

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOYOL KATILIMLARININ KAPASİTE VE
GECİKMELERİ ÜZERİNE BİR İNCELEME**



İrem Merve ULU

Ağustos, 2020
İZMİR

OTOYOL KATILIMLARININ KAPASİTE VE GECİKMELERİ ÜZERİNE BİR İNCELEME

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Programı

İrem Merve ULU

Ağustos, 2020

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

İREM MERVE ULU, tarafından **PROF. DR. SERHAN TANYEL** yönetiminde hazırlanan “**OTOYOL KATILIMLARININ KAPASİTE VE GECİKMELERİ ÜZERİNE BİR İNCELEME**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Serhan TANYEL

Yönetici

Doç. Dr. Mustafa ÖZUYSAL

Jüri Üyesi

Doç. Dr. Ilgin GÖKAŞAR

Jüri Üyesi

Prof. Dr. Özgür ÖZÇELİK

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Öncelikle tez çalışmamın başından beri; tezimin şekillenmesinde ve gelişiminde değerli katkılarını ve desteğini esirgemeyen, her daim desteği ile yanımda olan, araştırma ve çalışmalarımın, bilimsel altyapısının oluşturulmasından, araştırmanın ulaşacağı son noktaya kadarki süreci, çalışma yöntemi, bilgi birikimi ve tecrübeleri ile koordine eden ve sonsuz desteğiyle her zaman benim için en iyisine yönlendiren sevgili tez danışmanım Prof. Dr. Serhan Tanyel'e sabrı ve ilgisi için teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek lisans süresince her ihtiyaç duyduğumda yardımlarını esirgemeyen Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı öğretim üyelerine;

TÜBİTAK tarafından desteklenen 217M283 projesinden elde edilen veriler ile hazırlanan bu tez için TÜBİTAK'a; ayrıca Dr. Öğretim Üyesi Selim Dünder ve Doç. Dr. Ilgın Gökaşar'a gerek proje kapsamında gerek tez çalışmalarımındaki büyük katkıları için teşekkürlerimi sunarım.

Yalnızca tez süresince değil, 11 yıldır her zaman yanımda olan, benim için elinden gelen her şeyi yapan sevgili dostum Ezgi Apaydın; aynı laboratuvarında çalışmaktan mutluluk duyduğum ve yüksek lisansın bana kattığı en içten, en güzel dostlarım Çağla Durmaz ve Burcu Yiğit'e; tez sürecimde yardımlarını esirgemeyen Özge Uzun ve Cem'e sonsuz teşekkürler ederim.

Son olarak hayatımın vazgeçilmezleri; yaşıntım boyunca yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, canımdan çok sevdiğim aileme kalpten teşekkürler.

İrem Merve ULU

OTOYOL KATILIMLARININ KAPASİTE VE GECİKMELERİ ÜZERİNE BİR İNCELEME

ÖZ

Günümüzde özellikle büyük kentlerde gözlenen trafik sıkışıklığı hem sürücüler için zaman kaybına neden olmakta hem fazla yakıt tüketimi sebebiyle doğal çevreyi olumsuz etkilemektedir. Trafik sıkışıklığının sebebi karayolu yatırımlarının yetersiz olması düşünülse de mevcut tesislerin etkin kullanılamaması da sıkışıklığa neden olmaktadır.

Otoyollar ve çevre yolları gibi yüksek maliyete sahip yatırımların en iyi şekilde işletilebilmesi için çeşitli katılım denetimi uygulamaları yapılmaktadır. Ülkemizde katılım denetimi uygulamaları sınırlı sayıda görülse de özellikle zirve saati gibi yoğun trafik akımlarında etkili sonuçlar vermektedir.

Otoyolların sıkışıklık gözlenen katılım kesimlerinin en verimli şekilde kullanılabilmesi ve katılım denetimi uygulamalarının gerekli olduğu durumların tespiti için katılım kesiminde oluşan gecikmelerin belirlenmesi gerekmektedir. Tez kapsamında otoyol katılımlarının kapasitesinin belirlenmesine yönelik başlıca yöntemler açıklanmış daha sonra literatürde en yaygın yöntem olan Kritik Aralık Kabul yöntemi sahadan toplanan veri ile irdelenmiş, kent içi bir sinyalden ayrılan taşıtların katılım kesimine gelişlerine göre servis gecikmesi değeri incelenmiştir.

