEED)}} \quad (13)$$

Yukarıdaki durma olasılığı modeline, eğim ve kavşak derinliği bağımsız değişkenleri eklenerek yeni durma olasılığı modeli, 0,01 anlamlılık düzeyinde ($p=0,01$) Denklem 14'teki şekliyle önerilmiştir.

$$Durma\ Olasılığı = \frac{1}{1 + e^{5,038 - 3,013 \left(\frac{DONSETY}{100} \right) + (0,044 \cdot ASPEED) - (0,198 \cdot GRADE) - (0,014 \cdot INTW)}} \quad (14)$$

Denklem 13 ve 14'te;

DONSETY: Taşıtın sarı ışık anında kavşak koluna olan mesafesini (ft),

ASPEED: Taşıtın sarı ışık anı ve devamındaki sabit yaklaşım hızını (ft/s),

GRADE: Kavşak kolundaki ivme değerini (ft/ft, %) ve

INTW: Kavşak derinliğini (ft) ifade etmektedir.

Yine bahse konu çalışmada koruma süresine de değinen araştırmacılar; bu sürenin, sarı ışık bitiminde kavşak içerisinde kalan taşıtların kavşağı terk edebilmesi için uygulanması gerektiğini belirtmişler ve bu yorumdan hareketle söz konusu sürenin hesabı için Denklem 15'teki bağıntıyı önermişlerdir.

$$R = \frac{(L + W)}{V} \quad (15)$$

Denklem 15, kavşağın terk edilmesi durumunda, geçilmesi gereken kritik mesafeleri taşıt boyu (L) ve kavşak derinliği (W) olarak tarif etmekte ve taşıt hızını da (V) sabit olarak kabul etmektedir. Sarı ışığın son anlarında kavşağa giren bir taşıtın bu durumu fark ederek hızlanacağı öngörülmüş ve hız verileri yardımıyla 0,01 anlamlılık düzeyinde aşağıdaki bağıntı önerilmiştir.

$$FSPEED = 1,08 \cdot ASPEED \quad ; \quad R^2 = 0,99 \quad (16)$$

Denklem 16'daki bağıntı, taşıtın sarı ışık öncesi yaklaşım hızı (ASPEED) ve sarı ışık sonrasındaki ortalama hızı (FSPEED) arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu göstermekte ($R^2=0,99$) ve taşıtların sarı ışık anında hızlarını yaklaşık olarak %8 oranında artırdıklarını

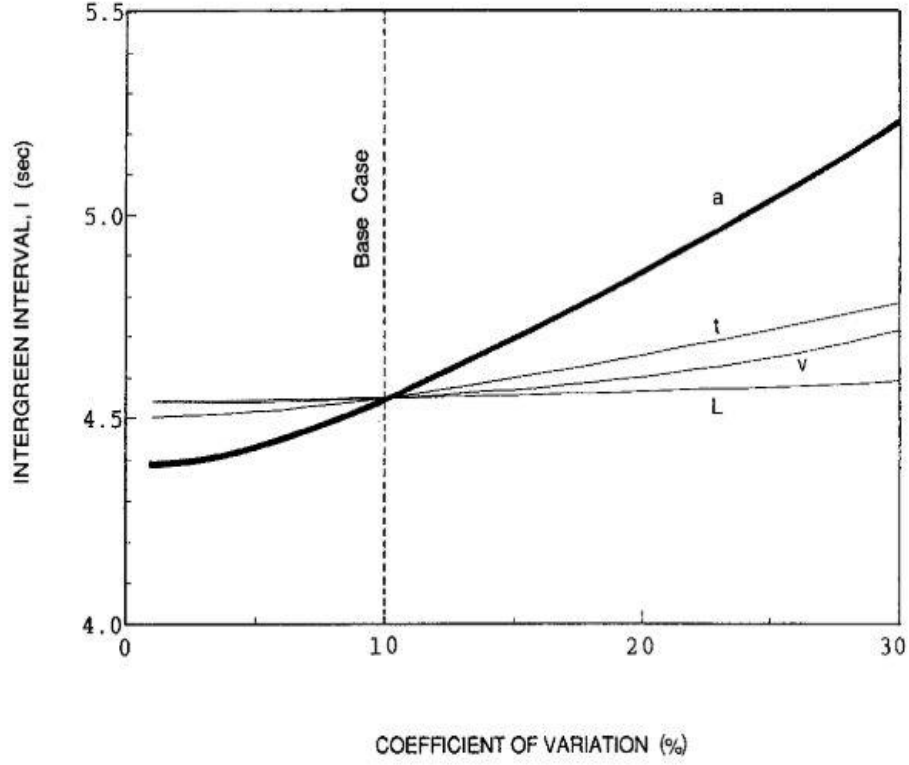
ifade etmektedir. Denklem 15’te hesaplanan koruma süresinin doğruluğu, diğer veriler ile birlikte hız verisinin de dikkatli bir şekilde belirlenmesiyle mümkün olabilecektir.

Sarı ışık probleminin anlaşılması ve giderilmesine yönelik yapılan akademik çalışmalara paralel olarak, ulaştırma mühendisliği alanında A.B.D. menşeli birçok kuruluşun da benzer çalışmalar yaptığı ve bilhassa sarı ve koruma sürelerinin hesabı ile alakalı belirli standart yöntemler önermeye çalıştıkları söylenebilir. Bunlardan Tip II ikilem bölgesi yaklaşımını ilk olarak gündeme getiren ITE, yine 1985 yılında sarı ve koruma sürelerinin hesabına yönelik, kavşak kolundaki eğim etkisini de dikkate alan Denklem 17’deki bağıntıyı önermiştir (Easa, 1993).

$$I = prt + \frac{v}{2(d + Gg)} + \frac{(W + L)}{v} \quad (17)$$

Denklem 17’de verilen bağıntının önerildiği yıllarda sarı + koruma süresi yerine kullanılmaya başlanan “intergreen interval” (yeşiller arası süre, I) kavramı, 1960 yılında Gazis vd. tarafından önerilen “amber signal light” kavramıyla aynı anlama gelmektedir. Ancak bu bağıntıda Denklem 8’den farklı olarak, rampa eğiminin (G, metre/metre, %) yerçekimi ivmesinin (g) etkisi altında yavaşlama ivmesini etkilediği kabul edilmiştir. Rampa yukarı tırmanma eğimlerin pozitif (durmaya yardımcı eğim, +) ve rampa aşağı iniş eğimlerin negatif (durmaya zorlaştıran eğim, -) olarak kabul edildiği bu denklem ile eğimi birbirinden farklı olan kavşak kolları için bir hesap standardı getirilmeye çalışılmıştır.

Erken dönem model çalışmalarının devam ettiği yıllarda Easa (1993) tarafından bir inceleme makalesi yayınlanmış ve yeşiller arası sürenin deterministik olarak hesabı üstü kapalı olarak eleştirilmiştir. Modelin; yavaşlama ivmesi (a), intikal reaksiyon süresi (t), taşıt hızı (V) ve taşıt boyu (L) gibi parametreleri birbirlerinden bağımsız “rastgele” seçilmiş olarak kabul ettiğini ve aslında bu parametreler arasında ilişki olduğunu ifade eden Easa, yeşiller arası süreyi olasılıksal bir yöntem (probabilistic method) ile hesaplamaya çalışmıştır. Bu amaçla; söz konusu parametrelerin varyasyon katsayılarının (coefficients of variation) %10 olduğu bir senaryo kurgulamış ve yeşiller arası süre parametrelerinin varyasyon katsayılarındaki değişimi yorumlamıştır (Şekil 8).



Şekil 8. Parametre varyasyon katsayılarına göre yeşiller arası sürenin hassasiyeti (Easa, 1993).

Şekil 8 incelendiği takdirde; yavaşlama ivmesindeki olası değişimlerin yeşiller arası süreyi en çok etkilediği, sırasıyla intikal reaksiyon süresi ve hız değerlerindeki değişimlerin de yeşiller arası sürede belirli etkileri olduğu, taşıt boyundaki değişimin ise görece önemsiz olduğu söylenebilir. Bu durumdan hareketle Easa, sarı ışık süresinin deterministik olarak hesabının yanlış sonuçlar verebileceğini ve söz konusu parametrelerin rastgele olan doğası sebebiyle ikilem bölgesinin oluşmasının tam olarak engellenemeyeceğini savunmuştur.

GHM modelini öneren iki ismin de içerisinde olduğu bir araştırma ekibi, yukarıda bahsedilen inceleme makalesinden iki yıl sonra konuya tekrardan dâhil olarak (Liu, Herman, & Gazis, 1995) farklı bir inceleme makalesi yayınlamışlardır. Bazı araştırmacıların 35 yıl önce tanımlanan ikilem bölgesi problemini tam olarak anlamadığından dem vuran araştırma ekibi ikilem bölgesi problemini, insan yapımı yasalar ile insan davranışının fiziksel etkileri arasındaki uyumsuzluğu gösteren güzel bir örnek olarak tanımlamışlardır. Sürücülerin ivmelenerek hız limitlerinin üzerine çıkmasıyla birlikte “ikilemin” teorik olarak giderilebileceğini, ancak sürücülere “dikkatli bir şekilde hızlanın” demenin tehlikeli bir tavsiye olacağını belirtmişlerdir. Bu yorumdan hareketle Denklem 8’de verilen yeşiller arası sürenin hesabını farklı bir notasyonda aşağıdaki şekilde tekrardan önermişlerdir.

$$\tau_{\min} = \delta + \frac{V_0}{2a} + \frac{W}{V_0} \quad (18)$$

($\tau_{\min}$: Yeşiller arası minimum süre, δ : İntikal fren süresi, V_0 : Sabit yaklaşım hızı, W : Kavşak derinliği + taşıt boyu, a : Sabit yavaşlama ivmesi)

İkilem bölgesini matematiksel olarak ifade edebilmek adına, Denklem 18'deki eşitliğin sağ tarafı basit bir düzenlemeyle kareli bir ifade haline getirilmeye çalışılmıştır.

$$\tau_{\min} - \delta = \left(\sqrt{\frac{V_0}{2a}} - \sqrt{\frac{W}{V_0}} \right)^2 + 2 \cdot \sqrt{\frac{W}{2a}} \quad (19)$$

Eşitliğin sağında çift köklü (x^2) bir ifade kalacak şekilde eşitliğin solunun negatif olamayacağı bir düzenleme yapılarak Denklem 19 yeniden yazılabilir.

$$\tau_{\min} - \delta - \sqrt{\frac{2W}{a}} = \left(\sqrt{\frac{V_0}{2a}} - \sqrt{\frac{W}{V_0}} \right)^2 \quad (20)$$

Denklem 20'de eşitliğin sol tarafındaki $\tau_{\min} - \delta - \sqrt{\frac{2W}{a}}$ ifadesinin sıfırdan küçük olması

durumu, ikilem bölgesinin matematiksel olarak gösterimidir. $\tau_{\min} - \delta - \sqrt{\frac{2W}{a}} > 0$ olması

durumunda ise, yavaş ve hızlı giden taşıtlar için (V_1 , V_2) iki farklı çözümün olduğu Şekil 9'de görülebilmektedir. Sarı ışık anında belirlenmiş hız limitinden (V_1) küçük bir V_0 hızı ile yol alan ve durabileceği halde ikilemde kalan bir sürücü için; taşıtın güvenli durabilmesi için gereken minimum mesafe (X_s) yardımıyla sarı sürenin (τ_y) hesabı yapılmak istendiği takdirde,

$$\tau_y = \frac{X_s}{V_0} = \frac{V_0 \cdot \delta + \frac{V_0^2}{2a}}{V_0} \quad (21)$$

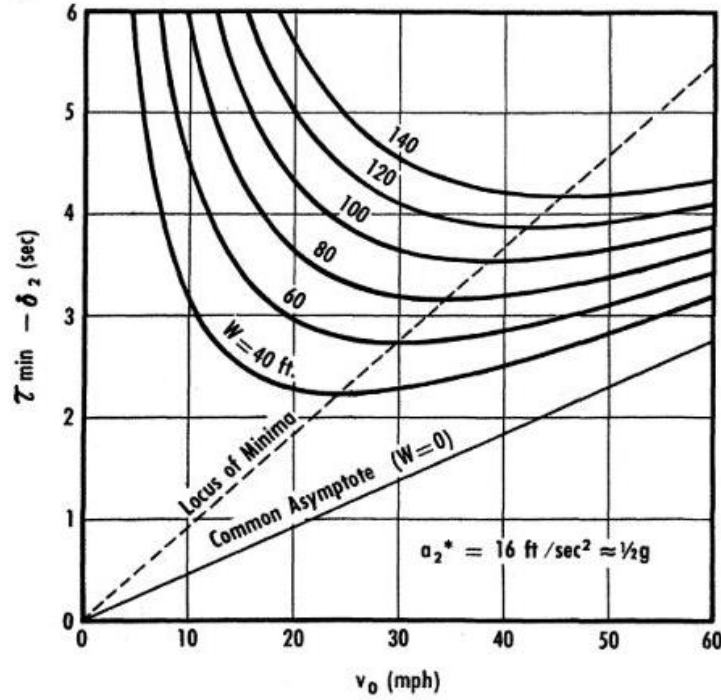
bağıntısı elde edilecektir. Bu bağıntı ile Denklem 18'deki bağıntının $W=0$ koşulunda aynı oldukları görülebilmektedir. Buradan hareketle; sarı ışık anında durma çizgisine X_s mesafesinde

olan bir sürücü, durabileceği halde devam etmeye karar verdiği takdirde, Denklem 18 ve 21’de verilen bağıntılar yardımıyla hesaplanan sarı ışık süreleri taşıtın durma çizgisini geçmesi için yeterli olacaktır. Güvenli tarafta kalabilmek adına, bu sarı süre hesabının V_0 yerine, idarece belirlenmiş limit hız değeri olan V_1 ile yapılması gerekmektedir. Bu yaklaşımla belirlenen sarı sürede, taşıtın durma çizgisinden geçtiği ve kavşağı henüz terk etmediği unutulmamalıdır.

Güvenliğin tam olarak sağlanabilmesi, taşıtın W kadar mesafeyi mevcut hızıyla kat edebileceği bir koruma süresinin uygulanması ile mümkün olabilir. Bu yorumdan hareketle taşıtın kavşak içerisinde geçireceği sürenin (τ_R) hesabı,

$$\tau_R = \frac{W}{\frac{V_0 - (V_1 - V_0)}{2a}} \quad (22)$$

bağıntısı yardımıyla yapılabilir. $\frac{V_0 - (V_1 - V_0)}{2a}$ ifadesinin W ’den büyük olması durumunda taşıt, bir saniye ve üzerinde uygulanan tüm koruma süresi değerleri için kavşağı güvenle terk edebilecektir. V_0 hızının sıfıra yaklaşması durumunda, τ_R için uygun olan maksimum değer seçilmelidir. Son olarak koruma süresi, W/V_1 değerinden daha küçük olmamalıdır.



Şekil 9. İkilem bölgesi oluşmadığı durumda, sabit V_0 ve farklı W değerleri etkisinde $\tau_{\min}$ parametresinin değişimi (Gazis, Herman, & Maradudin, 1960)

Şekil 9 incelendiği takdirde, görece düşük hızlarda giden taşıtlar için ikilem bölgesi probleminin giderilemediği ifadesi teorik olarak doğru kabul edilebilir (Papacostas & Kasamoto, 1992). Bununla birlikte, 6-7 mph (yaklaşık olarak 10 km/sa) hızlarda giden bir taşıt için mevcut sinyalizasyon uygulamasında ikilem bölgesi oluşturmayacak bir yeşiller arası sürenin belirlenmesi, çok uç örnekler haricinde mümkün görünmemektedir. Sonuç olarak burada bahsedilen hız değerinin çok küçük olması sürücünün istediği takdirde kolayca durabilmesini mümkün kılacağından, matematiksel olarak doğru olan bu argümanın uygulamada bir sorun teşkil etmeyeceği söylenebilir (Liu vd., 1995).

Sürücü kaynaklı yaşanacak ekstrem durumlar (alkol etkisi, yetersiz sürüş bilgisi vb.) dikkate alınmadığı takdirde, yukarıda anlatılmaya çalışılan yöntem yardımıyla τ_y ve τ_R değerlerinin hesabı rahatlıkla yapılabilir. Bununla birlikte söz konusu yaklaşımın güvenli olabilmesi, ancak ve ancak etkili bir hız denetimi ile mümkün olabilecektir. İnceleme makalesinin son kısmında bu konuya değinen Liu vd., ikilem bölgesi probleminin çözümünün, yeterli gözlem ve etkili denetim sayesinde mümkün olabileceğini ifade etmişlerdir.

Sinyalize kavşaklarda yeşiller arası sürenin hesabı, yukarıda verilen denklemler yardımıyla kolaylıkla yapılabilecektir. Bununla birlikte, derinlikleri görece uzun olan yüksek hızlı kavşaklar için Zegeer (1977) tarafından önerilen Tip II ikilem bölgesinin tespiti, olası trafik kazalarını ve riskli bölgeleri öngörebilmek adına yararlı olacaktır. Ancak, Denklem 17 ve türevleri yardımıyla süre dağılımı yapılan bir kavşakta, ikilem bölgesi probleminin tamamen ortadan kalkacağını söylemek mümkün değildir. Bu durumun başlıca sebebi; sinyalize kavşakların tamamında yapılması gereken etkili denetimin, günümüz teknolojik imkânlarıyla dahi ekonomik açıdan uygulanabilir olmamasıdır. Ek olarak, tüm sinyalize kavşaklarda denetim yapılmasının, sosyal açıdan da bazı etkilerinin olabileceği düşünülmelidir.

Tip I ve II ikilem bölgesi modellemelerinin diğer bir noksanı, her iki modelin de tek bir taşıt veya tek bir sürücü davranışını dikkate alıyor olmasıdır. Bununla birlikte, bilhassa deterministik modelin taşıt ve çevre şartlarını tam olarak yansıtmadığı söylenebilir. Yine her iki model, sarı ışık anında birbirlerine yakın olan sürücülerin, karar verme sürecinde birbirlerini etkilemediği ön kabulünü dolaylı da olsa yapmaktadır. Özetle, Denklem 18'te verilen parametrelere ek olarak, aşağıda verilen parametrelerin de ikilem bölgesi oluşumuna etkilerinin incelenmesi gerekecektir (Papaioannou, 2007).

1) Kaplama durumu

- 2) Taşıt karakteristiği ve kondisyonu
- 3) Kavşak planı
- 4) Sinyal ve döngü süreleri, fazlar (eğer sürücü tarafından biliniyorsa)
- 5) Kuyruk etkisi (en öndeki ve ikinci sıradaki taşıt için)
- 6) Durma çizgisine olan mesafe
- 7) Yaş, cinsiyet, davranış ve tutum gibi sürücü nitelikleri
- 8) Yolculuk türü.

Papaioannou 2007 yılında yaptığı çalışmada, bahsedilen parametrelerin sürücü davranışına etkilerini incelemeye çalışmıştır. Çalışma için, 2000’li yılların başında Avrupa Birliği ülkeleri arasında en kötü kaza geçmişine sahip ülkeler arasından Yunanistan seçilmiştir (Papaioannou vd., 2002). Durma çizgisine olan mesafe ve taşıt yaklaşım hızı gibi kinematik parametreler ile yaş ve cinsiyet gibi sürücü davranışına yönelik parametrelerin bir arada değerlendirildiği bu çalışma ile sürücü agresifliği kavramı, belirli parametre ve kıstaslar yardımıyla sınıflandırılmaya çalışılmıştır.

Birinci aşamada sürücülerin hız değerleri kullanılarak öncelik sınıflandırılması yapılmıştır. Taşıt hızlarını bölgedeki hız limitine göre değerlendiren bu öncelik sınıflandırmasında; kırsal bölgeler için hız limitinin %20’si ve kent içi bölgelerdeki hız limitinin %30’unu aşan sürücüler agresif olarak kabul edilmiştir. İkinci aşamada ise süreç sınıflandırması yapılarak ve kavşakta ikilem bölgesinin varlığı, sarı ışık anındaki taşıtın konumu, sürücünün geçme veya durma kararı gibi parametreler birlikte değerlendirilerek sürücünün agresiflik durumu belirlenmeye çalışılmıştır (Tablo 7).

Tablo 7. Agresiflik için ikinci aşama süreç sınıflandırması

Seçim Bölgesi	İkilem Bölgesi	Durma Çizgisine Olan Mesafe	Verilen Karar	Sınıflandırma
Evet	Hayır	Xs Uzunluğundan Az	Devam Et	Normal
Evet	Hayır	Opsiyon Bölgesinde	Devam Et	Normal
Evet	Hayır	Xc Uzunluğundan Fazla	Devam Et	Agresif
Evet	Hayır	Xs Uzunluğundan Az	Dur	Temkinli
Evet	Hayır	Opsiyon Bölgesinde	Dur	Normal
Evet	Hayır	Xc Uzunluğundan Fazla	Dur	Temkinli
Hayır	Evet	Xc Uzunluğundan Az	Devam Et	Normal
Hayır	Evet	İkilem Bölgesinde	Devam Et	Agresif
Hayır	Evet	Xs Uzunluğundan Fazla	Devam Et	Agresif
Hayır	Evet	Xc Uzunluğundan Az	Dur	Temkinli
Hayır	Evet	İkilem Bölgesinde	Dur	Normal
Hayır	Evet	Xs Uzunluğundan Fazla	Dur	Normal

Öncelik ve süreç sınıflandırmaları sonucunda sürücünün nihai agresiflik durumu Tablo 8'deki gibi belirlenmiştir.

Tablo 8. Sürücünün nihai agresiflik durumunun belirlenmesi

Öncelik Sınıflandırılması	Süreç Sınıflandırılması	Nihai Sınıflandırma
Agresif	Agresif	Agresif
Agresif	Normal	Agresif
Agresif	Temkinli	Agresif
Agresif Değil	Agresif	Agresif
Agresif Değil	Normal	Normal
Agresif Değil	Temkinli	Temkinli

Yine çalışma neticesinde tespit edilen, kavşak kolunda sarı ışığa yakalanan ve kuyruk başında olan sürücülerin, hızları ve cinsiyetlerine göre verdikleri dur ya da devam et kararlarının özeti Tablo 9'da gösterilmektedir.

Tablo 9. Sarı ışık anında kuyruk başında olan sürücülerin hız ve cinsiyete göre karar dağılımı

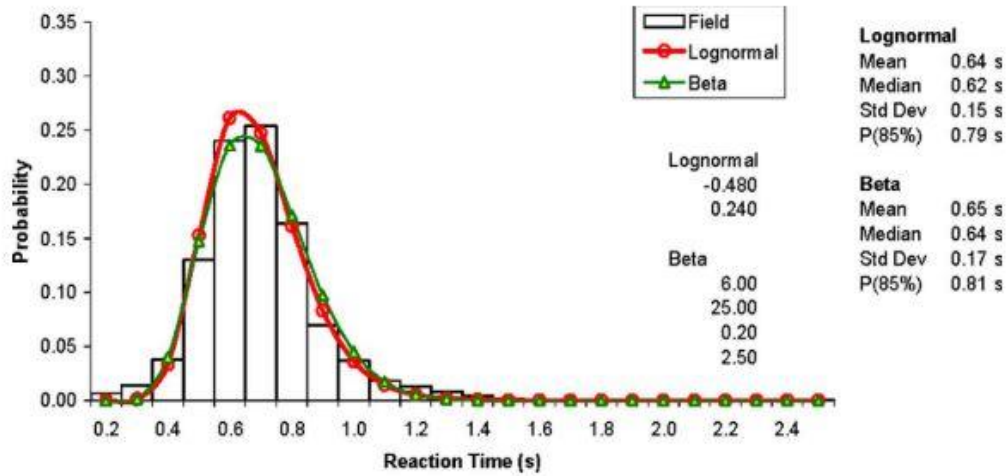
Hız Grubu (km/sa)	Tüm Sürücüler	Duranlar	Devam Edenler
Toplam Kuyruk Lideri	697 (%100)	377 (%54,1)	320 (%45,9)
10-39	63	50	13
40-49	253	127	126
50-59	215	112	103
60-100	166	88	78
ERKEK	617 (%100)	305 (%49,4)	312 (%50,6)
10-39	45	34	11
40-49	230	106	124
50-59	192	90	102
60-100	150	75	75
KADIN	80 (%100)	72 (%90)	8(%10)
10-39	18	16	2
40-49	23	21	2
50-59	23	22	1
60-100	16	13	3

Bu çalışma neticesinde üç farklı yapı temel alınarak ikili lojistik regresyon analizi yapılmış ve üç farklı model önerilmiştir. Analiz neticesinde sarı ışık anında; hız limitleri

içerisinde seyahat eden erkek bir sürücünün devam etme ihtimalinin kadın bir sürücüye nazaran 14 kat daha fazla olduğu, orta yaşlı bir sürücünün durma ihtimalinin genç ve yaşlı sürücülere nazaran 0,48 kat daha fazla olduğu, her 1 km/sa'lık hız artışının durma ihtimalini 0,906 kat etkilediği tespit edilmiştir. İleriki yıllarda birçok araştırmacının faydalandığı bu çalışma, sürücü agresifliğinin sınıflandırılması konusunda öncü niteliğindedir.

Seyir halinde olan bir sürücü veya yayanın, kendisi için tehlike oluşturabilecek bir durum veya engeli görmesi neticesinde; konuyu algılaması, o an için ihtiyaç duyulan eylemi tasarlaması, karar vermesi ve bu kararı uygulamaya başlaması için gerekli olan süreye intikal reaksiyon süresi (perception reaction time, prt) adı verilir (Yardım, 2015). Sarı ışık anında kavşağa yaklaşan sürücüler, dur ya da devam et kararlarından birini vermek durumundadırlar. Bu durum, kavşağı sabit hızla terk edenler hariç tüm sürücülerin intikal reaksiyon sürecini yaşadıkları anlamına gelir. Hızlanma ivmelerinin çeşitli sebeplerle ihmal edilmesi durumunda (Denklem 6), prt için intikal fren süresi (perception break time, δ) ifadesi de kullanılabilir (Liu vd., 1995). Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma İdareleri Birliği (American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO) intikal reaksiyon süresini; kent merkezi ve kent merkezine yakın bölgeler için 1,5 saniye, kırsal alanlar için 2,5 saniye olarak önermektedir (AASHTO, 2018). Yine ITE tarafından (ITE, 2015) 1 saniye olarak kullanılması tavsiye edilen bu değer, KGM tarafından durma ve intikal sürelerinin hesabında 0,75 saniye olarak kabul edilmiştir (URL-3, 2024).

Tanımından da anlaşılacağı üzere, sarı ışık anında kavşağa yaklaşan sürücülerin intikal reaksiyon süreleri birbirlerinden farklı olabilir. Bu durum, prt değerinin bir sürücü davranışı parametresi olarak kabul edilebilmesini mümkün kılar (Rakha vd., 2007). Rakha ve diğerleri 2007 yılında yaptıkları çalışmada bu konuya değinerek, sarı ışık anında ortaya çıkan prt değerlerinin değişimini farklı parametrelerin etkisinde incelemişler ve prt'nin Tip II ikilem bölgesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Verilerin temini noktasında önceki çalışmalardan farklı bir yöntem izleyen araştırmacılar, belirlenen bir gözlem kavşağına ve yine belirledikleri bir taşıta ihtiyaç duydukları ekipmanları yerleştirerek, farklı tipteki sürücülerin bu test sahasında sürüş yapmasını sağlamış ve verileri anlık olarak temin edebilmişlerdir. 455 gözlem verisi kullanılarak β ve lognormal dağılım yardımıyla belirlenmeye çalışılan prt davranışında (Şekil 10), yaş ve cinsiyet parametrelerinin bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Yine çalışma neticesinde araştırmacılar, 1,6 ila 3,3 saniye TTI değer aralığında, erkek sürücülerin kadın sürücülere nazaran durma ihtimallerinin daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir.

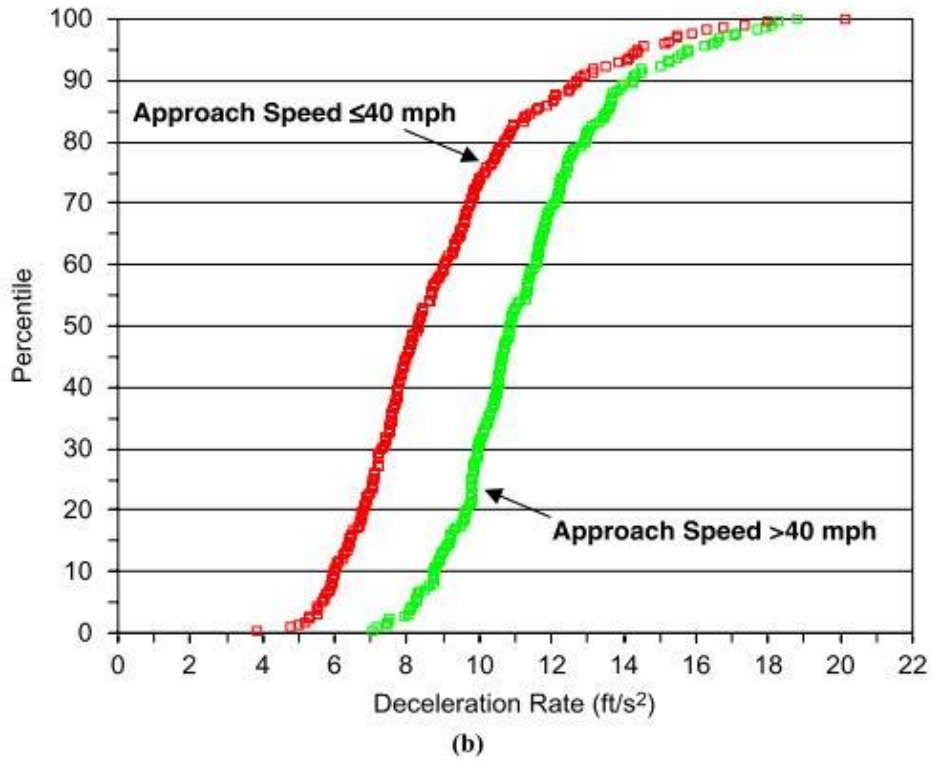


Şekil 10. İki farklı dağılım metodu kullanılarak önerilen prt modelleri (Rakha vd., 2007)

Gates vd. (2007) yılında A.B.D.'nin Wisconsin eyaletinde yaptıkları çalışmada, aşağıdaki kriterleri göz önünde bulundurarak 6 adet kavşak seçimi yapmış ve kamera görüntüsü üzerinden elde ettiği veriler yardımıyla kırmızı ışık ihlallerini, nedenlerini analiz ederek tahmin etmeye çalışmıştır.

- Farklı eğimlerde kavşak kolları seçilmeli,
- Çalışılan tüm kollarda yeterli görüş mesafesi bulunmalı,
- Kavşaklar dik kesişimli kollardan oluşmalı
- Birbirlerinden izole ancak yakın mesafeli kavşaklar seçilmeli,
- Taşıt yaklaşım hızları, trafik hacimleri, devre süreleri, faz dağılımı, kavşak derinliği, sarı ve koruma süreleri birbirlerinden farklı olan kavşaklar seçilmelidir (Bonneson vd., 2002).

Çalışma neticesinde, taşıt yaklaşım hızının yavaşlama ivmesine etkisini 40 mph (64,37 km/sa) hız değerinden büyük ve küçük hızları gruplandırarak inceleyen araştırmacılar (Şekil 11), buldukları tüm sonuçları bir tablo halinde sunmuşlardır.



Şekil 11. Yavaşlama ivmesinin taşıt yaklaşım hızına göre dağılımı (Gates vd., 2007)

Tablo 10. 2007 yılında Wisconsin’de yapılan çalışmanın bulguları

	Sırasıyla: %15., %50. ve %85. değerler	Anlamli Tahmin Parametreleri	Bulgular Önceki Çalışmalarla Benzer mi?
İntikal Fren Süresi(s)	0,7; 1 ve 1,6	-Taşıt Yaklaşım Hızı -Durma Çizgisine Olan Mesafe -Yavaşlama İvmesi -Taşıt tipi	EVET
Yavaşlama İvmesi(m/s²)	7,2; 9,9 ve 12,9	-Taşıt Yaklaşım Hızı -Durma Çizgisine Olan Mesafe -İntikal Fren Süresi -Taşıt Tipi	EVET

Tablo 10'un devamı

Dur ya da devam et kararlarının tahmini ve niteliği	Sarı Işık Anındaki Yaklaşık TTI değeri (s). Duranlar: 3,36; 4,27; 5,05 Devam Edenler: 4,03; 3,23; 2,72	-Sarı ışık Anındaki Yaklaşık TTI değeri, (En güçlü tahmin Parametresi) -Taşıt Yaklaşım Hızı -Sarı Süre -Taşıt Tipi -Yan Şeritteki Taşıt Hareketleri -Kavşak Koluna Yakın Konumlanan; taşıt, yaya, bisiklet, hayvan ve/veya sola dönen taşıtların varlığı	EVET
Kırmızı ışık ihlallerinin niteliği	Kırmızı Işık Başlangıcından Kaç Saniye Sonra Durma Çizgisi Geçilmiş? 0,02; 0,30; 0,84	-Sarı ışık Anındaki Yaklaşık TTI -Sarı Süre -Sarı Süre Eksikliği -Taşıt Tipi -Yan Şeritteki Taşıt Hareketleri -Kavşak Koluna Yakın Konumlanan; taşıt, yaya, bisiklet, hayvan ve/veya sola dönen taşıtların varlığı	EVET

Tablo 10'da verilen bulgulara ek olarak, sürücünün dur ya da devam et kararının tahminine yönelik bir lojistik regresyon analizi yapılmış ve durma veya devam etme ihtimali aşağıda şekilde hesaplanmıştır.

$$\ln \left[\frac{\pi_{devam\ et}}{\pi_{dur}} \right] = 3,170 - 2,041x_{TTI} + 0,044x_V + 0,804x_Y + 0,662x_{adjent} - 1,396x_{v.type} + 1,006x_{w.veh} \quad (23)$$

$$\pi_{devam\ et} = \frac{e^{Denklem\ 23}}{1 + e^{Denklem\ 23}} \quad ; \quad \pi_{devam\ et} + \pi_{dur} = 1 \quad (24)$$

Burada;

$\pi_{devam\ et}$, π_{dur} : Sürücünün devam etme ya da durma ihtimali

x_i : Denklem 23'teki sırasıyla; TTI, hız, sarı süre, yan şeritlerdeki taşıt hareketleri, taşıt tipi ve civarda bekleyen taşıtların varlığını temsil etmektedir. Denklem 24 yardımıyla yapılan modelleme sonucunda, taşıtların devam etme kararları %81 oranında tahmin edilebilmiştir.

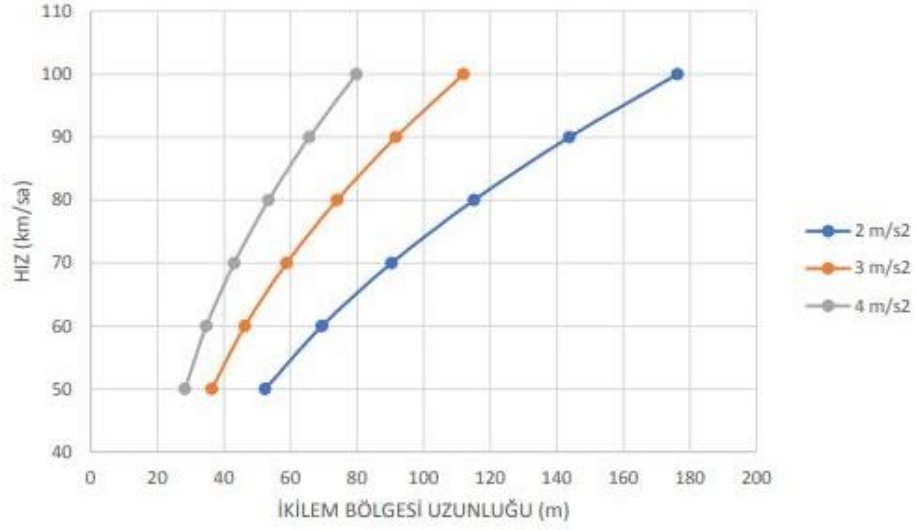
Elmitiny vd. tarafından 2008 yılında yüksek hızlı sinyalizasyon kavşakları üzerinde sınıflandırma ağacı modellemesiyle yapılan çalışmada; DTI, hız ve taşıtın trafik akımındaki konumu parametrelerinin, hem dur-devam et kararını hem de kırmızı ışık ihlallerini belirlemede en güçlü yordayıcılar olduğu tespit edilmiştir. Sarı giriş süresinin (taşıtların sarı ışık sonrası durma çizgisini geçtiği süre bilgisi), kırmızı ışık ihlallerini belirlemede önemli bir parametre olduğu belirtilen çalışmada, yukarıda verilen parametreler ve taşıt tipinin bu sürenin oluşumunda etkileri olduğu ortaya konmuştur (Elmitiny vd., 2010).

Dijital kamera teknolojisinde son 20 yılda yaşanan gelişmeler ve birçok araştırmacının bu cihazları daha kolay temin edebiliyor olması, erken dönem çalışmalarda sabit olarak kabul edilen veya ihmal edilen, sürücü ve taşıtlara ait bazı parametrenin (prt, a, d) tespit edilebilmesine olanak sağlamıştır (Karaçeper, 2018). Liu vd. (2007) yaptıkları çalışmada, önceki yıllarda yapılan birçok araştırmada sabit olarak kabul edilen bu parametreleri video gözlem yardımıyla tespit ederek, ikilem bölgesinin sınırlarının değişimini gözlemlemiştir. Bu çalışma neticesinde; tespit edilen hız, intikal reaksiyon süresi, hızlanma ve yavaşlama ivmeleri gibi parametrelerin ortalama değerleri alınarak hesaplanan ikilem bölgesi uzunluk ve konumlarının, sabit parametreler ile hesaplanana göre farklılıklar gösterdiği ortaya konmuştur.

Yavaşlama ivmesi, Tip I ikilem bölgesi analizinde X_s 'nin hesabı için önemli bir parametre olduğundan (Denklem 1), sarı ışık anında ortaya çıkabilecek ikilem bölgesi uzunlukları yavaşlama ivmesinin değişimine göre farklılaşabilir (Şekil 12). Bir taşıtın yavaşlama ivmesinin ortalama değeri (d , m/s²), frenleme başlangıcındaki hız (V_f , m/s) ve frenleme süresine (t_f , s) bağlı olarak Denklem 25'teki bağıntı yardımıyla kolayca hesaplanabilir.

$$d = \frac{V_f}{t_f} \quad (25)$$

Taşıtların frenleme kabiliyeti; taşıtın tekerlekleri ve fren aksamı, kaplamanın türü ve pürüzlülüğü, hava şartları gibi birçok parametreye göre değişkenlik gösterebilir (Yardım, 2015). Bu sebeple, kondisyonu farklı olan iki aynı taşıt durmak istediği takdirde farklı ivmelerle yavaşlayabilirler. Benzer şekilde farklı tipteki taşıtların, farklı frenleme kapasitelerine sahip olabilecekleri ortadadır.



Şekil 12. Yavaşlama ivmesi ve hız parametrelerinin ikilem bölgesi uzunluğu üzerindeki etkileri ($p_{rt}=1,5$ s; $I=3$ s; $W=25$ m), (Mercan, 2023).

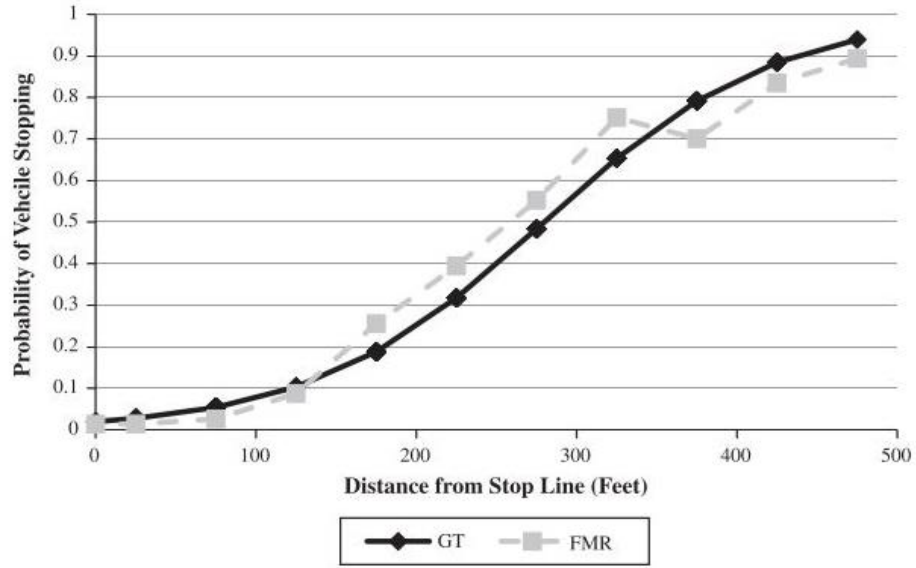
Gates ve Noyce 2010 yılında yaptıkları çalışmada; ikilem bölgesi problemi yaşayan taşıtları otomobil, kamyonet, kamyon ve çekici olarak dört farklı tipte kategorize etmiş ve her bir tipin ikilem bölgesi davranışını belirlemeye çalışmıştır. Bu çalışma neticesinde; kamyon ve çekicilerin diğer tiplere göre daha küçük ivmelerle yavaşladığı, ağır taşıtların kırmızı ışık ihlallerini otomobil ve kamyonetlere göre daha sık yaptığı tespit edilmiştir. Yine çalışma kapsamında; günün farklı saatlerinde oluşabilen yoğun ve sakin trafik koşullarının ve kuyruk oluşumunun, yavaşlama ivmesi ve kırmızı ışık ihlali üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır (Tablo 11), (Gates & Noyce, 2010). Yoğun trafik koşullarında, yavaşlama ivmeleri ve kırmızı ışık ihlallerinde anlamlı bir artış olduğu belirtilen çalışmada, kuyruk etkisinin söz konusu parametrelerde anlamlı bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

Tablo 11. Yavaşlama ivmesinin farklı parametrelere göre istatistik olarak değerlendirilmesi

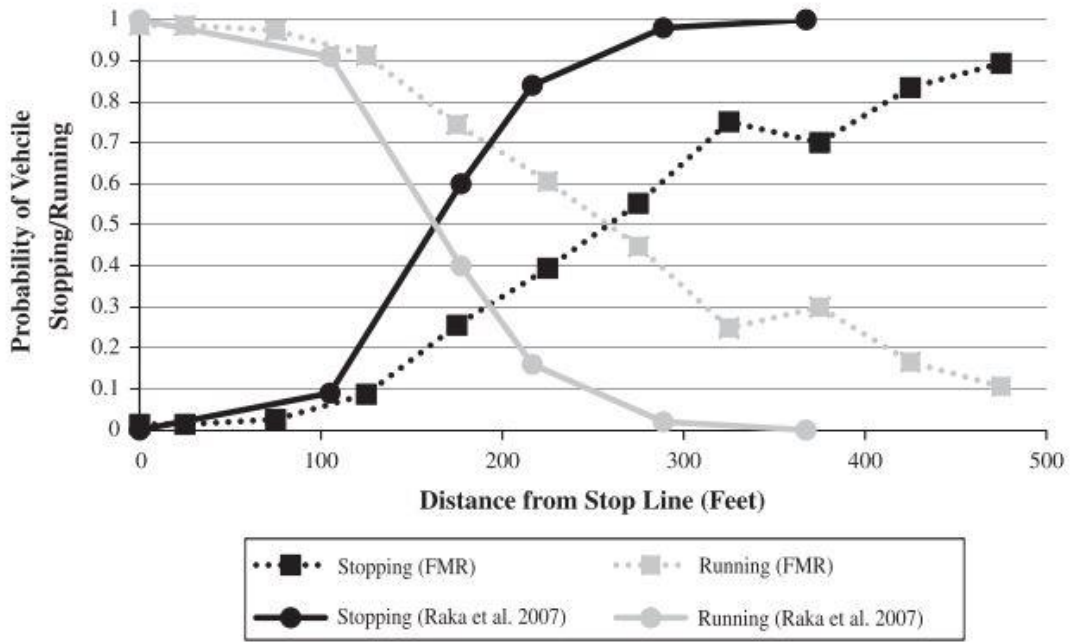
İncelenen Parametre	Kategori	N	Ortalama ft/s2	Standart Sapma ft/s2	Yavaşlama İvmesi (ft/s ²), (% dağılıma göre)			p
					15%	50%	85%	
Taşıt Tipi	Otomobil	315	10,09	2,95	7,00	9,78	13,12	.024
	Kamyonet	226	10,42	2,72	7,46	10,33	13,29	
	Kamyon	23	8,18	2,12	5,91	7,73	10,95	
	Çekici	8	8,59	1,95	6,37	8,54	11,30	
Trafik Yoğunluğu	Zirve Saatler	228	9,87	3,03	6,46	9,65	13,20	.024
	Zirve Harici Saatler	344	10,30	2,72	7,49	10,01	12,96	
Kuyruk	Kuyruk Var	185	9,86	2,86	6,86	9,68	12,58	.135
	Kuyruk Yok	387	10,25	2,85	7,23	10,00	13,31	

N: Vaka sayısı; p: Anlamlılık düzeyi

İnsanların günlük hayatta tecrübe ettikleri birçok durum ve gerçekleştirdikleri birçok eylem kesinlik içermeyen bulanık bir yapıda olabilmektedir. Örneğin havanın sıcak ya da soğuk olması durumu iki insan tarafından farklı şekilde algılanabilir ve bu iki insanın hava durumuna karşı alacakları önlemler farklılıklar içerebilir. Bununla birlikte hava sıcaklığı için birçok insan tarafından kabul görebilecek bir alt ve üst sınır belirleyebilmek mümkündür. Karanlık-aydınlık, başarılı-başarısız, doğru-yanlış, hızlı-yavaş gibi tanımlamaların birçoğu, kullanıldıkları probleme göre alt ve üst sınırları belirlenebilecek olan bulanık ifadelerdir (ALTAŞ, 1999). İkilem bölgesi problemi; durma çizgisine olan mesafe, yaklaşım hızı, yavaşlama ivmesi ve sinyal süreleri gibi sarı ışık anında sürücüler için kesinlik içermeyen ancak yaklaşık alt ve üst sınırları olan bulanık yapıda bir problem olarak değerlendirilebilir. Bu yaklaşımdan hareketle Hurwitz vd. 2012 yılında yaptıkları çalışmada, Tip II ikilem bölgesi sınırlarını belirlemek için bir bulanık mantık (fuzzy logic) modellemesi yaparak gözlem verileri ile model sonuçlarını karşılaştırmalı olarak sunmuşlardır (Şekil 13). Yine araştırmacılar, elde ettikleri sonuçları Rakha vd. (2007) tarafından yapılan çalışmanın sonuçları ile karşılaştırarak (Şekil 14), düşük hızlı kavşak yaklaşımlarında benzer sonuçların ortaya çıktığını, ancak ikilem bölgesi probleminin daha etkili olduğu yüksek hızlı kavşak yaklaşımlarında iki modelin farklı çalıştığını ifade etmişlerdir (Hurwitz vd., 2012).



Şekil 13. Taşıtların durma çizgisine olan mesafelerine göre durabilme ihtimallerinin gözlem verisi ve modelleme sonuçlarına göre karşılaştırılması (GT: saha çalışması verileri, FMR: bulanık mantık sonuçları), (Hurwitz vd., 2012)



Şekil 14. Taşıtların durma veya devam etme ihtimallerinin durma çizgisine olan mesafeye göre dağılımı (İki çalışma karşılaştırmalı olarak verilmiştir), (Hurwitz vd., 2012)

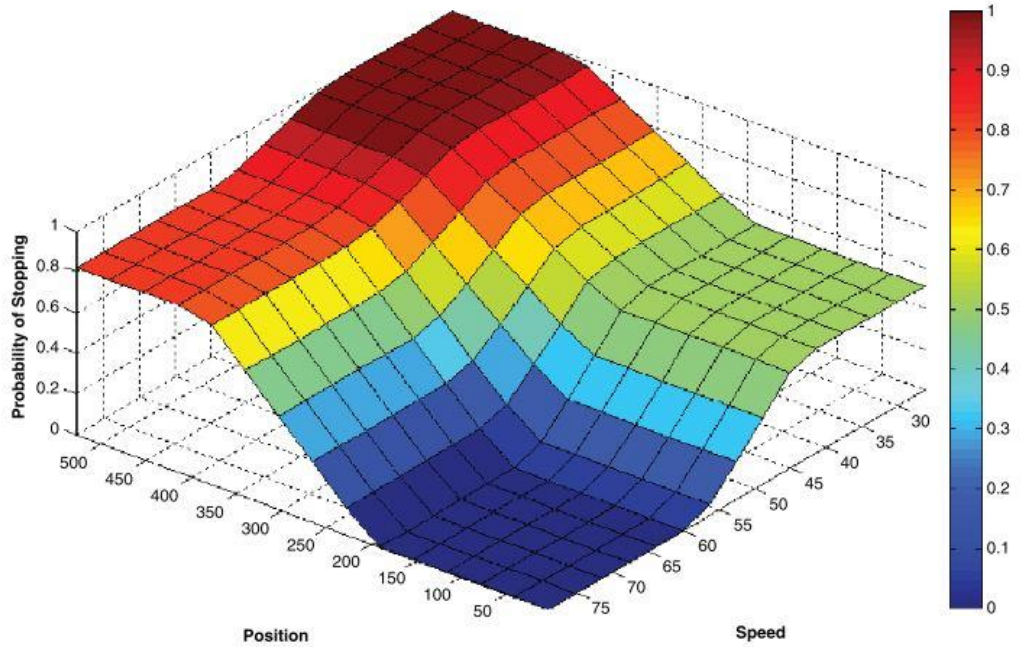
Moore ve Hurwitz 2013 yılında yaptıkları çalışmada, veri temini için bir sürüş simülatöründen faydalanmışlardır (Moore & Hurwitz, 2013). Yaş ortalaması 24,5 olan 30 üniversite öğrencisinin katılımıyla yapılan çalışmada, yavaşlama ivmesinin %95 güven

aralığında ve %15, 50, 85 dağılım sınırlarında aldığı değerler önceki çalışmalarda bulunan değerler ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur (Tablo 12).