Trafik mühendisliğince sıkça kullanılan benzetim programlarından biri olan AIMSUN yardımı ile bir katılım kesimi kurgusu oluşturulmuştur. Bu sayede farklı geometri ve hacim değerleri ile gecikme değerleri elde edilmiştir. Son olarak benzetim programından elde edilen veriler Kısmi En Küçük Kareler Regresyonu yöntemi kullanılarak katılım kesiminde gecikmeler modellenmeye çalışılmış ve gecikmeler için bağıntı önerisi yapılmıştır. Model çıktılarından yararlanarak, gecikmelerin katılım kesiminin başarımı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Otoyol katılımları, yan yol, gecikme, katılım kapasitesi, Kritik aralık kabul teorisi



AN INVESTIGATION ON CAPACITY AND DELAY OF FREEWAY ON RAMP JUNCTIONS

ABSTRACT

Traffic congestion cause time loss for drivers and negatively affect the natural environment due to excess fuel consumption especially in metropolitan cities. Although the reason for traffic congestion is considered to be a result of insufficient road investments; effective usage of existing facilities is among the other causes of the traffic problem.

Various merging control applications are carried out in order to operate high cost investments such as freeways efficiently. Although merging control applications are quite in limited numbers in our country, it provides effective results especially in high traffic flows such as peak hours.

Delays in the merging section should be determined in order to be able to use merging sections of the freeways effectively and to assign the situations where merging control applications are required. Within the scope of the thesis, the main methods for determining the capacity of freeway merging section are explained; the gap acceptance theory, which is the most common method in the literature, is discussed by using data collected from the field and the value of the service delay with respect to the arrivals of the vehicles approaching from an upstream signal located on an urban arterial, is tried to be determined.

With the help of AIMSUN, which is one of the simulation programs frequently used by traffic engineers, a model of freeway merging section is created. In this way, different geometry, volume and delay values are obtained. Finally, using the data obtained from the simulation program, Partial Least Squares Regression method is applied for modeling delays in the merging section and an equation is proposed. The effect of delays on the performance of the merging section is examined by using the outputs of the model.

Keywords: Freeway merging, on-ramp, delay, capacity of merging section, Gap acceptance theory



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ.....	iv
ABSTRACT.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
TABLolar LİSTESİ.....	xvi

BÖLÜM BİR - GİRİŞ..... 1

BÖLÜM İKİ – OTOYOL TESİSLERİ..... 4

2.1. Otoyol Kesimleri ve Etki Alanları.....	5
2.1.1 Temel Otoyol Kesimi	5
2.1.1.1. Temel Otoyol Kesiminde Trafik Akım Karakteristikleri.....	7
2.1.1.2. Serbest Akım Hızını Etkileyen Faktörler.....	10
2.1.2 Örölme Kesimi.....	11
2.1.3 Katılım ve Ayrılma Kesimleri	14
2.2 Otoyol Tesislerinde Hizmet Düzeyi	16

BÖLÜM ÜÇ – OTOYOL KATILIMLARINDA KAPASİTE HESAP YÖNTEMLERİ..... 20

3.1. HCM Yöntemi ile Kapasite Hesaplaması	20
3.1.1 Adım 1: Şerit 1 ve Şerit 2'ye Katılan Akımın (v_{12}) Kestirimi.....	25
3.1.2 Adım 2: Kapasitenin Belirlenmesi.....	28
3.1.3 Adım 3: Hizmet Düzeyinin Belirlenmesi	29
3.1.4 Özel Durumlar	30
3.1.4.1 İki Şeritli Katılımlar.....	30
3.1.4.2 Şerit Eklmeleri.....	32
3.1.4.3 Ana Katılım Alanları.....	32

3.1.4.4 On Şeritli Otoyollara Katılım.....	33
3.1.4.5 Otoyolun Sol Tarafında Yer Alan Katılımlar.....	34
3.2 Kritik Aralık Kabulü Yöntemi	35
3.2.1 Kritik Aralık Kabul Yönteminin Uygulanabilirliği	40
BÖLÜM DÖRT - OTOYOL KATILIMLARININ BAŞARIMLARININ KRİTİK ARALIK KABULÜ YÖNTEMİ İLE İRDELENMESİ.....	44
4.1 Anayoldaki Taşıtlar Arasındaki Zaman Cinsinden Aralıkların Modellenmesi...	44
4.1.1 Zaman Cinsinden Takip Aralığı Verilerinin Toplandığı Gözlem Bölgeleri	44
4.1.2 Zaman Cinsinden Takip Aralığı Veri Gruplarının Elde Edilmesi	49
4.1.3 Cowan M3 Dağılımın Özellikleri ve Parametrelerinin Ölçümlendirilmesi	54
4.2 Kritik Aralık Kabulü ve Takip Aralığı Değerleri.....	63
4.3 Sınırlı Öncelik Koşulunda Kapasite Hesabı.....	66
4.4 Gecikme.....	67
4.4.1. Bunker ve Troutbeck'in (2003) Gecikme Bağıntısı.....	67
4.4.2 Trafik Işığından Ayrılan Trafik Akım Özelliklerine Bağlı Servis Gecikmesinin Değişimi.....	72
BÖLÜM BEŞ - BENZETİM PROGRAMI İLE OTOYOL KATILIMLARINDAKİ GECİKMELERİN MODELLENMESİ	81
5.1. AIMSUN Benzetim Programı	81
5.2. AIMSUN Programında Modelin Oluşturulması	83
5.3. Modelinin Kalibrasyonu.....	85
5.3.1. Gözlem Noktaları.....	85
5.3.2. Kalibrasyon ve Validasyon İşlemleri.....	89
5.3.3. Gözlem Verilerinin AIMSUN Modeli Kalibrasyon ve Validasyon İşlemlerine ait Sonuçları	92

5.4. Senaryolar.....	104
5.5. Gecikmeler İçin Ampirik Bağını Önerisi	106
5.5.1. Kısmi En Küçük Kareler Yöntemi	106
5.5.2. Ampirik Model Önerisi.....	109
BÖLÜM ALTI – SONUÇ VE ÖNERİLER.....	126
KAYNAKLAR	129



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1 Tez çalışması akış şeması.....	3
Şekil 2.1 Örnek bir otoyol tesisinde temel otoyol kesimi, katılım ve ayrılmalar.....	4
Şekil 2.2 Örnek bir otoyolda temel otoyol kesimi	6
Şekil 2.3 Temel otoyol kesiminin akım-hız ilişkisi	8
Şekil 2.4 Temel otoyol kesiminin akım- yoğunluk ilişkisi	9
Şekil 2.5 Temel otoyol kesiminde akım karakteristiğine göre akım- hız ilişkisi.....	10
Şekil 2.6 Örülme kesimi akım hareketleri	12
Şekil 2.7 Tek taraflı örülme kesimi örnekleri	13
Şekil 2.8 İki taraflı örülme bölgesi.....	13
Şekil 2.9 Örülme kesimi	13
Şekil 2.10 Katılım hareketinin etki alanı	15
Şekil 2.11 Ayrılma hareketinin etki alanı	16
Şekil 2.12 Otoyol tesislerinde hizmet düzeyi	17
Şekil 3.1 HCM 2000'e göre katılım kesimi kapasite hesaplama yöntemi adımları	21
Şekil 3.2 Katılım etki alanı ve önemli değişkenler	22
Şekil 3.3 İki şeritli katılım	31
Şekil 3.4 Ana katılım alanı -1	33
Şekil 3.5 Ana katılım alanı- 2	33
Şekil 3.6 a) Öne giriş ve b) Araya giriş aralıkları	36
Şekil 3.7 Bir otoyol katılımında sürücülerin aralık kabul davranışı	36
Şekil 4.1 İzmir'deki gözlem noktaları	45
Şekil 4.2 İstanbul'daki gözlem noktası	45
Şekil 4.3 Ankara Caddesi'nin (Özkanlar) konumu	46
Şekil 4.4 Altınyol'un konumu	47
Şekil 4.5 Mürselpaşa Caddesi'nin konumu	48
Şekil 4.6 Bornova'da Çevre Yolu'nun konumu.....	48
Şekil 4.7 Acıbadem (Metrobüs Yanı) Yolu	49
Şekil 4.8 "k _d " parametresi ve trafik akım oranına bağlı serbest taşıt oranının değişimi.....	58
Şekil 4.9 " $\Delta \cdot q - \alpha$ " ilişkisi	62