Tablo 12. Yavaşlama ivmesinin istatistiksel analizi ve geçmiş çalışmalarla karşılaştırılması

Çalışma	Ortalama	Standart Sapma	%95 Güven Aralığı (m/s ²)		Yavaşlama İvmesi (m/s ²)		
			En Düşük	En Yüksek	15%	50%	85%
Güncel Çalışma (Moore ve Hurwitz 2013)	3,57	1,22	1,10	6,03	2,44	3,20	4,82
Gates vd. (2007)	3,08	0,85	1,35	4,80	2,19	3,02	3,93
Chang vd. (1985)	2,90		Bilgi Yok		1,71	2,80	4,11
Wortman ve Mathias (1983)	3,54		Bilgi Yok		2,44	3,35	4,88

Yine bu çalışmada bulanık mantık yardımıyla; durma çizgisine olan mesafe, hızla birlikte durma çizgisine olan mesafe ve durma çizgisine olan süre (TTI) temelli üç farklı modelleme 15 sürücünün verileri baz alınarak yapılmış, kalan 15 sürücünün verileri ile de her modelin doğruluğu kontrol edilmiştir. Sürücülerin dur ya da devam et kararının sırasıyla %88, %89 ve %90 oranında tahmin edilebildiğini belirten bu çalışma sonucunda, sürücülerin hız ve durma çizgisine olan mesafe verilerine dayanarak verecekleri karar, bulanık mantık modellemesi ile üç boyutlu olarak sunulmuştur.



Şekil 15. Mesafe ve hız ve temelli bulanık mantık modellemesi (ft. ve ft/s²)

Yaklaşık 60 yıldır yapılan çeşitli çalışmalar ile tanımlanmaya ve giderilmeye çalışılan ikilem bölgesi problemi ile alakalı birçok araştırmacı tarafından önem atfedilen diğer bir inceleme makalesi, 2014 yılında Zhang vd. tarafından yayınlanmıştır (Zhang, Fu, & Hu, 2014). Liu vd. tarafından (1995) yapılan inceleme makalesine atıfta bulunan araştırmacılar; söz konusu makalenin daha çok ikilem bölgesi probleminin sebeplerini açıklamaya yönelik olduğunu ifade edip, konu hakkında yapılmış çalışmaları kapsamlı bir şekilde değerlendirmeye çalışmışlardır. Tip I ikilem bölgesi hesabı için gerekli olan p , r , d , a , W gibi parametreler için; ITE, AASHTO gibi kuruluşlar ve bazı araştırmacıların önerdiği sabit değerler kullanılarak hız ve yeşiller arası sürenin değişimine göre Tip I ikilem bölgesi sınırları tablo halinde sunulmuştur. Benzer şekilde Tip II ikilem bölgesi sınırları, bu kez geçmiş yıllarda yapılan başlıca çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçların bir derlemesi olacak şekilde okuyucuya aktarılmıştır (Tablo 13). İkilem bölgesi probleminin tahminine yönelik geçmiş yıllarda geliştirilen birçok modele de yer verilen bu çalışma, yine birçok araştırmacı tarafından tespit edilen intikal reaksiyon süresi değerlerini derlemesi bakımından kıymetlidir (Tablo 14).

Tablo 13. Farklı araştırmacıların taşıt yaklaşım hızına göre önerdikleri Tip II ikilem bölgesi sınırları

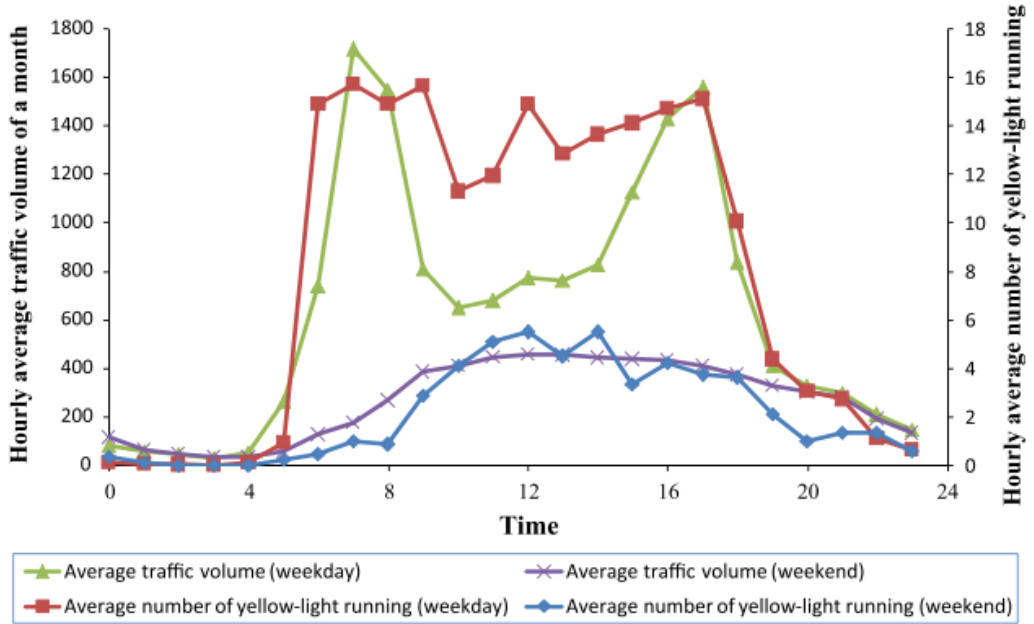
Hız (km/sa)	ITE 1974	Zegeer 1977	Chang vd. 1985	Bonneson vd. (1994)
56	32-65	31-77	39-88	44-75
64	34-76	37-86	45-94	54-89
72	50-91	46-99	51-99	65-105
80	67-107	52-107	56-105	77-121
88	73-122	71-117	62-11	90-138

Tablo 14. İntikal reaksiyon süresi için 2014 yılı öncesi yapılan çalışmalara ait bilgiler ve bulunan sonuçlar (Zhang vd., 2014)

Araştırmacı	Yıl	Veri Toplama Yöntemi	Gözlem Detayları	Ortalama S. Sapma	Medyan ve Aralık	% Dağılım	
						15%	85%
Gazis vd.	1960	Gözlem Verisi	3 kavşak; VL=64,72 km/sa; N=87	1,14 0,28	1,10	-	1,50
Crawford	1962	Test Aracı	3 taşıt; 6 adam; 2 kadın; N=650	-	0,80-1,85	-	-
Wortman ve Matthias	1983	Gözlem Verisi	6 kavşak; VL=48-80 km/sa; N=839	1,30 0,60	1,09-1,55	-	1,80
Chang vd.	1985	Gözlem Verisi	13 kavşak; VL=48-88 km/sa; N=579	1,30	1,10 0,70-1,55	-	1,90
Mussa vd.	1996	Sürüş Simülatörü	Yaş Aralığı=18-58; N=41; V=40,3 ve 72,5 km/sa	1,16	-	-	-
Goh ve Wong	2004	Gözlem Verisi	X kesişim; SSDV; N=965; V=50-60 km/sa	0,80 0,21	0,80	0,58	1,00
Goh ve Wong	2004	Gözlem Verisi	X kesişim; SSDY; N=965; V=50-60 km/sa	0,86 0,23	0,84	0,64	1,08
Goh ve Wong	2004	Gözlem Verisi	T kesişim; SSDV; N=965; V=50-60 km/sa	0,83 0,22	0,82	0,60	1,04
Goh ve Wong	2004	Gözlem Verisi	T kesişim; SSDY; N=965; V=50-60 km/sa	0,92 0,22	0,90	0,68	1,13
Setti vd.	2006	Test Aracı	32 genç, 28 yaşlı sürücü; V=72km/sa	0,74 0,19	0,70 0,30-1,70	-	0,79 0,81
Gates vd.	2007	Gözlem Verisi	6 kavşak; VL≥64km/sa veya VL≤56 km/sa	1,10 0,50	-	0,70	1,60
Caird vd.	2007	Sürüş Simülatörü	N=77; Farklı yaş grupları; VL=70km/sa	0,96 0,27	0,92 0,50-2,20	-	1,22 1,45
Gates ve Noyce	2010	Gözlem Verisi	6 kavşak; V≥40 km/sa; N=1275	1,13 0,48	1,00 0,11-3,74	0,73	1,57
Rakha vd.	2011	Gözlem Verisi	N=971; V=72,4 km/sa	0,73 0,18	0,72 0,22-1,52	0,57	0,92
Rakha vd.	2011	Gözlem Verisi	N=1045; V=88,5 km/sa	0,74 0,18	0,72 0,18-1,53	0,58	0,92

VL: Kavşaktaki hız limiti; V: Ölçülen hız değeri; N: Vaka Sayısı; SSDV: Sağa ve sola dönen taşıt var; SSDY: Sağa ve sola dönen taşıt yok

Trafik akımı; sosyal, ekonomik, dinamik ve jeofizik etkenlerle birlikte farklı periyotlarda değişkenlik gösterebilmektedir. Bu değişimlerde periyot; dünyanın kendi eksenini etrafındaki dönüşü baz alınacak olduğunda bir gün (günlük değişim), dünyanın güneş etrafındaki dönüşü baz alındığında ise bir yıl (mevsimsel değişim) gibi farklı aralıklarda olabilir (Yardım, 2017). Trafikteki herhangi bir problemin sebepleri incelenirken, söz konusu problemin gerçekleştiği zaman aralığının doğru bir şekilde tespit edilmesi ve bu aralıkta çözüm adına ihtiyaç duyulan gözlem verilerinin elde edilmesi gerekir (Lu vd., 2015). Lu vd. 2013 yılında yaptıkları çalışmada, trafiğin haftalık ve mevsimsel etkilerinin sarı ışık ihlalleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla 8 aylık bir kesit aralığı belirlemişler ve 6 kavşaktan 30.000'in üzerinde YLR (sarı ışıkta geçme) vakası toplamışlardır. İnceledikleri kavşak yaklaşım kollarını GHM modeli yardımıyla bölgelere ayıran araştırmacılar (Şekil 2), sürücülerin sarı ışık ihlallerini bu bölgeler yardımıyla kategorize etmeye çalışmışlardır. 2009 Temmuz ayı verileri yardımıyla saatlik ortalama trafik ve saatlik ortalama sarı ışık ihlalleri arasında bir ilişki olduğunu tespit eden araştırmacılar (Şekil 16), saatlik trafik, karlı olan ve karlı olmayan günler gibi faktörlerin sarı ışık ihlalleri üzerindeki etkisini tespit edebilmek amacıyla Denklem 26'daki bağıntı önerilmiştir.



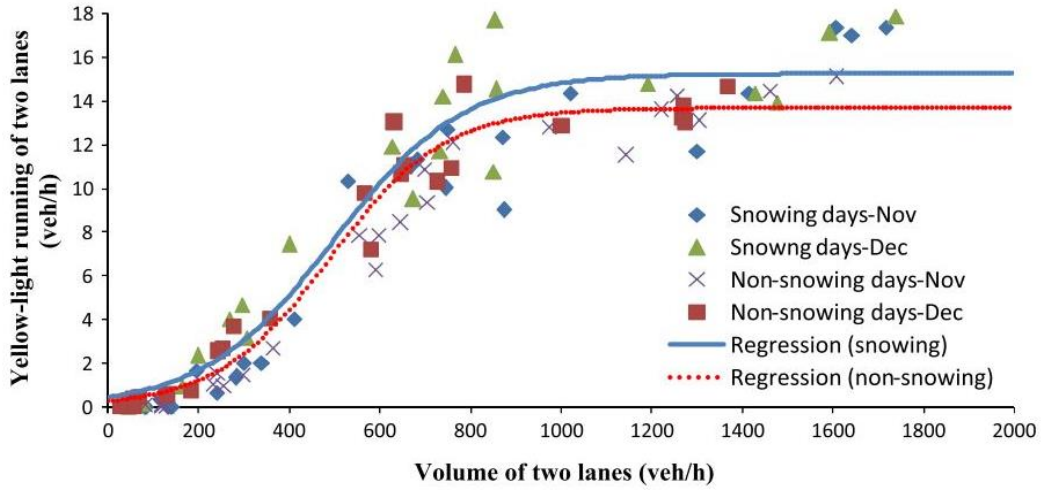
Şekil 16. Saatlik ortama trafik ve saatlik sarı ışık ihlalleri arasındaki ilişki (Lu vd., 2015).

$$Y = \frac{k}{1 + e^{a+bF}} \quad (26)$$

Burada Y ortalama saatlik sarı ışık ihlal sayısını, F ise ortalama saatlik trafik akımını temsil etmektedir. a ve b parametreleri regresyon sabitleridir. Çalışma neticesinde sarı ışık ihlallerinin trafik akımına göre değişimi, karlı ve karlı olmayan günler dikkate alınarak tespit edilmeye çalışılmıştır (Tablo 15 ve Şekil 17).

Tablo 15. Karlı olan ve olmayan günlerden alınan veri yardımıyla elde edilen regresyon sabitleri

		Karlı Olan Günler			Karlı Olmayan Günler		
		k	a	b	k	a	b
Tahmin Edilen Değer		15,20363	3,496391	-0,0068	13,64457	3,941735	-0,00757
Standart Sapma		0,540404	0,398307	0,000814	0,333401	0,351403	0,000654
%95 Güven Aralığında	Alt Sınır	14,1152	2,69416	-0,00844	12,97307	3,233973	-0,00889
	Üst Sınır	16,29206	4,298623	-0,00517	14,31608	4,649496	-0,00625
R²		0,926			0,963		



Şekil 17. Karlı olan ve olmayan günler için uydurulan regresyon eğrilerinin trafik etkisinde karşılaştırılması (Lu vd., 2015).

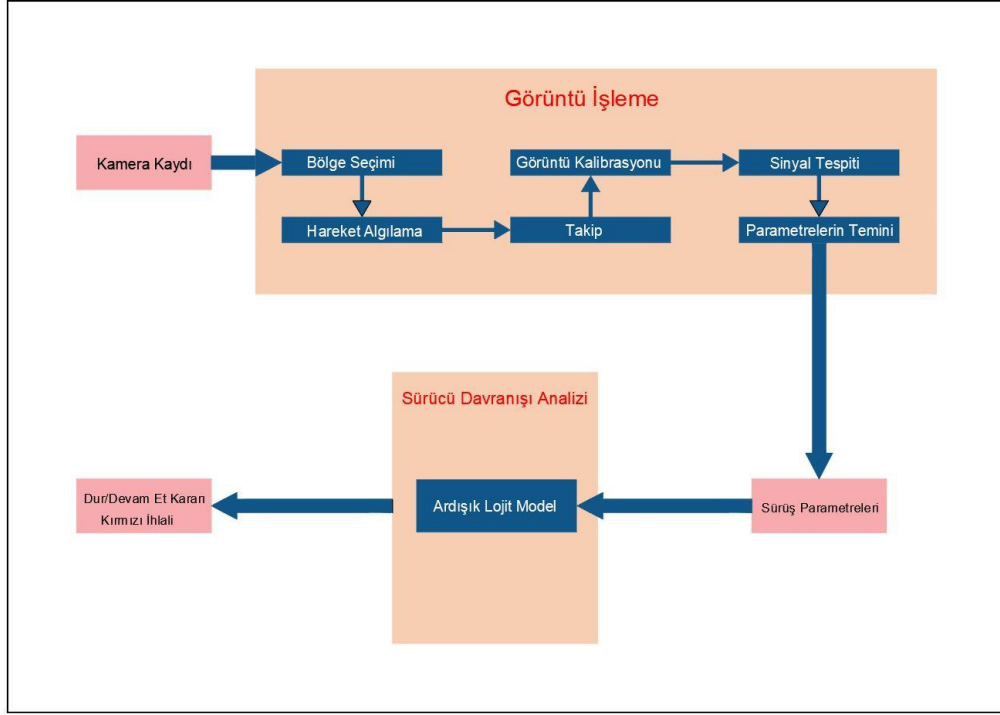
Yukarıda özet halinde aktarılmaya çalışılan araştırmaların büyük bir kısmı, ikilem bölgesi probleminin anlaşılmasına yönelik yapılan çalışmalardır. Uygun süre tanımı yapılmayan ve hızların yüksek olduğu kavşaklarda daha sık gözlemlenen bu problem, hiç kuşkusuz, kavşaklarda gerçekleşen birçok trafik kazasının ana sebeplerinden biri olarak kabul edilebilir. Bununla birlikte, söz konusu problemin kaza riskini artıran ve sahada gözlemlenebilen önemli çıktılarından bir tanesi kırmızı ışık ihlalleridir. Bir sürücü, kavşak

yaklaşımında sarı ışıkla karşılaşmasa dahi kırmızı ışık ihlali yapabilecektir. Konuya çok genel bir çerçeveden yaklaşılabilecek olursa, ikilem bölgesi problemi yaşamaksızın kırmızı ışık ihlali yapan bir sürücü için de “dur” ya da “devam et” şeklinde benzer iki ihtimal söz konusudur. Bu yorumdan hareketle, ikilem bölgesindeki sürücü davranışına etki eden; hız, durma çizgisine olan mesafe, yaş, cinsiyet, agresiflik gibi birçok parametrenin, kırmızı ışık ihlallerinin tamamında belirli etkilerinin olabileceği ortadadır. Özetle trafikte sıklıkla kırmızı ışık ihlali yapan bir sürücü için ikilem bölgesindeki kararsız durum, ihlal yapmayanlara nazaran daha “kararlı” bir hal alabilecektir.

Li vd. 2016 yılında yaptıkları çalışmada; kırmızı ışık ihlallerinin sebeplerini araştıran önceki çalışmalardan faydalanarak, söz konusu davranışa sebep olabilecek hususları beş ana başlık altında toplamışlardır (Li, Jia, & Shao, 2016).

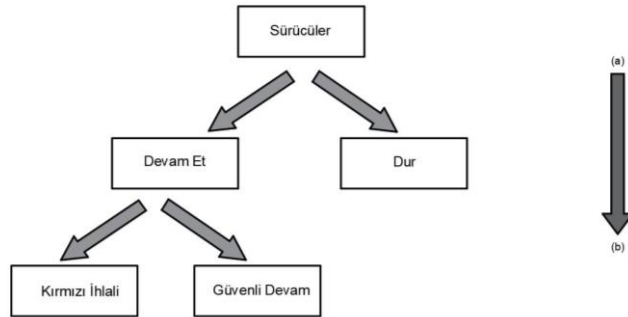
- 1) Sürücü ve taşıt karakteristiği: Erkek, genç ve emniyet kemeri takmayan sürücüler, kırmızı ışık ihlaline daha yatkındırlar. Bununla birlikte, küçük ve eski taşıtlara sahip sürücüler kırmızı ışık ihlallerini daha sıklıkla yapabilirler. Ek olarak, taşıt yaklaşım hızı ile kırmızı ışık ihlalleri arasında pozitif bir ilişki söz konusudur.
- 2) Kavşak Geometrik Tasarımı: Derinliği uzun olan kavşaklarda kırmızı ışık ihlalleri daha sık yaşanabilir.
- 3) Sarı Işık Süresi: Sarı sürenin 3,5 saniyenin altında olması kırmızı ışık ihlallerini artırabilir.
- 4) Trafik Şartları: Trafik hacmi ile yaya ve bisikletli varlığı kırmızı ışık ihlallerini etkileyen önemli iki faktördür.
- 5) Denetim Stratejisi: Kırmızı ışık denetiminin ihlalleri azaltmada pozitif, flaş (yanıp-sönme) uygulamalarının ise negatif etkileri bulunmaktadır.

Pekin’de bulunan iki kavşaktan alınan kamera görüntüleri yardımıyla kırmızı ışık ihlallerini inceleyen araştırmacılar, konuya yaklaşımlarını göstermek adına kavramsal bir çerçeve sunmuşlardır (Li, Jia, & Shao, 2016).



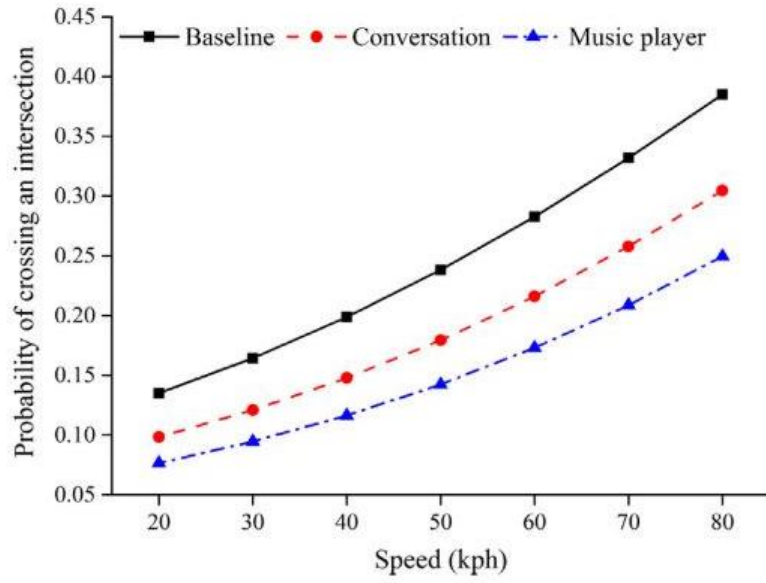
Şekil 18. Kırmızı ışık ihlallerinin analizi için Li vd. tarafından oluşturulan kavramsal çerçeve

Seçilen parametrelerin dur ya da devam et kararı ve kırmızı ışık ihlalleri üzerindeki etkilerini, önceki çalışmalara benzer şekilde lojistik regresyon yardımıyla tespit etmeye çalışmışlardır. Ancak bu çalışmada farklı olarak, lojistik regresyon aşamalı olarak uygulanmıştır (Şekil 19). İlk aşamada sürücülerin sarı ışık anında durma ihtimalleri, ikinci aşamada ise devam eden sürücülerin kırmızı ışık ihlali yapma ihtimalleri incelenmiştir. Araştırma sonucunda; taşıt yaklaşım hızının devam et kararında etkili olduğu ve taşıt ivmesi ile kırmızı ışık ihlalleri arasında pozitif bir ilişkinin olduğu tespit edilmiştir.



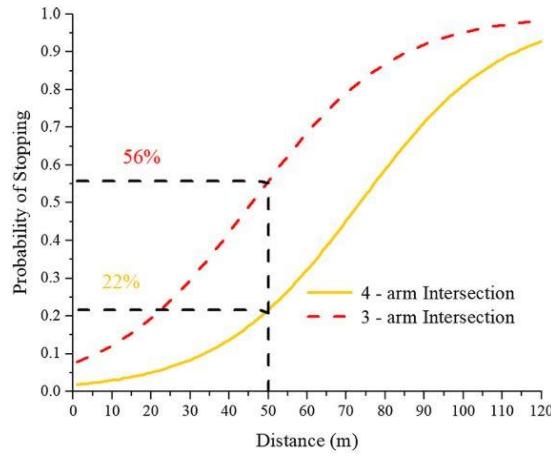
Şekil 19. İki aşamalı lojistik regresyonun kavramsal gösterimi (Li, Jia, & Shao, 2016).

Choudhary ve Velaga 2018 yılında yaptıkları çalışmada; diğer birçok faktör ile birlikte sürücülerin dinledikleri müzik ile ilgili ayarlamalar yaparken ve/veya telefonlarıyla ilgilenirken yaşadıkları dikkat dağınıklığının, sarı ışık anında verecekleri karara etkilerini incelemiştir. 18 ila 53 yaş arasında 73 farklı kişinin katılımıyla ve sürüş simülatörü kullanılarak yapılan çalışma neticesinde, söz konusu dikkat dağıtıcı unsurların sürücülerin devam etme kararında negatif etkileri olduğu tespit edilmiştir (Şekil 20). Sürücülerin gösterdiği bu davranışın, yaptıkları hatayı telafi edici bir davranış olarak sınıflandırılabilceği belirtilmiştir (Choudhary & Velaga, 2019).

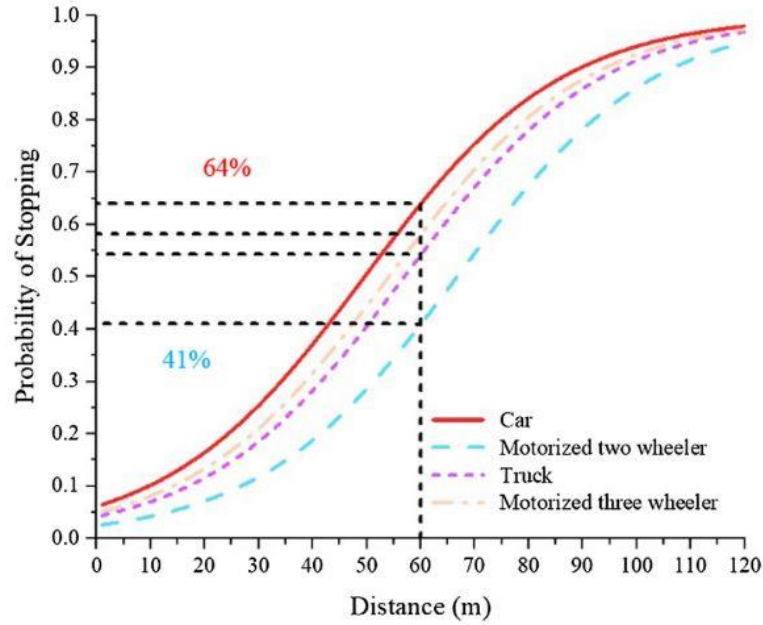


Şekil 20. Farklı sürüş koşullarının devam et kararının verilmesindeki etkileri (Choudhary & Velaga, 2019)

Pathivada ve Perumal 2018 yılında yaptıkları çalışmada, karmaşık trafik koşulları olarak isimlendirdikleri; iki, üç ve dört tekerlekli birçok farklı taşıtın trafikteki varlığının sürücü davranışı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma için ikisi dört kollu, üçü üç kollu olmak üzere beş farklı kavşak seçilmiş ve ihtiyaç duyulan veriler kamera görüntüsü yardımıyla elde edilmeye çalışılmıştır. Zirve saatlerdeki trafik sıkışıklığı sebebiyle ikilem bölgesi davranışının tespit edilemediğini belirten araştırmacılar, ihtiyaç duyulan veriyi trafik yoğunluğunun düşük olduğu 11.00-15.00 saatleri arasındaki görüntü kayıtları yardımıyla elde etmişlerdir. Bu çalışma neticesinde hem taşıt tipinin hem de kavşak geometrisinin sürücü davranışında etkilerinin olabileceği tespit edilmiştir (Pathivada & Perumal, 2019).



Şekil 21. Taşıtların durma ihtimalinin, farklı geometrideki iki kavşağa ve durma çizgisine olan mesafeye göre dağılımı (Pathivada & Perumal, 2019)



Şekil 22. Taşıtların durma ihtimalinin mesafe ve taşıt tipine bağlı olarak dağılımı (Pathivada & Perumal, 2019)

Pathivada ve Perumal'ın yukarıda özet olarak anlatılan çalışması, karmaşık trafik koşullarını taşıt kompozisyonu üzerinden tanımlamaktadır. Bununla birlikte, şerit takip disiplininin tam olarak oluşmadığı Hindistan gibi gelişmekte olan ülkelerin trafik koşulları, konu hakkında yapılan birçok araştırmaya ev sahipliği yapan A.B.D. gibi gelişmiş ülkelerin koşullarına nazaran farklılıklar gösterebilir. Bu sebeple, kurallara görece daha az riayet edilen bu tarz trafik koşulları da karmaşık ya da düzensiz olarak atfedilebilir (Biswas vd., 2017).

Moynur Rahman ve Min-Wook Kang tarafından 2021 yılında A.B.D.' de yapılan çalışmada, 46 farklı kavşak verisi yardımıyla kavşaklardaki eğim, limit hız değeri, %85 hız değeri, trafik hacmi, trafikteki ağır taşıt oranı, sarı ışık süresi, görüş açısı, diğer kavşak kollarındaki trafik yoğunluğu gibi bölgesel faktörlerin Tip II ikilem bölgesi başlangıcı ve sınırları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmada neticesinde araştırmacılar; %85 hız, trafikteki ağır taşıt oranı ve iniş eğimindeki artışın Tip II ikilem bölgesinin sınırlarını uzattığını ve başlangıcını durma çizgisinden daha öteye taşıdığını tespit etmişlerdir. Bu sebeple, tüm kavşaklar için ikilem bölgesi sınırlarını TTI cinsinden 2,5 saniye ila 5,5 saniye arasında belirlemenin hatalı bir yaklaşım olacağını belirtmişlerdir (Rahman & Kang, 2021).

Chauhan vd. 2021 yılında yaptıkları çalışmada; karmaşık trafik koşullarının, sürücülerin sarı ışık anındaki davranışlarına olan etkisini incelemişlerdir (Chauhan vd., 2022). Önceki yıllarda yapılan birçok çalışmada olduğu gibi lojistik regresyon analizi yönteminden faydalanan araştırmacılar, nokta veri modeli (Point Data Model, PDM) ve yörünge veri modeli (Trajectory Data Model, TDM) adında iki farklı tahmin modellemesi yaparak analiz için belirledikleri parametreleri bu modellere uygun olarak tanımlamışlardır. Tablo 16 incelendiği takdirde, karmaşık trafik koşullarının analizi için 17 farklı parametrenin detaylı şekilde tanımlanarak seçildiği görülebilecektir. Bu özelliği ile yapılan çalışmanın, geçmiş yıllarda yapılan diğer birçok çalışmadan farklı olduğu söylenebilir.

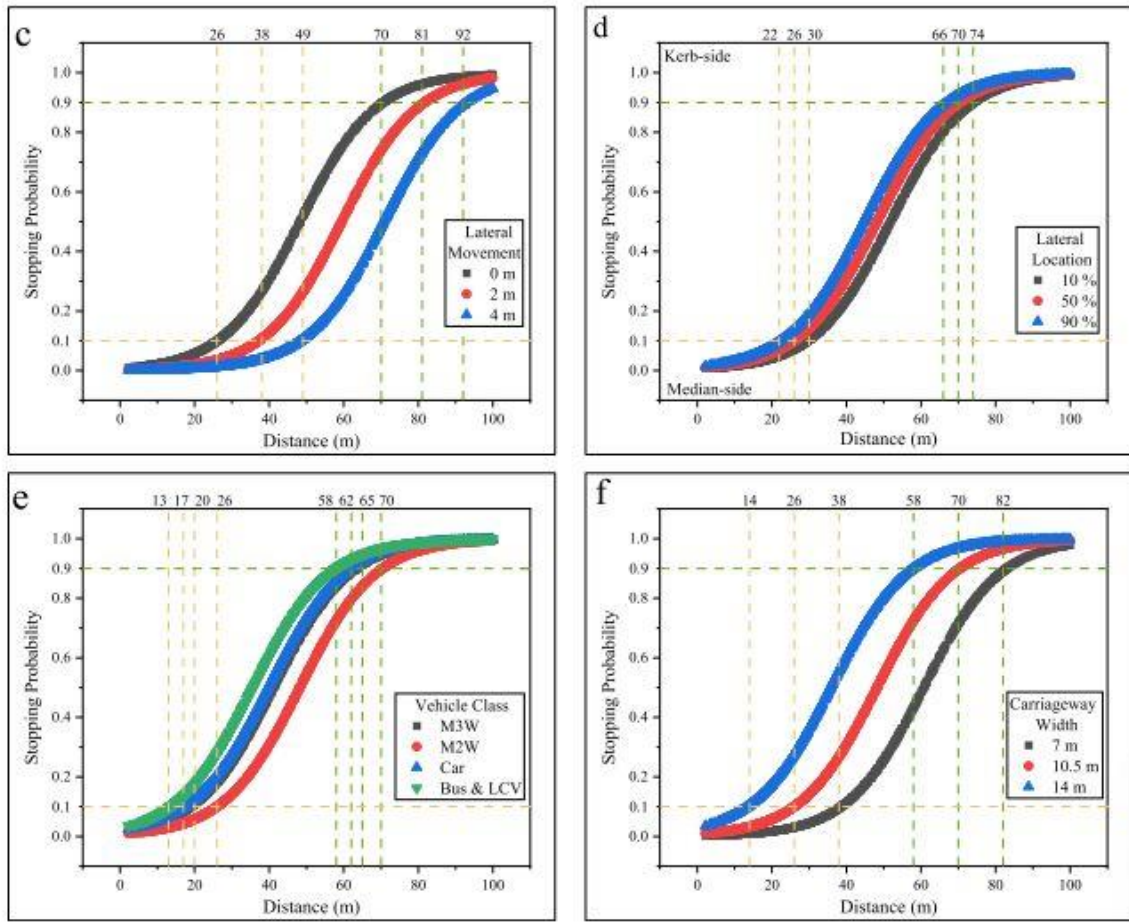
Tablo 16. Modellemeler için seçilen parametreler ve tanımlamaları

Parametre	Veri Tipi	Tanım	Kullanılan Model
Dur ya da devam et kararı	Kategorik	Bağımlı değişken; devam etme=1; durma=0	-
Durma çizgisine olan mesafe	Sürekli	Başlangıç noktasında (durma çizgisi) $x=0$	PDM ve TDM
Taşıt hızı	Sürekli	m/s; her 0,4 saniyede değişken	PDM ve TDM
Hızlanma ivmesi	Sürekli	m/s^2 ; her dört saniyede değişken	TDM
Yatay doğrultudaki hız	Sürekli	m/s; yatay hareket süresinde hesaplanan hız	TDM
Platform genişliği	Sürekli	Banket vb. genişlikler dahil (m)	TDM

Tablo 16'nın devamı

Taşıtın yatay konumu	Sürekli	Taşıtın yatay pozisyon oranı; 0=platformun ortası, 1=platform kenarları	TDM
Şerit konumu	Kategorik	1= orta şerit; 2=ara şeritler; 3=platform kenarları	PDM
Taşıt tipi	Kategorik	1=3 teker; 2=2 teker; 3=otomobil, 4=otobüs ve hafif ticari	PDM ve TDM
Taşıtın yatay hareketi	Sürekli	Yatayda katedilen toplam mesafe	TDM
Hareketin doğrultusu	Kategorik	Yolun ortasına doğru yatay hareket =0; platform kenarına doğru yatay hareket=1	TDM
Sinyalizasyon devre süresi (c)	Sürekli	Toplam devre süresi (s)	TDM
Sarı süre	Sürekli	Sarı süre (s)	TDM
Yeşil süre (g)	Sürekli	Yeşil süre (s)	TDM
g/c oranı	Sürekli	g/c	TDM
Kavşak tipi	Kategorik	4 kollu kavşak=0; 3 kollu kavşak=1	PDM VE TDM
Yaya trafiği	Kategorik	Var=0; yok=1	PDM VE TDM
Banket ve diğer yardımcı şeritler	Kategorik	Var=0; yok=1	PDM VE TDM

Bu çalışma neticesinde seçilen birçok parametrenin (Tablo 16), durma çizgisine olan mesafeye göre taşıtların durabilme ihtimaline olan etkileri grafikler halinde sunulmuştur. Geçmiş yıllarda yapılan diğer çalışmalardaki benzer sonuçları tekrar etmemek adına yalnızca; yatay hareket, yatay konum, taşıt tipi ve platform genişliği parametrelerinin söz konusu etkileri Şekil 23'te verilmiştir.



Şekil 23. Farklı parametrelerin mesafeyle birlikte durabilme ihtimaline etkisi (Chauan vd. 2021)

Pawar vd. (2022), sürücülerin zaman baskısı altındaki sarı ışık davranışını tespit edebilmek amacıyla yaptıkları çalışmada, veri temini için yine sürüş simülatöründen faydalanmışlardır. Çalışmanın girişinde sürüş simülatörü yardımıyla önceki yıllarda yapılan çalışmalara ait kısa bir özet sunan araştırmacılar (Tablo 17); zaman baskısı kavramını zaman baskısı yok (no time pressure, NTP), düşük zaman baskısı (low time pressure, LTP) ve yüksek zaman baskısı (high time pressure, HTP) olacak şekilde üç alt başlıkta gruplandırmışlardır.

Tablo 17. Önceki yıllarda sürüş simülatörü ile yapılmış çalışmaların özeti (Pawar, Pathak, & Patil, 2022).

Çalışma	Katılımcı Sayısı	Kurgulanan Senaryo	Yöntem	Majör Bulgular
Chaird vd. 2007	77	YSD=4,08; 4,58; 5,08 (s)	Lojistik Regresyon	prt=1 sn; yüm yaş grupları için uygun görünmektedir.
Abdel-Aty vd. 2009	62	DSL=90 m; YSD=4,3 s	Lojistik Regresyon	Tampon tampona sürüş koşulları altında verilen kararlarda yüksek değişkenlik gözlemlendi
Doğan vd. 2011	36	TSL= 3 s; YSD=2 s	Tek değişkenli ANCOVA	Zaman baskısı altındaki sürücüler kavşağa yüksek hızla yaklaşırlar, hızlı reaksiyon gösterirler, sert fren yaparlar
Haque vd. 2016	69	TSL=3 s; YSD=3,75 s	Karar ağacı ve genelleştirilmiş tahmin denklemleri	Genç ve orta yaşlı sürücülerin dikkat dağınıklığı altında devam etme eğilimleri hızdan bağımsız olarak azalır
Palat ve Delhomme 2016	94	DSL=59m; YSD=4,3 s	Ki kare testi	Zaman baskısı, sarı ışık anında devam etme ihtimalini artırmaktadır.
Fitzpatrick vd. 2017	36	YSD=4 s	T Testi	Yüksek zaman baskısı altındaki sürücüler, sarı ışık anında devam etmeye daha yatkındırlar.
Choudhary ve Velaga 2019	74	TSL=3;4;5 (s); YSD=3 s	Karar ağacı ve genelleştirilmiş lineer karma model	Müzik çalarla ilgilenen sürücüler, telefon konuşması yapanlardan %17 daha az devam etme eğilimindedirler.
Hussain vd. 2020 (b)	67	DSL=80;95 (m) YSD=4 s	Lojistik Regresyon	Hızdaki 1 birim artış (m/s), devam etme ihtimalini %5,3 artırmaktadır.
Ali vd. 2021	78	TSL=5 s; YSD=3 s	Karar ağacı ve karma lojit model	Taşıt ve sinyalizasyonun bağlı olduğu bir ortamda sürücüler daha az devam etme eğiliminde olurlar.

TSL= Durma çizgisine olan süre; YSD= Sarı ışık süresi; DSL=Durma Çizgisine olan mesafe; ANCOVA=Kovaryans Analizi

Rastgele orman algoritması (random forest algorithm) ve karışık etkili multinominal lojistik regresyon (mixed effects multinominal logistic regression, MEML) yardımıyla sürücülerin ivmelenme davranışlarını; hızlanma-yavaşlama, yavaşlama-hızlanma, sürekli hızlanma ve sürekli yavaşlama şeklinde dört alt kategoride inceleyen araştırmacılar, HTP şartları altında sürekli yavaşlama eğiliminin ivmelenme davranışına göre sırasıyla %63, %123 ve %77 oranında değiştiğini gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, sarı ışık anında devam etme ihtimalinin LTP ve HTP koşulları altında sırasıyla 2,73 kat ve 4,26 kat arttığı tespit edilmiştir.

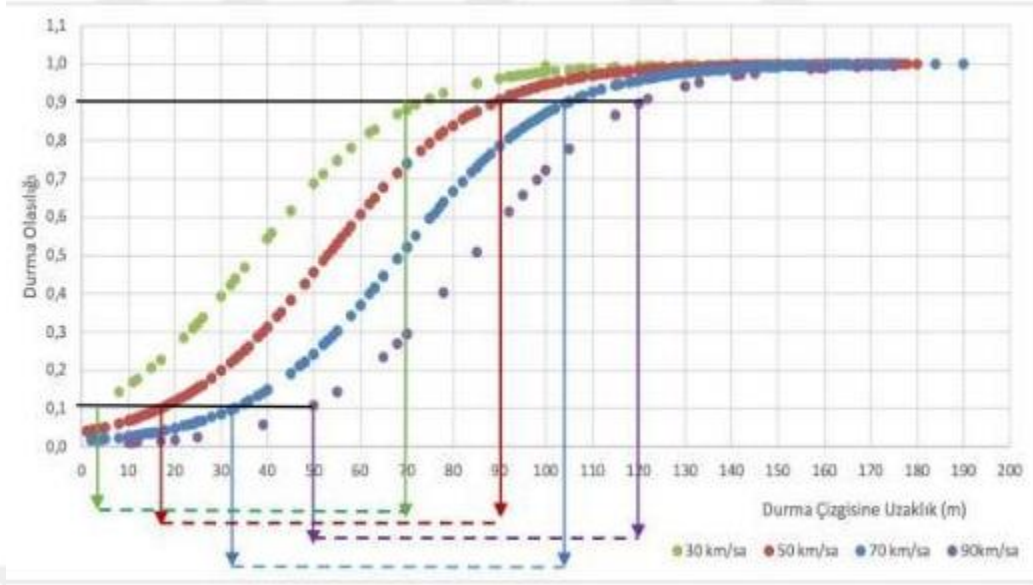
1.4. Ülkemizde Yapılan Çalışmalar ve Mevcut Durum

Çalışma kapsamında ülkemizdeki durum incelendiğinde, sinyalizasyon kavşaklarında uygulanacak sarı ve koruma sürelerinin belirlenmesi için yetkili kurumlarca önerilen erişime açık bir kamusal kaynak bulunamamıştır. Bununla birlikte yapılan araştırmalar sonucunda, birçok kavşakta söz konusu sürelerin geçmiş tecrübe ve gözlemler yardımıyla belirlendikleri düşünülmektedir. 18195 sayılı Karayolları Trafik Kanununun 52. Maddesinin a ve b bendinde, kavşaklara yaklaşan sürücülerin hızlarını; kullandıkları aracın yük ve teknik özelliğine, görüş, yol, hava ve trafik durumunun gerektirdiği şartlara uydurmaları gerektiği belirtilmektedir.

Şentürk tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada, yeşil sonu flaş uygulamasının kırmızı ışık ihlallerine olan etkisi incelenmiştir. Malatya ilinde iki kavşak üzerinde yapılan çalışma neticesinde, yeşil sonu flaş uygulamasının hem YLR vakalarının hem de RLR ihlallerinin artmasına sebep olduğu tespit edilmiştir. Söz konusu artışın ikilem bölgesinde bulunan taşıtların hızlanması nedeniyle gerçekleşebileceği sonucuna varılan araştırma, ülkemizde ikilem bölgesi problemine ilk kez atıfta bulunması bakımından önemlidir (Şentürk, 2019).

Akgüngör ve Mercan 2021 yılında yaptıkları çalışmada; hız, sarı+koruma süresi, maksimum yavaşlama ivmesi, intikal reaksiyon süresi ve kavşak derinliği parametrelerini Tip I ikilem bölgesi için efektif parametreler olarak belirlemişler ve bu parametrelerden oluşturdukları veri seti ile 648 farklı durum için ortaya çıkan sonuçları değerlendirmişlerdir (Akgüngör & Mercan, 2021).

Mercan tarafından konu ile alakalı 2023 yılında bir yüksek lisans tezi yapılmıştır. Çalışma kapsamında İzmit Orduevi Kavşağı'nda bulunan PTZ kamerasından alınan görüntüler video düzenleme programı Shotcut yardımıyla işlenmiştir. Toplamda 2172 sürücüye ait vaka incelenerek bir lojistik regresyon modeli oluşturulmuştur. Çalışma neticesinde hız ve durma çizgisine olan mesafe parametrelerinin sürücü davranışına etkilerinin olduğu tespit edilmiştir (Şekil 24), (Mercan, 2023).



Şekil 24. Sürücülerin durabilme ihtimalinin, durma çizgisine olan mesafe ve farklı hız grupları etkisi altında incelenmesi (Mercan, 2023).

1.5. Çalışmanın Amacı, Önemi ve Kapsamı

Sinyalize kavşaklarda sarı ışık yanmasıyla sürücüler, durmak ya da devam etmek arasında bir tercih yapmak durumunda kalırlar. Kararsızlığın yaşandığı bu ikilem bölgelerinde verilecek yanlış bir karar, kırmızı ışık ihlallerine ve neticesinde trafik kazalarına sebep olur. Sarı ışık probleminin tanımlanabilmesi için, ikilem bölgesindeki sürücü davranışının bilinmesi gerekir.

Taşıt gözlem sistemlerinde son yıllarda yaşanan teknolojik gelişmeler, sürücülerin dur ya da devam et kararına etki eden birçok parametrenin tespitine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, sinyalize kavşaklardaki tasarım ve yönetim farklılıkları, söz konusu parametrelerin farklı koşullar altında incelenmesini gerektirir. Konu hakkında yapılan çalışmaların büyük bir kısmına ev sahipliği yapan A.B.D.'deki ve ülkemizdeki sürücülerin, sarı ışık anında gösterdikleri davranışlar arasında ciddi farklılıkların olabileceği düşünülmektedir. Bu hipotezin doğruluğunun sınanması, konunun bilimsel bir bakış açısıyla incelenmesi neticesinde mümkün olabilecektir.

Ülkemizde 2023 yılında gerçekleşen 235.071 adet ölümlü ve yaralanmalı trafik kazasının %52,24'ü kavşaklarda meydana gelmiştir. Yaklaşık 29 milyon taşıtın trafiğe kayıtlı olduğu ülkemizde 2022 yılı sonu itibarıyla; sinyalize kavşaklarda sarı ışık anında gerçekleşen olayları anlamayı, sürücü davranışını tespit etmeyi, kural ihlallerini ve en

önemlisi trafik kazalarını önlemeyi amaçlayan müstakil bir çalışmaya rastlanmamıştır. Trafiğe kayıtlı taşıt sayısının yaklaşık beşte birine ev sahipliği yapan İstanbul'da ise bu konuda yapılmış; uluslararası literatürü esas alan, konuya bilimsel bir bakış açısıyla yaklaşan, ölçülebilir sonuçlar sunan, çözüm önerileri getiren ve erişime açık olan herhangi bir çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı; kavşaklarda sarı ışık anında meydana gelen olayları anlamak, sürücü davranışı ile bu davranışa etki eden faktörleri, kural ihlallerini ve trafik kazalarının sebeplerini tespit etmek ve çözüm için öneriler sunmaktır. Bu kapsamda, problemi ana hatlarıyla tanımlayabilmek adına; düşük bütçeli, mevcut kamu imkanlarının ortak kullanımını amaçlayan, yapay zeka ve yazılım alanındaki son teknolojiden istifade eden, gelişime açık ve yüksek adaptasyon kabiliyeti ile gelecek çalışmalarda kullanılabilmesi mümkün olan bir yöntem (model) geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntem yardımıyla ihtiyaç duyulan hız, konum, TTI, ivme, taşıt tipi, şerit konumu, sürücünün dur-devam et kararı gibi parametreler her bir taşıt için hızlı ve güvenilir bir şekilde tespit edilebilmiştir. Söz konusu parametreler kullanılarak sinyalize kavşaklardaki sarı ışık problemi ülkemiz için tanımlanmış; eğim, yolculuk türü, hava şartları, taşıt tipi gibi faktörlerin sürücü davranışı üzerindeki etkileri ayrı ayrı ve bir arada incelenmiştir. Elde edilen bulgular farklı tablo ve grafikler yardımıyla sunulmuş, yorumlanmış, üzerinde tartışılmış ve uluslararası literatür ile karşılaştırma yapılarak değerlendirme yapılmıştır. Sonuçlar özet şeklinde ve maddeler halinde sunulurken çözüm önerilerinde bulunulmuş ve çalışma neticesinde edinilen tecrübeler ışığında yeni araştırma konuları belirlenmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Kavşak Seçim Kriterleri

Eğim, hava şartları ve yolculuk türü gibi parametrelerin sarı ışık anındaki sürücü davranışına etkilerinin incelenebilmesi için, seçilen kavşakların belirli özelliklere sahip olması gerektiği düşünülmüştür. Bu sebeple, yapılacak saha çalışması öncesi aşağıdaki kavşak seçim kriterleri belirlenmiştir.

- 1) Denetim Şartları: Kavşaklarda yapılacak denetim uygulamaları, sarı ışık anında kavşağa yaklaşan sürücülerin vereceği kararları önemli ölçüde etkileyebileceğinden, seçilecek kavşaklarda benzer denetim şartları olması gerektiği düşünülmektedir. Bu amaçla, Elektronik Denetleme Sistemi (EDS) gibi uygulamalar yardımı ile denetlenen kavşaklar çalışma kapsamı dışında tutulmuştur.
- 2) Sürücülerin Görüş İmkanları: Sarı ışık anında “devam et” kararı verebilecek bazı sürücüler, diğer kavşak kollarındaki trafiği göremedikleri takdirde kararlarını içgüdüsel olarak durma yönünde değiştirebilirler. Bu sebeple seçilecek kavşaklarda kavşak geometrisinden kaynaklanan görüş kısıtlarının minimum ve birbirlerine benzer seviyede olması gerektiği düşünülmektedir. Sürücülerin diğer kavşak kollarında ön sırada bekleyen taşıtları görebilmelerine ve kavşak içerisinde görüş engeli yaşamamalarına dikkat edilerek kavşak seçimi gerçekleştirilmiştir.
- 3) Şerit Sayısı ve Parklanma: Sürücülerin manevra serbestliklerini benzer koşullar altında inceleyebilmek adına, minimum şerit sayısı iki olan kavşaklar değerlendirmeye alınmıştır. Bununla birlikte, kavşak kolundaki park koşulları da değerlendirilerek, sürekli parklanmanın gözlemlendiği (nizami olsun ya da olmasın) kavşaklar çalışma kapsamı dışında tutulmuştur. Ancak kavşak kolunda minimum iki şerit şartının sağlanması koşuluyla, müstakil bir park şeridine sahip kavşaklar çalışma kapsamında değerlendirilmiştir.
- 4) Kavşağın Geometrik Durumu: Kavşak içerisinde bulunan yatay ve düşey kurplar sürücülerin görüş imkanlarını etkileyebilecektir. Bu sebeple yatay doğrultuda görece düz ve düşey doğrultuda eğimlerinin mümkün olduğunca sabit olduğu kavşaklar seçilmeye çalışılmıştır. Yine kavşak derinliğinin sürücünün vereceği

kararda etkileri olabileceğinden, minimum 10 metre derinliğine sahip kavşaklar değerlendirilmeye alınmıştır.