Şekil 4.10	Trafik hacmi - " α " ilişkisi.....	63
Şekil 4.11	Farklı araştırmacıların çalışmalarına göre hesaplanan kritik aralık kabul değerlerinin karşılaştırılması.....	66
Şekil 4.12	Bunker ve Troutbeck (2003) tarafından tanımlanmış olan gecikme bileşenleri	68
Şekil 4.13	Farklı serbest araç oranı bağıntı ve parametrelerinin karşılaştırılması ...	71
Şekil 4.14	(a) Bunker ve Troutbeck (2003) servis gecikmesi değerleri (b) bu çalışmada ölçümlendirilmiş olan serbest taşıt oranı kullanılarak hesaplanan servis gecikmesi değerleri	71
Şekil 4.15	Gözlem noktasının görünümü	74
Şekil 4.16	Serbest taşıt oranı bağıntılarının gözlemlenen değerlerle karşılaştırılması	75
Şekil 4.17	Işıktan ayrılan taşıtların otoyol katılımında karşılaşılabilecekleri gecikmeleri gösteren örnek bir yol-zaman grafiği.....	75
Şekil 4.18	Bunker ve Troutbeck bağıntısı ile Kingsman bağıntısının sonuçlarının karşılaştırılması	79
Şekil 4.19	" y_{sl}/D_{ay} " oranının gecikme üzerindeki etkisi.....	79
Şekil 5.1	AIMSUN programında örnek proje ekranı	82
Şekil 5.2	AIMSUN modelin 2 boyutlu görüntüsü	84
Şekil 5.3	AIMSUN modelin 3 boyutlu görüntüsü	85
Şekil 5.4	Gözlem noktaları	86
Şekil 5.5	Tınaztepe bağlantı	87
Şekil 5.6	Tınaztepe kavşağı.....	87
Şekil 5.7	Mürselpaşa Bulvarı	88
Şekil 5.8	906 numaralı dedektörden elde edilen yoğunluk ve hacim verilerinin gözlem verileri ile karşılaştırılması	92
Şekil 5.9	906 numaralı dedektörden elde edilen yoğunluk ve hız verilerinin gözlem verileri ile karşılaştırılması	93
Şekil 5.10	906 numaralı dedektörden elde edilen hacim ve hız verilerinin gözlem verileri ile karşılaştırılması.....	93
Şekil 5.11	906 numaralı dedektörden elde edilen hacim verilerinin dakikalık olarak gözlem verileri ile karşılaştırılması	94

Şekil 5.12	906 numaralı dedektörden elde edilen hacim verilerinin 10'ar dakikalık ortalamalarının gözlem verileri ile karşılaştırılması	94
Şekil 5.13	907 numaralı dedektörden elde edilen yoğunluk ve hacim verilerinin gözlem verileri ile karşılaştırılması	95
Şekil 5.14	907 numaralı dedektörden elde edilen yoğunluk ve hız verilerinin gözlem verileri ile karşılaştırılması.....	95
Şekil 5.15	907 numaralı dedektörden elde edilen hacim ve hız verilerinin gözlem verileri ile karşılaştırılması.....	96
Şekil 5.16	907 numaralı dedektörden elde edilen hacim verilerinin dakikalık olarak gözlem verileri ile karşılaştırılması	96
Şekil 5.17	907 numaralı dedektörden elde edilen hacim verilerinin 10'ar dakikalık ortalamalarının gözlem verileri ile karşılaştırılması.....	97
Şekil 5.18	921 numaralı dedektörden elde edilen yoğunluk ve hacim verilerinin gözlem verileri ile karşılaştırılması	97
Şekil 5.19	921 numaralı dedektörden elde edilen yoğunluk ve hız verilerinin gözlem verileri ile karşılaştırılması.....	98
Şekil 5.20	921 numaralı dedektörden elde edilen hacim ve hız verilerinin gözlem verileri ile karşılaştırılması	98
Şekil 5.21	921 numaralı dedektörden elde edilen hacim verilerinin dakikalık olarak gözlem verileri ile karşılaştırılması	99
Şekil 5.22	921 numaralı dedektörden elde edilen hacim verilerinin 10'ar dakikalık ortalamalarının gözlem verileri ile karşılaştırılması.....	99
Şekil 5.23	906 numaralı dedektöre ait GEH Değerleri	100
Şekil 5.24	907 numaralı dedektöre ait GEH değerleri	101
Şekil 5.25	921 numaralı dedektöre ait GEH değerleri	101
Şekil 5.26	906 numaralı dedektöre ait RMSE yüzdeleri.....	102
Şekil 5.27	907 numaralı dedektöre ait RMSE yüzdeleri.....	103
Şekil 5.28	921 numaralı dedektöre ait RMSE yüzdeleri.....	103
Şekil 5.29	Benzetim modeline girilen yan yol talebi ve benzetim modelinin çıktısı hacim değerleri.....	109
Şekil 5.30	Benzetim programından elde edilen veriler ile hesaplanan ve KEKKR yöntemi ile hesaplanan iki şeritli yan yol kapasite değerleri	112