- 5) Kavşaktaki Trafik Karmaşası ve Yayaların Durumu: Yayaların ve sürücülerin sinyal kurallarına uymadıkları ve sıklıkla kırmızı ışık ihlali yaptıkları trafik karmaşası yaşanan kavşaklar, çalışma kapsamının dışında tutulmuştur. Ancak denetimin olmadığı sinyalizasyon kavşaklarda, bilhassa zirve saatlerde karmaşık durumların yaşanabilmesi olağan olarak görülmektedir. Dolayısıyla seçim yapılırken; yaya trafiğinin olmadığı, çok az olduğu veya yayaların kurallara genellikle riayet etme eğiliminde oldukları kavşaklar tespit edilmeye çalışılmıştır.

İBB Trafik Müdürlüğü'nün gözlem ekipmanlarına sahip ve yukarıda belirtilen şartları haiz kavşakların tespit edilebilmesi amacıyla Temmuz 2022-Nisan 2023 tarihleri arasında iki aşamalı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, İBB Trafik Müdürlüğü bünyesindeki Ulaşım Yönetim Merkezi'nde (Şekil 25) çevrimiçi kavşak taraması yapılarak seçim kriterlerini sağlama potansiyeli olan kavşaklar tespit edilmiştir. İkinci aşamada ise, söz konusu kavşaklar yerinde incelenmiş ve nihai karar aşamasına geçilmiştir.



Şekil 25. İBB Trafik Müdürlüğü Bünyesindeki Ulaşım Yönetim Merkezi

2.2. Çevrimiçi Kavşak Taraması

Çalışmanın yapıldığı tarihlerde, İstanbul Büyükşehir Belediyesi mücavir alan sınırları içerisinde 2477 adet sinyalizasyon kavşak bulunmaktadır. İBB Trafik Müdürlüğüne ait

848 adet trafik gözlem kamerasının 237 tanesi sinyalizasyon kavşakları üzerindedir. Mücavir alan sınırları içerisinde, 33 tanesi hariç kalan tüm sinyalizasyon kavşaklarında dinamik kavşak kontrolü söz konusudur. Bu sistemde, kavşağa yerleştirilen çeşitli sensörler yardımıyla devre süresi dinamik olarak belirlenmekte ve bu sayede bekleme sürelerinin azaltılması ile kavşak kapasitelerinin artırılması mümkün olabilmektedir. Tüm kavşaklar Trafik Müdürlüğü'ne bağlı Ulaşım Yönetim Merkezi (UYM) tarafından 06.00-22.00 saatleri arasında çevrimiçi olarak yönetilmektedir.

UYM sinyalizasyon ekibinin yardım ve nezaretinde, gözlem kamerasına sahip 237 adet sinyalizasyon kavşak yaklaşık 15 günlük süre içerisinde çevrimiçi olarak taranmıştır. Kavşakta bulunması istenen kriterler, kamera açılarının imkân verdiği ölçüde gözlemlenmeye çalışılmıştır. Çalışma için uygun olabileceği düşünülen kavşakların konum bilgileri, sinyal diyagramları gibi mevcut veriler kaydedilmiştir. Yine kavşağın gün içerisindeki trafik durumu ve varsa bazı özel durumlar, bölgeden sorumlu UYM görevlisinin geçmiş gözlem tecrübelerinden faydalanılarak öğrenilmeye çalışılmıştır. Bu aşamada, yaklaşık 60 adet kavşak sahada gözlem ve ölçüm yapılmak üzere belirlenmiştir.

2.3. Saha Çalışması

Çevrimiçi tarama sonucunda belirlenen kavşakların analizi iki aşamalı bir saha taraması neticesinde gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, her bir kavşağa gidilerek seçim kriterlerine uygunluğu gözlemlenmeye çalışılmıştır. Gözlem neticesinde uygun görülen kavşaklarda; eğim, kavşak derinliği, şerit genişliği gibi ölçümler yaklaşık olarak tespit edilerek not edilmiştir. Yapılan gözlem ve alınan notlar neticesinde, 10 adet kavşak çalışma için seçilmiş ve ihtiyaç duyulan uzunluk ve parametrelerin tespiti için ikinci aşamaya geçilmiştir.

İkinci aşama saha çalışmasında, seçilen her bir kavşakta nivo yardımıyla ortalama eğim hesabı hassas bir şekilde yapılmıştır. Lazer ve şerit metre yardımıyla; kavşak derinliği ve şerit genişliği gibi parametreler ölçülmüş, kameranın kavşak kolunda gözlemleyebildiği alan referans noktaları belirlenerek tespit edilmiştir (Şekil 26). Bununla birlikte, seçilen kavşaklarda belirli bir süre gözlem yapılarak, karşılaşılabilecek problemler tespit edilmeye çalışılmıştır. Yine bu aşamada, kavşağın genel işleyişini bozmayacak şekilde yapılması düşünülen bazı değişiklikler İBB Trafik Müdürlüğü'ne sorulmak üzere not edilmiştir.



Şekil 26. 17008 numaralı Sahilyolu Cevizli Kavşağına ait referans ölçümü

Seçilen 10 adet kavşaktan elde edilen bilgiler Tablo 18’de özet olarak verilmektedir. Yine bu kavşakların trafik haritası üzerindeki yaklaşık konumları Şekil 27’de gösterilmektedir.

Tablo 18. Seçilen kavşaklara ait geometrik özellikler (ölçüler)

Sıra	Kamera No	Kavşak No	Kavşak Adı	Kavşak Derinliği (m)	İncelenecek Kavşak Kolu Genişliği (m)	Eğim
1	651	33023	Şehit Ahmet Öztürk Kışlası	13,10	6,25	%3,88 - Çıkış
2	123	29019	Kamiloba Giriş	36,90	6,52	%1 - Çıkış
3	98	31020	Erciyeskent Silivri	16	6,90	%0,9 - İniş
4	728	33026	Hadımköy Hoşdere Girişi	12	8,40	%0,8 - İniş
5	589	33020	Derbent Villalar	31,50	10,00	%2 - İniş
6	537	21055	Derbent (Maslak)	23	8,50	%3,15 - İniş
7	742	11039	Alibeyköy Akşemsettin	10	5,30	%2,47 - Çıkış
8	951	17017	Sahilyolu Pendik	14,4	9,80	Yok - Düz
9	261	17008	Sahilyolu Cevizli	31,26	8,85	Yok - Düz
10	263	19013	Dragos Sahilyolu	26,10	8,70	Yok - Düz



Şekil 27. Seçilen kavşakların trafik haritası üzerindeki yaklaşık konumları

2.4. Seçilen Kavşakların Çalışma İçin Uygun Hale Getirilmesi

Seçilen kavşaklarda, İBB Trafik Müdürlüğü uhdesindeki kameralar kullanılmıştır. Söz konusu kameralar önceden belirlenen noktalara direkler vasıtasıyla sabitlenmiş ve sisteme bağlantıları bu sabit noktalar civarında yapılmıştır. Bu sebeplerle, kamera konumlarına dışarıdan bir müdahale mümkün olmamıştır. Yine sinyal sistemi ve paralelindeki trafik gözlemlerinin sürekli olarak yapılması, dışarıdan müdahale şansını büyük ölçüde azaltmıştır. Neticede, mevcut sinyal ve gözlem sisteminin bu çalışma kapsamında kullanılabilmesi için aşağıdaki sorunların giderilmesi gerekmiştir.

1. Görüntü kalitesinde yaşanan problemler
2. Sarı ışık anının tespit edilememesi
3. Kamera civarında bulunan ağaç dallarının görüşü engellemesi
4. Kamera açılarının kendiliğinden ya da dışarıdan müdahale ile değişmesi
5. Bağlantı elemanlarında yaşanan problemler

Yukarıda ana hatlarıyla sıralanan söz konusu problemlerin çözümü için yapılan çalışmalar alt başlıklar halinde sunulmuştur.

2.4.1. Görüntü Kalitesinde Yaşanan Problemlerin Giderilmesi

Kavşak seçimi esnasında belirlenen kriterler neticesinde; seçilen kavşaklar görece yüksek hızlı, düşük yoğunluklu ve düşük yaya trafikli olmak durumundadır. İstanbul'un mevcut trafik koşulları göz önünde bulundurulduğunda söz konusu şartlara uygun kavşaklar, genellikle şehir çeperlerinde ve banliyö bölgelerinde bulunabilmektedir. Bu sebeple, söz konusu bölgelerde bulunan kavşakların gözlem imkanları, kent içerisinde bulunan kavşaklara nazaran daha kötü olabilmektedir.

Çalışmanın yapıldığı dönemde seçilen dört kavşağa ait görüntüler, kameraların mevcut haliyle düşük kalitede ve çözünürlükte alınabilmekteydi. Bu kavşakların bir tanesinde yazılım güncellemesi yapılarak görüntü kalitesinde iyileştirme yapılabilmektedir. Kalan üç kavşakta ise değişiklik talebimiz uygun görülerek, mevcut kameraların yenileri ile değiştirilmesi sağlanmıştır.

2.4.2. Sarı Işık Anının Tespit Edilememesi

Seçilen kavşakların bir tanesi hariç tamamında kamera direkleri sinyal ünitelerinin arkalarında konumlandığından, incelenecek kavşak kolunun sinyal ünitesindeki sarı, kırmızı ve yeşil ışık değişimleri tespit edilememekteydi. Bununla birlikte, sinyalizasyonun faz değişimleri UYM sistemi üzerinden anlık olarak gözlenebilmekte, ancak bu verinin kaydı yapılamamaktaydı. Sarı ışık probleminin analiz edilebilmesi için, sarı ışık anının yüksek yakınlıkla tespiti oldukça mühimdir. Bu sebeple beş adet kavşakta sinyal direkleri üzerine 100W gücünde LED projektör montajı yapılmıştır. Bu projektörlerin enerji kabloları sarı ışık hattıyla paralel olacak şekilde bağlanmış ve yönleri kameralara doğru çevrilmiştir. Diğer dört kavşakta ise sarı ışık fazıyla paralel çalışan bir yaya ışığı ünitesi tespit edilerek, kamera açıları bu üniteyi görececek şekilde ayarlanmıştır. Bir kavşakta ise projektör bağlantısı yapılamadığından, sadece kavşak koluna ait yaya ünitesinin talebine karşılık gelen sarı ışık anının tespiti planlanmıştır. Son kavşakta ise sarı ışık anının tespiti, mevcut görüntü üzerinden yapılabilmektedir (Şekil 28).



Şekil 28. Direklere montajı yapılan projektörler (solda) ve sarı ışık tahmini yapılan yaya üniteleri (sağda)

2.4.3. Kamera Civarında Bulunan Ağaç Dallarının Görüşü Engellemesi

21055 numaralı Derbent (Maslak) kavşağında bulunan ve kamera görüntüsü kesen iki adet ağacın kısmi budama işlemi gerçekleştirilerek çalışma için hazır hale getirilmiştir (Şekil 29).



Şekil 29. Budama işlemi yapılan 21055 numaralı Derbent (Maslak) kavşağına ait görüntü

2.4.4. Kamera Açılarının Kendiliğinden ya da Müdahale ile Değişmesi

Seçilen kavşaklarda meydana gelecek kaza, trafik yoğunluğu vb. problemler, UYM personelinin kamera açılarına anlık müdahalede bulunmalarına sebebiyet verebilmektedir. Uygun yazılıma sahip kameralarda istenen açı kaydedilerek, kamera açısının müdahale

sonrası eski haline gelmesi otomatik olarak sağlanmıştır. Eski yazılım ile çalışan kameralar ise gün içerisinde sürekli kontrol edilerek, görüntü kaybının en aza indirilmesi sağlanmıştır.

2.4.5. Bağlantı Elemanlarında Yaşanan Problemler

Kameralar yardımıyla elde edilen görüntü, kamera civarında bulunan bir ünite yardımıyla UYM veri merkezine iletilmektedir. Bu sebeple elde edilen görüntünün kalitesi, kamera kalitesi ve kavşağın bulunduğu bölgedeki internet altyapısıyla doğrudan ilişkilidir. Yüksek kalitede bir görüntü elde edebilmek için, yüksek çözünürlüklü bir kameraya ve hızlı bir internet bağlantısına aynı anda ihtiyaç duyulmaktadır. Kamera ile alakalı taleplerimiz İBB Trafik Müdürlüğüne karşılanmıştır. Ancak internet altyapı problemlerinin giderilmesi, internet sağlayıcıları tarafından yüksek maliyetlerle ve belirli bir plan dahilinde gerçekleştirilebildiğinden, mümkün olmamıştır.

İki adet kamerada yapılan yazılım güncellemesi neticesinde bağlantı problemleri giderilmiş, ancak 19013 numaralı Dragos Sahilyolu kavşağında sorunun çözümü sağlanamamıştır. Görüntü kaydı aşamasına yakın zamanda geçilecek olması sebebiyle, bu kavşaktaki görüntü mevcut problemlili haliyle alınarak yaşanan sorunların görüntü işleme aşamasında giderilmesi planlanmıştır.

2.5. Kayıt Aşaması

Veri temin çalışmalarının son safhasında, seçilen 10 kavşaktan görüntülerin eş zamanlı olarak alınması gerçekleştirilmiştir. Yolculuk türü etkisinin incelenebilmesi için iki hafta içi ve iki hafta sonu gününe, hava şartlarının etkisinin incelenebilmesi için ise en az bir yağmurlu güne ihtiyaç duyulmaktaydı. Kavşakların uygun hale getirilmesi sırasında yaşanan aksaklıklar gecikmelere sebep olduğundan, tüm kavşaklar için görüntü alımı aynı gün başlatılamamıştır. Yine talep edilecek süreler içerisinde kameralar Trafik Müdürlüğü ile ortak kullanıldığından; trafik kazası, çeşitli altyapı sorunları, kameranın inceleme amaçları başka bölgelere odaklanması ve adli vakalar gibi özel durumlar için görüntülerde kesintiler yaşanabileceği düşünülmüştür. Trafik kazası gibi adli olayların gerçekleşmesi halinde, görüntüler Trafik Müdürlüğü tarafından düzenlenerek ilgili kısımların kayıtlardan çıkarılması söz konusu olmuştur. Özetle tüm bu etkiler düşünülerek, her bir kavşak için toplam iki haftalık olmak üzere on kavşaktan görüntü talebi yapılmıştır. 29.09.2022-

15.10.2022 tarihleri arasında kayıt saatleri her gün için 07.00-19.00 olacak şekilde kaydedilen görüntüler, 2022 yılının sonunda tarafımıza iletilmiştir.

2.6. İhtiyaç Duyulan Parametrelerin Elde Edilmesi

Çalışmanın bu aşamasında, elde edilen kamera görüntüleri görüntü işleme (bilgisayarlı görü) yöntemleriyle sayısal ortama aktarılmış ve oluşturulan veri işleme algoritması yardımıyla ihtiyaç duyulan parametreler mümkün olan en az hata ile tespit edilmeye çalışılmıştır.

2.6.1. Görüntü İşleme Uygulamaları

Görüntü işleme, bir görüntünün dijital forma dönüştürüldükten sonra amaca uygun yararlı bilgiler elde edilmesi için uygulanan tekniğe verilen isimdir. Sayısallaştırılmış görüntülerin bilgisayarlar aracılığıyla işlenmesi olarak da ifade edilebilir (URL-4, 2024).

Dijital görüntü işlemenin temel adımları şunlardır:

- Görüntü edinimi: Herhangi bir aygıt aracılığıyla görüntünün elde edilmesidir.
- Görüntü iyileştirme: Kontrastı artırma, gürültüyü azaltma gibi görüntünün daha iyi görünmesi için yapılan işlemleri içerir.
- Görüntü restorasyonu: Görüntü iyileştirmede olduğu gibi görüntüdeki bozulmaların giderilmesini içerir. Fakat görüntüde düzeltmeler, matematiksel ve istatistiksel yöntemler kullanılarak yapılır.
- Görüntü segmentasyonu: Görüntüyü bölgelere ayırır ve bu bölgeler belirli bir nesneye veya özelliğe denk gelir.
- Görüntü temsili ve tanımlanması: Görüntünün bilgisayar tarafından işlenebilecek şekilde temsil edilmesini ve özelliklerin görüntüden elde edilmesini içerir.
- Görüntü analizi: Nesneleri tanıma, desenleri tespit etme gibi bilgileri elde etmek için algoritmalar, modeller kullanmayı içerir.
- Görüntü sentezi ve sıkıştırma: Yeni görüntüler oluşturmak için depo gereksinimi azaltıp mevcut görüntüleri sıkıştırmayı içerir (URL-5, 2024).

Görüntü işleme teknolojisi günümüzde; güvenlik (nesne takibi, yüz tanıma vb.), tıp (tomografi, ultrason, hastalık teşhisi vb.), bankacılık (QR kod uygulamaları vb.), coğrafi bilgi sistemleri ve trafik (taşıt tanıma, hız tespiti, kavşak çözümleri, otonom sürüş

teknolojileri vb.) gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Trafikteki araç sayılarının sürekli artışı, birçok sorunu da beraberinde getirmektedir. Bu sebeple, teknolojik gelişmelerdeki artışa paralel olarak görüntü işleme çalışmalarında da bir artışın varlığından bahsedilebilir (Özalp & Dügenci, 2011).

2.6.2. Python Programlama Dili

Python, 1980’li yılların sonunda ilk olarak Guido Van Rossum tarafından geliştirilmeye başlanmıştır. Van Rossum, Amsterdam’da Centrum Wiskunde & Informatica (CWI) isimli araştırma merkezinde, üzerinde çalıştığı ABC programlama dilinin yeterli gelmediğini, geliştirilmeye açık olmadığını fark ederek ABC dilinin olumlu yanlarını alarak Python’ı ortaya çıkarmıştır (Severance, 2015). Python nesne yönelimli, yorumsal ve yüksek seviyeli bir dildir. Sade bir dil yapısına sahip olması Python’ı, öğrenmesi ve kodlanması kolay bir programlama dili yapar. Yapılmak istenen işlemler, daha az kod satırı kullanılması neticesinde daha okunaklı bir şekilde yapılabilir (Çobanoğlu, 2021). Yapısındaki bu farklılıklar sebebiyle Python, günümüzde dünyadaki en popüler programlama dillerinden biri haline gelmiştir.

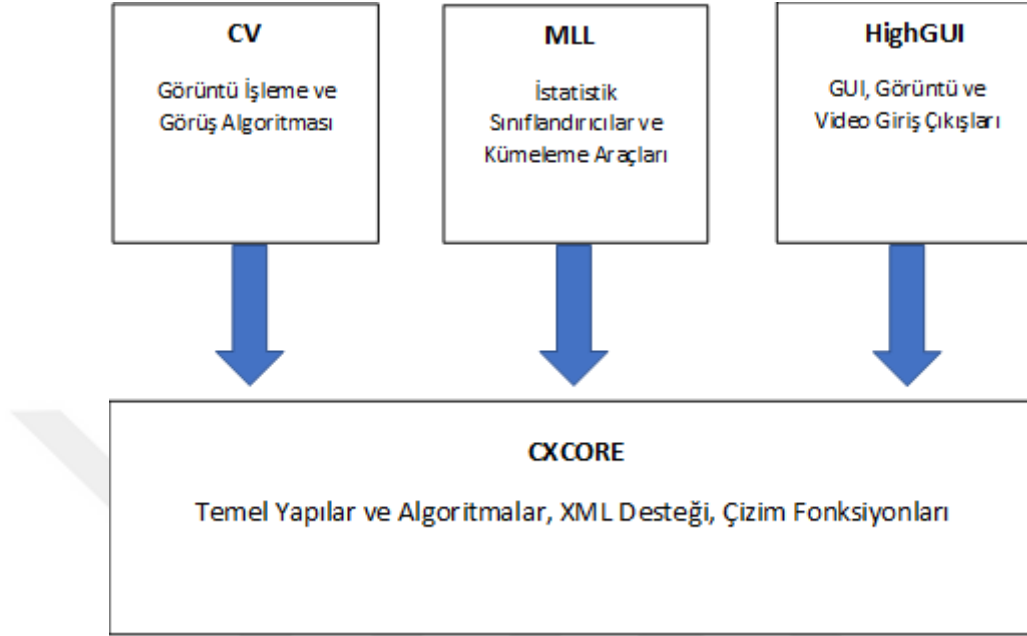
Açık kaynak koda sahip olan ve ücretsiz yazılım geliştirilmesine imkân veren Python; Windows, Unix/Linux ve MacOS işletim sistemleri üzerinde çalıştırılabilir. Taşınabilirlik sağlaması, herhangi bir ortamda yazılan bir programı farklı ortamlarda da çalıştırılabilir kılmaktadır. Web geliştirme, veri analizi, görüntü işleme, makine öğrenimi, yapay zekâ, oyun geliştirme gibi birçok alanda kullanılır. Dinamik kodlanan bir dil olmasından dolayı tanımlanan değişkenlerin tipleri başlangıçta belirtilmemektedir. Tanımlanan değişkenlerin tip kontrolleri çalışma esnasında yapılır (URL-6, 2024).

Yapılan işlemleri kolaylaştıran oldukça geniş bir kütüphaneye sahip olması sebebiyle, çalışmanın görüntü işleme aşamasında programlama dili olarak Python tercih edilmiştir. Çalışma kapsamında OpenCV, PyTorch, Os, Supervision, NumPy, Pandas, Tkinter ve Mathplotlib gibi birçok kütüphaneden faydalanılmıştır. Bu kütüphanelerden başlıcaları aşağıda özet olarak açıklanmıştır.

1. OpenCV Kütüphanesi

OpenCV (Open Source Computer Vision Library), görüntü işleme uygulamalarında bir resim ya da video içindeki ihtiyaç duyulan bilgileri çıkarıp işleyebilmek için kullanılır. Temel birçok Python kütüphanesinde olduğu gibi, açık kaynak kodlu olarak erişilebilen bir

görüntü işleme kütüphanesidir. Temel olarak beş farklı bileşenden oluşmaktadır (Bradski & Kaehler, 2008).



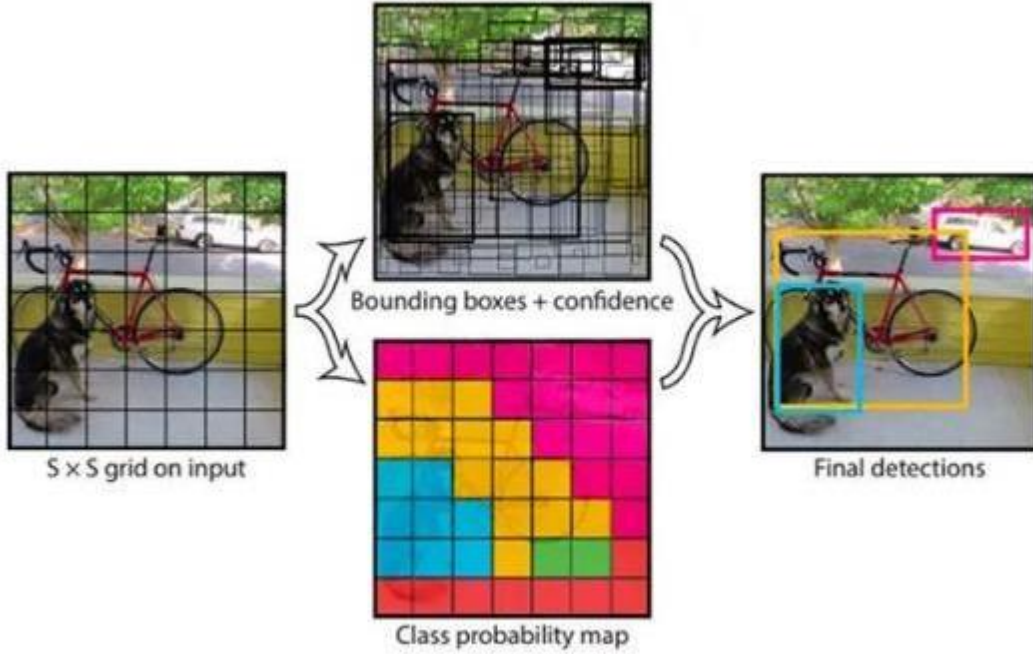
Şekil 30. OpenCV Bileşenleri

- CV (Computer Vision) bileşeni, ihtiyaç duyulan temel fonksiyonların görüntü işleme içerisinde kullanılmasını sağlayan ve yüksek seviyeli algoritmalar içeren bir kütüphanedir.
- MLL (Machine Learning Library) bileşeni, makine öğrenmesi için gerekli fonksiyonları içerir ve kütüphane yapısında sunar.
- HighGUI bileşeni, OpenCV kütüphanesi içerisinde tanımlanmış nesnelerin oluşturulabilmesini sağlayan bir grafik arabirimi kütüphanesidir. İçerdiği fonksiyonlar sayesinde resim ve videoların kayıt, silinme ve yüklenme gibi işlemleri gerçekleştirilir.
- CXCore bileşeni, OpenCV' ye ait IplImage, cvPoint, cvSize, cvMat, cvHistogram vb. veri yapılarını bünyesinde barındıran ve XML desteği sağlayan kütüphanedir.
- CvAux bileşeni; şekil ve şablon eşleştiren, yüz tanıyan, bir objenin ana hatlarını (köşe noktaları, tepe noktası vb.) bulan ve kamera kalibrasyonu yapan algoritmaları içeren bir kütüphanedir.

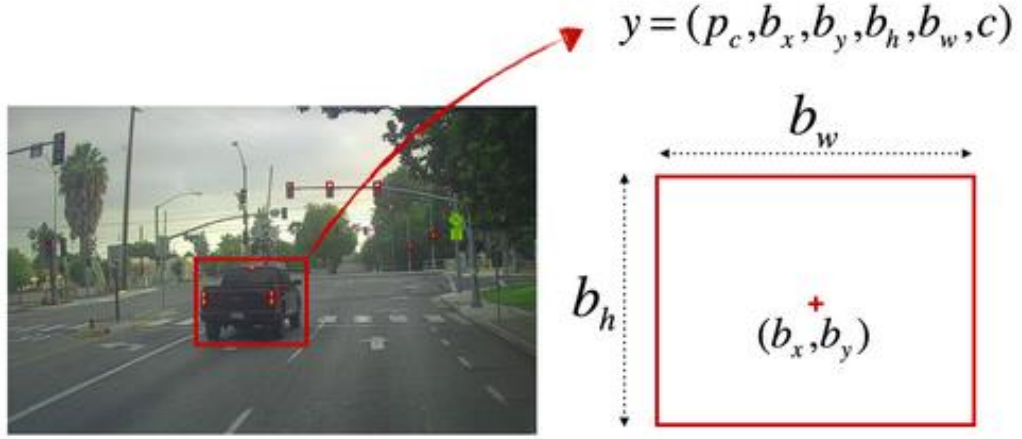
2. PyTorch, Ultralytics Kütüphaneleri ve YOLO Algoritması

YOLO (You Only Look Once) algoritması, konvolüsyonel sinir ağlarıyla (CNN) gerçek zamanlı nesne tespiti gerçekleştirir. Bu tarz algoritmalarda, görüntü üzerinde yapılan işlemlerin fazlalığı, çalışma hızını negatif anlamda etkileyebilmektedir. Bununla birlikte, resmin bütününe tek seferde nöral ağlardan geçirebilmesi, YOLO algoritmasını benzer diğer algoritmalarından daha hızlı yapar. Yine YOLO algoritmasının saniyede yakaladığı FPS (bir saniyedeki kare sayısı, Frame Per Second) sayısı diğer algoritmalara göre fazladır (Valeja vd., 2021).

YOLO'nun ilk adımı görüntüyü eşit ızgaralara bölmektir. Her ızgaranın belirli bir boyutu vardır ($S \times S$). Oluşan her ızgara bölmesinde nesneler potansiyel olarak tespit edilmeye çalışılır (Şekil 31). Nesnenin merkezine hâkim olduğunu düşünen ızgara bölmesi o nesneyi tespit edip etrafına sınırlayıcı kutu çizer. Sınırlayıcı kutu; nesnenin mevcut olduğuna dair güven skoru (p_c), genişlik (b_w), yükseklik (b_h), sınırlayıcı kutu merkezi (b_x , b_y), sınıf(c) gibi niteliklere sahiptir (Şekil 32).



Şekil 31. Görüntünün ızgaralara ayrılarak tahmin yapılması (URL-7, 2024)



Şekil 32. Sınırlayıcı kutu ve çizim parametreleri (URL-7, 2024)

Şekil 32’de belirtilen işlem neticesinde, algoritmanın eğitime bağlı olarak birden fazla sınırlayıcı kutu tanımlanabilecektir. Bu aşamada tanımlanacak sınırlayıcı kutu sayısı belirli durumlarda çok fazla olabileceğinden, önceden belirlenen bir eşik değeri (threshold) yardımıyla ihtimali küçük olan kutular ayıklanır ($p_c \leq \text{threshold}$ durumları elenir). Her bölüntüden gelen koordinat verisi görsel üzerine uygulandığında, tanınması istenen nesne için birden fazla sınırlayıcı kutu oluşumu söz konusudur. Bu nedenle ekranda istenmeyen, gereksiz sınırlayıcı kutular belirir. Bu sorunu ortadan kaldırmak için NMS (Non-Max Suppression) algoritması kullanılır. NMS algoritması, görüntüde tespit edilen nesneler için çizilen kutulara ait güven skorlarını algılayarak, en yüksek skora sahip sınırlayıcı kutuyu belirler ve diğer kutuları iptal eder (Şekil 33).



Şekil 33. NMS Algoritması çalışma prensibi (URL-8, 2024)

3. NumPy Kütüphanesi

NumPy (Numerical Python) bilimsel hesaplamaları kolaylaştıran, matris ve dizilerle işlem yapmak için gerekli işlemlere sahip bir matematik kütüphanesidir. NumPy'ın temelini NumPy dizileri oluşturur. Bu diziler, Python listeleriyle benzerlik gösterebilir, ancak NumPy dizileri işlevsellik ve hız bakımından daha kullanışlıdır. NumPy'da dizi içindeki tüm elemanlar aynı veri tipinden olmalıdır. İşlenecek görüntü de koordinatlar açısından matris yapısında olduğundan, yapılan çalışmalarda genellikle OpenCV kütüphanesi ile birlikte NumPy kütüphanesi de tercih edilir (URL-9, 2024).

4. Math ve Matplotlib Kütüphaneleri

Math kütüphanesi Python'un standart kütüphanelerinden biridir. Belirli matematiksel işlemleri basitçe yapılabilmesine olanak sağlar. Matplotlib kütüphanesi ise, veri görselleştirilmesinde kullanılan bir matematik kütüphanesidir. Sayısal verilerin daha anlaşılabilir ve yorumlanabilir olması amacıyla görsel olarak ifade edilip somutlaştırılması gerekmektedir. Matplotlib kütüphanesi kullanılarak veriler görselleştirilip, amaca uygun kaliteli çıktılar alınabilmektedir. 2 veya 3 boyutlu birçok grafik türü oluşturabilmek amacıyla kullanılan fonksiyonlar içerir (URL-10, 2024).

2.6.3. Elde Edilen Kamera Görüntülerinin, Görüntü İşlemeye Uygunluklarının Değerlendirilmesi

Önceki bölümlerde de belirtildiği üzere, sarı ışık altında ve belirli koşullar altında sürücü davranışını inceleyen bu çalışma, İBB Trafik Müdürlüğü tarafından gözlem amaçlı yerleştirilen mevcut kamera görüntüleri yardımıyla yapılmıştır. İkilem bölgesi problemi ile alakalı geçmiş yıllarda yapılan birçok çalışmada, incelenecek kavşaklar genellikle birden fazla kamera ile takip edilmiştir. Bu kameralara ek olarak, asfalt kaplama altına yerleştirilen çeşitli dedektörler ve yine asfalt kaplama kenarlarına yerleştirilen bazı sensörlerle de elde edilen verinin desteklenmesi sağlanmıştır.

Sarı ışık probleminin yapısı, ihtiyaç duyulan birçok parametreye ait verinin, mümkün olan en az hata ile tespit edilmesini gerekli kılar. Örneğin bir sürücünün sarı ışıkta geçmesi veya kırmızı ışık ihlali yapması arasındaki zaman farkı, sınır koşullar (sarı ışık sonu-kırmızı başlangıcı) düşünülecek olduğunda çok kısa bir süreye tekabül eder. Kamera görüntülerinin seri fotoğraflardan oluştuğu düşünülecek olduğunda bu kısa sürenin karşılığı, 10 fps (frame per second - 1 saniye içerisindeki kare sayısı) görüntü alabilen bir kamera için 100 ms değeridir. Bu hassasiyette çalışabilmek için elde edilen kamera görüntülerinin belirli

kalite şartlarını sağlaması gerekmektedir. Bu sebeple saha çalışması esnasında, mümkün olabildiğince çok kavşaktan yine mümkün olabildiğince çok sürede görüntü temin edilmeye çalışılmıştır.

Kamera kaydının başlatıldığı tarihle eş zamanlı olarak, 33026 numaralı Hadımköy Hoşdere Girişi kavşağı revizyona girmiştir. Bu kavşakta yapılan yenileme çalışmaları sebebiyle kamera bağlantısı sağlanamamış ve görüntü alımı mümkün olmamıştır.

Kayıt aşamasından önce bağlantı sorunları tam olarak giderilemeyen 19013 numaralı Dragos Sahilyolu kavşağından alınan görüntülerde, taşıt geçişlerinde çeşitli dalgalanmalar gözlemlenmiştir (Şekil 34). Bununla birlikte kayıta sıklıkla ortaya çıkan kopma ve takılmalar, sağlıklı veri teminini olanaksız hale getirmiştir. Yine bu kavşağa çok yakın olan 17008 numaralı Sahilyolu Cevizli kavşağından alınan görüntülerde, benzer bağlantı problemlerine daha düşük sıklıkta rastlanmıştır. Bu sebeplerden ötürü söz konusu iki kavşak çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır.



Şekil 34. 19013 numaralı Dragos Sahilyolu isimli kavşağa ait görüntüde yaşanan problemler

31020 numaralı Erciyeskent Silivri kavşağında kayıt yapıldığı dönemde, internet altyapısında yaşanan problemler sebebiyle görüntü kalitesinde ciddi kalite kaybı

yaşanmıştır. Bununla birlikte, kavşak kolu üzerinde bulunan üst geçidin altından geçen hafif taşıtları yaklaşık bir saniye süreyle görüntü dışında bırakması söz konusudur (Şekil 35). Bu sürede alınamayan verinin kaybı telafi edilemediğinden, söz konusu kavşağa ait görüntüler çalışma kapsamında değerlendirilmemiştir.



Şekil 35. 31020 numaralı Erciyeskent kavşağına ait görüntü

33020 numaralı Derbent Villalar ve 33023 numaralı Şehit Ahmet Öztürk Kışlası kavşaklarında, ağır taşıt trafiğinin haftanın tüm günlerinde çok yüksek seviyelerde olması, diğer taşıtların görüntü işleme tarafından tespitini önemli ölçüde kısıtlamıştır. Bununla birlikte, her iki kavşaktaki trafik yoğunluğunun çok fazla olması, kameraların bağlı bulunduğu direklerin yüksek miktarda salınım yapması, çalışmayı zorlaştıran diğer etmenlerdir (Şekil 36). Ayrıca 33023 numaralı kavşağın şehir merkezine uzak bir konumda olması internet altyapısını etkilemiş ve görüntü kalitesinin düşmesine sebebiyet vermiştir. Bu durumlar neticesinde, bu iki kavşak çalışma kapsamında değerlendirilmemiştir.



Şekil 36. 33020 ve 33023 numaralı kavşaklara ait görüntüler

29019 numaralı Kamiloba kavşağında, saha çalışmasını müteakiben internet bağlantısı kaynaklı yaşanan görüntü kopmaları neticesinde, görüntü çözünürlüğü 640x352 piksele düşürülmüştür (Şekil 37). Model çalışması yapılan ve iki günlük görüntülere ait sarı ışık vakaları kesilerek dosyalanan bu kavşakta, düşük çözünürlük sebebiyle yaşanan hassasiyet problemleri, bu kavşağın inceleme kapsamı dışında bırakılmasına sebep olmuştur.



Şekil 37. 29019 numaralı Kamiloba kavşağına ait görüntü

Kalan üç kavşak görüntülerinde de bazı sıkıntılar yaşanmış, görüntü iyileştirmeye yönelik kullanılan programlar ve gözle yapılan kontroller sonucunda bu sıkıntılar büyük oranda aşılmıştır.

2.6.4. Kamera Görüntülerinin Analiz İçin Uygun Hale Getirilmesi

Bu aşamada, çalışma için uygunlukları kontrol edilen kamera görüntülerinin gün seçimleri ve dosyalama işlemleri yapılarak, sarı ışık anlarının tespiti ve bu kesitlerin ana videolardan ayrılması işlemi gerçekleştirilmiştir.

1. Çalışma İçin Uygun Günlerin Belirlenmesi ve Dosyalama İşlemleri

Sürücülerin yolculuk türlerinin sarı ışık davranışına etkileri olabileceği düşünüldüğünden, her gün için tek bir parça halinde kayıt yapılan görüntülerde dosyalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Hafta içi ve hafta sonu gerçekleşen yolculukların sebeplerinde belirgin bir farklılık olabileceği düşünülerek, her bir kavşaktan hafta içi ve hafta sonu günlerin seçilmesine dikkat edilmiştir. Yine gün içerisinde sürücülerin yolculuk sebepleri değişebileceğinden, günlük 12 saat olarak alınan kayıtlar 07.00-08.00 başlangıç ve 18.00-19.00 saatleri bitiş olmak üzere birer saatlik dilimlere ayrılmıştır. Hava şartlarının etkisini inceleyebilmek adına yağışlı olan günler, gün seçimi yapılırken dikkate alınmıştır.

Kayıt yapılan ham verilerin .mkv formatında olması, görüntünün işlenebilirliği açısından problem teşkil etmekteydi. Bu sebeple görüntüler, çözünürlük ve fps özellikleri

değişmeyecek şekilde .mp4 formatına çevrilmiştir. Bu aşamadan sonra görüntüler Any Video Converter programı yardımıyla saatlik dilimlere ayrılmıştır. Her bir kavşak, gün ve saat ayrı ayrı dosyalar olarak analiz için hazır hale getirilmiştir.

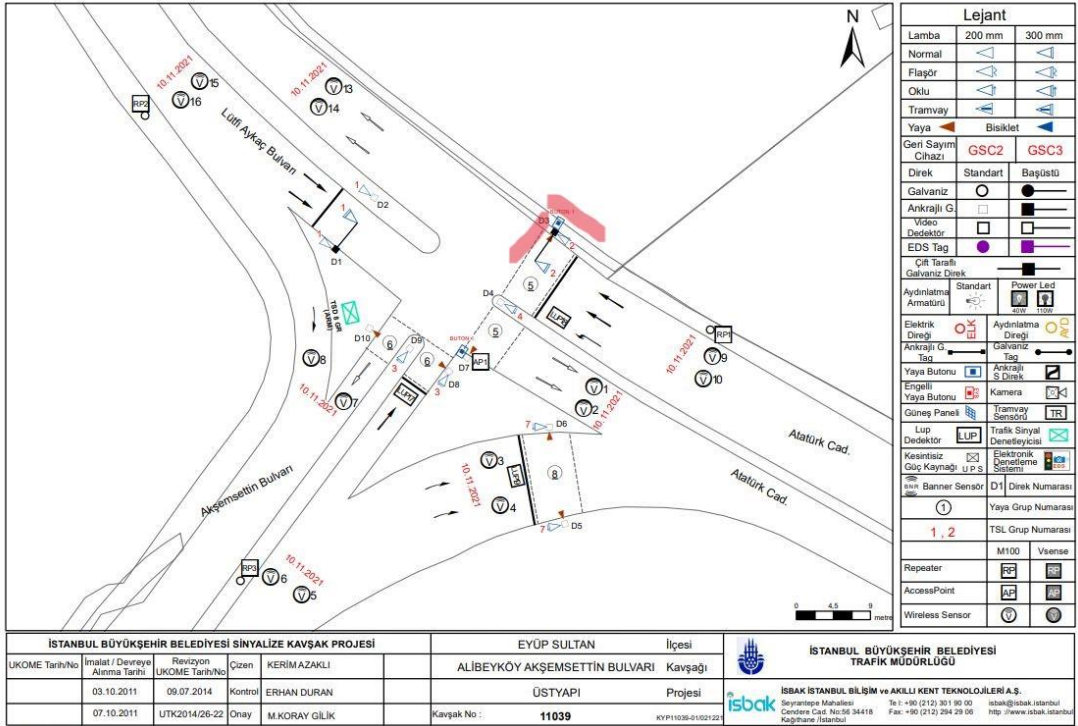
2. Sarı Işık Anının Tespiti

Seçilen kavşaklardaki devre süreleri dinamik olarak belirlendiğinden, sarı ışık anının tespiti için sabit bir döngü yakalamak mümkün olmamıştır. Saha çalışması esnasında hesaba katılan bu durum için yapılan çalışmalar ikinci bölümde ana hatlarıyla açıklanmıştır. Sarı ışık anının tespiti aşamasında yapılması gerekenler;

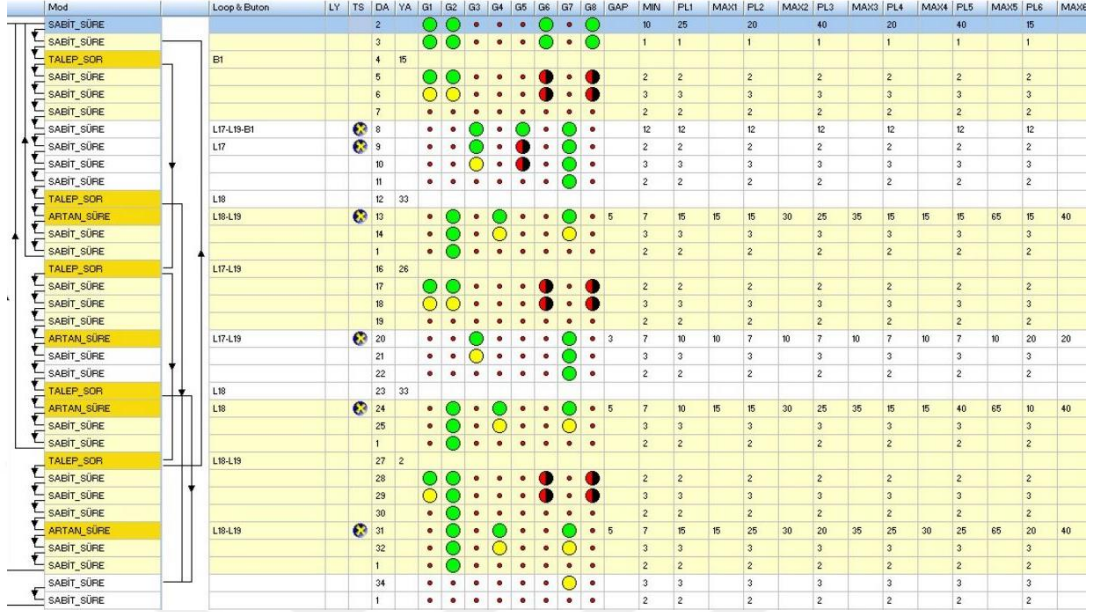
- Sarı ışık anının maksimum 200 ms hata ile tespit edilmesi
- Birer saatlik olarak hazırlanan kamera görüntülerinden bu kısımların kesilerek çıkarılması

şeklinde iki aşamalı olarak belirlenmiştir.

Birinci aşamada, sarı ışık anının tahmini için önceden belirlenen referanslar ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Seçilen üç kavşaktan birinde saha çalışması esnasında yerleştirilen projektörler yardımıyla, kalan iki kavşakta ise kavşak kolundaki yeşil ışıkla sıralı fazda çalışan bir yaya ünitesi yardımıyla sarı ışık anı tespit edilmeye çalışılmıştır. Alibeyköy kavşağından örnek verilecek olursa; UYM'den temin edilen sinyalizasyon kavşak projesi (Şekil 38) ve faz diyagramı (Şekil 39) yardımıyla sıralı çalışan fazların tespiti yapılmıştır.



Şekil 38. 11039 numaralı Alibeyköy kavşağına ait sinyalizasyon kavşak projesi



Şekil 39. 11039 numaralı Alibeyköy kavşağına ait faz diyagramı

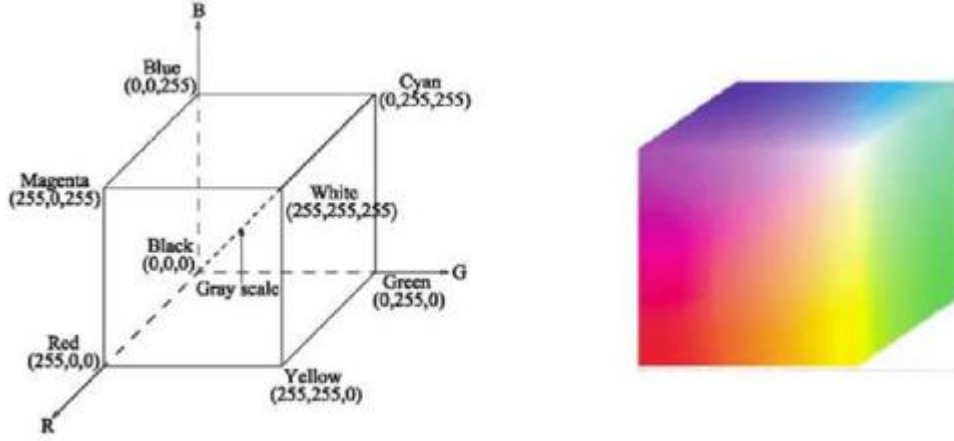
Sinyalize kavşak projesi yardımıyla incelenmek istenilen kavşak koluna ait akım numarası belirlenmiştir. Söz konusu kavşakta iki numaralı akım inceleneceğinden, bu akımla sıralı fazda çalışan yaya akımı faz diyagramından tespit edilmiş ve sinyalize kavşak projesinden de konum belirlemesi yapılmıştır. Alibeyköy kavşağı için bu zaman korelasyonu, yaya ünitesindeki kırmızının flaşa başlamasının ardından iki saniyedir. Son olarak, sabah ve akşam saatlerindeki kamera görüntülerinin yarı karanlık durumundan faydalanılarak belirlenen sürenin göz ile de kontrolü sağlanmıştır.



Şekil 40. 11039 numaralı Alibeyköy kavşağına ait görüntü

Sıralı fazların belirlenmesi neticesinde ikinci aşamaya geçilir. İlk olarak sarı ışık anlarının 1 frame hassasiyetle tespiti için Python programlama dili yardımıyla bir yazılım geliştirilmiştir. Bu amaçla, kamera görüntülerinin ekranda oluşmasını sağlayan ve piksel adı verilen kırmızı, yeşil ve mavi renkli noktalarda gerçekleşen renk değişimlerinin sayısal ortama aktarımı sağlanmaya çalışılmıştır. Bunun içinse RGB renk modelinden faydalanılmıştır.

RGB renk modelinde her renk; kırmızı, yeşil, mavi olmak üzere 3 ana spektrum bileşenlerinden oluşur. Bu nedenle Kartezyen koordinat sistemi tabanlı RGB küpünün eksenleri R (red), G (green) ve B (blue) 'yi göstermektedir. RGB'de Kırmızı (255,0,0), Yeşil (0,255,0), Mavi (0,0,255) olacak şekilde birer uç noktayı temsil etmektedir. Beyaz (255,255,255) koordinat sisteminde gösterildiği üzere bütün ana renklerin bir araya geldiği durumlarda, siyah ise aksi durumlarda (0,0,0) oluşur (Şekil 41). Siyahtan beyaza uzanan doğru üzerinde gri değerler bulunmaktadır (Şekil 42), (Gonzales & Wintz, 1987).



Şekil 41. RGB Renk Küpü (Gonzales & Wintz, 1987)

Renk Görünümü	Renk Adı	HEX değeri	RGB değeri
	White - Beyaz	#FFFFFF	255,255,255
	Yellow - Sarı	#FFFF00	255,255,0
	Fuchsia - Fıyıcı	#FF00FF	255,0,255
	Red - Kırmızı	#FF0000	255,0,0
	Silver - Gümüş	#C0C0C0	192,192,192
	Gray - Gri	#808080	128,128,128
	Olive - Zeytin yeşili	#808000	128,128,0
	Purple - Mor	#800080	128,0,128
	Maroon - Vişne Çürüğü	#800000	128,0,0
	Aqua - Turkuaz	#00FFFF	0,255,255
	Lime - Parlak yeşil	#00FF00	0,255,0
	Teal - Koyu Yeşil	#008080	0,128,128
	Green - Yeşil	#008000	0,128,0
	Blue - Mavi	#0000FF	0,0,255
	Navy - Yeşil	#000080	0,0,128
	Black - Siyah	#000000	0,0,0

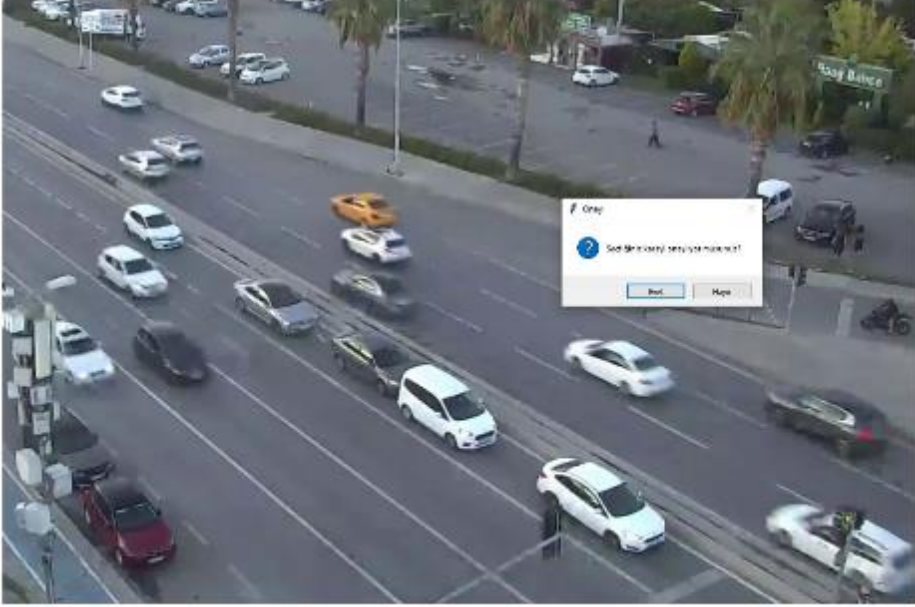
Şekil 42. Renklerin RGB ve HEX değerleri (URL-11, 2024)

Oluşturulan OrtRGB programı yardımıyla, renk değişikliğinin gerçekleştiği bölge Mouse kullanılarak çerçeve içerisine alınmış ve bu bölgedeki piksellerin her birine ait RGB değeri matris formatında belirlenmiştir. Sonraki aşamada ise Denklem 27'deki bağıntı kullanılarak bu bölgenin ortalama R, G ve B değerleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu denklemde R_i , G_i ve B_i her bir piksele ait R,G ve B değerlerine, n ise piksel sayısına karşılık gelmektedir.

$$ort.R, G, B = \frac{\sum_{i=1}^n R_i, G_i, B_i}{n} \quad (27)$$

Ortalama RGB değerleri her bir frame için ayrı ayrı hesaplanmış, frameler video içindeki sıralarına göre “Saat:Dakika:Saniye:Milisaniye” formatında zaman verileriyle eşleştirilmiş ve sonuçlar Microsoft Excel dosyası olarak yazdırılmıştır (Şekil 43).

29604	00:32:53:466	86	95	152	333	0
29605	00:32:53:533	88	96	153	337	4
29606	00:32:53:600	87	96	153	336	-1
29607	00:32:53:666	94	89	147	330	-6
29608	00:32:53:733	70	69	79	218	-112
29609	00:32:53:800	71	72	75	218	0
29610	00:32:53:866	70	72	75	217	-1
29611	00:32:53:933	71	73	76	220	3



Şekil 43. OrtRGB programına ait görseller

Sonraki süreçte, gün içerisinde güneş ışığından çok fazla etkilenen saatlerde ve renk kalitesi düşük olan görüntülerde ortRGB programı çalıştırılarak Excel dosyaları toplanmıştır. Elde edilen R, G ve B değerleri birbirleriyle toplanarak, bir sonraki satır ile aralarında anlamlı fark olup olmadığı araştırılmıştır (Şekil 43). Bu işlem, her bir satır bir fotoğraf karesine karşılık geldiğinden, görüntünün fps değerine bağlı olarak 1/fps hassasiyetle gerçekleştirilir. Söz gelimi, 10 fps ile oluşturulan bir görüntüde sarı ışık anı 100 ms hassasiyetle tespit edilebilecektir. Renk değişimlerinin frame geçişlerine denk gelmesi halinde belirgin iki fark değeri ortaya çıkabileceğinden, farkın ilk başladığı satır kontrol edilir. İlk satırdaki fark anlamlı ise, bu farka karşılık gelen, aksi durumlarda ise ikinci satıra karşılık gelen süre verisi kaydedilir. İncelenen renk değişimi saha çalışması esnasında

yerleştirilen projektörler için yapılıyor ise, bulunan süre verisi sarı ışık anı olarak kabul edilir. Yaya ünitelerindeki değişim araştırılıyor ise, bulunan zaman verisi faz diyagramlarından (Şekil 39) elde edilen farklar ile toplanır ya da çıkarılır. Tüm bu süreç, görüntüler hızlıca izlenerek göz ile de kontrol edilir.

Yapılan saha çalışmasında, çalışılan kavşaklardaki devre sürelerinin 1,5 ila 3 dakika arasında değişebildiği gözlenmiştir. Kamera görüntüleri birer saatlik parçalara ayrıldığından, her bir saat aralığında devre süresine bağlı olarak yaklaşık 20 ila 40 arasında sarı ışık fazına geçişin olduğu söylenebilir. Bir saat süreli görüntüler üzerinden sarı ışık vakalarının değerlendirilmesi, yapılacak küçük bir hatanın tüm saate etki etmesine sebebiyet verebilecektir. Bununla birlikte, bir saatlik görüntüler üzerinden her bir vakanın kontrolü esnasında çeşitli güçlüklerle karşılaşılacağı öngörülmüştür. Sarı ışık anının öncesi ve sonrasını kapsayacak şekilde yapılan görüntü kesim işlemi, söz konusu problemlerin en aza indirilmesine olanak sağlamıştır. Yine bu sayede veri analizi yapılacak ve kontrol edilecek görüntü miktarında ciddi bir azalma elde edilmiştir. 20 vakanın olduğu bir saat aralığında, vakaların 25'er saniyelik parçalara ayrılması, yaklaşık 50 dakikalık bir görüntünün analiz kapsamı dışında bırakılmasına olanak sağlamıştır. Hiçbir taşıtın geçmediği sarı ışık görüntüleri ayrı dosyalar içerisine atılmak suretiyle analiz kapsamı dışında tutulmuştur. Yine içerisinde vaka olan her görüntü izlenerek değerlendirilmiş; yaya varlığı, hava şartları, trafik ihlalleri gibi farklı durumlar için ayrı ayrı dosyalanmıştır.

Görüntü kesme işlemini kolaylaştırmak ve bu işlemi daha hassas bir yöntemle gerçekleştirebilmek amacıyla yeni bir yazılım geliştirilmiş ve bir görüntü kesme programı oluşturulmuştur. Yukarıda bahsedilen sarı ışık anının tespiti problemlerinin analiz aşamasında tekrar yaşanmaması için, kesilen görüntülerin üst kısımlarına dijital bir sinyalizasyon eklentisi yapılmıştır. Görüntülerin kesme işlemi, oluşturulan kesme programına Şekil 44'te gösterilen parametrelerin ve tüm saat içerisindeki zaman verilerinin girilmesi suretiyle gerçekleştirilmiştir. Yine kesilen vaka görüntüleri, programa girilen parametreler kullanılarak isimlendirilmiş ve kaydedilmiştir.

Kayıt Gün/Ay/Yıl:	22/10/2022
Kayıt Saat:	09.00
Kayıt Yeri:	Alibeykoy
Kesme Zamanları (saat:dakika:saniye:salise):	00:03:28;200,00:05:24;200
Başlangıç Kayıt Süresi (saniye):	10
Bitiş Kayıt Süresi (saniye):	13
Sarı Işık Süresi (saniye):	3.0
Onayla	

Şekil 44. Oluşturulan görüntü kesme programının arayüzü ve istenen parametreler

Görüntü kalitesi diğer kavşaklara göre daha iyi olan Alibeyköy ve Maslak kavşaklarında kullanılmak üzere farklı bir yazılım geliştirilmiştir. Oluşturulan algılama ve kesme programı sayesinde, ihtiyaç duyulan vaka görüntüleri daha hızlı bir şekilde elde edilebilmiş ve tespit-kesme sürecinin uzaması halinde ortaya çıkabilecek hataların en aza indirilebilmesi sağlanmıştır.

Geliştirilen yazılımda RGB değerlerinin tespiti, ortRGB programına benzer şekilde Denklem 27 yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Görüntü kesme aşaması ise yine görüntü kesme programı ile aynı mantıkla hazırlanmıştır. Excel yardımıyla birbirini takip eden iki frame arasında anlamlı fark bulma işlemi ise iki aşamalı olarak tasarlanmıştır. Birinci aşamada; R,G,B ve her biri için kontrol edilecek hassasiyet parametresi (sınır şartları) için gerekli atamalar yapılır. Atanacak değerler ortRGB bulucu programı yardımıyla önceden yaklaşık olarak belirlenir. Görüntü kalitesi görece iyi olan kavşaklarda, bu değerlerin bilhassa sabah ve akşam saatlerinde çok fazla değişmediği gözlemlenmiştir. Parametrelerin seçilmesi sonrasında, değişim aralığının sınır değerleri, Denklem 28 ve 29'daki gibi hesaplatılmıştır. Her iki denklemde büyük harfler RGB değerlerine, küçük harfler ise hassasiyet değerlerine karşılık gelmektedir.

$$\min [R, G, B] = ([R, G, B] - [r, g, b]_{\text{sensitivity}}) \geq 0 \quad (28)$$

$$\max [R, G, B] = ([R, G, B] - [r, g, b]_{\text{sensitivity}}) \leq 255 \quad (29)$$

Görüntü üzerinde çizilen alanda tespit edilen R, G, B değerlerinin bu sınırlar içerisinde olması, değişimin başlangıcı olarak kabul edilmiştir. R, G ve B değerlerinden kaç

tanisinin söz konusu sınır şartlarına tabi olduğunu belirleyen ve programın daha esnek çalışabilmesini sağlayan bir parametre de koşullara eklenmiştir (1, 2 veya 3). Bu sayede, yazılımın gün içerisindeki renk değişimlerine daha hassas tepki verebilmesi sağlanmıştır.

İkinci aşamada renk değişiminin beklendiği bölge için süre bilgisi tanımlanarak, daha hassas bir yakalama işleminin gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Örneğin sarı sürenin 4 saniye olduğu bir kavşakta, projektör üzerinde gerçekleşmesi beklenen renk değişiminin olağandışı durumlardan etkilenmemesi adına (görüntü kopmaları, ünite önünden araç veya başka bir cismin geçmesi vb.) 3 ve 5 değerleri sınır değerler olarak atanmıştır. Renk değişiminin gerçekleştiği süre bilgisi kaydedilerek oluşturulan vaka görüntüsünün ismine kavşak ve zaman bilgileri ile birlikte yazdırılmıştır. Yine tüm bu işlemler sonucunda elde edilen vaka görüntüleri izlenerek dosyalama işlemi yapılmıştır.

2.7. Parametre Analizi

Bu aşamada, analiz için uygun hale getirilen kamera görüntüleri, hazırlanan parametre tespit algoritması yardımıyla işlenecek ve ihtiyaç duyulan tüm veriler elde edilecektir. Parametre analiz algoritması, üç aşamada kurgulanmıştır.

1. Görüntü üzerinde incelenecek alanın perspektif dönüşümünün yapılması ve takip algoritması yardımıyla her bir taşıt için yörünge (trajectory) bilgisinin elde edilmesi
2. Elde edilen konum zaman verilerinde bulunan gürültünün (hata) giderilebilmesi için filtreleme işlemi yapılması
3. Filtrelenmiş veriler yardımıyla ihtiyaç duyulan tüm parametrelerin tespiti ve kontrolü

2.7.1. Perspektif Dönüşümü ve Takip Algoritması

Görüntü işleme için perspektif dönüşümü, kamera görüntüsü üzerinde belirlenen bir alanın üç boyutlu halinin kuşbakışı iki boyutlu bir alana dönüştürülme işlemidir. Python OpenCv kütüphanesi yardımıyla yapılan bu işlem; köşe koordinatları verilen bir alan içerisindeki her bir pikselin perspektif üzerindeki karşılığını belirler. Bu dönüşüm sonrasında mesafeler hesaplanarak her bir piksele karşılık gelen uzunluk değerleri belirlenir. Bu sayede, çizilen alan içerisindeki tüm piksellerin perspektif konumları belirlenmiş olur. Şekil 45'te 21055 numaralı kavşakta yapılan perspektif dönüşümüne ait görsel verilmiştir.



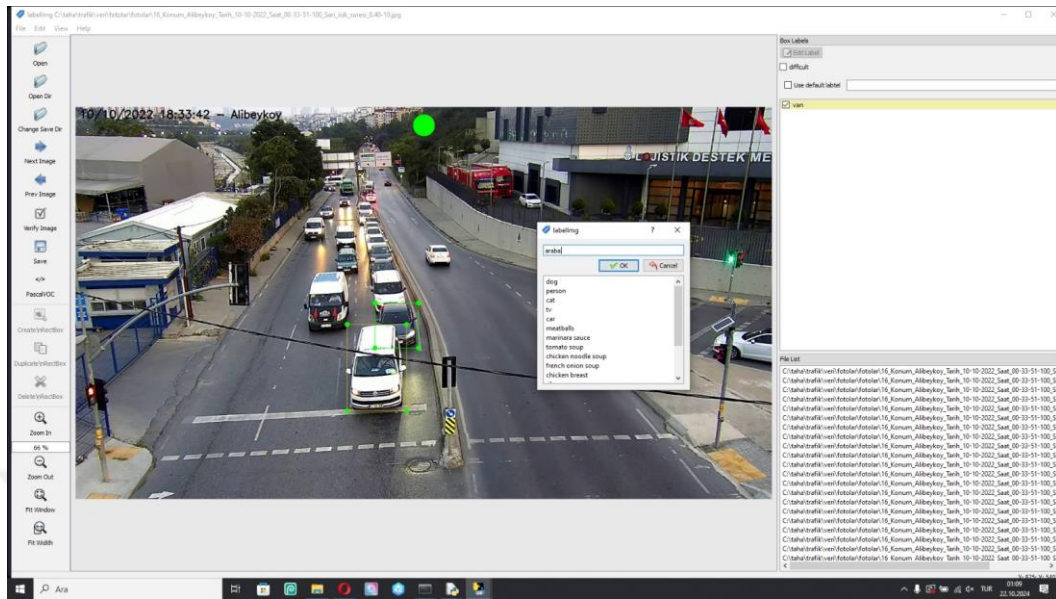
Şekil 45. 21055 numaralı Derbent (Maslak) kavşağına ait perspektif dönüşümü

Perspektif dönüşümünün ardından takip algoritması yardımıyla taşıtların piksel başına koordinatları yörüngeleri boyunca tespit edilir. Bu aşamada yukarıda açıklanan YOLO algoritmasından faydalanılmıştır. YOLO algoritmasının sunulan hali, içerisinde birçok objenin tanınabilmesini sağlayan hazır modeller barındırmaktadır.

YOLO algoritmasının sunduğu hazır modellerin birçoğu ideal koşullar altında verimli çalışmaktadır. Bu ideal koşullar; yüksek görüntü kalitesi, nesnelerin kameraya yakın olması, görüntü boyunca renklerin çok fazla değişmemesi şeklinde sıralanabilir ve örnekler çoğaltılabilir. Çalışma kapsamında temin edilen görüntüler; yağmurlu, güneşli, alacakaranlık renk koşullarını bir arada barındırmaktadır. Birçok taşıt, kamera görüntülerinin yalnızca incelenen bölgesinde ve birbirlerine yakın olarak hareket ettiğinden, mevcut hazır modeller yardımıyla kesintisiz bir veri akışının sağlanabilmesi mümkün olmamıştır. Bununla birlikte, ilerleyen kısımlarda açıklanacak olan parametre tespit algoritmasının sağlıklı çalışabilmesi için taşıt hareketlerinin mümkün olan en doğru şekilde tespit edilmesi gerekmektedir. Bu sebeplerden ötürü, incelenecek her kavşak için yeni bir model oluşturulmasına karar verilmiştir.

Model oluşumu için kavşaklarda analiz yapılacak günlere ait kesilen vaka videoları bir dosya içerisinde toplanmıştır. İncelenecek alanda renk değişimine sebep olabilecek faktörler ile trafikteki taşıt kompozisyonunun değişimini en iyi şekilde temsil edecek bir eleme işlemi yapılarak, yaklaşık 30 adet vaka görüntüsü bir araya getirilmiştir. 30 adet görüntüden yaklaşık olarak 7500 adet fotoğraf karesi çıkacağından (10 fps için), benzer temsil koşullarını sağlayacak şekilde azaltma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonraki aşamada, seçilen her bir fotoğraf karesindeki taşıtlar ön tampon çizimleri hassas olacak şekilde

çerçeveler içerisine alınmış ve taşıt tipi bilgisi girilmiştir (Şekil 46). Bu işleme etiketleme adı verilmektedir.



Şekil 46. 11039 Alibeyköy kavşağı için etiketleme işlemi

Çalışma için gerekli etiket miktarı oldukça fazladır. Örnek vermek gerekirse, 11039 numaralı kavşaktan alınan beş günlük görüntünün model etiketlemesi için yaklaşık 3100 fotoğraf karesi kullanılmıştır. Bir fotoğraf karesinin etiketlenmesi işlemi araç sayısı, araç görünürlüğü ve işlemi yapacak kişiye göre değişmekle birlikte, 1-2 dakika arasında sürebilmektedir. 3100 fotoğrafın tamamı için bu süre yaklaşık 50-60 saattir. Bununla birlikte, bir insanın sürekli etiketleme yapacağı süre çoğunlukla bir saati geçememektedir. Çalışmanın bu aşamasında, söz konusu iş yükü ve süreyi azaltabilmek adına yeni bir yazılım geliştirilmesi yapılmıştır. Nihai model eğitimi için gerekli etiket miktarının yaklaşık %10'u kadar fotoğraf alınarak ve YOLO'nun güven skoru değeri düşürülerek (threshold $\approx 0,2$) ara bir model oluşturulmuştur. İkinci aşamada oluşturulan bu ara model gerekli etiket miktarının bu kez %60'ına uygulanmış (burada ilk %10 ile ikinci %60 seçiminin farklı fotoğraflar olmasına dikkat edilmelidir) ve Şekil 47'de görülen fotoğraf kareleri elde edilmiştir. İlk model az miktarda fotoğrafla ve düşük güven skoru ile yapıldığından; elde edilen yeni etiketlerde bazı şekil bozuklukları ile ikili veya yapılmamış etiketlerle karşılaşılması söz konusudur. Ancak bu fotoğrafları düzeltmek için harcanacak süre, yeni baştan etiketlemeye nazaran çok daha kısadır. Bu yöntemdeki %10 ve %60 değerleri tecrübe ve deneme-yanılma ile elde edildiğinden, farklı görüntüler için farklı oranlar belirlenebilir. Yine söz konusu ara işlemin çoğaltılarak yapılması da mümkündür. Ancak model oluşturma işlemleri yüksek

işlem kapasiteli bilgisayarlarda veya ücret mukabilinde online olarak satın alınan ortamlarda ve uzun sürelerde yapılabildiğinden, ara işlem sayısının en fazla iki ile sınırlandırılması gerektiği düşünülmektedir. Bu aşamadan sonra oluşturulan model ile takip algoritması birlikte çalıştırılarak, görüntü üzerinde taşıt takibi sağlanmıştır.

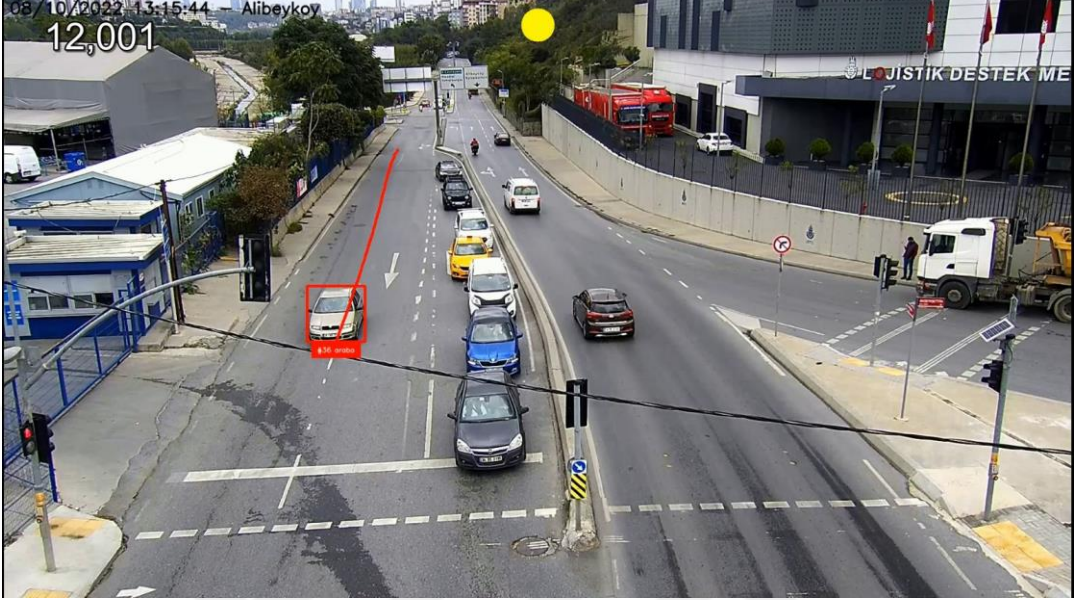


Şekil 47. Oluşturulan ara model sonucu elde edilen yeni etiket karesi örneği

2.7.2. Konum-Zaman Verilerinin Elde Edilmesi ve Filtreleme İşlemi

YOLO tarafından oluşturulan sınırlayıcı kutular bir taşıtın yaklaşık olarak görüntüde kapladığı alanı temsil etmektedir. 11039 numaralı kavşağa ait görüntülerde bu dikdörtgen kutuların alt kenarlarının orta noktası, görüntüye doğru karşıdan gelen bir taşıtın ön tamponu ile yine yaklaşık olarak örtüşmektedir. Bu gözlemden hareketle, sınırlayıcı kutuların bahsedilen noktaları her bir taşıt için tanımlayıcı olarak kabul edilmiş ve bu noktaların yörünge boyunca hareketi sonucu fotoğraf karesi başına perspektifte aldıkları konum değerleri kaydedilmiştir. Taşıtın her bir fotoğraf karesinde aldığı yol, bu yaklaşım sayesinde kolayca modellenebilmiştir. Ancak bu yaklaşımın da bazı mahsurlu tarafları bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, sınırlayıcı kutu boyutlarının, yetersiz veriyle yapılan modellerde sonucunda sürekli ve/veya yüksek miktarda değişim gösterebilmesidir. Bu hatayı en aza indirebilmek adına yukarıda açıklanan etiketleme aşamasında titiz davranılmıştır. Yine diğer bir husus, taşıtın kameraya göre dik bir açıyla yaklaşmaması durumudur. Bu gibi durumlarda sınırlayıcı kutu alt kenarı taşıt tamponunu tam olarak temsil edemeyebilir. Söz konusu

problemi giderebilmek adına farklı kavşaklar için farklı nokta seçimleri yapılmış ve taşıtın yörünge boyunca hareketinin kontrolü için oluşturulan yörünge izi (Şekil 48) görüntü kayıtları üzerinden takip edilerek optimum nokta seçimi yapılmaya çalışılmıştır.



Şekil 48. Bir taşıtın kamera görüntüsü üzerinde oluşturduğu yörünge izi

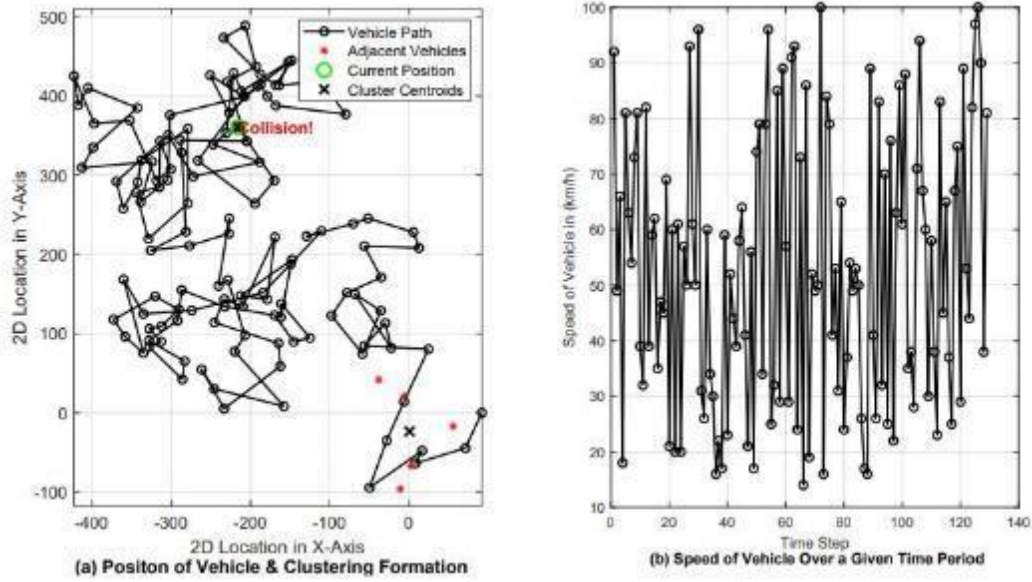
Şekil 48’de görülebileceği üzere, taşıtlar düşey doğrultuda hareket ederken yatay konumları da belirli oranda değişebilmektedir. Bu çalışma kapsamında taşıt hızlarının tespiti, fotoğraf karesi başına yörüngeyi dikey konum farkları üzerinden yapılacaktır. Bu yöntemle hesaplanacak hız değerinin, içerisinde belirli bir miktar hata barındıracağı ortadadır. Ancak çalışma kapsamında taşıtların sarı ışık anındaki hızlarının, durma çizgisine olan mesafeye göre inceleneceği unutulmamalıdır. Hızın göreceli bir kavram oluşu sebebiyle bu yaklaşımın benimsenebileceği düşünülmüştür. Daha açık bir ifadeyle; yatay konum değişikliklerinin hızdaki etkisi, yörünge başındaki bir gözlemci ile durma çizgisinin tamamı karşılaştırıldığında aynı olmayabilir. Sarı ışık anı söz konusu olduğunda, taşıtın durma çizgisine ulaştığı ve kavşağı tamamen terk ettiği süreler olayların gelişmesinde belirleyici olacaktır. Bu sürenin uzun ya da kısa olması, taşıtın yataydan çok düşeyde gerçekleştirildiği hareketle ilgilidir. Yine ivme ve intikal reaksiyon süresi gibi daha hassas hesap yöntemleriyle tespit edilmesi gereken parametreler çalışma kapsamına dahil olmadığından, konum ve hız hesabında böyle bir yaklaşımın kabulünün uygun olacağı düşünülmüştür.

Yukarıda yapılan yaklaşım ve kabuller ışığında elde edilen hız zaman grafikleri içerisinde fotoğraf karesi başına belirli sapmalar gözlemlenmiştir.

Literatürde “gürültü” olarak tanımlanan bu durumun çok çeşitli sebepleri olabilir. Çalışma kapsamında alınan veride tespit edilen gürültünün ana sebepleri aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

❖ Veri Alma (Sinyal) Hassasiyeti

Taşıt takibinde benimsenen yöntem gereği, her bir taşıtın yörüngesindeki değişim 1/fps saniye hassasiyetle elde edilmektedir. Başka bir deyişle, 10 fps kalitesindeki bir görüntüde hareket eden taşıtlar, her 100 milisaniyede bir bize sinyal göndermektedir. Zaman aralığının bu denli kısa olması, elde edilen verinin oldukça hassaslaşmasına sebebiyet vermektedir (Şekil 49). Bu noktada sinyal sıklığının azaltılması, gürültünün azaltılmasında etkili olabilecektir. Ancak bu yaklaşımla birlikte elde edilen verinin bir kısmı hesaba katılmamış olacak ve hassasiyet azalacaktır.



Şekil 49. Bir taşıtın hareketini gösteren gürültülü veri örnekleri (Nauman vd., 2024)

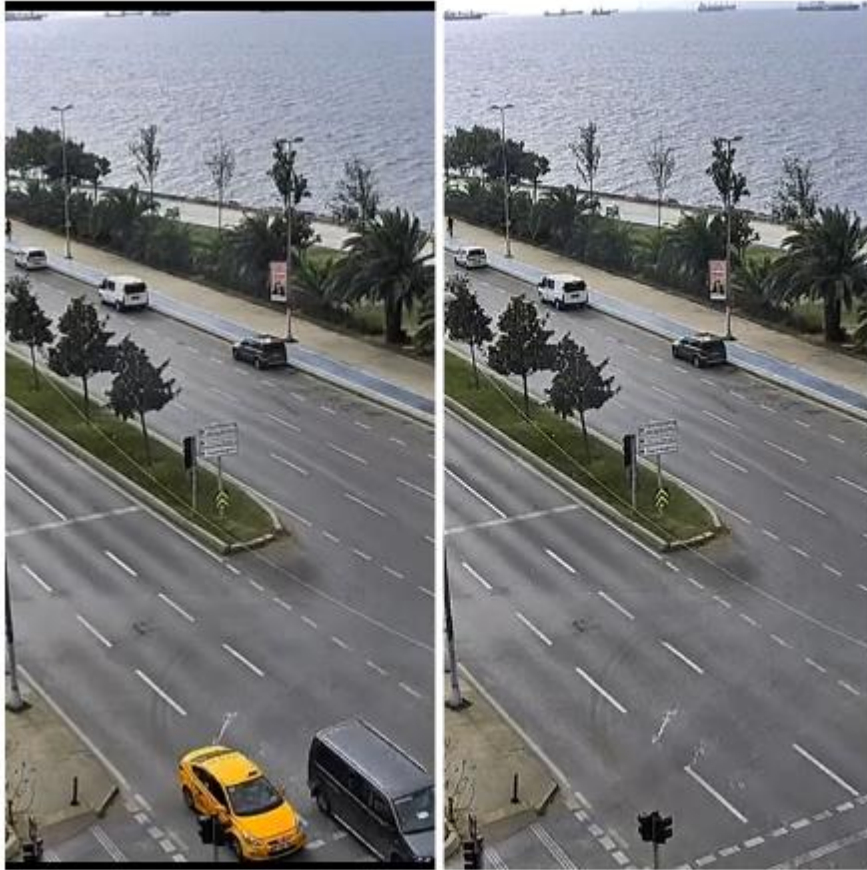
❖ Görüntü Kalitesi

Dijital bir ortamda görüntü pikseller yardımıyla oluşturulmaktadır. Bir görüntünün kalitesi, barındırdığı piksel miktarıyla doğrudan ilintilidir. Çalışma kapsamında alınan görüntüler, kameraların UYM ile ortak kullanılması sebebiyle tek bir kavşak koluna istenilen şekilde sabitlenememiştir. Yine tüm kavşaklarda 1920x1080 çözünürlükte görüntü temini sağlanamamıştır. Taşıt takibi için görüntü üzerinde çizilen alandaki piksel sayısı ne kadar fazla olursa, piksel başına düşen mesafeler de o oranda azalacaktır. Bu sayede ihtiyaç duyulan verinin daha hassas temini gerçekleştirilebilir. Ancak hareketin doğası gereği alınacak olan veride bir miktar gürültü olması beklenen bir durumdur. Yapılan çalışmalarda

araştırmacılar (Li vd., 2016), (Dong vd., 2021), çeşitli filtreleme yöntemleriyle bu gürültüyü azaltma yoluna gitmişlerdir.

❖ Uygulanan Yöntemin Sınırları

Çalışma kapsamında taşıt takibi ve referans noktasının takibi YOLO algoritması yardımıyla yapılmıştır. Çizilen sınırlayıcı kutu boyutlarında meydana gelecek anlık değişimler, seçilen referans noktasında sapmalara sebebiyet verebilmektedir. Bu sapmaları en aza indirmek adına yukarıda detayları verilen etiketleme işlemi büyük bir titizlikle gerçekleştirilmiştir. Yine kayıt alınan günlerdeki fırtına ve yağış gibi sebepler, kameralar ve bağlantı direklerinde salınma sebep olduğundan, elde edilen görüntülerde çeşitli sapmalar gözlemlenmiştir. Bu sorunun giderilebilmesi için Adobe Premiere Pro yazılımı kullanılarak ve warp stabilizasyonu tekniğinden faydalanılmıştır. Şekil 48’de soldaki resimde görülebileceği üzere, görüntüdeki salınımının giderilmesi sonrası salınım miktarını tolere edebilmek adına alt ve üst kısımlarında kesintiler meydana gelmiştir.



Şekil 50. 17017 numaralı kavşaktan yağmurlu bir günde alınan görüntüdeki salınımın giderilmesi

Saatlik kamera titreşimi giderilen 17017 numaralı Pendik kavşağında, kameranın fiziki montajından kaynaklandığı düşünülen ve aşağı yönlü olan çok küçük miktardaki hareketler, bazı durumlarda 1 saatlik dilim içerisinde bile kamera açılarında değişime sebebiyet vermiştir. Bu değişim sebebiyle perspektif dönüşümü için çizilen alanlarda küçük sapmalar gözlemlenmiştir (Şekil 51). Koordinatlar yardımıyla perspektif alanı oluşturma işlemi hassas bir çalışma gerektirdiğinden, 11039 ve 21055 numaralı kavşaklarının analiz sonuçları beklenilmiş ve alınan sonuçlar yeterli görülerek çalışmanın söz konusu iki kavşak verisi yardımıyla tamamlanması kararlaştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında temin edilen görüntülerde yaşanan problemler, kavşaklar analiz kapsamına alınmasa dahi detaylı olarak anlatılmaya çalışılmıştır. Bunun temel sebebi, benzer çalışmaları yapacak olan araştırmacıların, görüntü temini aşamasında bu çalışma neticesinde edinilen tecrübelerden faydalanabileceğinin düşünülmesidir.



Şekil 51. Pendik kavşağında meydana gelen sapmaya ait görüntüler

Takip algoritması yardımıyla elde edilen gürültülü verinin, analize uygun hale getirilmesi amacıyla filtreleme işlemi uygulanmıştır. Çalışma kapsamında taşıtların sarı ışık anındaki hız ve konum bilgilerinin mümkün olan en az hata ile tespiti gerektiğinden, eldeki konum zaman verileri incelenerek, Butterworth alçak-geçiren (low-pas) filtrenin kullanımına karar verilmiştir. Bu filtreleme tekniğinin en temel özelliği, alçak geçiren yapısı sayesinde maksimum düz frekans tepkisi sunabilmesidir. Ancak bu filtreleme tekniği uygulandığında, eldeki gürültülü verinin keskin frekans ayrımını tam olarak yapılamayabilir. Başka bir deyişle, taşıtın ani ivmelenerek hızını artırmasının veri üzerindeki etkisi, bu filtreleme yardımıyla tam olarak saptanamayabilir. Yine bu tarz bir filtrelemede faz kaymaları yaşanabileceğinden, filtrelene sonras ı ivmelenmenin gerçekleştiği zaman verisi tam olarak belirlenemeyebilir (Dong vd., 2021).

Butterworth alçak-geçiren filtresinin frekans yanıtı Denklem 30'daki bağıntı yardımıyla hesaplanır (Aslankaya & Bayrak, 2023).

$$[H(j\omega)]^2 = \frac{1}{1 + \left[\frac{\omega}{\omega_c}\right]^{2n}} \quad (30)$$

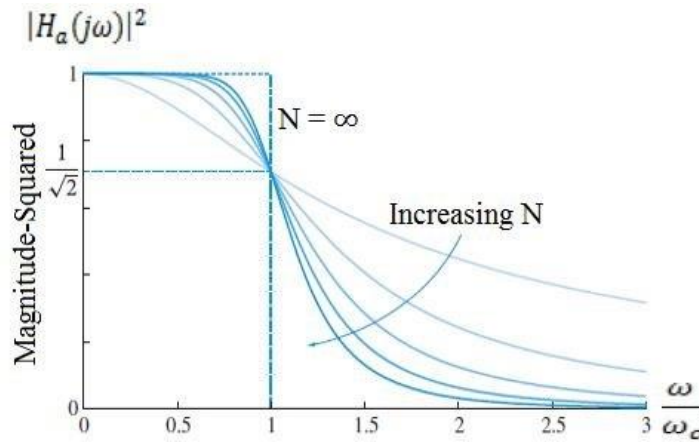
Burada;

$H(j)$: Frekans yanıtını,

ω : Frekans değişkenini,

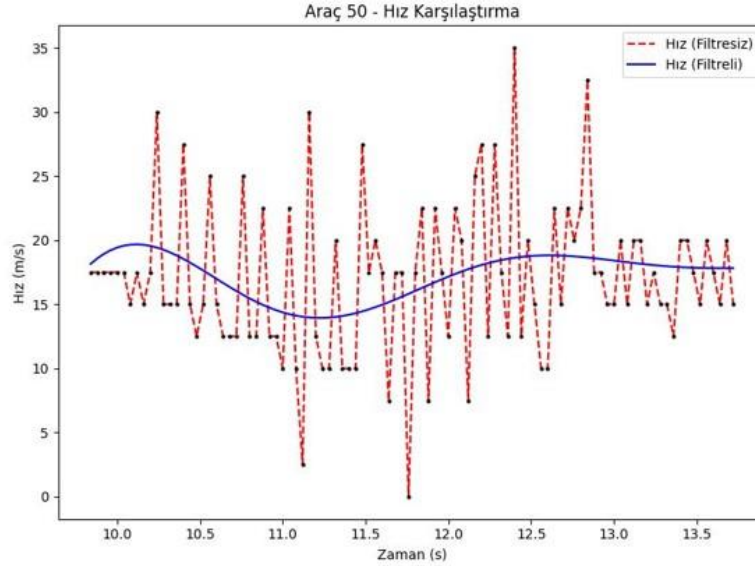
ω_c : Kesme frekansını,

n : Filtre derecesini (order) temsil etmektedir (Şekil 52).



Şekil 52. Analog bir alçak geçiren Butterworth filtresinde filtre derecesindeki artışın frekans yanıtı üzerindeki etkisi (Jasim vd., 2020)

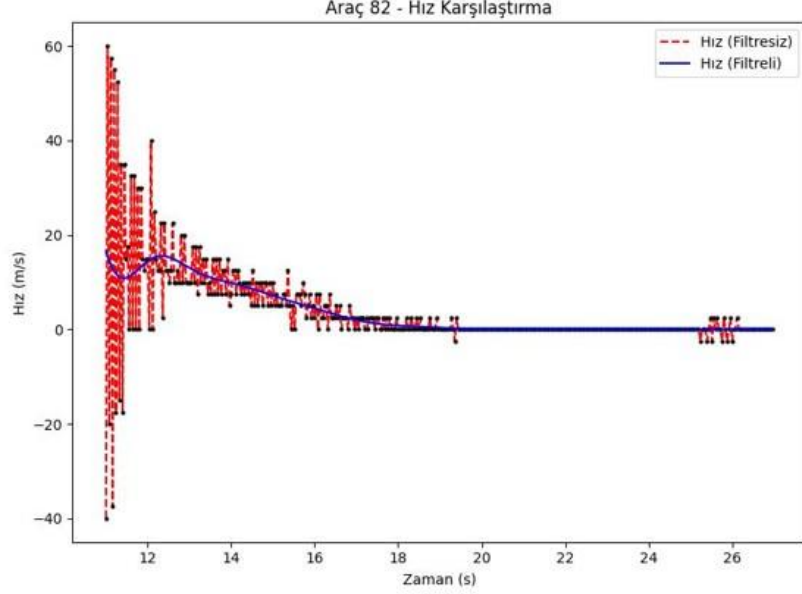
Görüntü işleme yöntemiyle alınan veri, görüntü kaydının fotoğraf karelerinin birleşimi yardımıyla oluşması sebebiyle kesikli zaman aralıklarında elde edilmektedir. Örneğin saniyede 10 kare yardımıyla oluşturulan bir görüntünün işlenmesi neticesinde bir saniyede 10 veri alınabilecek ve bunun sonucunda her 0,1 saniyede bir veri kesintisi yaşanacaktır. Ses dalgası gibi sürekli yapıda (analog) olmayan bu tarz bir verinin filtrelenebilmesi için dijital dönüşüm işlemi uygulanmaktadır. SciPy kütüphanesi yardımıyla yapılan bu dönüşümde, farklı n ve kesme frekansı değerleri girilerek gürültülü verinin filtre neticesinde değişimi incelenmiştir. Sarı ışık anında analizi yapılan taşıtların gürültülü ve filtreli hız zaman grafikleri oluşturularak değerlendirilmiş ve çalışma için kesme frekansı ve filtre derecesi değerleri sırasıyla 0,5 ve 4 olarak belirlenmiştir (Şekil 53).



Şekil 53. Sarı ışık anında duran bir taşıta ait konum farkı-zaman verilerinin filtre çıktısı ile karşılaştırılması

İncelenen taşıtların bazılarında, kamerada gerçekleşen anlık titreşim ve taşıtların birbirleriyle etkileşimi neticesinde sınırlayıcı kutu boyutlarının anlık olarak ve çok fazla değiştiği durumlarla karşılaşılmıştır. Bunun sonucunda, söz konusu taşıtlardan elde edilen veride ciddi sapmalar olduğu gözlenmiştir. Analizi yapılan tüm taşıtlar için çizilen hız zaman grafikleri tek tek kontrol edilerek, elde edilen verideki sapma miktarının sürekli ve taşıt hızını önemli ölçüde değiştirebilecek olduğuna kanaat getirilen vakalar analiz kapsamı dışında bırakılmıştır. Şekil 54 incelendiğinde, Maslak kavşağındaki bir taşıttan 11. ve 12. saniyeler arasında elde edilen veride sürekli (yaklaşık yarım saniyenin üzerinde) ve 100 m/s gibi ciddi miktarlarda sapma gözlenmiş ve bu sebeple söz konusu taşıt analiz kapsamı

dışında bırakılmıştır. Bununla birlikte Şekil 53'te olduğu gibi; sapma miktarının 30-40 m/s aralığında, karşılıklı ve 1-2 frame gibi kısa zaman aralığında gerçekleştiği durumlarda ise filtreleme işlemi neticesinde elde edilen hız değerleri uygun olarak kabul edilmiştir.



Şekil 54. Analiz kapsamı dışında bırakılan bir taşıta ait hız-zaman grafiği

Çalışma kapsamında taşıtların sarı ışık anındaki konum ve hız parametreleri zaman bazlı bir yöntem ile tespit edilmiştir. Bu çalışmada daha hassas hesap gerektiren anlık ivme ve intikal reaksiyon süresi gibi parametrelere ihtiyaç duyulmadığından, filtreleme işlemi için Butterworth alçak-geçiren filtrenin kullanılmasına karar verilmiştir.

2.7.3. Parametre Tespit Algoritması (Model Oluşturulması)

Sürücülerin sarı ışık anındaki davranışlarının anlaşılabilmesi, ihtiyaç duyulan parametrelerin tespiti ile mümkün olabilir. Bu amaçla, kullanılan yöntem uygun olarak kurgulanan ve zaman-konum ekseninde çalışan üç aşamalı bir parametre tespit algoritması tasarlanmış, Python ve ilgili kütüphaneler yardımıyla bir yazılım geliştirilmiştir.

Takip algoritması yardımıyla her bir fotoğraf karesi için elde edilen konum verilerinin farkları alınarak, yukarıda anlatıldığı şekliyle filtrelenmiştir. Taşıtın, birbirini takip eden iki fotoğraf karesindeki konumunda meydana gelen değişim sonucu elde edilen bu filtreli fark, karşılığında bir zaman verisi ile eşleştigiinden; sarı ışık anı, öncesi ve sonrasında gerçekleşen taşıt hareketi bu iki eksen yardımıyla tanımlanmıştır. Ölçüm alanına giren tüm taşıtlara ait konum, zaman, hız ve ivme gibi parametreler, fotoğraf karesi başına

ve her bir taşıt için tespit edilmiş ve birinci aşamada belirlenen şartlar neticesinde analiz kapsamına giren taşıtlar için elde edilen tüm verilerin kaydı sağlanmıştır (Şekil 55).



Şekil 55. 21055 numaralı Derbent (Maslak) kavşağına ait analiz görüntüsü

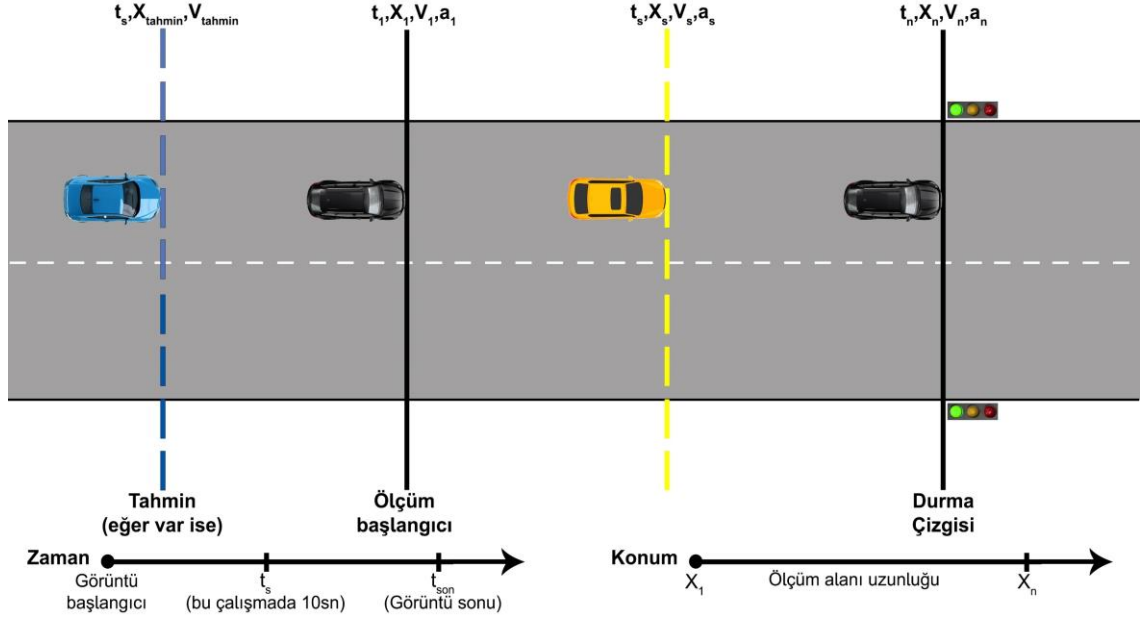
Birinci aşamada analiz için görüntü üzerinde belirlenen alana giren her taşıtın tabi olacağı sınır şartları tanımlanmıştır. Bu aşamada yapılmak istenen, sarı ışık anında kavşaktan uzak olan, yeşil ışıkta geçen veya takip algoritmasında gerçekleşecek hatalar sonucu verisi potansiyel olarak yanlış analiz edilecek taşıtların elenerek, algoritmanın sonraki aşamalara doğru bir şekilde geçişini sağlamaktır. Söz konusu şartlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Parametre tespitinin doğru bir şekilde yapılabilmesi, yeterli miktarda verinin görüntü üzerinden temini ile mümkün olabilecektir. Bu sebeple, herhangi bir nedenden ötürü 20 ve daha az konum verisine sahip olan taşıtlar, analiz kapsamı dışında bırakılmıştır. Minimum veri sayısı parametresi, farklı kavşaklar için değiştirilebilmek üzere dinamik parametre olarak ayarlanmıştır.
2. Kavşak koluna çizilen alanın uzunluğunun yaklaşık %10'undan sonra takibine başlanan taşıtlar, analiz kapsamı dışında bırakılmıştır. Bu sayede takip algoritması tarafından geç algılanan veya takip sürekliliğinde problem olan taşıtların, kapsam dışında bırakılması hedeflenmiştir.
3. İncelenen tüm şeritlerde, ön tamponları durma çizgisine 6 m mesafeden yakın olan taşıtların ölçülen son beş hız değerinin ortalaması 1 m/s değerinden küçük ise, geride

- olan ve takibi yapılan diğer araçlar analiz kapsamı dışında bırakılmıştır. Örnek verilecek olursa, iki şeritli bir yolda iki araç kırmızı ışıktaki yan yana durduğunda, arkadan gelecek taşıtlar için durmak bir seçenek olmaktan çıkacaktır. Yine bu sınır şartı her bir şerit için de ayrı ayrı tatbik edilmektedir. Buradaki 6 m ve 1 m/s değerleri, farklı kavşaklar için değiştirilebilmek üzere dinamik parametreler olarak atanmıştır.
4. Bir taşıt için $t_n < t_s$ ise, bu taşıtın yeşil ışıktaki geçtiği kabul edilecektir. Burada t_n taşıtın ölçülen son konum değerine karşılık gelen zaman değerini, t_s ise görüntüdeki sarı ışık zamanını temsil etmektedir.
 5. Bir taşıtın anlık yatay konumu, çalışılan kavşağa göre dinamik olarak belirlenen bir parametre ile sınırlandırılmıştır. Bu sayede sola veya sağa dönebilmek için dönüş ceplerine giren ve farklı sinyal fazlarına tabi olan taşıtlar, analiz kapsamı dışında bırakılmıştır.
 6. $t_1 > t_s + t$ şartını sağlayan taşıtlar, analiz kapsamı dışında bırakılmıştır. Burada t_1 değeri taşıtın ilk ölçülen konumuna karşılık gelen zaman değerini temsil etmektedir. Tip II ikilem bölgesinin durma çizgisine olan süre ile tanımlandığı birçok çalışmada, bu bölgenin sınırları 2 ila 5-6 s aralığında verilmiştir. Ölçülen alana sarı ışık anından belirli bir süre sonra giren sürücülerin, kırmızı ışığı net bir şekilde görebilecekleri düşünüldüğünden, bu noktada yapılacak ihlallerin sarı ışık anında yaşanan kararsızlıkla doğrudan alakalı olmayacağı kabul edilmiştir. t değeri ölçülen alan ve kavşaktaki taşıt hızlarına göre değişken olarak seçilmiştir. Bu değer, sarı ışık süresi 3 saniye olan 11039 numaralı kavşak için 7 saniye olarak belirlenmiştir.
 7. Herhangi bir sebepten ötürü takip sürekliliği sağlanamayan taşıtlar analiz kapsamı dışında bırakılmıştır. Ancak, takibi 100-200 ms gibi çok kısa süreler için kesintiye uğrayan taşıtların kapsam dışında kalmaması adına, kesinti sonrası alınan ilk konum verisi ile kesinti öncesi alınan son konum verisinin farkı arada kalan ve verisi olmayan fotoğraf karesi sayısına bölünerek dağıtılmıştır. Örneğin, 21055 numaralı Derbent (Maslak) kavşağında taşıtın verisi 12. ve 17. kareler arası alınamamışsa, $X_{17} - X_{12}$ farkı beşe bölünüp 12. kareden itibaren eklenerek aradaki karelere atanmıştır. Burada X_n , n. fotoğraf karesinden alınan taşıta ait konum verisidir. Bahse konu kavşaktan alınan görüntü 25 fps olduğundan, 4 kayıp karede hızın ölçülemediği zaman aralığı 160 ms olacaktır. Bu süre ihmal edilebilecek düzeydedir. Yine bu kavşaktaki bir taşıt için birbiri ardına 4 kareden fazla veri

kaybı söz konusuysa ve toplam okunamayan veri sayısı 10'un üzerindeyse, incelenen taşıt analiz kapsamı dışında bırakılmıştır. Buradaki 4 ve 10 parametreleri farklı kavşaklarda değiştirilebilmek üzere dinamik parametre olarak atanmıştır.

Algoritmanın ikinci aşamasında olaylar zaman ve konum ekseninde sıra ile kurgulanarak, ihtiyaç duyulan parametrelerin tespiti sağlanmıştır (Şekil 56). Burada t , X , V ve a sırasıyla zaman, konum, hız ve ivme parametrelerini ifade etmektedir. 1 indisi ölçülen ilk değeri, n indisi ölçülen son değeri, s indisi sarı ışık anını ve $tahmin$ indisi ise tahmin hesabı sonucu bulunan parametreleri tanımlamak için kullanılmıştır.



Şekil 56. Parametre tespit algoritması yardımıyla gerçekleşen olayların konum ve zaman eksenlerine göre tanımlanması

1. $t_1 < t_s$ durumu

İncelenecek taşıtın ölçülen ilk zaman verisinin (t_1), analizi yapılan görüntünün sarı ışık anından (t_s) küçük olması, elimizde bu taşıta ait gerekli tüm verilerin olduğu anlamına gelmektedir. Yukarıdaki sınır şartlarının varlığı, bu zaman aralığındaki taşıtların doğru bir şekilde belirlenebilmesine yardımcı olmaktadır.

Bu şartı sağlayan ve sınır şartları sebebiyle elenmemiş olan her taşıt için aşağıdaki parametrelerin tespiti ve hesabı yapılmaktadır.

X_s : Taşıtın sarı ışık anındaki konumu (m)

V_s : Taşıtın sarı ışık anındaki hızı (m/s)

a_s : Taşıtın sarı ışık anındaki ivme değeri (m/s²)

$DTI = X_s$, durma çizgisine olan mesafe (m)

$TTI = \frac{DTI}{V_s}$, durma çizgisine olan zaman (s)

Burada X_s , V_s ve a_s parametreleri sırasıyla taşıtın sarı ışık anında kaydedilen konum, hız ve ivme değerlerine karşılık gelmektedir.

2. $t_1 > t_s$ durumu

İncelenecek taşıtın ölçülen ilk zaman verisinin, incelenen görüntünün sarı ışık anından büyük olması, taşıtın sarı ışık anında incelenen alana henüz girmediğini göstermektedir. Alınan görüntülerdeki kamera açıları sebebiyle karşılaşılan bu problem, bir meçhul süre (m) tanımlanarak, taşıtın sarı ışık anındaki hız ve konum parametrelerinin tahmin edilmesiyle çözülmeye çalışılmıştır.

Bu şartı sağlayan ve sınır şartları sebebiyle elenmemiş olan her taşıt için aşağıdaki parametrelerin hesabı yapılmaktadır.

m : $t_1 - t_s$, meçhul süre (s)

V_{tahmin} : Taşıtın sarı ışık anındaki hızı (m/s)

X_{tahmin} : Taşıtın sarı ışık anında durma çizgisine göre konumu (m)

İncelenen iki kavşaktaki hız ve eğim değerleri farklı olduğundan, tahmin hesabı her iki kavşak için ayrı ayrı yapılacaktır. İşlem bütünlüğünün daha kolay görülebilmesi adına, tahmin hesabındaki denklemler işlem sırasına uygun bir akış içerisinde ve tek parça olarak sunulmuştur.

➤ 11039 numaralı Alibeyköy Kavşağı:

Bu kavşakta, hızlar görece düşük olduğundan, taşıtın ölçüm yapılmayan bölgede ivmesiz olarak hareket ettiği kabul edilmiştir. V_1 (m/s) taşıtın ölçülen ilk üç hız değerinin ortalaması olmak üzere, sarı ışık anındaki hız değeri,

$$V_{tahmin} = V_1 \quad (31)$$

şeklinde tanımlanır. Taşıtın sarı ışık anındaki konumu ($X_{tahmin} = DTI_{tahmin}$),

$$X_{tahmin} = (Yolun\ Uzunluğu - X_1) + (V_{tahmin} \cdot m) \quad (32)$$

bağıntısı yardımıyla elde edilir. Burada X_1 taşıtın ölçülen ilk konumuna (m) ve yolun uzunluğu ifadesi ise ölçüm bölgesinin uzunluğuna (m) karşılık gelmektedir. Son olarak taşıtın sarı ışık anında durma çizgisine olan tahmini süresi (s), TTI_{tahmin} ,

$$TTI_{tahmin} = \frac{DTI_{tahmin}}{V_{tahmin}} \quad (33)$$

şeklinde tanımlanır.

Alibeyköy kavşağından elde edilen görüntüler incelendiğinde, ölçüm alanının gerisinde bulunan taşıtların görece düşük hızlarda seyahat etmesi nedeniyle birçok sürücünün frenleme yapmadığı gözlenmiştir. Bu sebeple tahmin neticesinde esas olarak ihmal edilen durum, tahmin bölgesindeki taşıt hızlanmasıdır. Ancak bu kavşakta, sarı ışık anındaki ortalama hız değeri 11,19 m/s (40,31 km/sa) olarak tespit edilmiştir. Trafikteki taşıtların büyük çoğunluğu, 40-50 km/sa hız değerlerine çok kısa bir sürede erişebildiğinden, tahmin bölgesindeki taşıtların sabit hızla hareket ettiği kabul edilmiştir.

➤ 21055 numaralı Maslak Kavşağı:

Bu kavşakta taşıtların görece yüksek hızlarda seyahat etmesi ve kavşak kolunun negatif eğime sahip olması sebebiyle, duran ve devam eden taşıtların bilinmeyen bölgede ivmeli olarak hareket ettikleri kabulü yapılmıştır. Tüm sürücüler için intikal reaksiyon süresi 1 saniye olarak kabul edilmiştir. V_1 ölçülen ilk üç hız değerinin ortalaması (m/s) ve a hızlanma ivmesi (m/s^2) olmak üzere, devam eden bir taşıt için kinematik hareket formülleri yardımıyla,

$$V_1 = V_{tahmin} + (m-1) \cdot a \quad (34)$$

bağıntısı yazılabilir. Burada kullanılan $(m-1)$ ifadesi, sürücünün intikal reaksiyon süresi sonunda ivmelendiği sürenin saniye cinsinden değeridir. Sarı ışık anında devam kararı veren bir sürücünün negatif eğimin de etkisiyle, olağan dışı durumlar haricinde ivmelendiği kabul edilebilecektir. Gazis vd. tarafından önerilen ve Denklem 3'te verilen ampirik bağıntı, ilk hızın V_{tahmin} olduğu kabulü ile a yerine yazıldığında,

$$V_1 = V_{tahmin} + (m-1) \cdot (4,90 - 0,147 \cdot V_{tahmin}) \quad (35)$$

bağıntısı elde edilir. Denklem 35'teki ifade düzenlenerek tekrar yazıldığında sarı ışık anındaki hız (V_{tahmin}),

$$V_{tahmin} = \frac{V_1 - 4,90 \cdot m + 4,90}{(1,147 - 0,147 \cdot m)} \quad (36)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem 36 yardımıyla hesaplanan hız verisi ve diğer bilinen parametreler yardımıyla X_{tahmin} ,

$$X_{tahmin} = \underbrace{(Y.U. - X_1)}_{L_1} + \underbrace{V_{tahmin} \cdot m + 0,5 \cdot a \cdot (m-1)^2}_{L_2} \quad (37)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanır. Denklem 37'de eşitliğin sağ tarafında L_1 ile gösterilen uzunluk taşıtın ilk ölçüm anında kavşak koluna olan mesafesini, L_2 ile gösterilen uzunluk ise taşıtın meçhul süre boyunca ivmeli olarak katettiği mesafeyi ifade etmektedir. Son olarak TTI_{tahmin} parametresi, Alibeyköy kavşağındakine benzer şekilde Denklem 33 yardımıyla hesaplanmıştır.

Devam eden tüm taşıtların ivmelenerek ölçüm alanına geldikleri kabulü, yapılan tahmin hesabında bir miktar hatanın olmasına sebebiyet verecektir. Ölçüm alanına sarı ışık sonrasında trafik yoğunluğu sebebiyle düşük hızlarda giren bazı taşıtların, yeteri kadar ivmelenemeyeceği ilk bakışta düşünülebilir. Ancak sarı ışık anını 1 saniye geçtikten sonra (intikal reaksiyon süresince hız sabit olarak kabul edildi) ölçüm alanına giren ve trafik yoğunluğu sebebiyle ivmelenememiş bir taşıtın, yaklaşık 75 metrelik ölçüm mesafesini katederek devam kararı vermesi, kavşaktaki trafiğin olağan akışında mümkün görünmemektedir. Nitekim bu durum, tahmin hesabı öncesinde vaka görüntülerinin incelenmesi neticesinde doğrulanmıştır.

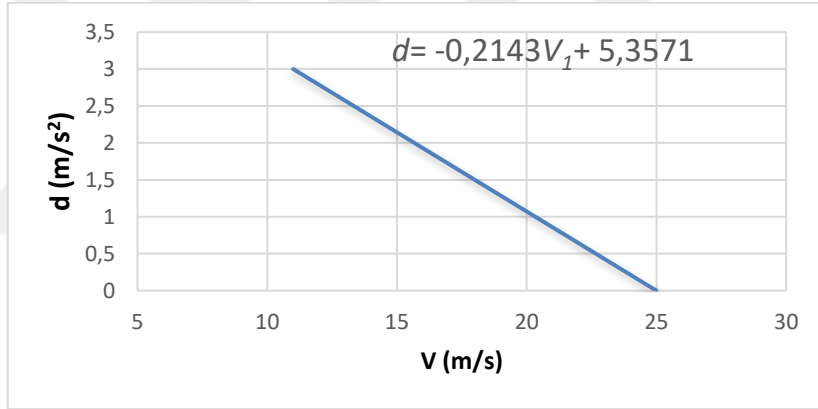
Maslak kavşağında sarı ışık anında ölçüm bölgesinde olmayan ve dur kararı veren bir sürücünün, tahmin bölgesinde belirli bir süre fren yaptığı kabul edilmiştir. Bu frenleme süresi (f_s) meçhul sürenin (m) bir fonksiyonu olarak saniye cinsinden,

$$f_s(m) = \begin{cases} 3 + \frac{(m-4)}{4} & ; m > 4 \text{ s,} \\ (m-1) & ; 1 \text{ s} < m \leq 4 \text{ s} \end{cases} \quad (38)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Bu tanımlama ile, ölçüm alanına sarı ışık anından 4 saniye sonra giren bir taşıtın 3 saniye boyunca fren yaptığı kabul edilmiştir. 4 saniyeden daha büyük m değerine sahip olan taşıtların, kavşağa daha uzak olacağı düşünülerek frenleme eyleminin sürekli olmayacağı öngörülmüştür. Fren ivmesi için, sınırları $d_{max} = 3 \text{ m/s}^2$, $d_{min} = 0$ olan doğrusal ivme fonksiyonu,

$$d = -0,2143 \cdot V_1 + 5,3571 \quad (39)$$

bağıntısıyla tanımlanmıştır. Denklem 43'teki bağıntı ile, hızı $V_1=11 \text{ m/s}$ ve altında olan taşıtlar için yavaşlama ivmesi 3 m/s^2 olarak belirlenmiştir. V_1 değerindeki artışla birlikte taşıtların yavaşlama ivmesinin aldığı değerler doğrusal olarak azalmaktadır. Hızı $V_1=25 \text{ m/s}$ ve üzerinde olan taşıtların ise ölçüm başlangıcına kadar yavaşlamadıkları kabul edilmiştir.



Şekil 57. Duran taşıtlar için belirlenen doğrusal ivme fonksiyonu

Frenleme süresi ve yavaşlama ivmesinin belirlenmesiyle birlikte, taşıtın sarı ışık anındaki hız ve konum değerleri (V_{tahmin} , X_{tahmin}),

$$V_{tahmin} = V_1 + f_s \cdot d \quad (40)$$

$$X_{tahmin} = \underbrace{(Y.U. - X_1)}_{L_1} + \underbrace{V_{tahmin} \cdot m - 0,5 \cdot d \cdot (f_s)^2}_{L_2} \quad (41)$$

bağıntıları yardımıyla hesaplanır. Denklem 41'de eşitliğin sağ tarafında L_1 ile gösterilen uzunluk taşıtın ilk ölçüm anında kavşak koluna olan mesafesini, L_2 ile gösterilen uzunluk ise taşıtın meçhul süre boyunca yavaşlayarak katettiği mesafeyi ifade etmektedir. Son olarak

TTI_{tahmin} parametresi, Alibeyköy kavşağındakine benzer şekilde Denklem 33 yardımıyla hesaplanmıştır.

Duran taşıtlar için yapılan bu tahmin hesabı neticesinde, sürücülerin kavşaktan yaklaşık 75 metre uzaktayken frenlemeye başladığı kabulü yapılmıştır. Görüntüler üzerinde yapılan incelemede, sürücülerin tahmin bölgesinde hızlarını düşürdükleri, ancak esas frenlemenin son 75 metre içerisinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple, yavaşlama ivmesinin hesabında kullanılan Denklem 39'daki bağıntının alabileceği en büyük değer, konforlu bir yavaşlama ivmesi olarak kabul edilen 3 m/s^2 ile sınırlandırılmıştır. Benzer şekilde, frenleme süresinin 3 saniyeyi geçmesi durumunda fren sürekliliğinin bozulduğu kabul edilmiştir. Devam eden taşıtların tahmin hesabında bahsedildiği üzere, yoğun trafik şartlarında duran bir taşıtın fren yapmadan ölçüm başlangıcına varabileceği düşünülebilir. Ancak analiz kapsamında değerlendirilebilmesi için sarı ışık anında şeridin en önünde durması gereken bir taşıtın, ölçüm bölgesine sarı ışık anından 1 saniye sonra girmesi gerçekleşmesi pek mümkün olmayan bir durum olarak kabul edilmiştir. Vaka görüntüleri üzerinde yapılan gözlemler, bu durumu doğrular niteliktedir.

İhtiyaç duyulan parametreler tespit edildikten sonra üçüncü aşamaya geçilir. Bu aşamada sürücülerin sarı veya kırmızı ışık anında aldıkları kararın tespiti yapılacaktır.

1. $t_n \leq t_s + s$ ise, taşıtın sarı ışık anında kavşağı terk ettiği kabul edilecektir. Burada s , sarı ışık süresinin saniye cinsinden değeridir. Bu şartı sağlayan taşıtların t_n anında belirli bir hız değerine sahip olmaları gerekir. Durma çizgisinde çok küçük hızlarla hareket eden ve duramayan taşıtların tespiti için bu şarta ek bir kontrol şartı tanımlanmıştır.

$V_{n,ort,5}$: Taşıtın ölçülen son beş hızının ortalaması

Eğer $V_{n,ort,5} < 1 \text{ m/s}$ ise, taşıt sarıdan çok küçük hızlarla geçti, gözle kontrol et.

Eğer bir taşıt yukarıdaki iki şartı sağlıyor ise, parametrelerin yazdırılacağı Microsoft Excel dosyasının ilk satırına bu not düşülecektir.

2. $t_n > t_s + s$ ise taşıt kırmızıya yakalanmıştır. Bu noktada taşıtın son beş hız değerinin ortalamasına bakılarak sürücünün aldığı karar tespit edilir.

Eğer $V_{n,ort,5} < 1 \text{ m/s}$ ise, taşıt kırmızıda durdu.

Bu noktada, durma çizgisinin çok gerisinde duran taşıtların gözle kontrol edilebilmesi için bir kontrol şartı eklenmiştir. Durma çizgisinin yaklaşık 6-7 metre gerisi, durma eşik değeri olarak kabul edilmiştir.

$X_n < \text{Durma eşik değeri ise, taşıt çok geride durdu, gözle kontrol et}$

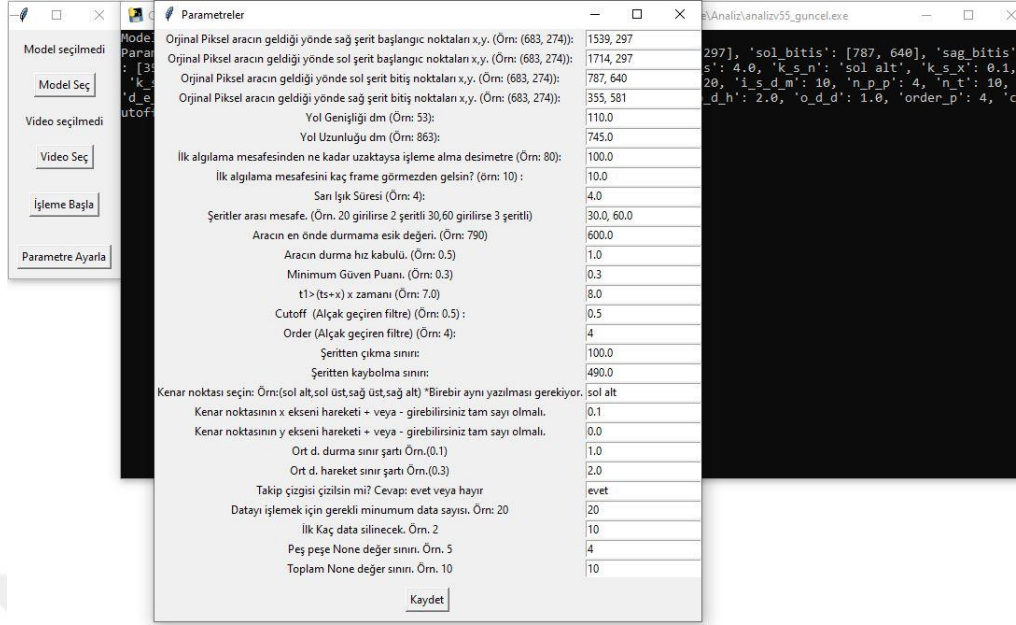
$t_n > t_s + s$ şartı sağlanıyor, ancak $V_{n,ort,5} < 1 \text{ m/s}$ şartı sağlanmıyor ise, taşıtın kırmızıda geçtiği kabul edilecektir. Durma çizgisinde tam olarak duramayan taşıtların gözle kontrol edilebilmesi için bir kontrol şartı eklenmiştir.

Eğer $1 \text{ m/s} \leq V_{n,ort,5} < 3 \text{ m/s}$ ise, taşıt kırmızıda çok yavaş geçti, gözle kontrol et.

1. ve 2. maddede belirlenen hız ve mesafe parametrelerinin tamamı, ihtiyaç halinde değiştirilebilmesi için dinamik parametre olarak belirlenmiştir.
3. 1 ve 2 şartlarını sağlamayan tüm taşıtların, sarı ışık anında durdukları kabul edilecektir.

Son olarak taşıtın ortalama hız değeri, gürültülü ilk konum ve son konum değerlerinin farkının toplam takip süresine bölünmesiyle hesaplanmıştır. Filtrelenmiş veriler yardımıyla elde edilen anlık hız değerlerinin de ortalaması alınarak ölçüm neticesinde yapılan ortalama hata miktarı belirlenmiştir.

Yazılım aşamasının tamamlanmasının ardından, parametre tespiti için bir program oluşturulmuştur (Şekil 58). Bu sayede ihtiyaç duyulan verilerin tespiti kolaylaştırılmaya çalışılmıştır. Trafikte sürekli gözlenen dinamik etkilerin alınacak sonuçları etkileyebileceği ortadadır. Bu sebeple parametre tespit algoritmasının, mümkün olan en basit şekilde oluşturulmasına özen gösterilmiştir. Tasarlanan algoritma neticesinde oluşturulan program, analizin bitmesiyle birlikte taşıta ait istenen tüm verileri bir Microsoft Excel dosyasına yazdırmaktadır. Yine analizi yapılan tüm görüntülerin sonuç görüntüleri kaydedilmiştir. Bu bölümde anlatılan ve çalışmanın verimli bir şekilde yapılabilmesini sağlayan tüm yazılım imkanlarının bir araç olduğu düşünülerek hem veri tabloları ile grafikler, hem de analiz görüntüleri büyük bir titizlikle karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.



Şekil 58. Oluşturulan Parametre Tespit Programı Arayüzü

3. BULGULAR VE İRDELEME

Parametre analizi neticesinde, Alibeyköy kavşağında 1626 ve Maslak kavşağında 2292 olmak üzere toplamda 3918 taşıt verisi elde edilmiştir. Bu bölümde, elde edilen veriler yardımıyla söz konusu kavşaklar için Tip I İkilem Bölgesi Analizi, Kırmızı Işık (RLR), Sarı Giriş Süresi Analizi ve Tip II İkilem Bölgesi Analizi gerçekleştirilecektir. Tespit edilen bulgular irdelenerek yorumlanacak, sonuçlar geçmiş yıllarda yapılan çalışmalar ile mukayeseli olarak ele alınacaktır.

3.1. Elde Edilen Taşıt Verilerine Ait Temel İstatistik Bilgiler

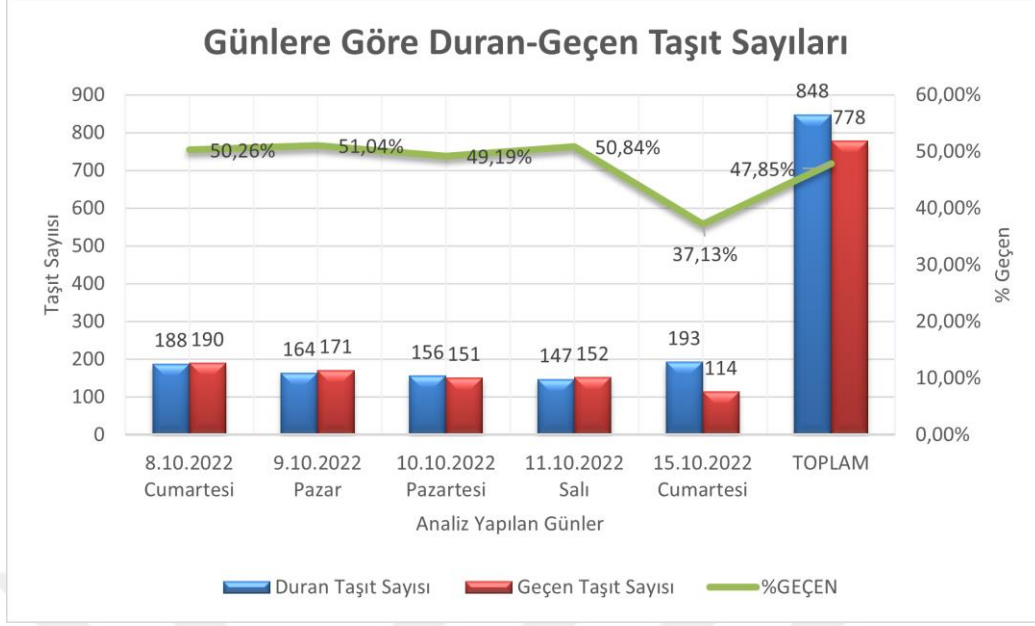
Tip I ikilem bölgesi analizi öncesinde kavşaklardaki genel durumu görebilmek adına, farklı gün, saat ve taşıt tiplerine göre durma-devam etme oranları tablo ve grafikler halinde sunulacaktır.

3.1.1. Günlere Göre Durma Geçme Sayıları

Alibeyköy kavşağı için günlere göre sarı ışık anında duran-geçen taşıt sayıları ve geçme oranları Tablo 19’da ve Şekil 59’da verilmiştir.

Tablo 19. Alibeyköy kavşağı için günlere göre duran-geçen ve toplam taşıt sayıları

GÜNLER	8.10.2022 Cumartesi	9.10.2022 Pazar	10.10.2022 Pazartesi	11.10.2022 Salı	15.10.2022 Cumartesi	TOPLAM
Analiz Edilen Taşıt Sayısı (N)	378	335	307	299	307	1626
Duran Taşıt Sayısı	188	164	156	147	193	848
Geçen Taşıt Sayısı	190	171	151	152	114	778
%GEÇEN	50,26%	51,04%	49,19%	50,84%	37,13%	47,85%



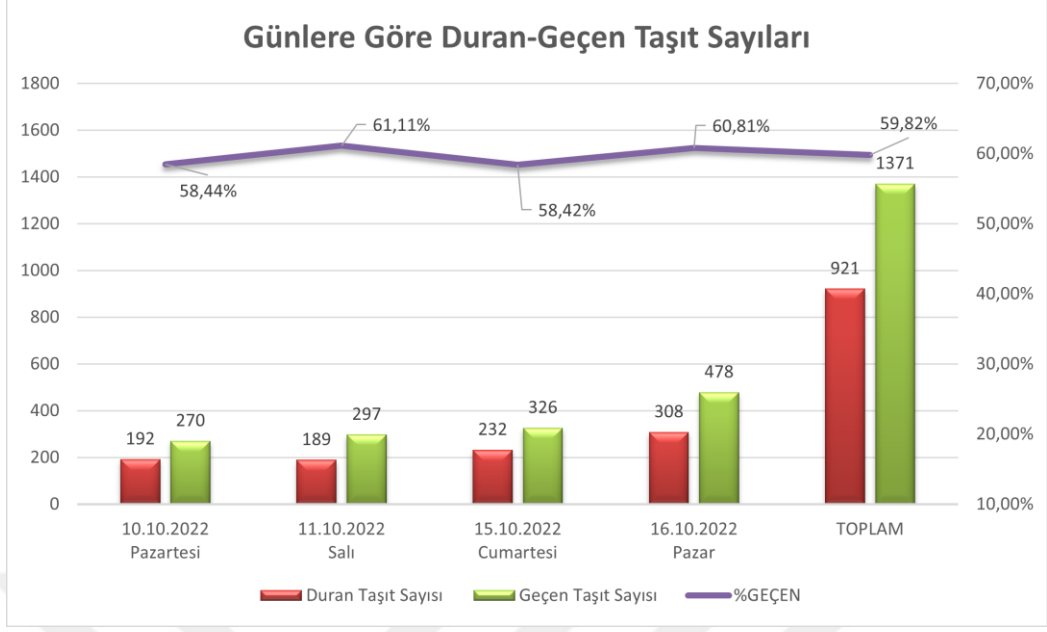
Şekil 59. Alibeyköy kavşağı için günlere göre duran-geçen taşıt sayıları

Tablo 19 incelendiğinde, en fazla verinin 08.10.2022 Cumartesi, en az verinin ise 11.10.2022 Salı günü elde edildiği görülmektedir. Bu kavşakta şerit ihlali yapılarak gerçekleştirilen sola dönüşlerin, hafta içi günlerde daha fazla yaşanması ve bu tür YLR vakalarının kapsam dışında bırakılması, hafta içi günlerde analiz edilen taşıt sayılarının bir miktar azalmasına sebebiyet vermiştir. 15.10.2022 Cumartesi gününün yağmurlu olması ise, diğer cumartesiye nazaran sarı ışığa yakalanan taşıt sayısında azalmaya sebebiyet vermiştir. Yağış olmayan günlerde geçme oranları birbirlerine yakın ve %50 civarında seyrederken, yağış olan günde bu oran %37,13'e gerilemiştir. Toplamda ise %47,85'lik bir geçme oranı söz konusudur.

Maslak kavşağı için günlere göre sarı ışık anında duran-geçen taşıt sayıları ve geçme oranları Tablo 20'de ve Şekil 60'da verilmiştir.

Tablo 20. Maslak kavşağı için günlere göre duran-geçen ve toplam taşıt sayıları

GÜNLER	10.10.2022 Pazartesi	11.10.2022 Salı	15.10.2022 Cumartesi	16.10.2022 Pazar	TOPLAM
Analiz Edilen Taşıt Sayısı (N)	462	486	558	786	2292
Duran Taşıt Sayısı	192	189	232	308	921
Geçen Taşıt Sayısı	270	297	326	478	1371
%GEÇEN	58,44%	61,11%	58,42%	60,81%	59,82%



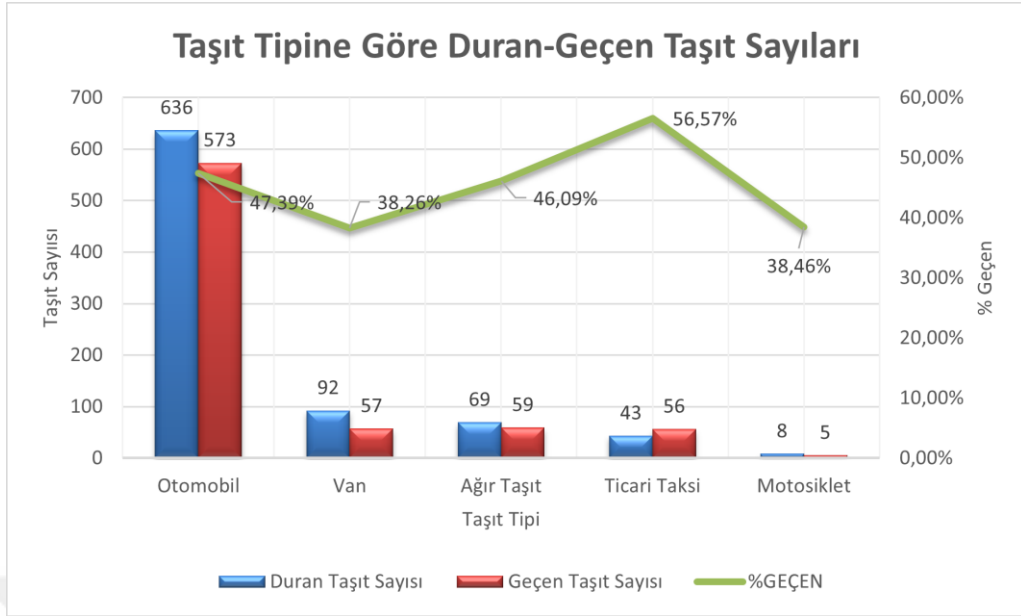
Şekil 60. Maslak kavşağı için günlere göre duran-geçen taşıt sayıları

Tablo 20 incelendiğinde en çok verinin 16.10.2022 Pazar, en az verinin ise 10.10.2022 Pazartesi günü elde edildiği görülecektir. Bu kavşakta sola dönüşler için bekleyen ve van grubuna ait olan taşıtlar, düz doğrultuda devam eden taşıtların görüntüsünü engellemektedir. Hafta içi özellikle sabah ve akşam saatlerinde yaşanan bu durum neticesinde elde edilen veri sayısında bir düşüş yaşanmıştır. Hafta içi günlerde veri sayısında yaşanan düşüşün diğer bir sebebi, zorlamalı akım koşullarının analiz kapsamı dışında bırakılmasıdır. Buna ek olarak, 16.10.2022 Pazar günü trafiğe çıkan van tipi taşıt sayısının az olması söz konusu görüntü engellerini büyük ölçüde ortadan kaldırmıştır. Bu durum tespit edilen taşıt sayısının artmasına sebep olmuştur. Geçme oranları tüm günler için %60 dolaylarında gerçekleşmiştir.

Maslak kavşağının 3 şeritli olması, hız ve trafik değerinin Alibeyköy kavşağına göre daha fazla olması gibi etkenler, bu kavşaktaki geçme oranının Alibeyköy kavşağına göre bir miktar artmasına sebebiyet vermiştir.

3.1.2. Taşıt Tipine Göre Durma-Geçme Sayıları

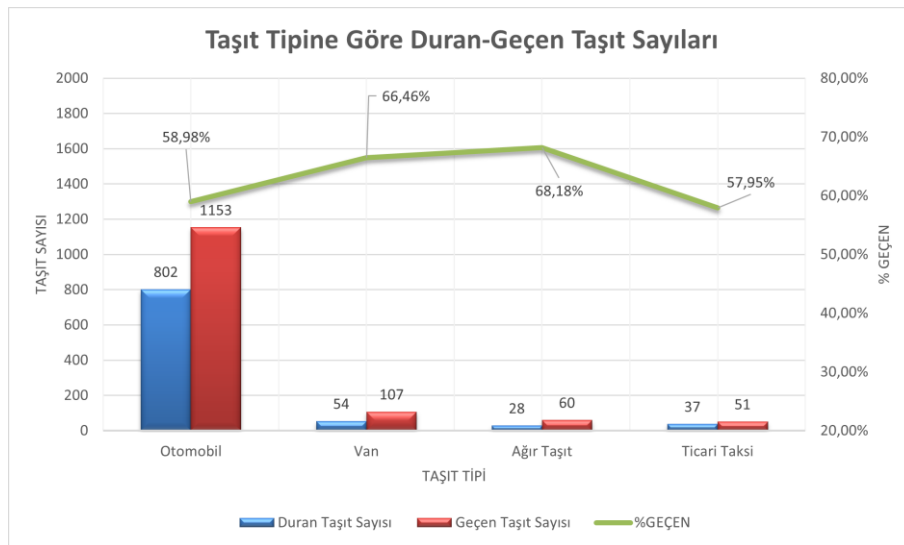
Alibeyköy kavşağı için taşıt tipine göre sarı ışık anında duran-geçen taşıt sayıları ve geçme oranları Şekil 61’de verilmiştir.



Şekil 61. Alibeyköy kavşağı için taşıt tipine göre duran-geçen taşıt sayıları

Şekil 61 incelendiğinde, en çok taşıt verisinin beklenildiği üzere otomobil grubuna ait olduğu görülebilecektir. Motosiklet grubundaki taşıt sayısının az olmasının ana nedeni, bu tipteki taşıtların diğer tiplere nazaran daha az tercih edilmesidir. Bununla birlikte, motosiklet tipi taşıtların küçük olması ve yörüngeleri boyunca diğer taşıtların arkalarında kalabilmesi, halihazırda trafikte oransal olarak az olan bu taşıtların tespitini de zorlaştırmıştır. Geçme oranları incelendiğinde, ticari taksilerin %56,57 ile birinci sırada olduğu tespit edilmiştir.

Maslak kavşağı için taşıt tipine göre sarı ışık anında duran-geçen taşıt sayıları ve geçme oranları Şekil 62’de verilmiştir.

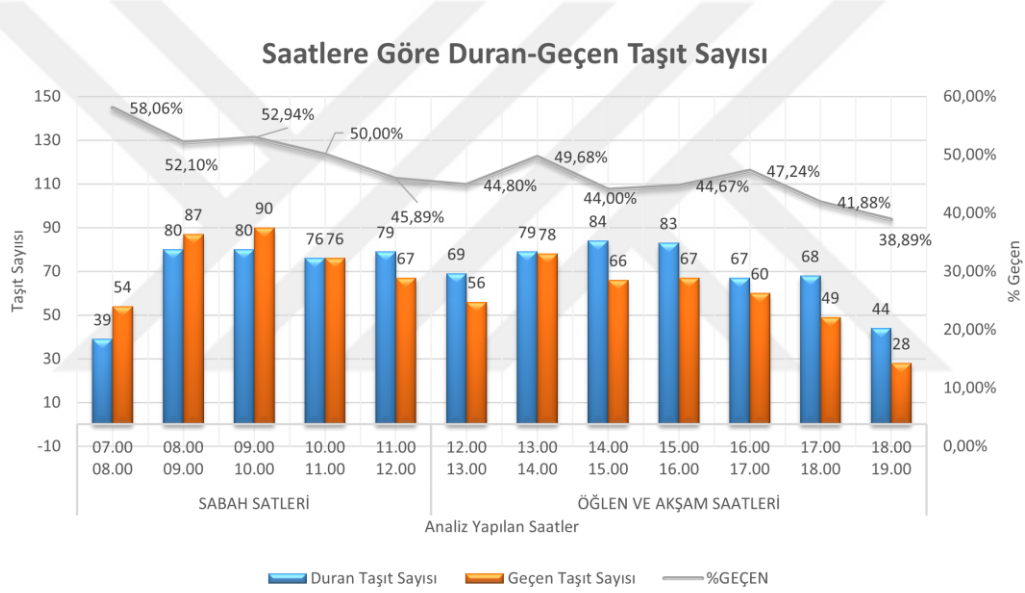


Şekil 62. Maslak kavşağı için taşıt tipine göre duran-geçen taşıt sayıları

Şekil 62 incelendiğinde, en çok taşıt verisinin beklenildiği üzere otomobil grubuna ait olduğu görülebilecektir. Motosiklet grubundaki taşıtların bu kavşaktaki kamera açıları sebebiyle görüş engeline takılması, bu tipin tespitini olanaksız hale getirmiştir. Geçme oranları incelendiğinde, ağır taşıt ve van grubunun benzer geçme oranları ile ilk sıralarda olduğu tespit edilmiştir.

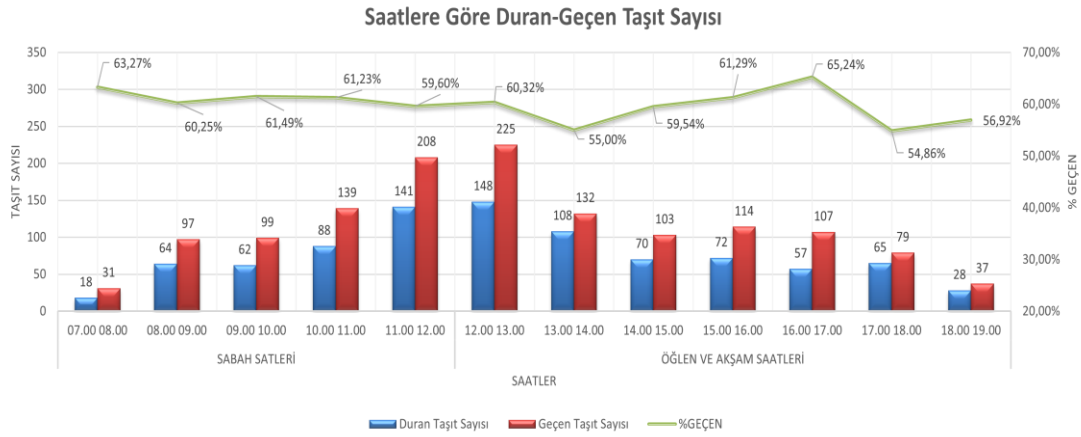
3.1.3. Saatlere Göre Durma-Geçme Sayıları

Alibeyköy kavşağı için saatlere göre sarı ışık anında duran-geçen taşıt sayıları ve geçme oranları Şekil 63'te verilmiştir.



Şekil 63. Alibeyköy kavşağı için saatlere göre duran-geçen taşıt sayıları

Şekil 63 incelendiğinde, 07.00-08.00 ile 18.00-19.00 saatleri arasında veri sayısında bir azalmanın olduğu görülmektedir. Her iki saat aralığına ait görüntülerde, taşıtların farları genellikle açık durumdadır. Bu sebeple, söz konusu saat aralıklarında taşıt takibinde çeşitli güçlüklerle karşılaşmıştır. Bununla birlikte, sabah saatlerinde trafikteki taşıt sayısının az olması, akşam saatlerinde ise sola dönmek isteyen taşıtların diğer saatlere nazaran daha fazla kural ihlali yapması, veri sayısındaki azalmanın ikincil sebepleri olarak sıralanabilir. Grafik incelendiğinde, Alibeyköy kavşağında sabah saatlerindeki geçme oranının, öğlen ve akşam saatlerine nazaran daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Geçme oranının en büyük değeri %58,06 ile 07.00-08.00 saat aralığına aittir.



Şekil 64. Maslak kavşağı için saatlere göre duran-geçen taşıt sayıları

Şekil 64 incelendiğinde, sabah ve akşam saatlerindeki veri sayısının diğer saatlere nazaran daha az olduğu görülebilmektedir. Alibeyköy kavşağında sabah ve akşam saatlerinde karşılaşılan durumlar bu kavşak için de geçerlidir. Bununla birlikte, van grubu taşıtların sabah ve akşam saatlerinde sola dönüş cebinde sıklıkla bulunmaları, diğer şeritlerin kamera tarafından net olarak görülememesine sebebiyet vermiştir. Maslak kavşağında, saatlere göre geçme oranının gün içerisinde fazla değişmediği tespit edilmiştir. 16.00-17.00 saatleri arasında geçme oranı %65,24 ile en büyük değerini almıştır.

3.2. Tip I İkilem Bölgesi Analizi

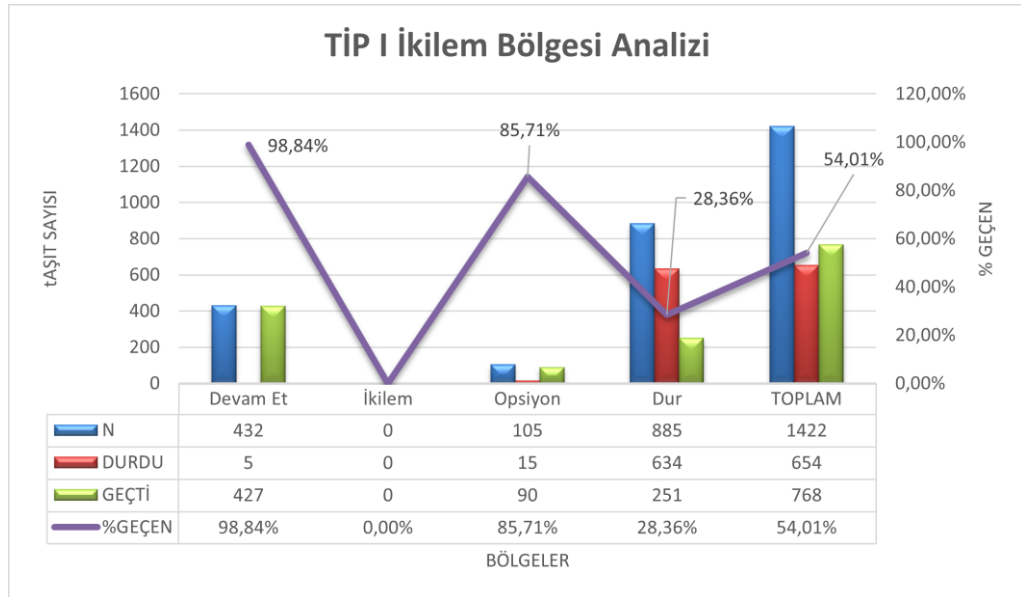
Bu bölümde, elde edilen taşıt verileri ve Denklem 1 ve 2'deki bağıntılar yardımıyla her iki kavşak için Tip I ikilem bölgesi analizi yapılacaktır. Denklem 1 ve 2'deki bağıntılarda bulunan tüm parametrelerin tespiti mümkün olmadığından, literatürdeki yaklaşım temel alınarak bilinmeyen parametreler için bazı kabuller yapılmıştır. Bununla birlikte, iki kavşakta uygulanan süreler ve kavşakların geometrik yapıları birbirinden farklıdır. Özetle, bu analiz için yapılan kabuller ve seçilen parametreler Tablo 21' de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Yapılan kabuller, seçilen ve tespit edilen parametreler yardımıyla her iki kavşaktaki tüm taşıtlar için X_c , X_s , OZ ve DZ bölge sınırları belirlenerek, taşıtların bulundukları bölgeler tespit edilmiştir. Bu bölgelerdeki YLR vakaları ve oranları belirlenerek elde edilen veriler tek bir grafik halinde sunulmuştur.

Tablo 21. Tip I İkilem Bölgesi Analizi İçin Seçilen Parametreler ve Yapılan Kabuller

Parametre	Sembol	Yapılan Kabul	
		Alibeyköy Kavşağı	Maslak Kavşağı
Meçhul Süre	m	$m \leq 3$ olan taşıtlar analize dahil edilmiştir.	$m \leq 5$ olan taşıtlar analize dahil edilmiştir.
İntikal Reaksiyon Süresi	prt	prt=1 s (ITE)	prt=1 s (ITE)
Yavaşlama İvmesi	d	d=3,05 m/s ² (ITE)	d=3,05 m/s ² (ITE)
Hızlanma İvmesi	a	a=0 (ITE)	a=0 (ITE)
Sarı + Koruma Süresi	Y+R	5 s (3 s+2 s, kavşak uygulama değerleri)	5 s (4 s+3 s, kavşak uygulama değerleri)
Kavşak Derinliği	W	10 m (Kavşakta ölçülen değer)	23 m (Kavşakta ölçülen değer)
Taşıt Boyu	L	4,5 m ; 6,5 m; 10 m; 12 m. Otomobil ; Van ; Kamyonet ; Otobüs (Kavşaktaki taşıt kompozisyonuna göre yaklaşık olarak belirlenmiştir)	4,5 m ; 6,5 m; 10 m; 12 m. Otomobil ; Van ; Kamyonet ; Otobüs (Kavşaktaki taşıt kompozisyonuna göre yaklaşık olarak belirlenmiştir)
Hız	Vs	m/s ² ; (Analiz sonucu her taşıt için elde edilmiştir)	m/s ² ; (Analiz sonucu her taşıt için elde edilmiştir)
Konum	X	m ; (Analiz sonucu her taşıt için elde edilmiştir)	m ; (Analiz sonucu her taşıt için elde edilmiştir)

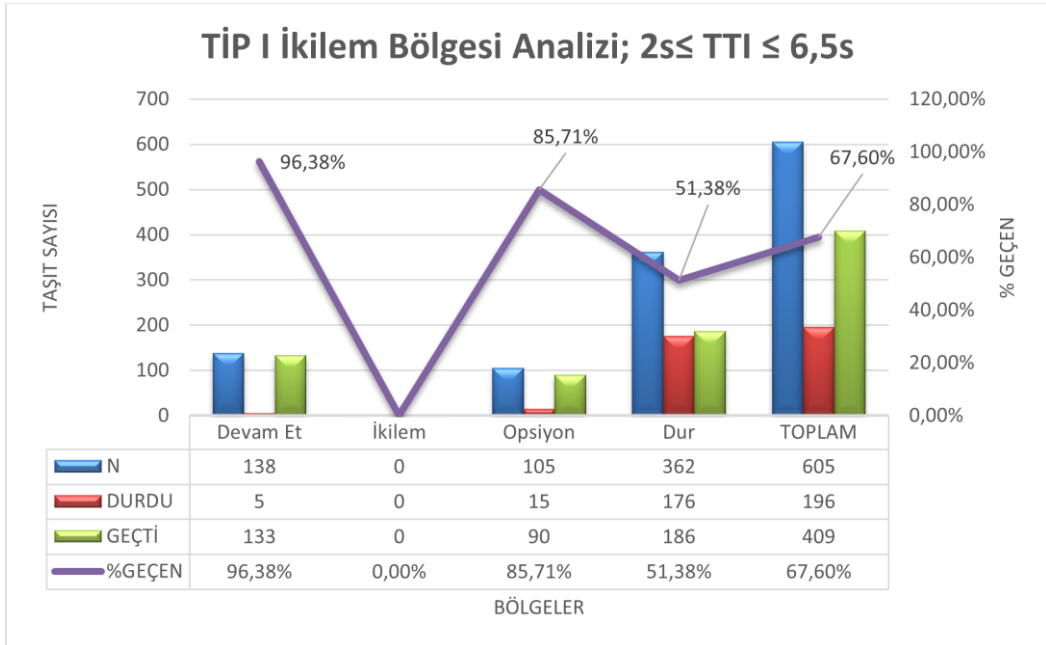
3.2.1. Alibeyköy Kavşağı İçin Tip I İkilem Bölgesi Analizi



Şekil 65. Alibeyköy kavşağına ait Tip I ikilem bölgesi analiz sonuçları

Alibeyköy kavşağı için Şekil 65 yardımıyla elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde irdelenmiştir.

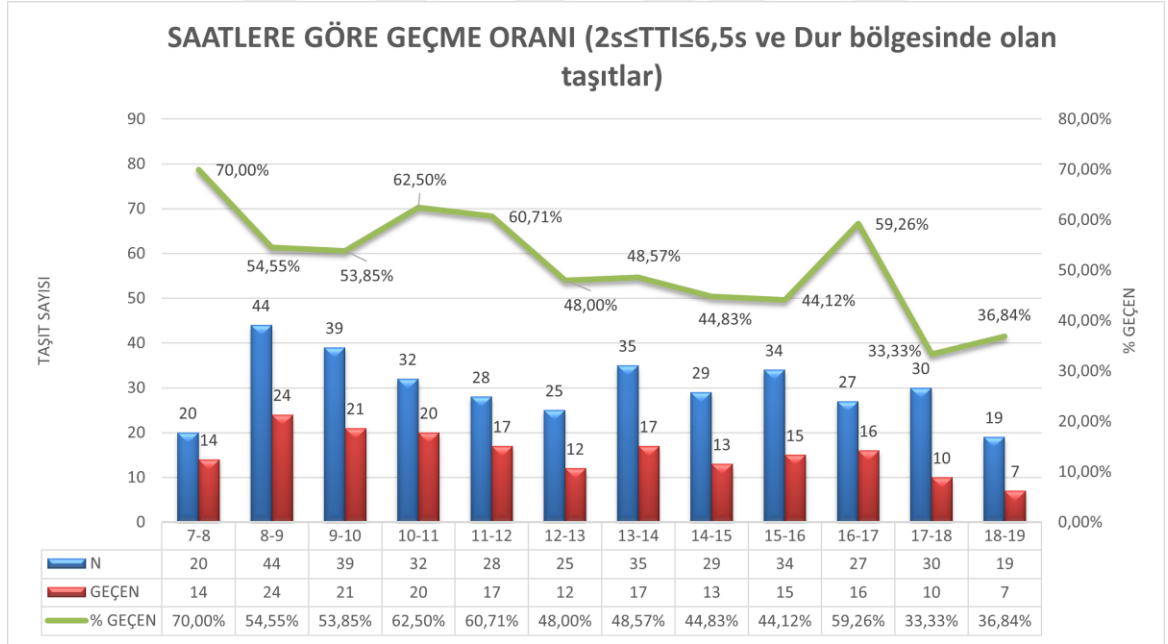
- 1422 sürücünden sadece 24 sürücü için potansiyel ikilem bölgesi oluşumu gözlenmiştir.
- Hiçbir taşıtın sarı ışık anında ikilem bölgesinde kalmadığı tespit edilmiştir.
- Sarı ışık anında hızların düşük olması ve kavşak derinliğinin kısa olmasının bu duruma sebebiyet verdiği düşünülmektedir.
- Alibeyköy kavşağı için sarı ışık anındaki ortalama hız değeri $V_{s,ort} = 11,19$ m/s (40,31 km/sa) olarak tespit edilmiştir.
- Devam et bölgesindeki sürücülerin %98,84'ü kavşağı terk ederek bulundukları bölgeye uygun davranış sergilemişlerdir.
- Opsiyon bölgesinde bulunan sürücülerin devam etme eğiliminde oldukları gözlenmiştir (%85,71).
- Dur bölgesindeki sürücülerin %28,36'sı devam etme kararı vermişlerdir.
- Sarı ışık anında kavşağa çok yakın olan birçok taşıtın devam etme kararı vermesi ve yine kavşaktan çok uzak olan birçok taşıtın durma kararı vermesi beklenen bir durumdur. Bu sebeple, literatürdeki ikilem bölgesi sınırları ve kavşak üzerinde elde edilen tecrübeden faydalanılarak ve $2s \leq TTI \leq 6,5s$ şeklinde bir sınırlama getirilerek yeni bir analiz yapılmasına karar verilmiştir.



Şekil 66. Alibeyköy kavşağı için Tip I İkilem Bölgesi – Sınırlandırılmış Analiz

Alibeyköy kavşağı için Şekil 66'dan elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde irdelenmiştir.

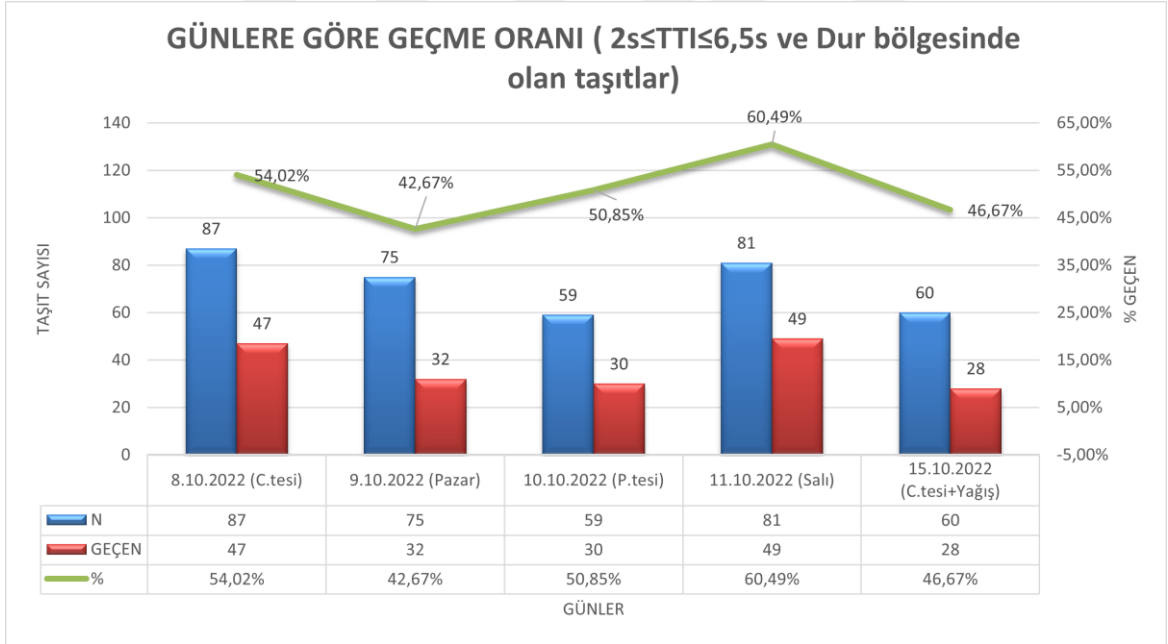
- $2 \leq TTI \leq 6,5$ s sınırları içinde kalan tüm taşıtların, %67,60 oranında devam et kararı verdikleri gözlenmiştir.
- Devam et bölgesinde bulunan taşıtların, bir önceki duruma yakın bir davranış gösterdikleri gözlenmiştir. Alibeyköy kavşağı için devam et bölgesindeki olan taşıtların tamamına yakınının doğru kararı verdikleri görülebilmektedir. Buradan hareketle, Tip I ikilem bölgesi özelinde tanımlanan, arkadan çarpmalı kazaların bu kavşakta gerçekleşme olasılığının oldukça düşük olduğu söylenebilir.
- Opsiyon bölgesinde olan taşıtlar, yeni durumda yine bu sınırlar içerisinde kaldığından aynı sonuçlar elde edilmiştir.
- Sınırlandırılmış durumda, dur bölgesinde bulunan taşıtların %51,38'i devam etme kararı verilmiştir. Beklenmedik olan bu durum neticesinde, dur bölgesinde olan taşıtların davranışlarının farklı koşullar altında incelenmesine karar verilmiştir.
-



Şekil 67. Alibeyköy kavşağı dur bölgesinde olan taşıtlar için Tip I ikilem bölgesi sınırlandırılmış analiz verilerinin saatlere göre dağılımı

Alibeyköy kavşağında dur bölgesinde olan taşıtlar için Tip I ikilem bölgesi sınırlandırılmış analizi, farklı saatler dikkate alınarak yapılmış ve Şekil 67'deki grafik elde edilmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde irdelenmiştir.

- Sabah saatlerinde (07.00-12.00) dur bölgesinde bulunan taşıtların, öğlen ve akşam saatlerine nazaran (12.00-19.00) daha fazla devam etme eğiliminde oldukları gözlenmiştir.
- 16.00-17.00 saat aralığında geçme oranı, öncesi ve sonrasında bulunan ve yakın olan diğer saat aralıklarından daha büyük değer almıştır. Bu durumun iş çıkış saatleriyle alakalı olduğu düşünülmektedir.
- Sürücü davranışındaki bu saatlik değişimlerin, yolculuk türüyle alakalı olabileceği düşünülmektedir.
- Saatlere göre yolculuk türünün detaylı incelemesi, Tip II ikilem bölgesi analizi kapsamında yeniden yapılacaktır.
- Görüntüler üzerinde yapılan inceleme neticesinde 08.00-10.00 ve 17.00-19.00 saatleri arasında tüm kavşak kollarında trafik yoğunluğu yaşandığı gözlenmiştir. Zorlamalı trafik koşullarını barındırmayan, ancak taşıt hareketlerini görece sınırlandıran bu yoğunluğun da devam etme kararındaki düşüşte etkili olduğu söylenebilir.

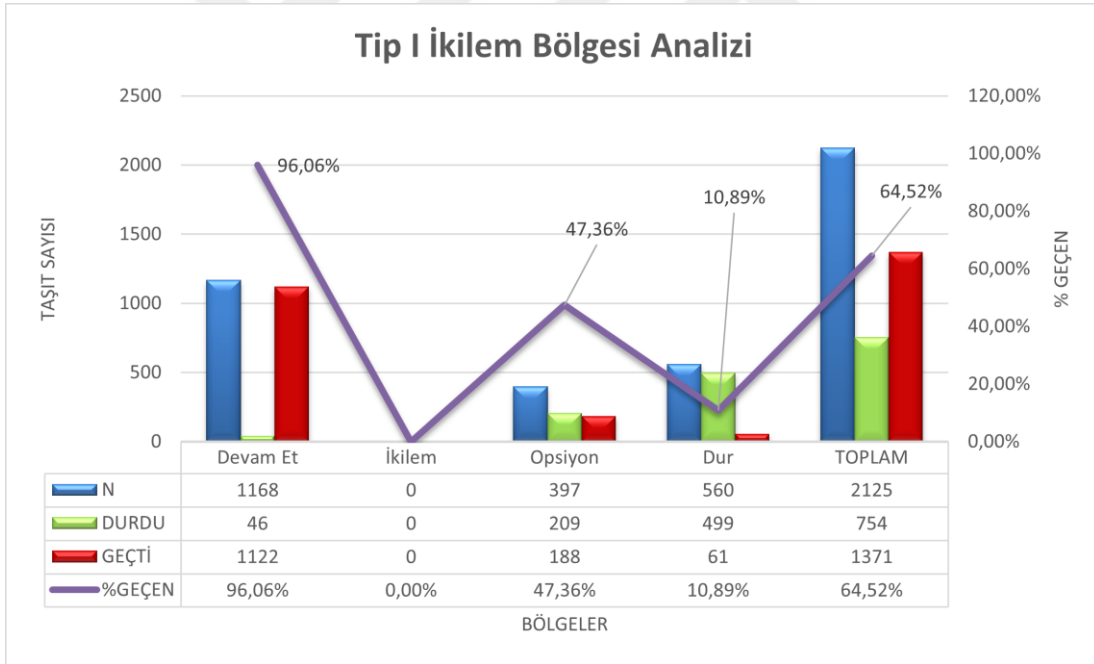


Şekil 68. Alibeyköy kavşağı dur bölgesinde olan taşıtlar için Tip I ikilem bölgesi sınırlandırılmış analiz verilerinin günlere göre dağılımı

Alibeyköy kavşağında dur bölgesinde olan taşıtlar için Tip I ikilem bölgesi sınırlandırılmış analizi, farklı günler dikkate alınarak yapılmış ve Şekil 68'deki grafik elde edilmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde irdelenmiştir.

- Farklı günlere göre yapılan analiz neticesinde, geçme oranının salı günü en büyük değeri aldığı gözlenmiştir.
- Yağışlı olan ve olmayan iki cumartesi günü elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, geçme oranında bir düşüş yaşandığı gözlenmiştir. Bu durumun hava şartları ile alakalı olabileceği düşünülmektedir.
- Hava şartlarının etkisinin daha detaylı incelenmesi, Tip II ikilem bölgesi analizi esnasında yeniden yapılacaktır.
- Pazar günü geçme oranının, diğer günlere oranla daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu durumun yolculuk türüyle alakalı olabileceği düşünülmektedir.
- Günlere göre yolculuk türünün detaylı incelemesi, Tip II ikilem bölgesi analizi kapsamında yeniden yapılacaktır.

3.2.2. Maslak Kavşağı İçin Tip I İkilem Bölgesi Analizi

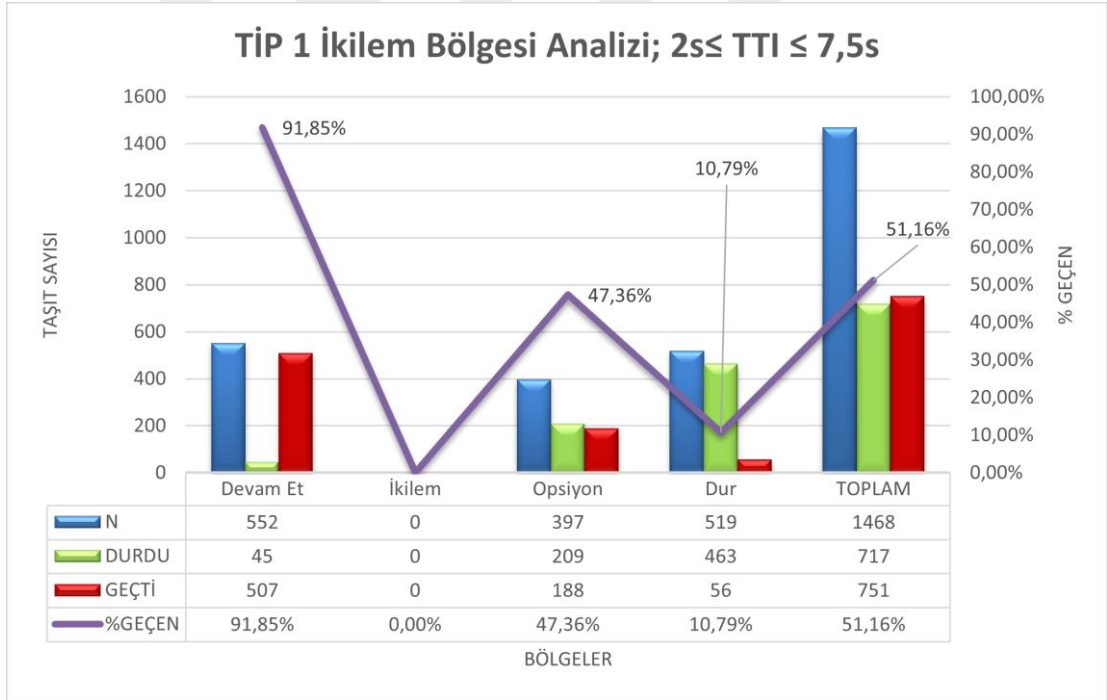


Şekil 69. Alibeyköy kavşağına ait Tip I ikilem bölgesi analiz sonuçları

Maslak kavşağı için Şekil 69 yardımıyla elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde irdelenmiştir.

- 2125 sürücünden sadece 12 sürücü için potansiyel ikilem bölgesi oluşumu gözlenmiştir.
- Hiçbir taşıtın sarı ışık anında ikilem bölgesinde kalmadığı tespit edilmiştir.

- Bu kavşakta ikilem bölgesi oluşumunun düşük olmasının temel sebebinin, 7 saniye olarak belirlenen sarı+koruma süresi olduğu düşünülmektedir.
- Maslak kavşağı için sarı ışık anındaki ortalama hız değeri $V_{s,ort} = 17,04$ m/s (61,35 km/sa) olarak tespit edilmiştir.
- Devam et bölgesindeki sürücülerin %96,06'sı kavşağı terk ederek bulundukları bölgeye uygun davranış sergilemişlerdir.
- Opsiyon bölgesinde bulunan sürücülerin dur/devam et kararını birbirine yakın oranda verdikleri gözlenmiştir (%47,36 devam).
- Dur bölgesindeki sürücülerin %10,89'u devam etme kararı vermiştir.
- 7 saniye olan sarı + koruma süresi ve taşıt hızlarının görece yüksek olması sebebiyle, sınırlandırılmış analiz için Alibeyköy kavşağından farklı olarak $2s \leq TTI \leq 7,5s$ sınırları seçilmiş ve ikinci bir analiz yapılmıştır.



Şekil 70. Maslak kavşağı için Tip I İkilem Bölgesi – Sınırlandırılmış Analiz

Maslak kavşağı için Şekil 70 yardımıyla elde edilen bulgular aşağıda maddeler halinde irdelenmiştir.

- $2s \leq TTI \leq 7,5$ s sınırları içinde kalan tüm taşıtların, %51,16 oranında devam et kararı verdikleri tespit edilmiştir.

- Devam et bölgesinde bulunan taşıtların devam etme oranının, sınırlandırılmamış analiz sonuçlarına benzer şekilde %91,85 değerini aldığı tespit edilmiştir. Alibeyköy kavşağında olduğu gibi, bu kavşakta da devam et bölgesinde bulunan taşıtların çok büyük bir kısmının doğru kararı verdikleri gözlemlenmiştir.
- Opsiyon bölgesinde olan taşıtlar, yeni durumda yine bu sınırlar içerisinde kaldığından, sınırlandırılmamış durumla aynı sonuçlar elde edilmiştir.
- Sınırlandırılmış durumda, dur bölgesinde bulunan taşıtların %10,79'u (56 taşıt) devam etme kararı verilmiştir. Ülkemizdeki koşullar dikkate alındığında hem taşıt sayısı hem de oran olarak beklenebilecek bu durum neticesinde, Maslak kavşağı için başka koşulları kapsayan ek bir analize gerek duyulmamıştır.

3.3. Y+R Değişiminin İkilem Bölgesi Oluşumuna Etkisi

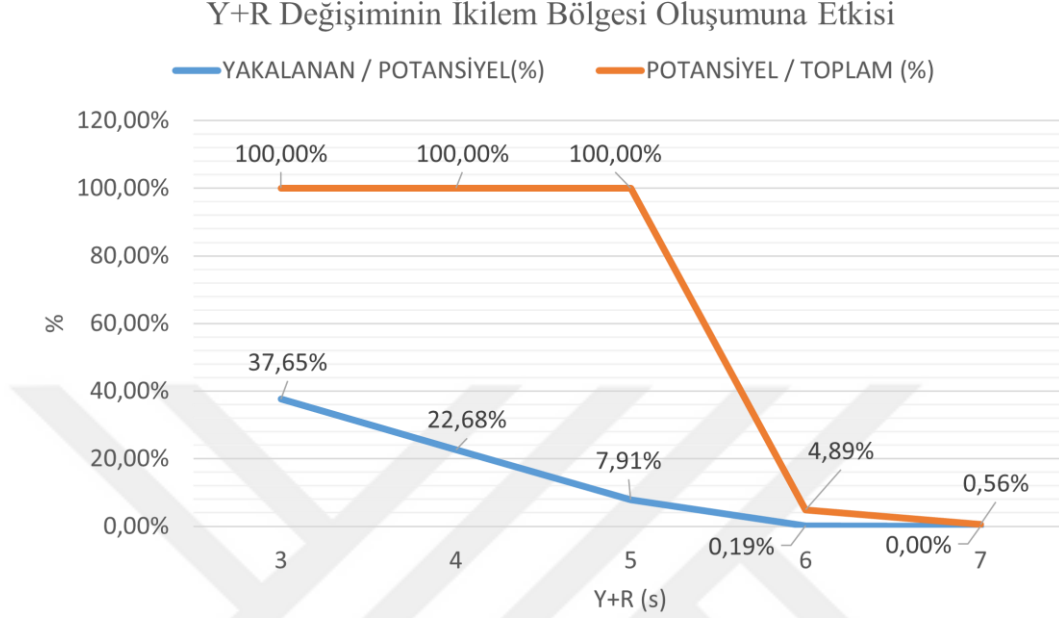
Her iki kavşakta potansiyel ikilem bölgesi oluşturan taşıt sayısının az oluşu ve hiçbir taşıtın ikilem bölgesinde kalmadığının tespiti neticesinde, Maslak kavşağından elde edilen veriler yardımıyla varsayımsal bir analiz yapılmasına karar verilmiştir. Bu analiz kapsamında Maslak kavşağı için, Tablo 21'de belirlenen parametre ve koşullar Y+R haricinde değiştirilmemiş ve Y+R değeri için farklı süre değerleri belirlenmiştir. Bu sayede diğer tüm koşullar aynı kaldığı takdirde Y+R' deki değişimin ikilem bölgesi oluşumuna etkisi incelenmeye çalışılmıştır. Farklı Y+R süreleri için potansiyel ikilem bölgesi oluşum sayısı ve sarı ışığa ikilem bölgesinde yakalanan taşıt sayısı Tablo 22'de verilmiştir.

Tablo 22. Farklı Y+R süreleri neticesinde Tip I ikilem bölgesi oluşturan taşıtlar

	Y+R=3	Y+R=4	Y+R=5	Y+R=6	Y+R=7
Toplam Taşıt Sayısı	2125	2125	2125	2125	2125
İkilem Bölgesi Potansiyeli Olan Taşıt Sayısı	2125	2125	2125	104	12
Sarı Işığa İkilem Bölgesinde Yakalanan Taşıt Sayısı	800	482	168	4	0
Yakalanan / Potansiyel (%)	37,65%	22,68%	7,91%	0,19%	0,00%

Şekil 71'deki grafik yardımıyla, Maslak kavşağı gibi hızların görece yüksek ve derinliği görece uzun olan kavşaklarda, Y+R parametresindeki 1 saniyelik değişimlerin bile ikilem bölgesi oluşumunu ciddi anlamda etkileyebileceği gösterilmiştir. Y+R değerinin 7

saniye yerine 5 saniye alınması durumunda, kavşak kolundaki tüm taşıtların potansiyel olarak ikilem bölgesi oluşturacağı ve bu taşıtların %7,91'inin sarı ışığa ikilem bölgesinde yakalanacakları tespit edilmiştir.



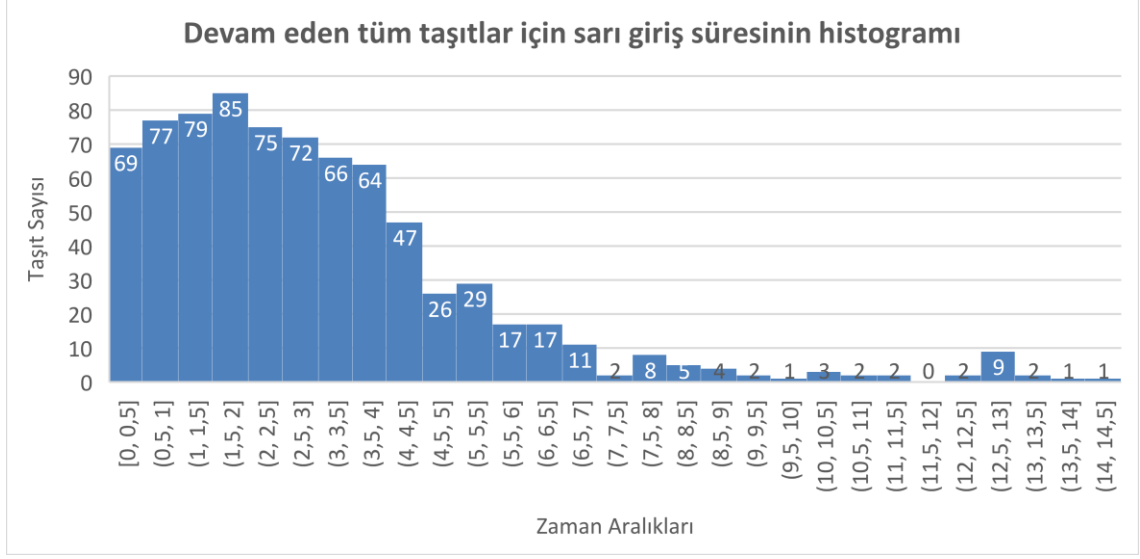
Şekil 71. Maslak kavşağında olası Y+R değişimlerinin ikilem bölgesi oluşumuna etkisi

3.4. RLR ve Sarı Giriş Süresi Analizi

Bu bölümde, devam eden taşıtların sarı ışık sonrası durma çizgisini geçtikleri süre olan sarı giriş süresi yardımıyla, sürücülerin sarı ve kırmızı ışık ihlallerini anlamaya yönelik çeşitli analizler yapılacaktır. Parametre analizi aşamasında sarı giriş süresi, devam eden taşıtların son süre verisinden (t_n) sarı ışık süresinin (t_s) farkı alınarak hesaplanmıştır.

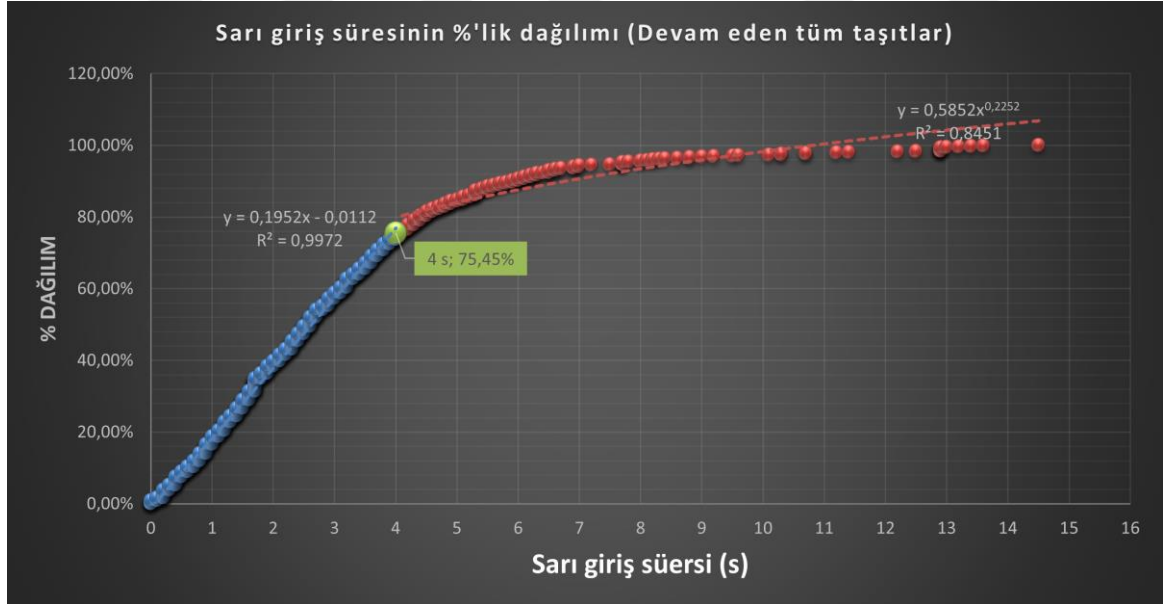
3.4.1. Alibeyköy Kavşağı İçin Sarı Giriş Süresi Analizi

Alibeyköy kavşağında devam et kararı veren ve analizi yapılan 778 taşıtın sarı giriş süresi verileri histogram haline getirilerek kırılmanın gerçekleştiği süre bilgisi belirlenmiştir.



Şekil 72. Alibeyköy kavşağında devam eden tüm taşıtlar için sarı giriş süresinin histogramı

Şekil 72 incelendiğinde, 4 saniyelik sarı giriş süresi sonunda durma çizgisini geçen taşıt miktarında belirgin bir azalmanın olduğu tespit edilmiştir. Sarı giriş süresinin yüzdesel dağılımını görebilmek ve konunun daha net anlaşılabilmesini sağlamak amacıyla, bu süreye ait dağılım grafiği oluşturulmuştur.



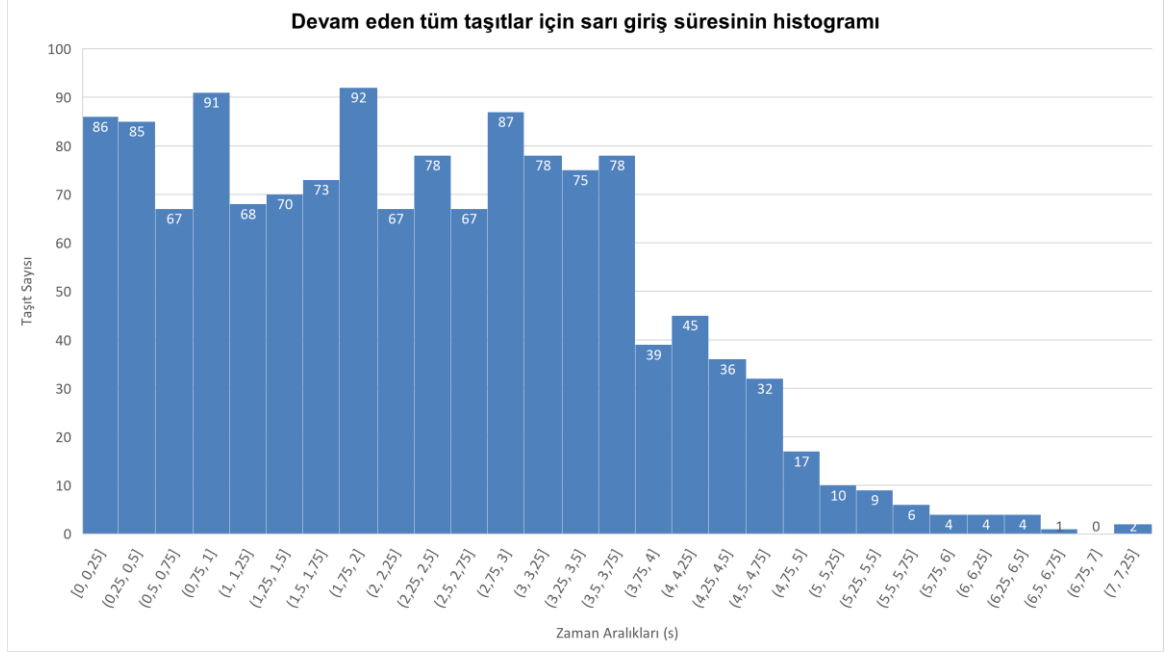
Şekil 73. Alibeyköy kavşağında devam eden tüm taşıtların sarı giriş süresi dağılımı

Şekil 73 incelendiğinde, sarı giriş süresinin ilk 4 saniyelik süreçte doğrusal bir dağılım içerisinde olduğu, 4 saniyeden sonra ise dağılımın doğrusal olmaktan uzaklaştığı görülebilmektedir. İlk 4 saniyelik süre içerisinde devam eden taşıtların yaklaşık %75'i

durma çizgisini geçmiştir. Bu iki grafik yardımıyla, Alibeyköy kavşağında devam eden sürücülerin büyük çoğunluğunun devam et kararlarını, sarı ışığın yanmasını müteakip ilk dört saniye içerisinde durma çizgisini geçecek şekilde verdikleri sonucuna varılabilir. Bu durum, kavşaktaki sürücülerin sarı ışık algısını anlamaya yönelik önemli bir kanıttır. Bununla birlikte, Alibeyköy kavşağında sarı sürenin 3 saniye olarak uygulandığı hesaba katıldığında, doğrusal dağılım içerisinde olan sürücülerin yaklaşık dörtte birinin kırmızı ışık ihlali yaptıkları tespit edilmiştir.

3.4.2. Maslak Kavşağı İçin Sarı Giriş Süresi Analizi

Maslak kavşağında devam et kararı veren ve analizi yapılan 1371 taşıtın sarı giriş süresi verileri histogram haline getirilerek kırılmanın gerçekleştiği süre bilgisi belirlenmiştir.



Şekil 74. Maslak kavşağında devam eden tüm taşıtlar için sarı giriş süresinin histogramı

Şekil 74 incelendiğinde, 3,75 saniyelik süre sonunda durma çizgisini geçen taşıt miktarında belirgin bir azalmanın olduğu tespit edilmiştir. Alibeyköy kavşağında yapıldığı gibi sarı giriş süresinin yüzdesel dağılım grafiği oluşturulmuştur.

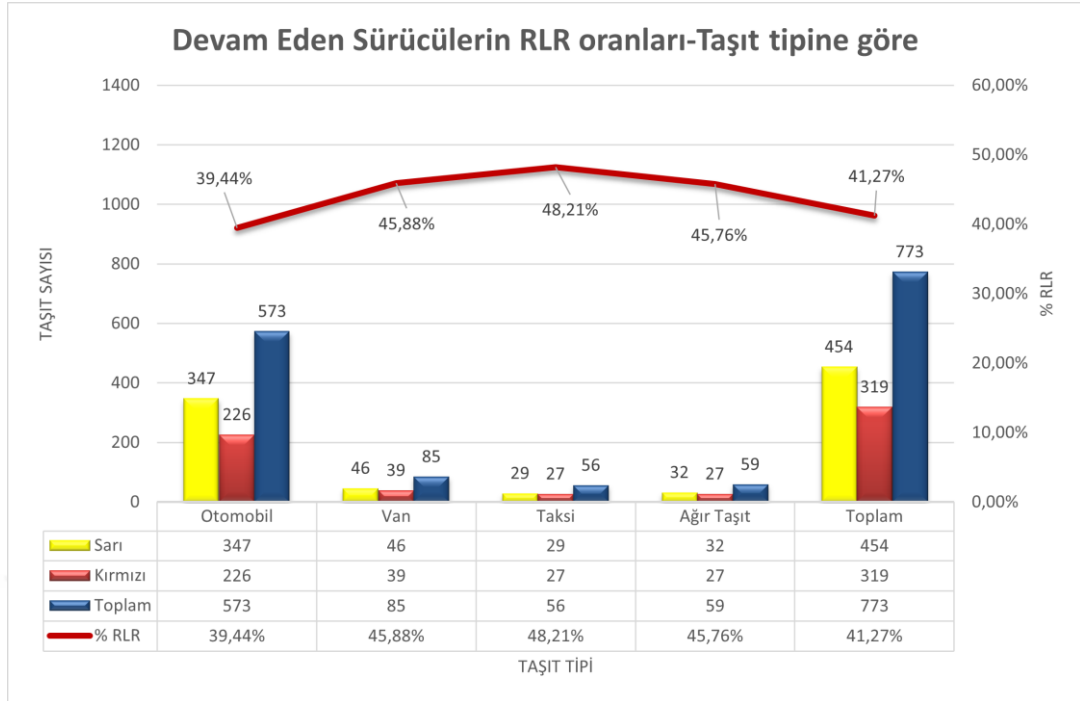


Şekil 75. Maslak kavşağında devam eden tüm taşıtların sarı giriş süresi dağılımı

Şekil 75 incelendiğinde, sarı giriş süresinin ilk 3,75 saniyelik süreçte doğrusal bir dağılım içerisinde olduğu, 3,75 saniyeden sonra ise dağılımın doğrusal olmaktan uzaklaştığı görülebilmektedir. İlk 3,75 saniyelik süre içerisinde devam eden taşıtların yaklaşık %85'i durma çizgisini geçmiştir. Bu iki grafik yardımıyla, Maslak kavşağında devam eden sürücülerin büyük çoğunluğunun devam et kararlarını, sarı ışığın yanmasını müteakip ilk 3,75 saniye içerisinde durma çizgisini geçecek şekilde verdikleri sonucuna varılabilir. Bu durum Alibeyköy kavşağında olduğu gibi, Maslak kavşağında sürücülerin sarı ışık algısını anlamaya yönelik önemli bir kanıttır. Maslak kavşağında uygulanan sarı sürenin 4 saniye olması, %85'lik dilim içerisinde bulunan taşıtların kırmızı ışık ihlali yapmasını engellemiştir. Her iki kavşak için hem histogram dağılımından hem de yüzdesel dağılımdan elde edilen benzer sonuçlar, mukayeseli analiz kısmında yeniden irdelenecektir.

3.4.3. Alibeyköy Kavşağı İçin RLR Analizi

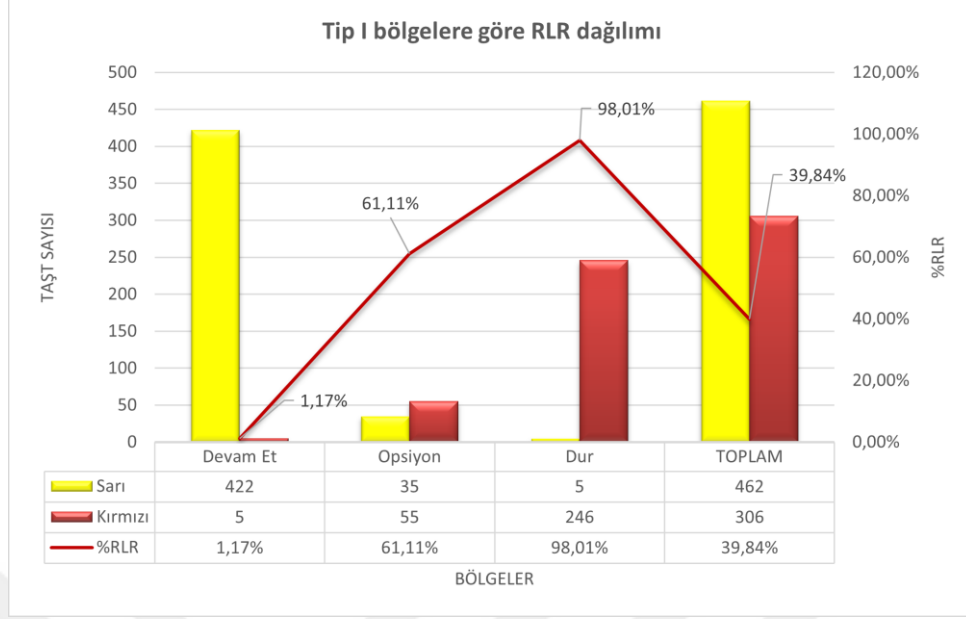
Alibeyköy kavşağında devam kararı veren sürücülerin, taşıt tipine göre RLR dağılımları Şekil 76'da gösterilmektedir.



Şekil 76. Alibeyköy kavşağında devam kararı veren sürücülerin, taşıt tipine göre RLR dağılımı

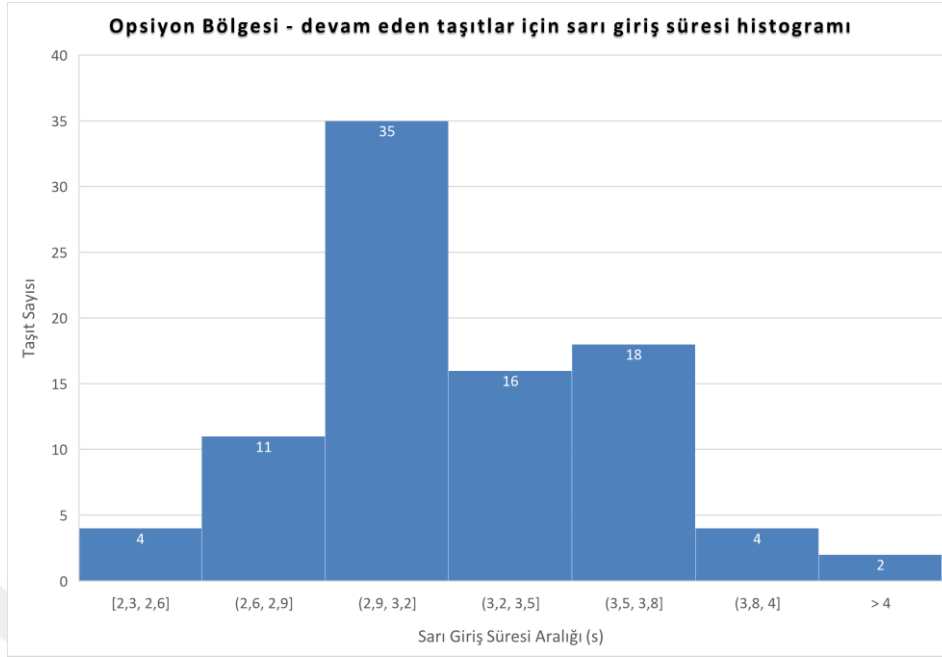
Şekil 76 incelendiği takdirde, devam eden tüm taşıtların %41,27'sinin RLR ihlali yaptıkları görülebilmektedir. Ticari taksi sürücülerini, %48,21 ile RLR en çok yapan grup olarak tespit edilmiştir. Bu kavşakta, RLR ihlali yapan taşıt sayısı ve RLR oranının beklenenin çok üzerinde olduğu söylenebilir. Mukayeseli analiz kısmında bu duruma tekrar değinilecektir.

Alibeyköy kavşağında sarı ışık anında dur bölgesinde olduğu halde, devam kararı veren birçok sürücünün olduğu Şekil 65 ve Şekil 66 yardımıyla tespit edilmiştir. Tip I ikilem bölgesi modellemesine göre, dur bölgesinde olan taşıtların devam etmesinin RLR ihlallerine ve neticesinde trafik kazalarına sebebiyet vereceği öngörülmektedir. Bu öngöründen hareketle, devam kararı veren sürücülerin, bulundukları bölgelere göre yapmış oldukları RLR ihlalleri incelenmiş ve sonuçlar Şekil 77'de sunulmuştur.



Şekil 77. Alibeyköy kavşağında devam kararı veren sürücülerin, bulundukları Tip I bölgesine göre RLR dağılımı

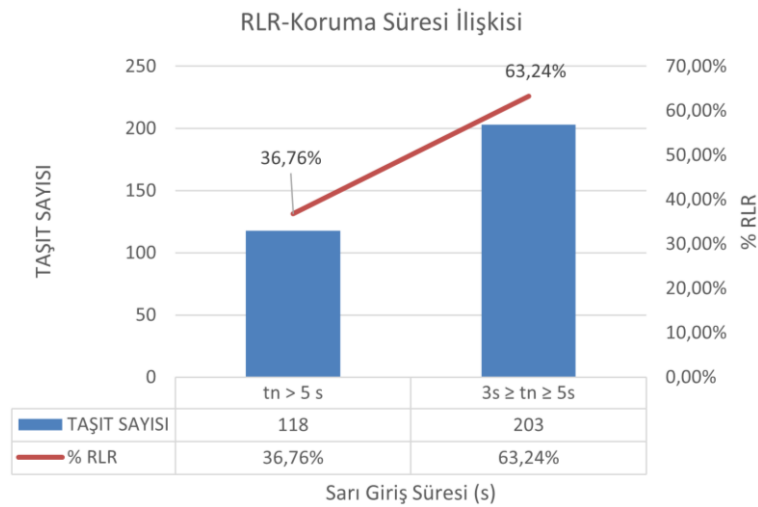
Tip I ikilem bölgesi modelinin temel amacının RLR ihlallerini tespit etmek olmadığı unutulmamalıdır. Bu modelde, Xc mesafesi hesaplanırken öngörülen durum, taşıtın kavşağı tamamen terk etmesidir. Yine bu modele göre taşıtlar, kavşağı Y+R süresinin bitimine kadar terk edebileceklerdir. Şekil 77 incelendiği takdirde, dur ve devam et bölgelerinde olan sürücülerin verdikleri devam kararı neticesinde ortaya çıkan %98,01 ve %1,17 RLR oranlarının, Tip I ikilem bölgesi modelinin RLR öngörüsüyle uyuşmakta olduğu gözlenmiştir. Opsiyon bölgesinde ise devam eden taşıtların %61,11'inin RLR ihlali yaptıkları tespit edilmiştir. Derinliği Alibeyköy kavşağında olduğu gibi görece kısa olan ve koruma süresi 1-2 saniye olarak belirlenen kavşaklarda (Alibeyköy için $W=10m$, $R=2s$) dur bölgesinde olup devam eden taşıtların büyük oranda RLR ihlali yapacakları öngörülmektedir. Bu kavşak özelinde, dur ve devam et bölgelerinde modelin öngördüğü RLR oranlarının saha verileri ile örtüşmesi; modelin tahmin başarısını, bu çalışma kapsamında tespit edilen parametrelerin doğruluğunu, yapılan kabul ve varsayımların uygun olduğunu göstermektedir. Opsiyon bölgesinde ise dur ya da devam et kararlarının ikisi de uygun olacağından, bu bölgede olup devam et kararı veren sürücülerin %61,11 oranında RLR ihlali yapması beklenenin dışında bir durumdur. Bu sebeple, opsiyon bölgesinde olup devam eden taşıtların sarı giriş süreleri histogram haline getirilerek Şekil 78'de verilmiştir.



Şekil 78. Opsiyon bölgesinde bulunup devam eden taşıtlara ait sarı giriş süresi histogramı

Şekil 78 incelendiğinde, opsiyon bölgesinde olup devam eden taşıtlarının tamamının sarı+koruma süresi (5s) bitmeden evvel durma çizgisini geçtikleri görülebilecektir. Yapılan inceleme neticesinde, opsiyon bölgesinde bulunduğu halde devam eden taşıtların %93,33'ünün, ölçülen son hız değerlerini korudukları takdirde kavşağı güvenle terk edebilecekleri tespit edilmiştir. Elde edilen bu değer, Tip I modelinin opsiyon bölgesi için öngördüğü durum ile örtüşmektedir.

Alibeyköy kavşağında RLR ihlali yapan taşıtların koruma süresine göre durumunu görebilmek adına bir analiz yapılmış ve sonuçlar Şekil 79'da sunulmuştur.

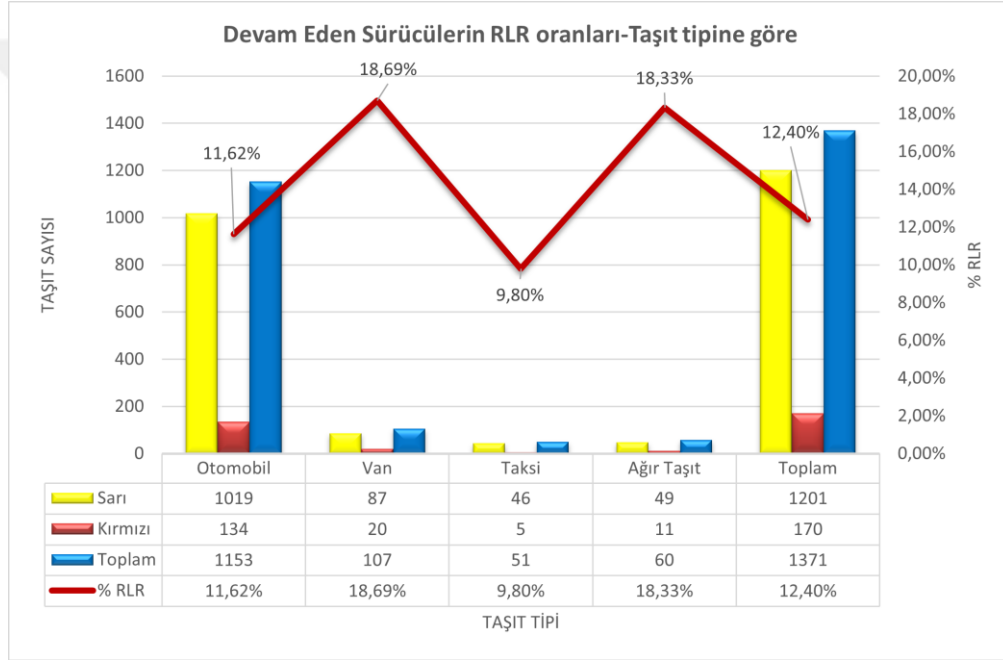


Şekil 79. RLR - koruma süresi ilişkisi

Şekil 79 incelendiğinde, kırmızı ışık ihlali yapan taşıtların %36,76'sının durma çizgisini koruma süresi bitiminden sonra geçtiği görülmektedir. Beş günlük gözlem neticesinde 118 sürücünün bu tarz bir kırmızı ışık ihlali yaptığı tespit edilmiştir. Her ne kadar ortalama taşıt hızları kavşak genelinde düşük olsa da, 5 günlük sürede tespit edilen ihlal miktarının hem oransal hem de sayısal olarak beklenenin çok üzerinde olduğu ortadadır.

3.4.4. Maslak Kavşağı İçin RLR Analizi

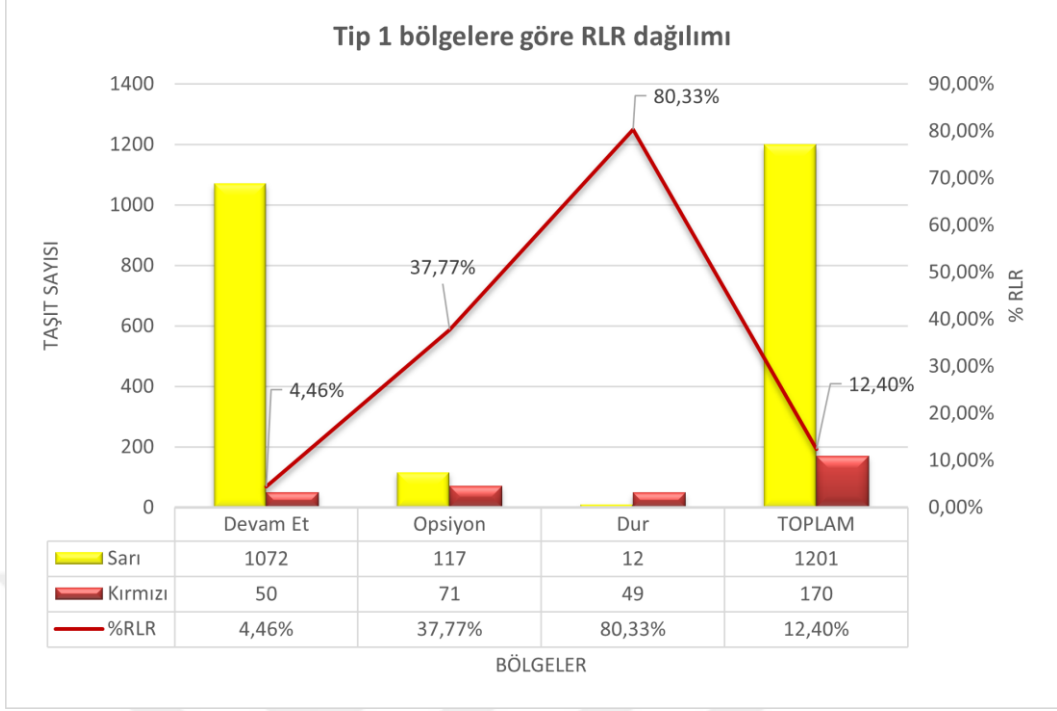
Maslak kavşağında devam kararı veren sürücülerin, taşıt tipine göre RLR dağılımları Şekil 80'de gösterilmektedir.



Şekil 80. Maslak kavşağında devam kararı veren sürücülerin, taşıt tipine göre RLR dağılımı

Şekil 80 incelendiği takdirde, devam eden tüm taşıtların %12,40'ının RLR ihlali yaptıkları görülebilmektedir. Van grubu ile ağır taşıt sürücülerinin, %18,69 ve %18,33 ile RLR ihlalini en çok yapan gruplar olduğu tespit edilmiştir. Bu kavşakta, otomobil ve ticari taksi gruplarının RLR ihlal oranları, diğer iki gruba nazaran oldukça düşüktür.

Maslak kavşağında devam kararı veren sürücülerin, bulundukları bölgelere göre yapmış oldukları RLR ihlalleri incelenmiş ve sonuçlar Şekil 81'de sunulmuştur.

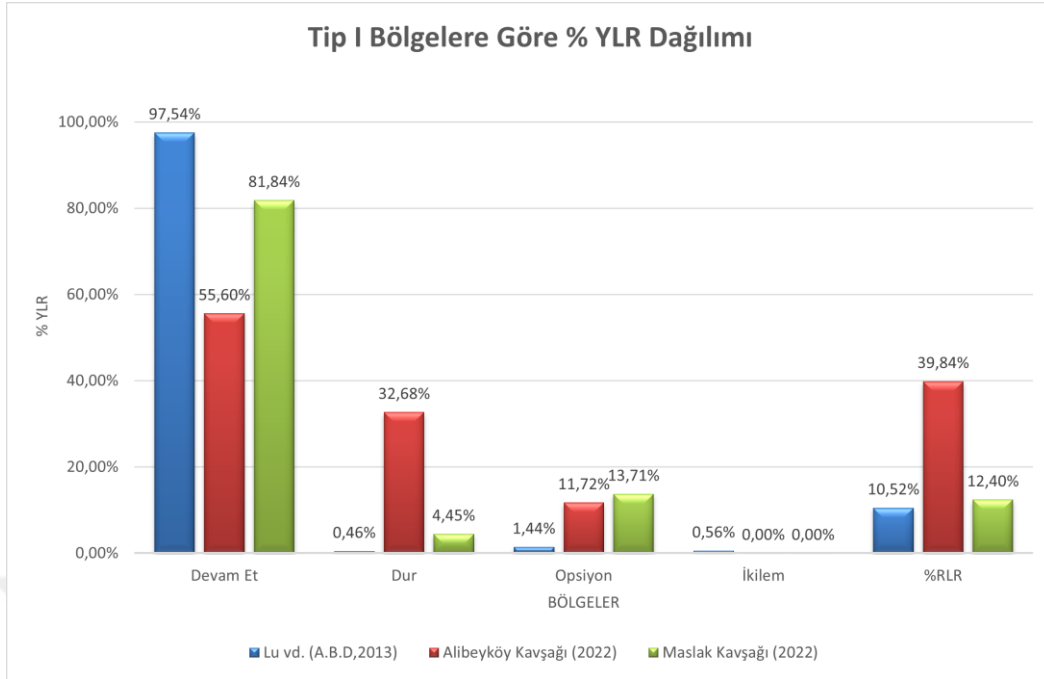


Şekil 81. Maslak kavşağında devam kararı veren sürücülerin, bulundukları Tip I bölgesine göre RLR dağılımı

Şekil 81 incelendiğinde, devam et bölgesinde gerçekleşen RLR oranının %4,46 gibi düşük bir değer aldığı görülmektedir. Dur bölgesinde olmalarına rağmen devam kararı veren sürücülerin çok büyük bir kısmı (%80,38) RLR ihlali yapmıştır. Opsiyon bölgesinde ise RLR oranı %37,77 olarak gerçekleşmiştir. Alibeyköy kavşağına göre, derinliği görece uzun ve Y+R süresi 2 saniye fazla olan Maslak kavşağından elde edilen bu sonuçların, Tip I ikilem bölgesi modelinin öngörüsüyle uyumlu olduğu söylenebilir.

3.5. Tip I İkilem Bölgesi, RLR ve Sarı Giriş Süresi Analiz Bulgularının Mukayeseli Olarak İrdelenmesi

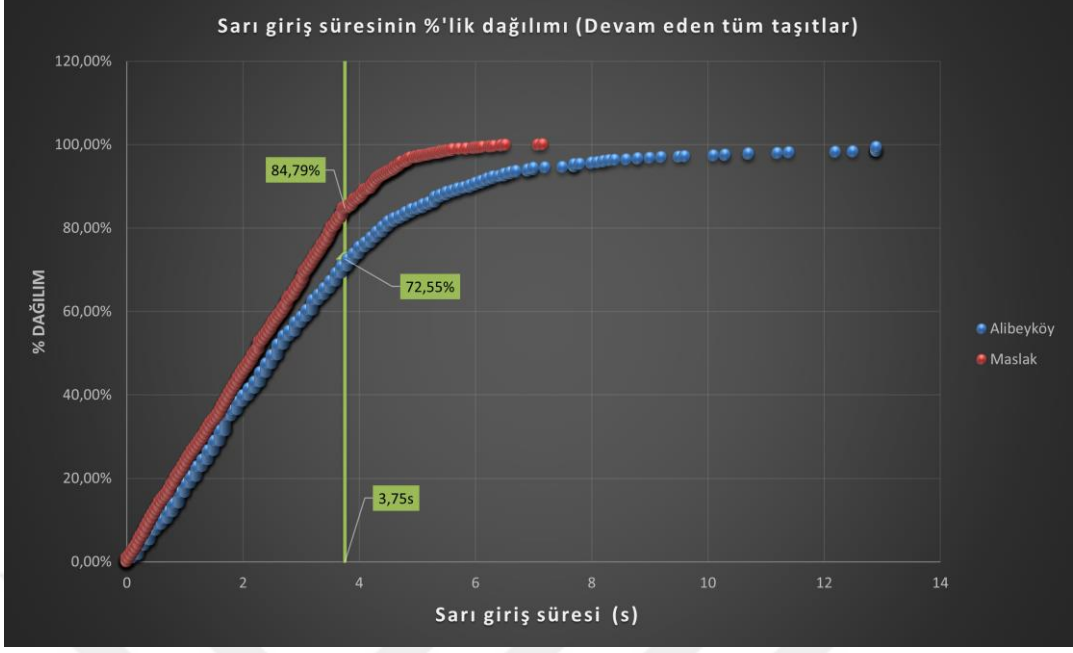
Tip I ikilem bölgesi bulgularının mukayeseli olarak irdelenebilmesi için, Alibeyköy ve Maslak kavşaklarının analiz sonuçları ile Lu vd. tarafından 2013 yılında A.B.D.’de yapılan çalışmanın analiz sonuçları bir arada grafik haline getirilmiştir.



Şekil 82. YLR vakalarının Tip I modeli bölgelerine göre dağılımı ve mukayeseli gösterimi

Şekil 82’de, YLR vakalarının (devam eden taşıtların) Tip I modeli bölgelerine göre dağılımı mukayeseli olarak sunulmuştur. A.B.D’ de yapılan çalışma, sensörler yardımıyla toplanan 6 aylık (217 gün) veri ile gerçekleştirilmiş ve toplamda 32837 YLR vakası tespit edilmiştir. Bu çalışma kapsamında Tip1 ikilem bölgesi hesabına göre iki kavşakta ve toplam 9 günün gündüz saatlerinde tespit edilen YLR vakası 2139’dur.

Şekil 82 incelendiğinde, A.B.D.’ de yapılan çalışmada tespit edilen YLR vakalarının neredeyse tamamının (%97,54) dur bölgesindeki taşıtlar tarafından yapıldığı görülebilecektir. Bu oran Alibeyköy kavşağında %55,60 ve Maslak kavşağında %81,84’tür. %RLR değerleri incelendiğinde, Alibeyköy kavşağında gerçekleşen RLR ihlallerinin diğer iki kavşakta gerçekleşen ihlal sayısından anlamlı şekilde fazla olduğu söylenebilir. Bununla birlikte, A.B.D.’ deki çalışmada verilen %RLR değerleri, kavşağı zamanında terk edemeyen taşıtlara aittir. Başka bir deyişle, %10,52 RLR içerisinde olan taşıtların bir kısmı durma çizgisini kırmızı ışık yanmadan önce geçmiş olabilirler. Elde edilen mukayeseli sonuçlar, A.B.D. ve İstanbul’daki sürücülerinin sarı ışık anında farklı şekilde davrandıklarını göstermektedir. Bu davranış farkının, ülkemizdeki sarı ışık algısıyla ilgili olduğu düşünüldüğünden, Maslak ve Alibeyköy kavşaklarına ait sarı giriş süresi verileri mukayeseli olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 83. Alibeyköy ve Maslak kavşakları için sarı giriş süresi dağılımının mukayeseli olarak gösterimi

Şekil 83 incelendiğinde; sarı süre, ortalama ve %85 hız, eğim, şerit sayısı, trafik yoğunluğu gibi farklı birçok parametreye sahip iki kavşakta, sarı giriş süresi % dağılım eğrilerinin birbirlerine yakın şekilde konumlandığı görülebilmektedir. Alibeyköy kavşağı için doğrusal dağılımın bozulduğu 3,75 saniye değeri referans alındığında, Alibeyköy ve Maslak kavşakları için dağılım değerleri sırasıyla %84,79 ve %72,55 olarak bulunmuştur. Bunun anlamı, sürücülerin %84,79'unun ve %72,55 'inin durma çizgisini 3,75 saniyeye kadar doğrusal bir dağılım içerisinde geçtikleridir. Şekil 72'de ve Şekil 74'te bulunan histogram grafiklerinde bu durum net bir şekilde görülebilecektir. İki kavşakta farklı sarı süreler uygulanmasına rağmen elde edilen dağılım eğrileri benzerlik göstermektedir. Kavşağa yaklaşan bir sürücünün, özel durumlar haricinde o kavşakta uygulanan sarı süreyi bilmesine imkân yoktur. Sarı ışık yandığında anlık tepki vermek durumunda olan sürücüler, olağanüstü bir durum yaşanmadığı takdirde, alışkanlıkları bağlamında hareket edeceklerdir. Eldeki veriler ışığında, incelenen kavşaklardaki devam eden sürücülerin sarı ışık süresini, durmadan önce kavşağı terk edecekleri son zaman aralığı olarak gördükleri sonucuna ulaşılmıştır. İstanbul'da bulunan denetimsiz birçok kavşakta benzer bir durumla karşılaşılacağı düşünülmektedir. Ancak bu yorum, farklı kavşaklardan alınacak veriler ve daha farklı analizler yardımıyla desteklenmelidir.

Hem Tip I, hem de RLR analizinde Alibeyköy kavşağının ihlallere daha açık olduğu gözlemlenmiştir. Ancak kavşakta uygulanan sarı süre her iki analizi de doğrudan etkilemektedir. Bu analizlerin sonucu daha çok, uygulanan süreler ile mevcut kavşak durumunun uyumlu olup olmadığını bize söylediğinden, bir kavşağın diğerinden daha güvenli olduğunu söylemek doğru olmayacaktır. Nitekim kavşak derinlikleri Alibeyköy ve Maslak için sırasıyla 10 metre ve 23 metredir. Maslak kavşağında bir sürücü, durma çizgisini RLR ihlali yapmadan geçse dahi, kat etmesi gereken 23 metre daha mesafe bulunmaktadır. Yine de Şekil 66 ve Şekil 70 değerlendirilecek olduğunda, Maslak kavşağındaki sürücülerin bulundukları Tip I bölgesine göre daha uygun davranış gösterdikleri ortadadır.

3.6. Tip II İkilem Bölgesi Analizi

Bu bölümde, kavşaklardan elde edilen veriler SPSS programı kullanılarak lojistik regresyon analizine tabi tutulacaktır. Sürücünün sarı ışık anında vereceği karar, dur-devam et şeklinde ikili kategorik bir bağımlı değişken olduğundan, literatürdeki birçok araştırmacı bu ikili davranışının tahmini için lojistik regresyon analizinden faydalanmıştır. Sürücü davranışına etkisi olduğu düşünülen her parametrenin analizi ayrı ayrı yapılacak ve $p = 0,05$ düzeyine yakın anlamlı parametreler yardımıyla nihai bir model oluşturulacaktır. Sonuçlar odds oranı (odds ratio, $\exp(B)$) ve Nagelkerke R Square (NRS) yardımıyla yorumlanacaktır.

3.6.1. TTI ve DTI Parametrelerinin Sürücü Davranışına Etkisi

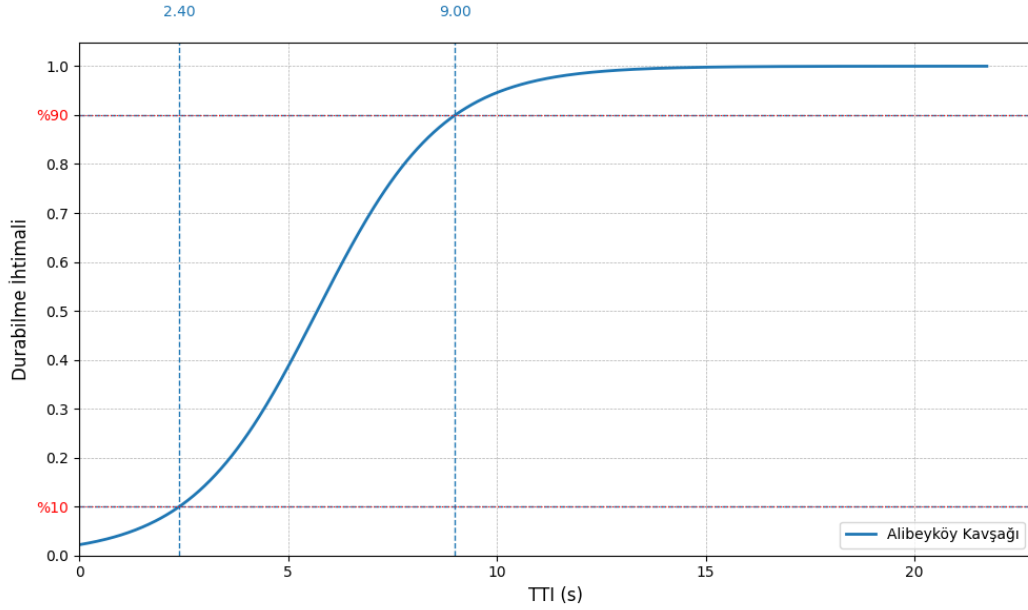
TTI ve DTI parametreleri, sürücülerin dur/devam et kararını etkileyen en önemli parametrelerdir. Yapılan birçok araştırmada bu durum ortaya konmuştur. Bununla birlikte, Zegeer tarafından 1977 yılında tanımlanan Tip II ikilem bölgesi sınırları, DTI parametresi yardımıyla belirlenmektedir. TTI parametresi DTI' ın hız göre bir fonksiyonu olduğundan, her iki parametrenin aynı model içerisinde kullanılması sakıncalıdır. Ancak TTI, içerisinde hız parametresini de barındırmaktadır. Bu sebeple DTI' a göre daha güçlü bir yordayıcı olması beklenmektedir.

Alibeyköy kavşağı için yapılan TTI ve DTI modellerinin sonucu Tablo 23'te verilmiştir.

Tablo 23. Alibeyköy kavşağı için yapılan TTI ve DTI modellerinin sonuçları

	B	S.E.	Wald	Sig.	Exp(B)	95% C.I. for EXP(B)		Cox & Snell R Square	Nagelkerke R Square
						Lower	Upper		
TTI	0,666	,032	445,299	,000	1,946	1,829	2,070	0,498	0,664
Constant	-3,795	,188	408,905	,000	,022				
DTI	,064	,003	459,878	,000	1,066	1,059	1,072	0,469	0,626
Constant	-4,868	,202	401,311	,000	,020				

Tablo 23 incelendiğinde, her iki parametrenin de beklenildiği üzere, $p < .001$ düzeyinde anlamlı olduğu görülebilecektir. NRS (Nagelkerke R Square) değerleri incelendiğinde, TTI modelindeki değerin diğerine göre daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun durum, TTI parametresinin DTI'a göre sürücü davranışını daha güçlü yordadığına işaret eder. Bu sebeple, diğer parametrelerin etkisi incelenirken kurulan modellerde, bağımsız değişken olarak TTI parametresi de kullanılacaktır. Alibeyköy kavşağındaki sürücülerin farklı TTI değerlerine göre durabilme ihtimali, Şekil 84'te grafik olarak sunulmuştur.



Şekil 84. Alibeyköy kavşağı ortalama Tip II ikilem bölgesi sınırları

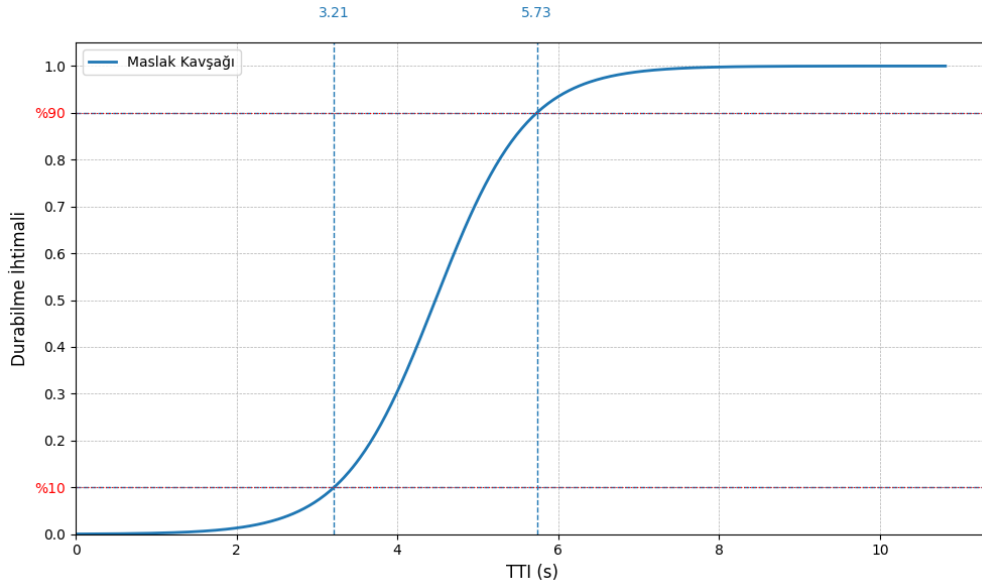
Şekil 84 incelendiğinde, Alibeyköy kavşağı için ortalama TIP II ikilem bölgesi sınırlarının 2,40 s – 9 s aralığında oluştuğu görülebilecektir. 9 saniye olarak tespit edilen ikilem bölgesi bitiş sınırının, literatürde belirtilen 5-5,5 saniye değerinden oldukça büyük olduğu söylenebilir.

Maslak kavşağı için yapılan TTI ve DTI modellerinin sonucu Tablo 24’te verilmiştir.

Tablo 24. Maslak kavşağı için yapılan TTI ve DTI modellerinin sonuçları

	B	S.E.	Wald	Sig.	Exp(B)	95% C.I. for EXP(B)		Cox & Snell R Square	Nagelkerke R Square
						Lower	Upper		
TTI	1,742	,078	496,207	,000	5,711	4,899	6,658	0,592	0,799
Constant	-7,795	,350	495,280	,000	,000				
DTI	,065	,003	533,361	,000	1,068	1,062	1,074	0,519	0,702
Constant	-4,868	,202	580,341	,000	,008				

Tablo 24 incelendiğinde, her iki parametrenin de beklenildiği üzere, $p < .001$ düzeyinde anlamlı olduğu görülebilecektir. NRS değerleri incelendiğinde, TTI modelindeki değer DTI’ya göre daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun durum Alibeyköy kavşağındakine benzer şekilde, TTI parametresinin DTI’ya göre sürücü davranışını daha güçlü yordadığına işaret eder. Bu kavşak özelinde bulunan 0,799 ve 0,702 NRS değerleri, TTI ve DTI parametrelerinin yordama gücünün hem Alibeyköy kavşağından hem de literatürdeki diğer çalışmalardan daha fazla olduğunu göstermektedir. Bu bulgu ilerde ayrı bir başlık altında irdelenecektir. Maslak sürücülerin farklı TTI değerlerine göre durabilme ihtimali, Şekil 85’te grafik olarak sunulmuştur.



Şekil 85. Maslak kavşağı ortalama Tip II ikilem bölgesi sınırları

Şekil 85 incelendiğinde, Alibeyköy kavşağı için ortalama TIP II ikilem bölgesi sınırlarının 3,21 s – 5,73 s aralığında olduğu görülebilecektir. 3,21 saniye olarak tespit

edilen ikilem bölgesi başlangıç sınırının, literatürde belirtilen 2-2,5 saniye değerinde büyük olduğu tespit edilmiştir.

3.6.2. Hava Şartlarının Sürücü Davranışına Etkisi

Alibeyköy kavşağında yağmurlu olan ve olmayan iki cumartesi gününe ait veriler yardımıyla lojistik regresyon analizi gerçekleştirilmiş ve Tablo 25'teki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 25. Alibeyköy kavşağı için hava şartlarının etkisinin incelenmesi

	B	S.E.	Wald	Sig.	Exp(B)	95% C.I. for EXP(B)		Cox & Snell R Square	Nagelkerke R Square
						Lower	Upper		
TTI	,702	,052	180,495	,000	2,019	1,822	2,237		
Yağmur Var	-,445	,243	3,359	,067	,641	,398	1,031	0,515	0,689
Constant	-3,922	,312	158,195	,000	,020				

Tablo 25 incelendiğinde, yağmurlu havanın sürücü davranışına $p=0,05$ düzeyinde anlamlı bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir. Ancak elde edilen p değeri %5'e çok yakın olduğundan, yağmurlu havaların ve dolayısıyla kaplamanın ıslak olmasının, sürücü davranışına bu kavşak özelinde $p=0,067$ düzeyinde anlamlı etkisi olduğu söylenebilir.

Maslak kavşağından alınan kamera kayıtlarında, 2. Bölümde anlatılan ve ilgili idare tarafından uygulanan kısıtlar sebebiyle, yağmurlu olan 15.10.2022 Cumartesi günü dışında başka bir cumartesi gününe ait görüntü bulunmamaktadır. Hava şartlarının etkisi, bu sebepten ötürü yağışlı olan ve olmayan günler baz alınarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 26'da verilmiştir.

Tablo 26. Maslak kavşağı için hava şartlarının etkisinin incelenmesi

	B	S.E.	Wald	Sig.	Exp(B)	95% C.I. for EXP(B)	
						Lower	Upper
TTI	1,744	,078	495,261	,000	5,719	4,905	6,668
Yağmur Var	-,186	,180	1,072	,301	,830	,583	1,181
Constant	-7,757	,352	486,348	,000	,000		

Tablo 26'dan elde edilen veriler yardımıyla, Maslak kavşağındaki yağmurlu havanın sürücü davranışına $p=0,05$ düzeyinde anlamlı bir etkisinin olmadığı söylenebilir.

3.6.3. Günlere Göre Yolculuk Türünün Sürücü Davranışı Üzerindeki Etkisi

Hafta içi ve hafta sonu günler baz alınarak her iki kavşak için lojistik regresyon analizi yapılmış ve sonuçları Tablo 27 ve

Tablo 28’ de ayrı ayrı sunulmuştur.

Tablo 27. Alibeyköy kavşağı için hafta içi ve hafta sonu günlerin analiz sonuçları

	B	S.E.	Wald	Sig.	Exp(B)	95% C.I. for EXP(B)	
						Lower	Upper
TTI	,666	,032	444,778	,000	1,946	1,829	2,070
Hafta Sonu Günler	,004	,156	,001	,981	1,004	,740	1,362
Constant	-3,795	,188	406,533	,000	,022		

Tablo 28. Maslak kavşağı için hafta içi ve hafta sonu günlerin analiz sonuçları

	B	S.E.	Wald	Sig.	Exp(B)	95% C.I. for EXP(B)	
						Lower	Upper
TTI	-1,743	,078	496,684	,000	,175	,150	,204
Hafta Sonu Günler	,166	,162	1,048	,306	1,181	,859	1,623
Constant	7,784	,350	494,015	,000	2401,310		

Her iki kavşakta yapılan analizler neticesinde, hafta içi ve hafta sonu günlerde yapılan yolculukların sürücü davranışına $p=0,05$ düzeyinde anlamlı bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

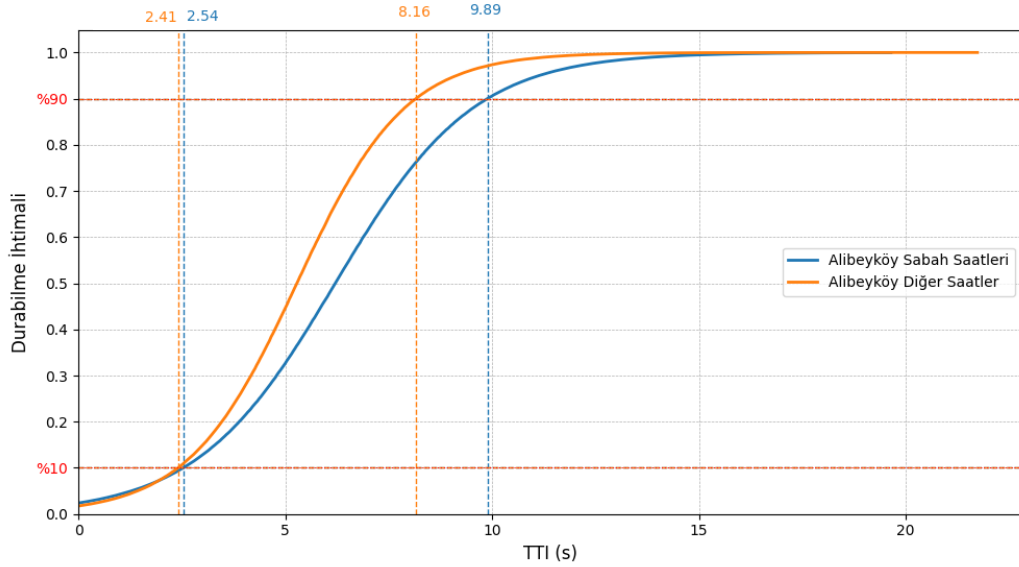
3.6.4. Saatlere Göre Yolculuk Türünün Sürücü Davranışına Etkisi

Alibeyköy kavşağından elde edilen veriler 07.00-12.00 arası sabah saatleri ve 12.00-17.00 arası öğlen ve akşam saatleri olarak gruplandırılarak lojistik regresyon analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 29’da sunulmuştur.

Tablo 29. Alibeyköy kavşağında sabah saatleri ve diğer saatler arasında yapılan lojistik regresyon analiz sonuçları

	B	S.E.	Wald	Sig.	Exp(B)	95% C.I. for EXP(B)		Cox & Snell R Square	Nagelkerke R Square
						Lower	Upper		
TTI	,676	,032	440,510	,000	1,967	1,846	2,095		
Öğlen ve Akşam Saatleri	,584	,154	14,315	,000	1,794	1,325	2,428	0,502	0,670
Constant	-3,883	,193	406,111	,000	,021				

Tablo 29'dan elde edilen veriler neticesinde, Alibeyköy kavşağındaki saatlik durumun sürücü davranışına $p < 0,001$ düzeyinde anlamlı bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Sabah saatlerinde gerçekleşen yolculukların genel olarak konut-iş yönünde olduğu düşünüldüğünde, yolculuk türünün bu kavşak özelinde sürücü davranışı üzerinde etkileri olduğu söylenebilir. Bu kavşakta sürücülerin TTI, sabah saatleri ve diğer saatlere göre durabilme ihtimali karşılaştırmalı olarak Şekil 86'da gösterilmiştir.



Şekil 86. Sabah ve diğer saatlerdeki sürücülerin TTI'ya göre durabilme ihtimalleri

Maslak kavşağından elde edilen veriler 07.00-12.00 arası sabah saatleri ve 12.00-17.00 arası öğlen ve akşam saatleri olarak gruplandırılarak lojistik regresyon analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 30'da sunulmuştur.

Tablo 30. Maslak kavşağında sabah saatleri ve diğer saatler arasında yapılan lojistik regresyon analiz sonuçları

	B	S.E.	Wald	Sig.	Exp(B)	95% C.I. for EXP(B)	
						Lower	Upper
TTI	1,743	,078	495,520	,000	5,713	4,900	6,660
SABAH VE DİĞER SAATLER	-,007	,162	,002	,966	,993	,722	1,365
Constant	-7,795	,350	495,461	,000	,000		

Tablo 30'dan elde edilen veriler incelendiğinde, Maslak kavşağındaki saatlik durumun sürücü davranışına $p=0,05$ düzeyinde anlamlı bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

3.6.5. Şerit Konumunun Sürücü Davranışına Etkisi

Sağ şeritte ve diğer şeritlerde bulunan taşıtlar gruplandırılarak yapılan analiz neticesinde, taşıtların sarı ışık anında farklı şeritlerde bulunmalarının, durabilme ihtimaline $p=0,05$ düzeyinde anlamlı bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. Sonuçlar her iki kavşak için Tablo 31'de verilmiştir.

Tablo 31. Sağ şerit ve diğer şeritler arasında yapılan lojistik regresyon analizi sonuçları

Kavşak	Parametre	B	S.E.	Wald	Sig.	Exp(B)	95% C.I. for EXP(B)	
							Lower	Upper
Maslak	TTI	1,743	,078	494,945	,000	5,715	4,901	6,663
	ŞERİT	-,025	,161	,025	,875	,975	,711	1,338
	Constant	-7,796	,350	495,045	,000	,000		
Alibeyköy	TTI	,665	,032	444,863	,000	1,945	1,829	2,070
	ŞERİT	,034	,156	,048	,827	1,035	,762	1,405
	Constant	-3,790	,189	401,089	,000	,023		

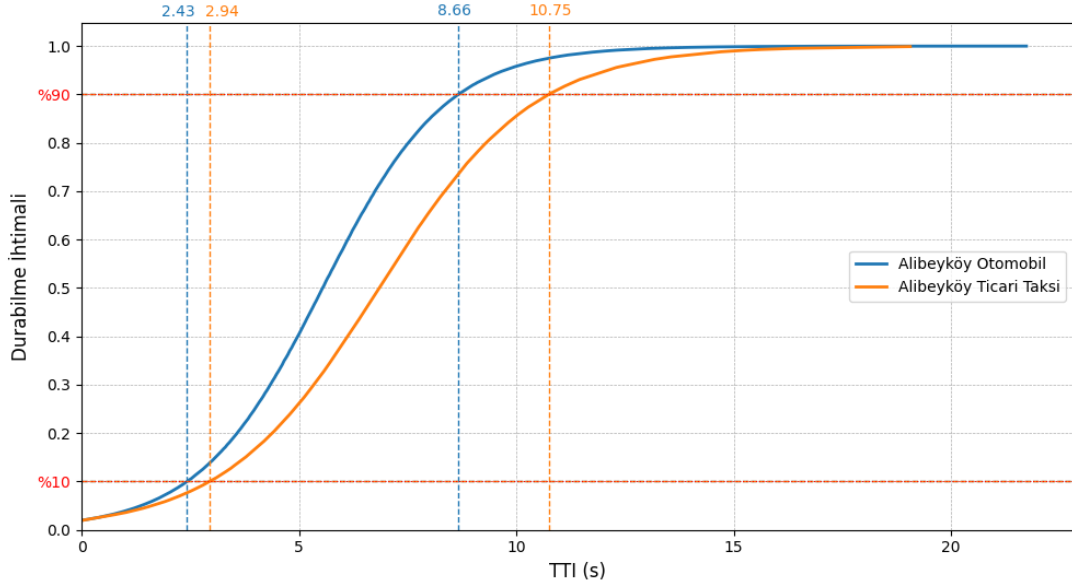
3.6.6. Alibeyköy Kavşağında Taşıt Tipinin Sürücü Davranışına Etkisi

Alibeyköy kavşağında, taşıt tipinin sürücü davranışına etkisini incelemek amacıyla lojistik regresyon analizi yapılmış ve Tablo 32'deki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 32. Alibeyköy kavşağında farklı taşıt tipleri için yapılan lojistik regresyon analizi sonuçları

	B	S.E.	Wald	Sig.	Exp(B)	95% C.I. for EXP(B)		Cox & Snell R Square	Nagelkerke R Square
						Lower	Upper		
TTI	,673	,032	438,528	,000	1,961	1,841	2,089	0,501	0,669
Ticari Taksi			7,215	,065					
Ağır Taşıt	,506	,415	1,483	,223	1,658	,735	3,744		
Van	,629	,390	2,600	,107	1,876	,873	4,030		
Otomobil	,819	,328	6,247	,012	2,268	1,193	4,312		
Constant	-4,073	,222	338,068	,000	,017				

Tablo 32 incelendiğinde, Alibeyköy kavşağı için taşıt tipindeki değişimin sürücü davranışına $p=0,065$ düzeyinde anlamlı bir etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, ticari taksi ile otomobil sürücüleri arasındaki fark $p=0,05$ düzeyinde anlamlıdır. Otomobil ve taksilerin TTI'ya göre durabilme ihtimallerinin dağılımı Şekil 87'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 87. Otomobil ve taksi sürücülerinin TTI'ya göre durabilme ihtimalleri

3.6.7. Maslak Kavşağında Yaya Varlığının Sürücü Davranışına Etkisi

Maslak kavşağında, yol kenarında karşıya geçmek için bekleyen yayaların sürücü davranışına etkisi lojistik regresyon yardımıyla incelenmiş ve elde edilen veriler Tablo 33'te sunulmuştur. Alibeyköy kavşağında yaya trafiği yok denecek kadar az olduğundan, analiz sadece Maslak kavşağı için yapılmıştır.

Tablo 33. Maslak kavşağında yaya etkisi için yapılan lojistik regresyon analizi sonuçları

	B	S.E.	Wald	Sig.	Exp(B)	95% C.I. for EXP(B)	
						Lower	Upper
TTI	1,744	,078	494,678	,000	5,722	4,907	6,672
YAYA VAR	-,103	,161	,414	,520	,902	,658	1,235
Constant	-7,797	,351	493,926	,000	,000		

Tablo 33 incelendiğinde, yol kenarında karşıya geçmek için bekleyen yayaların sürücü davranışına $p=0,05$ düzeyinde anlamlı bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.

3.6.8. Maslak Kavşağında Taşıt Tipinin Sürücü Davranışına Etkisi ve Nihai Model

Maslak kavşağında, taşıt tipinin sürücü davranışına etkisini incelemek amacıyla lojistik regresyon analizi yapılmış ve Tablo 34'teki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 34. Maslak kavşağında farklı taşıt tipleri için yapılan lojistik regresyon analizi sonuçları ve nihai model

	B	S.E.	Wald	Sig.	Exp(B)	95% C.I. for EXP(B)		Cox & Snell R Square	Nagelkerke R Square
						Lower	Upper		
TTI	1,776	,080	489,758	,000	5,908	5,048	6,914	0,595	0,804
Otomobil			18,300	,000					
Van	-1,269	,342	13,723	,000	,281	,144	,550		
Ağır Taşıt	-,998	,417	5,734	,017	,369	,163	,834		
Ticari Taksi	-,121	,417	,084	,772	,886	,391	2,007		
Constant	-8,414	,407	426,412	,000	,000				

Tablo 34 incelendiğinde, taşıt tipindeki değişimin sürücü davranışına $p=0,05$ düzeyinde anlamlı etkisinin olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte, otomobil – van ve otomobil – ağır taşıt sürücüleri arasındaki fark da $p=0,05$ düzeyinde anlamlıdır. Maslak

kavşağında sürücü davranışını etkileyen başka bir parametre tespit edilemediğinden Tablo 34'teki model nihai model olarak kabul edilmiştir. Bu modelin NRS değeri 0,804 olarak hesaplanmıştır. Bu değer modelin sürücü davranışının yüksek bir başarıyla tahmin edildiğini göstermektedir. Anlamlı parametrelerin odds oranı değerleri yardımıyla, Maslak kavşağı için aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Otomobil sürücülerinin sarı ışık anında durma ihtimali, van tipi taşıt sürücülerinin durma ihtimalinin 3,56 (1/0,281) katıdır. Diğer bir ifadeyle, van tipi taşıt sürücülerinin sarı ışık anında durma ihtimali, otomobil sürücülerinin durma ihtimalinin 0,28 katıdır.
- Otomobil sürücülerinin sarı ışık anında durma ihtimali, ağır taşıt sürücülerinin durma ihtimalinin 2,71 (1/0,369) katıdır. Diğer bir ifadeyle, ağır taşıt sürücülerinin sarı ışık anında durma ihtimali, otomobil sürücülerinin durma ihtimalinin 0,369 katıdır.
- TTI'daki 1 saniyelik artış, sürücülerin durma ihtimalini 5,908 kat artırmaktadır.

3.6.9. Alibeyköy Kavşağı İçin Nihai Model

Alibeyköy kavşağında sürücü davranışına $p=0,05$ ve yakın düzeylerde anlamlı etkisi olduğu bilinen; TTI, hava şartları, taşıt tipi ve saatlere göre yolculuk türü parametreleri birlikte kullanılarak lojistik regresyon modeli oluşturulmuş ve sonuçları Tablo 35'te gösterilmiştir.

Tablo 35. Alibeyköy kavşağı için oluşturulan nihai model

	B	S.E.	Wald	Sig.	Exp(B)	95% C.I. for EXP(B)		Cox & Snell R Square	Nagelkerke R Square
						Lower	Upper		
TTI	,682	,033	431,902	,000	1,979	1,855	2,110	0,506	0,676
Otomobil			5,502	,139					
Van	-,193	,247	,610	,435	,825	,508	1,338		
Ağır Taşıt	-,254	,289	,777	,378	,775	,440	1,365		
Ticari Taksi	-,722	,330	4,784	,029	,486	,254	,928		
Yağmur	-,287	,202	2,025	,155	,751	,506	1,114		
Öğlen ve Akşam Saat.	,568	,157	13,078	,000	1,764	1,297	2,399		
Constant	-4,028	,235	293,029	,000	,018				

Tablo 35 incelendiğinde, TTI ve saatlere göre yolculuk türü parametrelerin değişiminin durabilme ihtimaline $p=0,05$ düzeyinde, taşıt tipindeki değişimin $p=0,139$

düzeyinde ve hava şartlarındaki değişimin $p=0,155$ düzeyinde anlamlı etkilerinin olduğu tespit edilmiştir. Anlamlılık düzeyi $p=0,05$ 'ten büyük olup bu düzeye yakın olan parametreler, sürücü davranışına etkilerinin görülebilmesi adına modele dahil edilmiştir. Anlamlı parametrelerin odds oranı değerleri yardımıyla, Alibeyköy kavşağı için aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- TTI'daki 1 saniyelik artış, sürücülerin durma ihtimalini 1,98 kat artırmaktadır.
- Öğlen ve akşam saatlerinde seyahat eden sürücülerin durma ihtimali, sabah saatlerindeki sürücülerin durma ihtimalinin 1,764 katıdır.
- Ticari taksi sürücülerinin durma ihtimali, otomobil sürücülerinin durma ihtimalinin 0,486 katıdır.
- Yağmurlu günde sürücülerin durma ihtimali, yağmur olmayan günlerdeki durma ihtimalinin 0,751 katıdır ($p=0,155$ düzeyinde anlamlı).

3.6.10. Maslak Kavşağı Modelinden Elde Edilen NRS Değerlerinin İrdelenmesi

Alibeyköy ve Maslak kavşaklarında, TTI ve DTI verileri yardımıyla yapılan lojistik regresyon analizi neticesinde elde edilen NRS verileri, geçmiş yıllarda yapılan çalışmalar ile karşılaştırmalı olarak Tablo 36'da sunulmuştur.

Tablo 36. Elde edilen NRS değerlerinin geçmiş yıllarda yapılan çalışmalar ile karşılaştırılması

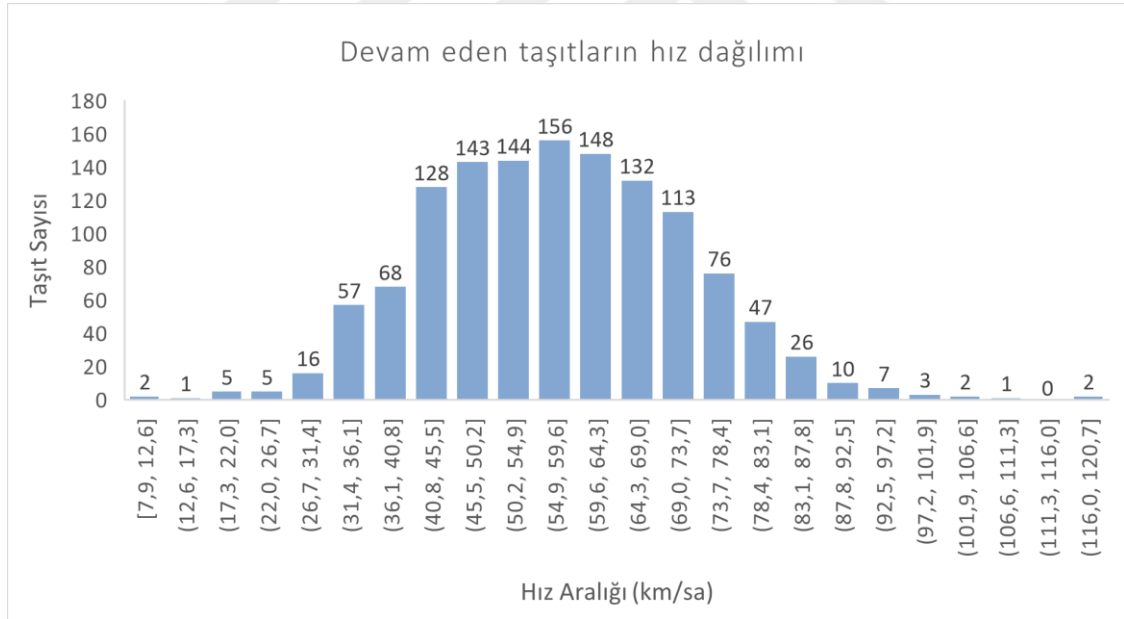
Araştırmacı/Kavşak	Ölçüm Yöntemi	Parametre	$p \leq 0,05$ Olanlar	NRS
Papaioannou (2007)	Simülatör	V, DTI, Cinsiyet, Yaş	Hepsi	0,695
Papaioannou vd. (2021)	Kamera Gözlem	DTI, V, İvme	Hepsi	0,830
Alomari vd. (2023)	Kamera Gözlem	DTI, Kuyruk Sırası	Hepsi	0,589
Kr ve Krishnamurthy (2024)	Kamera Gözlem	V, DTI, W, Y, Sayaç Türü, Kavşak Tipi	Belirtilmemiş	0,628
Maslak Kavşağı	Kamera Gözlem	TTI		0,799
Maslak Kavşağı	Kamera Gözlem	DTI		0,702
Alibeyköy Kavşağı	Kamera Gözlem	TTI		0,664
Alibeyköy Kavşağı	Kamera Gözlem	DTI		0,626

Tablo 36 incelendiğinde, Maslak kavşağında yalnızca sadece TTI ve DTI parametreleri ile kurulan modeller neticesinde elde edilen NRS değerlerinin 1'e çok yakın

olduğu ve önceki yıllarda yapılan çalışmalara ait NRS değerlerinden oldukça büyük olduğu görülebilecektir. Papaioannou vd. tarafından yapılan çalışmada NRS değeri 0,830 olarak bulunmuştur. Ancak bu çalışmada, sarı ışık davranışının çoğu durumda bir sonucu olan ivme parametresi de modele dahil edilmiştir. Maslak kavşağı TTI ve DTI modellerinden elde edilen büyük NRS değerlerinin olası 3 farklı sebebi olduğu düşünülmektedir.

1. Maslak kavşağındaki taşıtların görece yüksek hızlarda ve birbirlerine yakın konumda seyahat etmeleri

Alınan kamera kayıtları incelendiğinde, Maslak kavşağına yaklaşan taşıtların kavşak öncesinde görece yüksek hızlarda ve birbirlerine yakın konumlarda seyahat ettikleri tespit edilmiştir. Sarı ışık anında ölçüm alanında olup devam eden 1293 taşıtın hızlarının ortalaması 57,6 km/sa, standart hata 14,6 km/sa olarak hesaplanmıştır. Trafiğin görece yoğun olduğu saatlerde sarı ışık anındaki hızları düşük olan 185 taşıt verisi hesaba katılmadığı takdirde yeni hız ve standart hata değerleri sırasıyla 61,23 km/sa ve 12,24 km/sa olarak hesaplanmıştır. Devam eden tüm taşıtların hız dağılımı Şekil 88'deki grafikte verilmektedir.



Şekil 88. Maslak kavşağında devam eden taşıtların hız dağılımı

Sarı ışık anında taşıtların birbirlerine yakın konumda olmaları ve görece yüksek hızlarda seyretmeleri, çabuk bir şekilde karar vermek durumunda olan sürülerin diğer taşıtlardan etkilenmesine neden olabilecektir.

2. Yapılan tahmin hesabı neticesinde taşıt TTI değerlerinin birbirlerine yaklaşmış olması ihtimali

Yapılan tahmin hesabı neticesinde taşıtların hız ve konum değerlerinde bir miktar hata yapılabileceği ortadadır. Ancak tahmin hesabında kullanılan meçhul süre, ilk konum, ilk hız gibi parametrelerin her taşıt için ayrı ayrı ölçülmesi ve uygulanan hızlanma/yavaşlama ivmelerinin de bu parametrelere göre farklı değerler alabilmesi, tahmin hesabının tek tip bir etki yaratmasını büyük oranda engelleyecektir. Tablo 37’de, tahmin hesabında kullanılan m parametresinin sınırlandırılması ile daha az taşıt verisi kullanılarak kurulan modellere ait bazı bilgiler bulunmaktadır.

Tablo 37. m parametresi sınırlandırılarak kurulan modeller ait bilgiler

Sınırlama	Taşıt Sayısı	Duran	Geçen	NRS*
Tüm Taşıtlar	2281	921	1360	0,799
m<4	2014	656	1358	0,744
m<1	1570	277	1293	0,621

*Sadece TTI kullanılarak elde edilmiştir.

Tablo 37 incelendiğinde, tahmin verileri sınırlandırılarak kurulan yeni modeller sonucu elde edilen NRS değerlerinde bir miktar düşüş olduğu söylenebilir. m<4 olarak kurulan modelde, modele dahil edilmeyen 267 taşıttan sadece 2 tanesi duran taşıttır. m<1 sınırlandırması için de benzer bir durum söz konusudur. Sınırlandırılmış durumda duran taşıt sayısındaki bu azalma, hiç kuşkusuz NRS değerinde de bir azalmaya sebebiyet verecektir. Bu sebeple, tüm taşıt verisi kullanılarak hesaplanan NRS değerini tek başına tahmin hatası olarak kabul etmek doğru olmayacaktır.

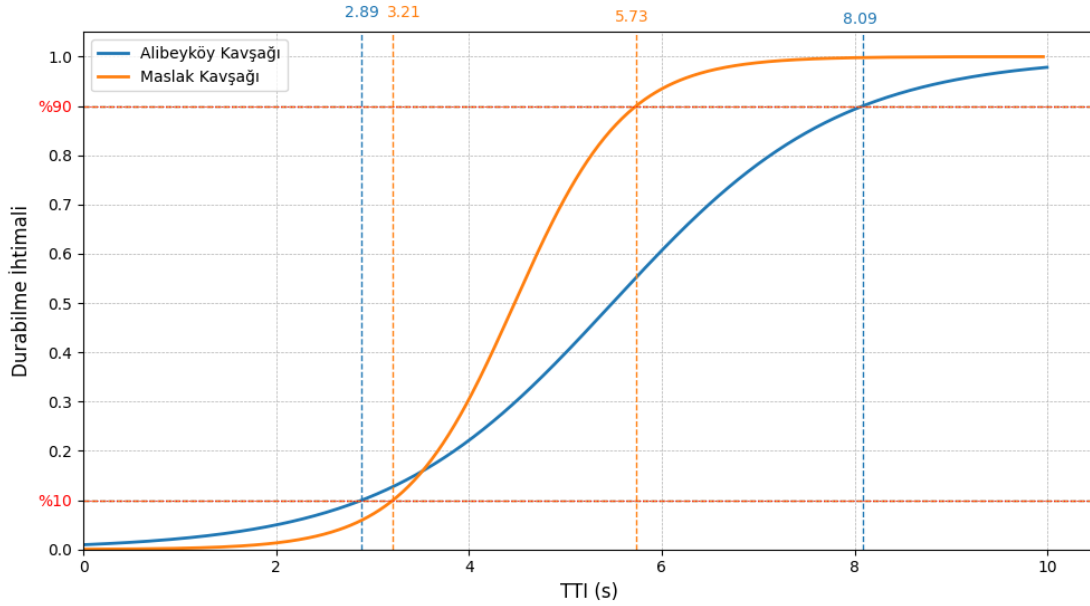
3. Maslak kavşağındaki negatif eğimin etkisi

Maslak kavşağı, taşıtların %3,15 iniş eğiminin de etkisiyle görece yüksek hızlarda seyahat ettiği bir kavşaktır. Bu durum hem saha çalışması hem de verilerin işlenmesi aşamasında gözlenmiştir. Bu kavşakta incelenen; günlük ve saatlik yolculuklar, yaya varlığı, hava şartları ve şerit konumu gibi değişkenlerin sürücü davranışına anlamlı bir etkide bulunmadığı, yapılan analizler neticesinde tespit edilmiştir. Anlamlı etkisi bulunan taşıt tipi değişkeni ise van grubu ve ağır taşıtların durabilme ihtimalinin otomobillere nazaran daha az olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgu, negatif eğimli kavşaklar için beklenebilecek bir

duruma işaret etmektedir. Nitekim Rahman ve Min-Wook tarafından 2021 yılında yapılan çalışmada, negatif eğim ve ağır taşıt varlığının ikilem bölgesi başlangıcını durma çizgisinden uzağa taşıyacağı ve ikilem bölgesi uzunluğunu artıracığı tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular ve yapılan karşılaştırmalar neticesinde, negatif eğim ve yüksek hızların birlikte bulunduğu durumlarda, sürücülerin hız ve konumlarına, yani TTI parametresine daha duyarlı hale gelebileceği söylenebilir. Ancak bu yorumun; eğimleri farklı, birbirlerine yakın konumda olan ve benzer koşullara sahip kavşaklar ile yapılacak analizler ile desteklenmesi gerektiği düşünülmektedir.

3.6.11. Tip II İkilem Bölgesi Sınırlarının İki Kavşakta Mukayeseli Olarak İrdelenmesi

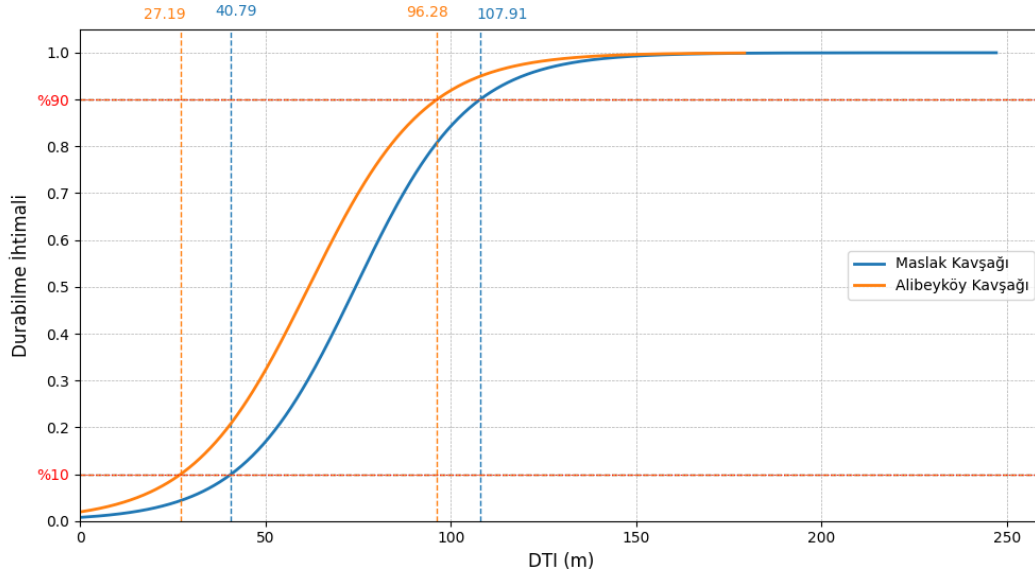
Her iki kavşağa ait ortalama Tip II ikilem bölgesi sınırlarını gösteren bir grafik oluşturularak Şekil 89’da sunulmuştur. İki kavşak verilerinin aynı grafikte daha sade gösterilebilmesi adına, $TTI > 10$ saniye olan taşıtlar analize dahil edilmemiştir.



Şekil 89. Alibeyköy ve Maslak kavşakları durabilme ihtimalinin TTI'ya göre değişimi ($TTI \leq 10$ s olan taşıtlar)

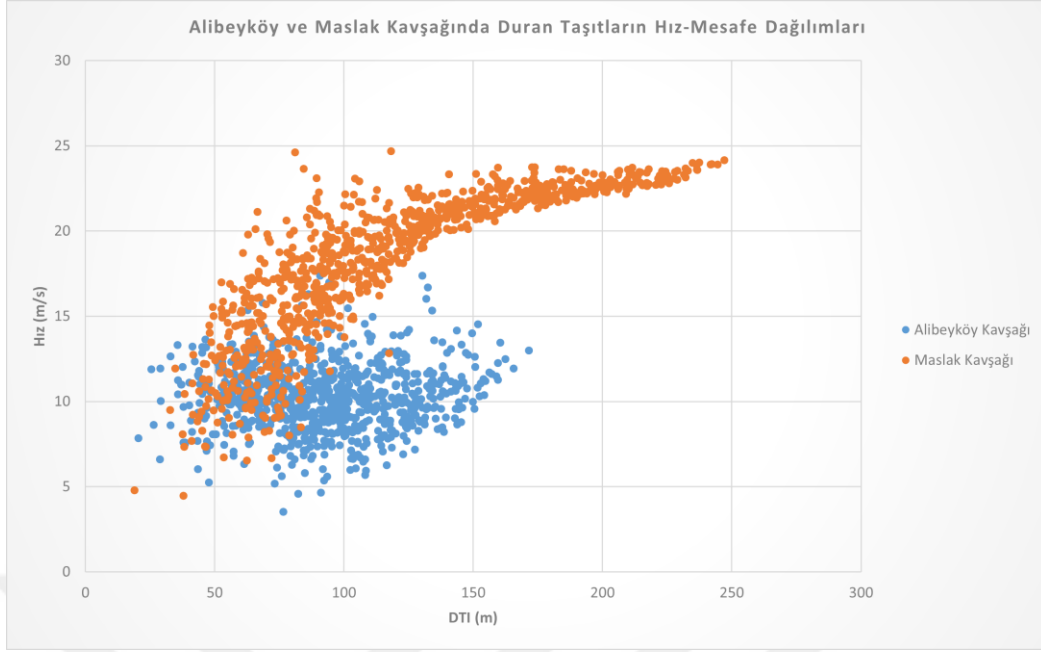
Şekil 89 incelendiğinde, Alibeyköy kavşağına ait grafiğin daha yatık şekilde olduğu görülebilecektir. Her iki kavşakta ikilem bölgesi başlangıç sınırları birbirlerine yakın değerler almıştır. Alibeyköy kavşağındaki ikilem bölgesi bitiş sınırı, Maslak kavşağına göre

daha büyüktür. Bu durumun irdelenebilmesi adına, sürücülerin durabilme ihtimali DTI ile modellenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 90’da grafik olarak sunulmuştur.



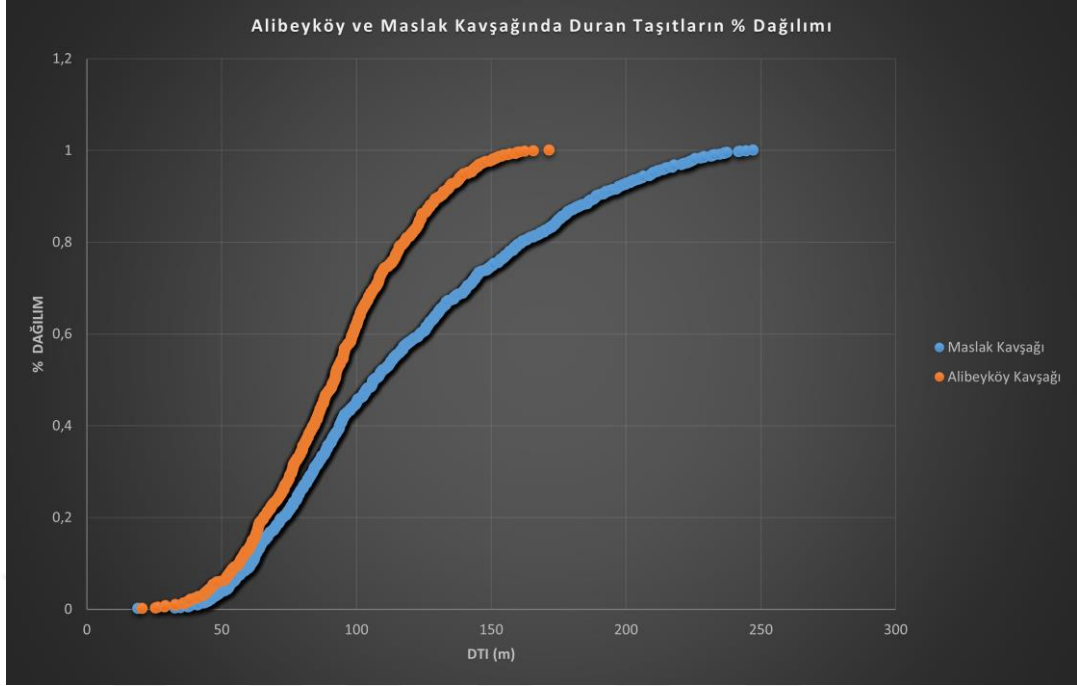
Şekil 90. Alibeyköy ve Maslak kavşaklarında durabilme ihtimalinin DTI’ya göre değişimi

Şekil 90 incelendiğinde, DTI parametresi yardımıyla belirlenen ikilem bölgesi başlangıç değerlerinin 27,19 m ve 40,79 m, bitiş değerlerinin ise 96,28 m ve 107,91 m olduğu görülecektir. Şekil 89’da gözlenen ikilem bölgesi boyundaki uzama, DTI ile belirlenen sınırlarda gözlenmemiştir. Ancak DTI ile yapılan modelde, hızların kavşak ortalaması olarak alınacağı unutulmamalıdır. Ortaya çıkan bu farklı durumu anlayabilmek adına, her iki kavşakta duran ve devam eden taşıtlar iki gruba ayrılarak hız - mesafe dağılım grafikleri oluşturulmuştur.



Şekil 91. Her iki kavşakta duran taşıtların hız-mesafe dağılımlarının karşılaştırılması

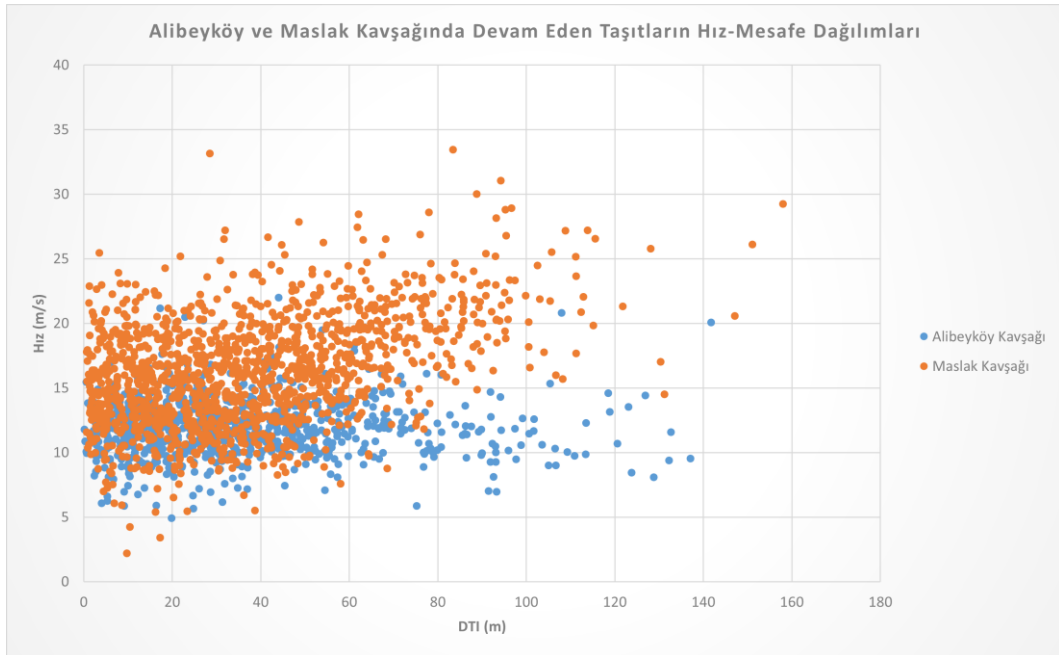
Şekil 91 incelendiğinde, Maslak kavşağındaki dağılım yönünün Alibeyköy kavşağından farklı olduğu görülebilecektir. Maslak kavşağında hızlar arttıkça dağılım sağa doğru kaymaktadır. Alibeyköy kavşağında ise dağılım düşeyde görece sabittir. Başka bir deyişle, Maslak kavşağındaki dağılım mesafe ve hıza benzer duyarlıyken, Alibeyköy kavşağındaki dağılım mesafeye daha duyarlıdır. Alibeyköy kavşağında hızların düşük olmasının bu duruma sebebiyet verdiği düşünülmektedir. Dağılımdaki farkı daha net görebilmek adına, her iki kavşakta duran taşıtların mesafeye göre yüzdesel dağılımları oluşturularak Şekil 92’de sunulmuştur.



Şekil 92. Her iki kavşakta duran taşıtların mesafeye göre % dağılımlarının karşılaştırılması

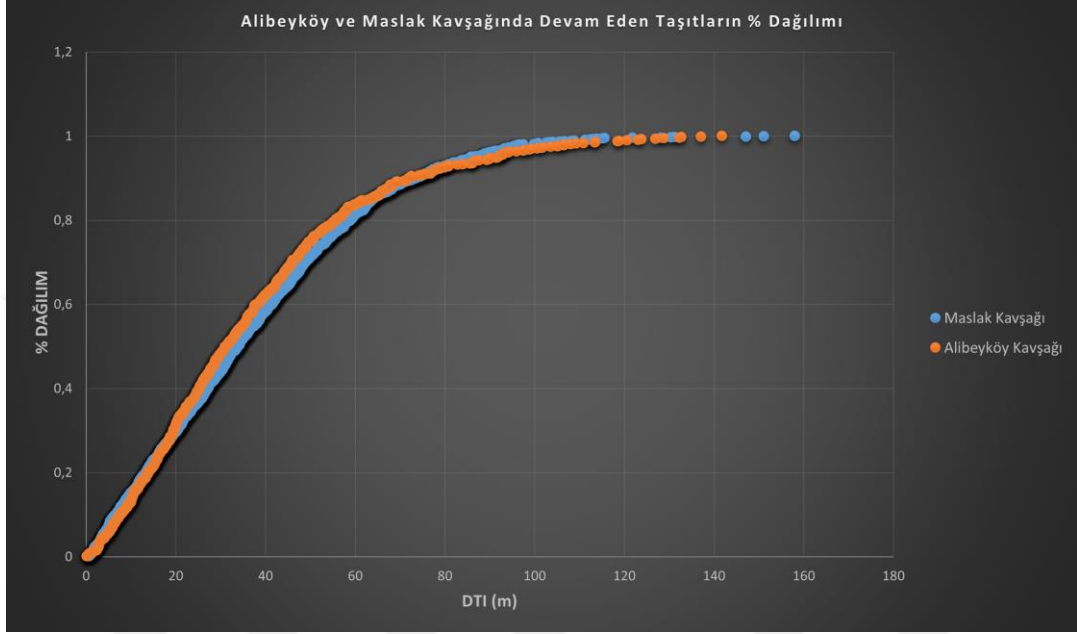
Şekil 92 incelendiğinde, Alibeyköy ve Maslak kavşaklarında duran taşıtların yaklaşık 50 metre DTI sonrasında yüzdesel dağılımda farklılaşmanın başladığı görülebilecektir.

Devam eden taşıtlar için hız-mesafe dağılım grafiği oluşturularak Şekil 93'te sunulmuştur.



Şekil 93. Her iki kavşakta devam eden taşıtların hız-mesafe dağılımlarının karşılaştırılması

Şekil 93 incelendiğinde, her iki kavşaktaki dağılımın 60-80 metre aralığına kadar yaklaşık yatay konumlandığı tespit edilmiştir. Hızlardaki artışın dağılımın yönüne belirgin bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Dağılımdaki benzerliği daha net görebilmek adına, her iki kavşakta devam eden taşıtların mesafeye göre yüzdesel dağılımları oluşturularak Şekil 94’te sunulmuştur.



Şekil 94. Her iki kavşakta devam eden taşıtların mesafeye göre % dağılımlarının karşılaştırılması

Şekil 94 incelendiğinde, Alibeyköy ve Maslak kavşakları için oluşturulan dağılım eğrilerinin büyük oranda benzer oldukları görülebilecektir. Bu durum, kavşakta devam eden sürücülerin mesafe algısıyla açıklanabilir. Her iki kavşak için duran ve devam eden taşıtların mesafeye göre dağılımlarının %15, %50 ve %85 değerleri Şekil 90’da sunulmuştur.

Tablo 38. Devam eden taşıtların DTI dağılımının %15,%50 ve %85 değerleri

Kavşak	Duran Taşıtlar			Devam Eden Taşıtlar		
	15%	50%	85%	15%	50%	85%
Alibeyköy	62 m	91,92 m	124,09 m	10,7 m	31,3 m	63,3 m
Maslak	66,3 m	107,05 m	175,48 m	9,9 m	33,8 m	64,1 m

Tablo 38’den elde edilen sonuçlar, incelenen kavşaklarda devam kararı veren sürücülerin mesafe algısıyla hareket ettiklerini ortaya koymaktadır. Bu durum süre

analizinden elde edilen (Şekil 72, Şekil 74 ve Şekil 83) sonuçlarla örtüşmektedir. Sarı giriş sürelerinin %15, %50 ve %85 değerleri Alibeyköy kavşağı için sırasıyla 0,9 s; 2,6 s; 5,1 s ve Maslak kavşağı için sırasıyla 0,6 s; 2,2 s; 3,8 saniyedir. Maslak kavşağında hızların yüksek olması, sarı giriş sürelerinin daha düşük olmasına sebebiyet vermektedir. Yine iki kavşakta sarı giriş süresinin doğrusal dağılımın farklı değerlerde bozulması (Alibeyköy %75,45 ve Maslak %84,76) %85 değerlerinde sapmaya sebebiyet vermiştir.

Elde edilen tüm veriler ışığında, incelenen kavşaklarda devam kararı veren sürücülerin, bu kararı bir zaman ve mesafe alışkanlığı ile verdikleri söylenebilir. Alibeyköy kavşağındaki RLR ihlallerinin Maslak kavşağına göre fazla olması, bu kavşakta hızların görece düşük olmasından ve uygulanan sarı ışık süresinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Benzer şekilde, Alibeyköy kavşağında dur bölgesinde devam eden taşıt sayısının Maslak kavşağından fazla olması aynı gerekçelerle açıklanabilir. İstanbul'da bulunan denetimsiz birçok kavşakta benzer bir durumla karşılaşılacağı düşünülmektedir. Ancak bu yorum, farklı kavşaklardan alınacak veriler ve daha farklı analizler yardımıyla desteklenmelidir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, İBB tarafından taşıt trafiğini gözlem amaçlı montajı yapılan ve kullanılan trafik gözlem kameraları yardımıyla, iki farklı kavşakta gerçekleşen sarı ışık vakalarının ve kırmızı ışık ihlallerinin detaylı analizi yapılmıştır. Geliştirilen parametre tespit algoritması ve programı yardımıyla analiz için ihtiyaç duyulan; hız, konum, ivme, taşıt tipi, sarı giriş süresi, şerit konumu, sürücünün dur - devam et kararı gibi birçok parametre tespit edilmiştir. İncelenen kavşaklarda Tip I İkilem Bölgesi, RLR, Sarı Giriş Süresi, Tip II İkilem Bölgesi Analizleri yapılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- İncelenen kavşaklarda olağandışı bir durum yaşanmadığı takdirde, devam et bölgesinde bulunan sürücüler için arkadan çarpmalı kaza riskinin çok düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu bölgede olan sürücülerin tamamına yakını hızlarından bağımsız olarak devam kararı vermişlerdir. İstanbul'da bulunan denetimsiz kavşakların büyük çoğunluğunda benzer bir durumla karşılaşılması beklenmektedir.
- İncelenen kavşaklarda devam eden sürücülerin benzer mesafe alışkanlıklarına sahip oldukları tespit edilmiştir. Farklı koşullara sahip olan iki kavşakta birbirine çok yakın olarak tespit edilen %10, %50 ve %85 DTI değerleri bu alışkanlığın en önemli kanıtıdır. Benzer mesafe alışkanlığına İstanbul'daki denetimsiz birçok kavşakta rastlanabileceği düşünülmektedir.
- İncelenen kavşaklarda devam eden sürücülerin sarı ışık süresini, durmadan önce kavşağı terk edecekleri son zaman aralığı olarak gördükleri sonucuna ulaşılmıştır. Her iki kavşaktan elde edilen sarı giriş zamanı verilerinin dağılımı incelenmiş ve 4 saniye civarının devam etme eğiliminde ani azalmanın başladığı nokta olduğu sonucuna ulaşılmıştır. İstanbul'daki denetimsiz birçok kavşakta, benzer bir sarı ışık algısıyla karşılaşılabilenliği düşünülmektedir.
- Sarı+koruma süresinin, Tip I ikilem bölgesi oluşumuna etki eden en kritik parametre olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bilhassa derinliği uzun olan kavşaklarda, bu sürede yapılacak 1 saniyelik değişimin dahi, ikilem bölgesi oluşumuna sebebiyet verebileceği tespit edilmiştir. Sinyalize bir kavşakta Tip I ikilem bölgesi oluşmasını engellemenin en hızlı ve kolay yolu, sarı+koruma sürelerinin doğru bir şekilde belirlenmesidir.

- Alibeyköy kavşağındaki tüm RLR ihlallerinin %36,76'sı, koruma süresi bitiminden sonra gerçekleşmiştir. Diğer bir ifadeyle, RLR ihlallerinin %36,76'sında kesişen kavşak kolunda yeşil süre başlamış bulunmaktadır.
- 70-80 km/sa ve daha düşük olan hızlarda, RLR ihlallerinin taşıt hızlarıyla direkt alakalı olmadığı tespit edilmiştir. Görece düşük hızlarda, beklenenin aksine çok fazla RLR ihlali gerçekleşebilir. Taşıt hızları Maslak kavşağına göre düşük olan Alibeyköy kavşağından elde edilen veriler, bu durumun en önemli kanıtıdır. Uygulanan sarı süre ve sürücü algısının, RLR ihlallerinde önemli etkilerinin olduğu tespit edilmiştir.
- RLR ihlallerinin büyük çoğunluğunun, dur bölgesinde olan taşıtlar tarafından yapıldığı tespit edilmiştir. Opsiyon bölgesinde olan taşıtların, kavşak derinliğinin uzun olması halinde RLR ihlali yapabileceği sonucuna ulaşılmıştır. Devam et bölgesinde olan taşıtların çok düşük oranlarda RLR ihlali yaptıkları gözlenmiştir.
- İncelenen kavşaklardan elde edilen YLR vaka ve RLR ihlal oranları, yurtdışında yapılan benzer bir çalışma ile mukayese edilmiş ve çarpıcı sonuçlar bulunmuştur. Söz konusu çalışmada tüm YLR vakalarının %97,54'ü devam et bölgesinde gerçekleşmiştir. Bu oran Maslak ve Alibeyköy kavşakları için sırasıyla %81,84 ve %55,60'tır.
- Sürücülerin durma kararına etki eden en önemli parametreler DTI ve TTI'dır. TTI parametresi, durma çizgisine olan mesafe ve taşıt hızının bir fonksiyonu olduğundan, yordama gücü en yüksek olan parametredir.
- Alibeyköy kavşağında sabah saatlerinde seyahat eden sürücülerin durma ihtimalinin, öğlen ve akşam saatlerinde seyahat edenlere göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun, sabah saatlerinde gerçekleştirilen yolculukların genellikle ev-iş yönünde olması ve sürücülerin varacakları yere yetişme kaygısı yaşaması sebebiyle gerçekleştiği düşünülmektedir.
- Maslak kavşağındaki saatlik değişimin, sürücülerin durma ihtimaline anlamlı bir etkisi olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.
- Alibeyköy kavşağında ticari taksi sürücülerinin durma ihtimalinin, otomobil sürücülerine nazaran daha az olduğu tespit edilmiştir.
- Maslak kavşağında van grubu ve ağır taşıt sürücülerinin durma ihtimalinin, otomobil ve ticari taksi sürücülerine nazaran daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun, kavşaktaki negatif eğim ile alakalı olduğu düşünülmektedir.

- Alibeyköy kavşağında yağmurlu hava ve neticesinde ortaya çıkan ıslak kaplamanın, sürücülerin durma ihtimalini azaltabileceği $p=0,155$ anlamlılık düzeyinde tespit edilmiştir. Bununla birlikte, Maslak kavşağında hava şartlarının sürücülerin durabilme ihtimaline anlamlı bir etkisi olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Hava şartlarının etkisinin tam olarak anlaşılabilmesi için, farklı kavşaklardan elde edilecek daha fazla miktarda veriye ihtiyaç duyulmaktadır.
- Hafta içi ve hafta sonu günlerde yapılan yolculukların, sarı ışık davranışı bakımından anlamlı bir farklılık içermediği tespit edilmiştir.
- Maslak kavşağında, yol kenarında karşıya geçmeyi bekleyen yayaların olduğu ve olmadığı durumlar gruplandırılarak yapılan analiz neticesinde, durma çizgisi civarında karşıya geçmeyi bekleyen yayaların, sürücülerin durma ihtimaline anlamlı bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.
- Taşıtların bulunduğu şerit konumu, sağ ve diğer şeritler şeklinde gruplandırılarak yapılan analiz neticesinde, şerit konumunun sürücülerin durma ihtimaline anlamlı bir etkisinin olmadığı tespit edilmiştir.
- TTI, taşıt tipi, yağmurlu hava ve saatlik yolculuk türü parametreleri yardımıyla Alibeyköy kavşağındaki sürücülerin durabilme ihtimalini tahmin etmek amacıyla bir lojistik regresyon modeli oluşturulmuştur. Modelin tahmin başarısı $NRS=0,676$ olarak ölçülmüştür.
- TTI ve taşıt tipi parametreleri yardımıyla Maslak kavşağındaki sürücülerin durabilme ihtimalini tahmin etmek amacıyla bir lojistik regresyon modeli oluşturulmuştur. Modelin tahmin başarısı $NRS=0,804$ olarak ölçülmüştür.
- Maslak kavşağında bulunan negatif (iniş) eğimin, karar aşamasındaki sürücülerin hız ve konumlarına daha bağlı hale getirdiği düşünülmektedir. Başka bir ifadeyle, iniş eğiminin mutlak değerce artmasının, sürücü davranışına etki eden diğer parametrelerin etkisinin azalmasına sebebiyet vereceği düşünülmektedir. Maslak kavşağında incelenen birçok parametrenin sürücü davranışına anlamlı bir etkisinin olmaması, van grubu ve ağır taşıt sürücülerinin durma ihtimalinin diğer sürücülere göre düşük olması ve yalnızca TTI kullanılarak oluşturulan model sonucu elde edilen $NRS=0,799$ değeri, bu değerlendirmeye kanıt olarak gösterilebilir.
- Alibeyköy kavşağı için Tip II ikilem bölgesi sınırları TTI cinsinden, 2,40 s – 9,00 s saniye olarak tespit edilmiştir. İkilem bölgesi bitiş sınırı, literatürde belirtilen 5-5,5 saniye değerinden oldukça büyüktür.

- Maslak kavşağı için Tip II ikilem bölgesi sınırları TTI cinsinden, 3,21 s – 5,73 s olarak tespit edilmiştir. İkilem bölgesi başlangıç sınırı literatürde belirtilen yaklaşık 2,5 saniye değerinden büyüktür. Kavşaktaki negatif iniş eğiminin bu duruma sebebiyet verdiği düşünülmektedir.
- Her iki kavşakta ortalama Tip II ikilem bölgesi sınırları DTI cinsinden, Alibeyköy kavşağı için 27,19 m - 96,28 m ve Maslak kavşağı için 40,79 m - 100,91 m olarak tespit edilmiştir.

Bu çalışma neticesinde, İstanbul'daki sürücülerin sarı ışık anında gösterdikleri davranışın literatürde öngörülenden farklı ve değişik koşullar altında benzerlikler içeren bir yapıda olduğu tespit edilmiştir. Bununla birlikte; eğim, hava şartları, yolculuk türü, taşıt tipi, taşıtın bulunduğu şerit, yaya varlığı gibi birçok parametrenin sürücü davranışına etkileri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar farklı koşullar altında yorumlanmıştır.

2021 yılından itibaren yapılmakta olan bu çalışma neticesinde elde edilen bulgu ve tecrübeler ışığında sunulan aşağıdaki önerilerin, sarı ışık ve ikilem bölgesi probleminin daha iyi anlaşılması ve çözümü için faydalı olacağı düşünülmektedir.

- Sürücülerin mevcut sarı ışık algısına değiştirmeye yönelik kapsamlı bir plana ihtiyaç olduğu düşünülmektedir. Bu plan ile eyleme geçmeden önce; yüksek hızlı, farklı denetim koşullarına sahip ve mevcut kaza geçmişi kötü olan kavşaklar seçilerek konu ayrıntılı bir şekilde incelenmelidir. Yine bu aşamada farklı tipteki sürücüler seçilerek anket çalışması yapılmalı, elde edilen sonuçlar sahadan alınan veriler ile karşılaştırılmalıdır.
- Kırmızı ışık ihlalleri ve kazaların sıklıkla yaşandığı kavşaklar tespit edilerek sinyal süreleri kontrol edilmelidir. 3 saniye olarak uygulanan sarı sürelerin kırmızı ışık ihlallerine yol açtığı Alibeyköy kavşağında yapılan analiz neticesinde tespit edilmiştir. Sarı ışık sürelerinin hesabında farklı araştırmacıların önerdiği ve bu çalışmada sunulan yöntemler denenmeli, ITE gibi öncü kuruluşların konu hakkındaki yayınları ve uygulamaları takip edilmelidir. Bununla birlikte, İstanbul özelinde sürücülerin farklı bir sarı ışık algısına sahip oldukları bu çalışma neticesinde ortaya konmuştur. Bu sebeple, sarı ışık süresinde yapılacak artışın agresif sürücüler tarafından suistimal edilebileceği düşünülmektedir. Tüm bu faktörler dikkate alınarak, kaza ve ihlallerin sıklıkla yaşandığı kavşaklarda sarı ışık süresi yerine koruma süresinin artırılmasının ilk aşamada daha uygun olacağı düşünülmektedir.

- Kavşaklardaki denetim uygulamasının etkisinin incelenmesi ve sürücülerin sarı ışık algısını değiştirmeye yönelik bazı çalışmaların yapılması neticesinde sarı sürelerin belirlenmesi ile alakalı ülkemizdeki duruma uygun bir hesap yönteminin geliştirilmesi gerekmektedir.
- Sürücüleri önceden bilgilendirilerek yapılan sinyal denetiminin, denetimsiz kavşaklardaki sürücülerin sarı ışık davranışını olumsuz yönde etkilediği düşünülmektedir. Bu konu ivedi bir şekilde incelenmeli ve varsa mahsurları ortaya konulmalıdır. Elde edilecek sonuçlar ışığında ülkemizde yapılan sinyal denetiminin daha kapsayıcı bir hale getirilmesi için gerekli tüm adımlar atılmalıdır.
- Hızların görece düşük olduğu kavşaklarda kırmızı ışık ihlallerinin daha az yaşanacağı düşünülmemelidir. Bu çalışma neticesinde RLR ihlallerinin düşük hızlardaki taşıtlar tarafından da sıklıkla yapılabileceği net bir şekilde ortaya konulmuştur.

Bu tez çalışmasından elde edilen tecrübe ve sonuçlar neticesinde, aşağıdaki çalışmaların ileride yapılması gerektiği düşünülmektedir.

- Birbirlerine yakın konumlarda bulunan ve benzer koşullara sahip olan denetimli ve denetimsiz kavşaklar seçilerek, bu çalışma neticesinde tespit edilen sürücü davranışının, denetim etkisi ile değişip değişmediğinin tespiti yapılabilir.
- Bu çalışmada seçilen kavşaklarla benzer özellikler taşıyan farklı kavşaklar seçilerek elde edilen sonuçların karşılaştırması yapılabilir.
- Kent dışı kırsal bölgelerden taşıt hızlarının daha yüksek olduğu kavşaklar seçilerek, sürücü davranışının değişip değişmediği kontrol edilebilir, eğer değişiyor ise kritik hız değeri bulunabilir.
- Eğimin etkisinin tam olarak tespit edilebilmesi adına, birbirlerine yakın konumlarda bulunan ve eğim dışında benzer koşullara sahip olan kavşaklar belirlenerek yeni bir çalışma yapılabilir.
- Bu çalışma halihazırda montajı yapılmış ve kullanımda olan kameralar yardımıyla yapılmıştır. Gerekli ekipmanın temin edilmesi ile birlikte, aynı kavşağa ait farklı kollarda çalışma yapılarak benzerlikler ve farklılıklar ortaya konulabilir.
- Çalışma neticesinde elde edilen ve literatürde belirtilen durumla farklılıklar içeren sürücü davranışı, yapılacak anket çalışması yardımıyla doğrulanabilir.

5. KAYNAKLAR

- AASHTO. (2018). A Policy on Geometric Design of Highways and Streets. 7th Edition. USA: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Abdel-Aty, M., Yan, X., Radwan, E., & Wang, X. (2009). Using Drivers' Stop/Go Decisions in Driving Simulator to Assess Rear-End Crash Risk at Signalized Intersections. *Journal of Transportation Safety & Security*, 1(2), 85-100.
- Akgüngör, A. P., & Mercan, E. Z. (2021). An Analysis of Type I Dilemma Zone at Signalised Intersections. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 112, 5-16.
- Ali, Y., Haque, M. M., Zheng, Z., & Bliemer, M. C. (2021). Stop or Go Decisions at the Onset of Yellow Light in a Connected Environment: a Hybrid Approach of Decision Tree and Panel Mixed Logit Model. *Analytic Methods in Accident Research*, 31, 100165.
- Alomari, A. H., Al-Mistarehi, B. W., Al-Jammal, A. A., Alhadidi, T. I., & Obeidat, M. S. (2023). Modelling Driver Behaviour at Urban Signalised Intersections Using Logistic Regression and Machine Learning. *The Sustainable Road Traffic and Road Safety*, 35(6), 838-854.
- Altaş, İ. H. (1999). Bulanık Mantık : Bulanıklılık Kavramı. *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 62, 80-85.
- Aslankaya, E., & Bayrak, G. (2023). Şebeke bağlantılı fotovoltaiik sistemlerde Bessel ve Butterworth filtrelerinin güç hesabı ve analizi üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 689-700.
- Biswas, S., Ghosh, I., & Chandra, S. (2017). Influence of Signal Countdown Timer on Efficiency and Safety at Signalized Intersections. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 44, 4, 308-318.
- Bonneson, J., Middleton, D., Zimmerman, K., Charara, H., & Abbas, M. (2002). Intelligent Detection-Control System for Rural Signalized Intersections. Washington, DC.: FHWA, USDOT.
- Bonneson, J., Zimmerman, K., & Brewer, M. (2002). Engineering Countermeasures to Reduce Red-Light-Running, Report 4027-2. Texas: Texas Transportation Institute.
- Bradski, G., & Kaehler, A. (2008). *Learning OpenCV*. Sebastopol: O'Reilly Media, Inc.
- Caird, J., Chisholm, S., Edwards, C., & Creaser, J. (2007). The Effect of Yellow Light Onset Time on Older and Younger Drivers' Perception Response Time (PRT) and Intersection Behavior. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 10(5), 383-396.

- Chang, M.-S., Messer, C. J., & Santiago, A. J. (1985). Timing Traffic Signal Change Intervals Based on Driver Behavior. *Transportation Research Record* 1027, 20-30.
- Chauhan, R., Dhamaniya, A., & Arkatkar, S. (2022). Analysing Driver's Decision in Dilemma Zone at Signalized Intersections Under Disordered Traffic Conditions. *Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour*, 89, 222-235.
- Choudhary, P., & Velaga, N. R. (2019). Driver Behaviour at the Onset of Yellow Signal: a Comparative Study of Distraction Caused by Use of a Phone and a Music Player. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 62, 135-148.
- Crawford, A. (1962). Driver Judgment and Error During the Amber Period at Traffic Lights with an Appendix on the Calculation of Thresholds and Subjective Scales. *Ergonomics*, 5, 513-532.
- Çobanoğlu, B. (2021). Herkes için Python. İstanbul: Pusula Yayıncılık.
- Dong, S., Zhou, Y., Chen, T., Li, S., Gao, Q., & Ran, B. (2021). An integrated Empirical Mode Decomposition and Butterworth filter based vehicle trajectory reconstruction method. *Physica*, 583, 126295.
- Easa, S. M. (1993). Reliability-Based Design of Intergreen Interval at Traffic Signals. *Journal of Transportation Engineering*, 119, 2, 255-271.
- EGM. (2024). Ülke Geneli Trafik İstatistik Bülteni. Ankara: Emniyet Genel Müdürlüğü Trafik Başkanlığı.
- Elhenawy, M., Jahangiri, A., Rakha, H. A., & El-Shawarby, I. (2015). Modeling Driver Stop/Run Behavior at the Onset of a Yellow Indication Considering Driver Run Tendency and Roadway Surface Conditions. *Accident Analysis and Prevention*, 83, 90-100.
- Elmitiny, N., Yan, X., Radwan, E., Russo, C., & Nashar, D. (2010). Classification Analysis of Driver's stop/go Decision and Red-light Running Violation. *Accident Analysis and Prevention*, 101-111.
- FHWA. (2013). Signalized Intersections Informational Guide, Second Edition. Washington, DC: U.S. Department of Transportation.
- Fu, C., Zhang, Y., Bie, Y., & Hu, L. (2016). Comparative analysis of driver's brake perception-reaction time at signalized intersections with and without countdown timer using parametric duration models. *Accident Analysis and Prevention*, 95, 448-460.
- Gates, T. J., & Noyce, D. A. (2010). Dilemma Zone Driver Behavior as a Function of Vehicle Type, Time of Day and Platooning. *Transportation Research Record*, 2149, 84-93.
- Gates, T. J., McGee, H., Moriarty, K., & Maria, H.-U. (2012). Comprehensive Evaluation of Driver Behavior to Establish Parameters for Timing of Yellow Change and Red Clearance Intervals. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2298(1), 9-21.

- Gates, T. J., Noyce, D. A., Laracuente, L., & Nordheim, E. V. (2007). Analysis of Driver Behavior in Dilemma Zones at Signalized Intersections. *Transportation Research Record*, 2030, 29-39.
- Gazis, D., Herman, R., & Maradudin, A. (1960). The Problem of the Amber Signal Light in Traffic Flow. *Operation Research*, 8(1), 112-132.
- Gonzales, R. C., & Wintz, P. (1987). *Digital Image Processing* (2nd Edition). Amerika Birleşik Devletleri: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.
- Herman, R. (1963). Problem of the Amber Signal Light. *Traffic Eng. Control*, 5, 298-304.
- Hosmer, D. W., & Lemeshow, S. (2013). *Applied Logistic Regression*, Second Edition. New York: A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc.
- Hurwitz, D. S., Wang, H., Knodler, M. A., Ni, D., & Moore, D. (2012). Fuzzy Sets to Describe Driver Behavior in the Dilemma Zone of High-Speed Signalized Intersections. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 15(2), 132-143.
- Hussain, Q., Alhajyaseen, W. K., Brijs, K., Pirdavani, A., & Brijs, T. (2020). Innovative Countermeasures for Red Light Running Prevention at Signalized Intersections: A Driving Simulator Study. *Accident Analysis & Prevention*, 134, 105349.
- ITE. (2015). *Guidelines for Determining Traffic Signal Change and Clearance Intervals*. Washington, DC: Institute of Transportation Engineers.
- ITE Technical Committee 18. (1974). Small Area Detection at Intersection Approaches. *Traffic Engineering*, 44, 8-17.
- Jasim, A. M., Mahmood, J. R., & Ali, R. S. (2020). Design and Implementation of a Musical Water Fountain Based on Sound Harmonics Using IIR Filters. *International Journal of Computing and Digital Systems*, 319-333.
- Kang, M.-W., Rahman, M., & Lee, J. (2020). Determination and Utilization of Dilemma Zone Length and Location for Safety Assessment of Rural High-Speed Signalized Intersections. *Transportation Research Record*, 2674(4), 272-280.
- Karaçeper, S. (2018). Dijital Teknoloji ve Grafik Tasarımda Yenilikler. *Aydın Sanat*, Yıl 4, Sayı 8, 73-83.
- KGM. (2024). *Trafik Kazaları Özeti*. Karayolları Genel Müdürlüğü.
- Komol, M. R., Pinnow, J., Elhenawy, M., Yasmin, S., Masoud, M., Glaser, S., & Rakotonirainy, A. (2022). A Review on Drivers' Red Light Running Behavior Predictions and Technology Based Countermeasures. *IEEE Access*, 25309-25325.
- KR, A., & Krishnamurthy, K. (2024). Modelling the Influence of Amber Light Dilemma Zone on Driver Behaviour Under Mixed Traffic Conditions. *14th Conference on Traffic and Granular Flow (TGF)*, (s. 275-282). New Delhi.

- Li, J., Jia, X., & Shao, C. (2016). Predicting Driver Behavior during the Yellow Interval Using Video Surveillance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13, 1213.
- Li, Z., & Wei, H. (2013). Modeling Dynamics of Dilemma Zones by Formulating Dynamical Contributing Factors with Video-observed Trajectory Data. *Social and Behavioral Sciences*, 80, 880-900.
- Liu, C., Herman, R., & Gazis, D. C. (1995). a Review of the Yellow Interval Dilemma. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 333-348.
- Liu, Y., Chang, G.-L., Tao, R., Hicks, T., & Tabacek, E. (2007). Empirical Observations of Dynamic Dilemma Zones at Signalized Intersections. *Transportation Research Record*, 2035, 122-133.
- Long, K., Liu, Y., & Han, L. D. (2013). Impact of Countdown Timer on driving Maneuvers After the Yellow Onset at Signalized Intersections: an Empirical Study in Changsha, China. *Safety Science*, 54, 8-16.
- Lu, G., Wang, Y., Wu, X., & Liu, H. X. (2015). Analysis of Yellow-Light Running at Signalized Intersections Using High-Resolution Traffic Data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 73, 39-52.
- Majhi, R. C., & Senathipathi, V. (2020). Analyzing Driver's Response to Yellow Indication Subjected to Dilemma Incursion: An Econometric Approach. *Transportation Research Procedia*, 48, 1111-1124.
- McShane, C. (1999). The origins and globalization of traffic control signals. *Journal of Urban History*, 25(3), 379-404.
- Mercan, E. Z. (2023). Sinyalize Kavşaklarda İkilem Bölgeleri ve Sarı ışık Süresinin Etkisi. *Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale*.
- Mohammed, H. A., Hurwitz, D. S., Noyce, D. A., & Wang, X. (2021). Influence of Following Vehicle's Tailway and Classification on Subject Driver's Response to the Circular Yellow Indication. *Transportation Research Part F journal*, 73-86.
- Moore, D., & Hurwitz, D. S. (2013). Fuzzy Logic for Improved Dilemma Zone Identification. *Transportation Research Record*, 2384, 25 - 34.
- Nauman, A., Iqbal, A., Khurshaid, T., & Kim, S. W. (2024). Multi-Layered Unsupervised Learning Driven by Signal-to-Noise Ratio-Based Relaying for Vehicular Ad Hoc Network-Supported Intelligent Transport System in. *Sensors*, 24, 6548.
- NHTSA. (2012). Traffic Safety Facts 2009. Washington, DC 20590: U.S. Department of Transportation.
- Norton, E. C., & Dowd, B. E. (2018). Log Odds And the Interpretation of Logit Models. *Health services research*, 53(2), 859-878.

- Özalp, A. N., & Dügenci, M. (2011). Plaka Tanıma Sistemlerine Yeni Yaklaşımlar. Akademik Bilişim'11 - XIII. Akademik Bilişim Konferansı Bildirileri, (s. 747-751). Malatya.
- Pagomenos, A., Rodwell, D., & Larue, G. S. (2023). Predicting young drivers' safe behaviour of stopping in the dilemma zone. *Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour*, 283-300.
- Papacostas, C. S., & Kasamoto, N. H. (1992). Intergreen Interval Controversy: Toward a Common Framework . *Transportation Research Record*, 1324, 21-32.
- Papaioannou, P. (2007). Driver Behaviour, Dilemma Zone and Safety Effects at Urban Signalised Intersections in Greece. *Accident Analysis and Prevention*, 39, 147-158.
- Papaioannou, P., Mintsis, G., Taxiltaris, C., & Basbas, S. (2002). Enforcement and Traffic Accidents: Recent Experience from Greece. 15th ICTCTWorkshop. Brno.
- Papaioannou, P., Papadopoulos, E., Nikolaidou, A., Politis, I., Basbas, S., & Kountouri, E. (2021). Dilemma Zone: Modeling Drivers' Decision at Signalized Intersections against Aggressiveness and Other Factors Using UAV Technology. *Safety* 7(1), 7010011.
- Parsonson, P. S., Roseveare, R. W., & Thomas, J. M. (1974). Small-Area Detection at Intersection Approaches. *Traffic Engineering*, 44(5), 8-17.
- Pathivada, B. K., & Perumal, V. (2019). Analyzing Dilemma Driver Behavior at Signalized Intersection Under Mixed Traffic Conditions. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 60, 111-120.
- Pawar, D. S., Pathak, D., & Patil, G. R. (2022). Modeling Dynamic Distribution of Dilemma Zone at Signalized Intersections for Developing World Traffic. *Journal of Transportation Safety and Security*, 14(5), 886-904.
- Pawar, N. M., Velaga, N. R., & Mishra, S. (2022). Impact of Time Pressure on Acceleration Behavior and Crossing Decision at the Onset of Yellow Signal. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 87, 1-18.
- Pollard, J. (2008). The Eccentric Engineer: The History of Traffic Lights Is Full of Twists and Turns. *Engineering and Technology*, 93.
- Rahman, M., & Kang, M.-W. (2021). Analysis of Intersection Site-Specific Characteristics for Type II Dilemma Zone Determination. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 147(10), 04021072.
- Rakha, H., Amer, A., & El-Shawarby, I. (2008). Modeling Driver Behavior Within a Signalized Intersection Approach Decision–Dilemma Zone. *Transportation Research Record*, 2069, 16-25.
- Rakha, H., El-Shawarby, I., & Setti, J. R. (2007). Characterizing Driver Behavior on Signalized Intersection Approaches at the Onset of a Yellow-Phase Trigger. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8 (4), 630-640.

- Ren, Y., Wang, Y., Wu, X., Yu, G., & Ding, C. (2016). Influential Factors of Red-Light Running at Signalized Intersection and Prediction Using a Rare Events Logistic Regression Model. *Accident Analysis and Prevention*, 266-273.
- Road Safety Annual Report. (2018). Int. Transp. Forum. Paris, France.
- Seufert, E. B. (2014). Chapter 3 - Quantitative Methods for Product Management. *Leveraging Analytics and User Segmentation to Drive Revenue*, ISBN 9780124166905.
- Severance, C. (2015). Guido van Rossum: The Early Years of Python. *Computer*, 48, 2, 7-9.
- Sharma, A., Bullock, D., & Peeta, S. (2011). Estimating Dilemma Zone Hazard Function at High Speed Isolated Intersection. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 400-412.
- Şentürk, H. (2019). Kavşaklarda Kırmızı Işık İhlalleri Üzerine Bir İnceleme: Malatya Örneği. Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- URL-1. (2024, Ağustos 1). (2024, Ağustos, 1). <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries> adresinden alındı
- URL-10. (2024, Eylül 22). <https://medium.com/datarunner/matplotlibkutuphanesi-1-99087692102b> adresinden alındı
- URL-11. (2024, Eylül 25). <https://ozgurseremet.com/rgb-led-nedir-nasil-kullanilir/> adresinden alındı
- URL-12. (2024, Ağustos 22). <https://byjus.com/physics/difference-between-analog-and-digital/> adresinden alındı
- URL-2. (2024, Temmuz 20). <https://highways.dot.gov/safety/intersection-safety/about> adresinden alındı
- URL-3.(2024, Temmuz 18). <https://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Trafik/DurmaIntikal.aspx> adresinden alındı
- URL-4. (2024, Ağustos 22). <https://www.simplilearn.com/image-processing-article> adresinden alındı
- URL-5. (2024, Ağustos 30). <https://www.geeksforgeeks.org/digital-image-processing-basics/> adresinden alındı
- URL-6. (2024, Eylül 02). <https://aws.amazon.com/tr/what-is/python/> adresinden alındı
- URL-7. (2024, Eylül 10). <https://medium.com/analytics-vidhya/object-detection-using-yolo-and-car-detection-implementation-1ec79e882875> adresinden alındı
- URL-8. (2024, Eylül 10). <https://www.labellerr.com/blog/why-is-the-yolo-algorithm-important/> adresinden alındı

URL-9. (2024, Eylül 10). <https://numpy.org/> adresinden alındı

- Valeja, Y., Pathare, S., Patel, D., & Pawar, M. (2021). Traffic Sign Detection using Clara and Yolo in Python. 7th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), 367-371.
- Wang, F., Tang, K., Xu, Y., & Li, K. (2020). Investigating drivers' decision zones at high-speed intersections in China based on the acceleration-deceleration diagram. *Case Studies on Transport Policy*, 8(1), 112-118.
- Yang, D., & Wang, Y. (2016). Vehicle Lane Changing Strategy for the Dilemma Zone Problem. *CICTP*, 174-183.
- Yardım, M. S. (2015). *Karayolu Mühendisliğine Giriş (Ders Notları)*. İstanbul, Türkiye.
- Yardım, M. S. (2017). *Trafik Mühendisliğine Giriş (Ders Notları)*. İstanbul, Türkiye.
- Zegeer, C. V. (1977). *Effectiveness of Green-Extension Systems at High-Speed Intersections*. Louisville: Kentucky Department of Transportation.
- Zhang, Y. P., Liu, Y., Liu, L., & Fu, C. Y. (2016). Type Classification of Motorized Vehicles Red Light Running and Their Characteristics Analysis. *MATEC Web of Conferences* 81 (s. 02021). Les Ulis, France: EDP Sciences.
- Zhang, Y., Fu, C., & Hu, L. (2014). Yellow light dilemma zone researches: a review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering(English Edition)*, 1(5), 338-352.
- Zhang, Y., Fu, C., & Hu, L. (2014). Yellow Light Dilemma Zone Researches: a Review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 1(5), 338-352.
- Zhang, Y., Yan, X., & Li, X. (2021). Effect of Warning Message on Driver's Stop/Go Decision and Red-Light-Running Behaviors Under Fog Condition. *Accident Analysis and Prevention*, 150, 105906.
- Zimmerman, K. H. (2007). Additional Dilemma Zone Protection for Trucks at High-Speed Signalized Intersections. *Transportation Research Record*, 82-88.

ÖZGEÇMİŞ

Murat Hüseyin AKYÜZ, İlköğrenimini Şair Zihni İlkokulu, Cumhuriyet İlköğretim Okulu ve Bayburt Anadolu İmam Hatip Lisesi'nde bitirdikten sonra lise eğitimini 2004 yılında Erzincan Nevzat Ayaz Fen Lisesi'nde tamamladı. 2005-2006 öğretim yılında Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2011 yılında bu bölümden mezun oldu. 2015 yılında Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ulaştırma Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2016 yılında “Kent İçi Üniversite Kampüslerinde Otopark Planlaması ve Yönetimi: Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez Kampüsü Örneği” başlıklı yüksek lisans tezini sundu. 2017 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim dalında doktora eğitimine başladı. 2017 yılından itibaren Bayburt Üniversitesi Aydıntepe Meslek Yüksekokulu'nda öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır. İyi derece İngilizce bilmektedir.

Akyüz, M. H., ve Yardım, M. S., (2016). Üniversite Kampüslerinde Sürdürülebilir Otopark Planlaması ve Yönetimi İçin Kavramsal Bir Çerçeve. 1st International Mediterranean Science and Engineering Congress.