Şekil 5.31	Benzetim programından elde edilen ve KEKKR yöntemi ile hesaplanan iki şeritli yan yoldaki gecikme değerleri	114
Şekil 5.32	Benzetim programından elde edilen ve KEKKR yöntemi ile hesaplanan iki şeritli yan yoldaki hızlar.....	116
Şekil 5.33	Benzetim programından elde edilen veriler ile hesaplanan ve KEKKR yöntemi ile hesaplanan tek şeritli yan yol kapasite değerleri	118
Şekil 5.34	Benzetim programından elde edilen ve KEKKR yöntemi ile hesaplanan tek şeritli yan yoldaki gecikme değerleri	120
Şekil 5.35	Benzetim programından elde edilen ve KEKKR yöntemi ile hesaplanan iki şeritli yan yoldaki hızlar.....	122
Şekil 5.36	İki şeritli yan yol katılımlarında anayol gecikmesine Vyanyol ve Qanayol/Qkatılım etkisi	123
Şekil 5.37	İki şeritli yan yol katılımlarında anayoldaki gecikmeye Vyanyol ve Qanayol etkisi.....	123
Şekil 5.38	Tek şeritli yan yol katılımlarında anayol gecikmesine Vyanyol ve Qanayol/Qyanyol etkisi.....	124
Şekil 5.39	Tek şeritli yan yol katılımlarında anayol gecikmesine Qanayol ve Vyanyol etkisi	124

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1 Katılım kesiminde kapasite analizi için gerekli veriler	22
Tablo 3.2 Arazi yapısına göre ağır taşıt düzeltme faktörü	24
Tablo 3.3 Yan yol yaklaşık kapasitesi	24
Tablo 3.4 Katılım kesiminde v_{12} değeri kestirimi için denklemler	26
Tablo 3.5 Altı şeritli otoyollar için P_{FM} denklemi seçimi	27
Tablo 3.6 Katılım alanları için kapasite değerleri	29
Tablo 3.7 Katılım alanları için hizmet düzeyi.....	30
Tablo 3.8 Sağ taraftan tek şeritli katılıma sahip on şeritli otoyollarda 5. şeritteki akım.....	34
Tablo 4.1 Sağ şeride ait hacim (tst/sa), ortalama takip aralığı (saniye), ortanca, kip, basıklık ve çarpıklık değerleri	51
Tablo 4.2 Orta şeride ait hacim (tst/sa), ortalama takip aralığı (saniye), ortanca, kip, çarpıklık ve basıklık değerleri	52
Tablo 4.3 Sol şeride ait hacim (tst/sa), ortalama takip aralığı (saniye), ortanca, kip, çarpıklık ve basıklık değerleri	53
Tablo 4.4 Sağ şerit için Cowan M3 dağılımı parametreleri	59
Tablo 4.5 Orta şerit için Cowan M3 dağılımı parametreleri.....	60
Tablo 4.6 Sol şerit için Cowan M3 dağılımı parametreleri.....	61
Tablo 4.7 Otoyol katılımlarında uzunluk cinsinden kabul edilen aralıklar	65
Tablo 5.1 AIMSUN modeli uygulama süreci	83
Tablo 5.2 Üç Gözlem noktasındaki şeritlerin hacim değerleri, ortalama zaman cinsinden takip aralığı, ortalama hız ve standart sapmaları	89
Tablo 5.3 906, 907 ve 921 numaralı dedektörlerden elde edilen GEH değerleri ..	102
Tablo 5.4 Ortalama RMSE değerleri	104
Tablo 5.5 İzmir ilinde yer alan örnek katılım alanları geometrileri.....	105
Tablo 5.6 İzmir ilinde yer alan katılım öncesi sinyalizasyon sistemlerinde devre süresi ve yeşil süre.....	105
Tablo 5.7 İki şeritli yan yol kapasitesi için model seçimi ve doğrulaması	110
Tablo 5.8 İki şeritli yan yol kapasitesini etkileyen değişkenlerin KEKKR yöntemi ile analizi	110

Tablo 5.9 İki şeritli yan yol kapasitesini etkileyen değişkenlerin KEKKR yöntemi ile analizi 2	111
Tablo 5.10 İki şeritli yan yol gecikmesi için model seçimi ve doğrulaması	112
Tablo 5.11 İki şeritli yan yol gecikmesini etkileyen değişkenlerin KEKKR yöntemi ile analizi	113
Tablo 5.12 İki şeritli yan yoldaki hızlar için model seçimi ve doğrulaması	114
Tablo 5.13 İki şeritli yan yol hızları etkileyen değişkenlerin KEKKR yöntemi ile analizi	115
Tablo 5.14 Tek şeritli yan yol kapasitesi için model seçimi ve doğrulaması	116
Tablo 5.15 Tek şeritli yan yol kapasitesini etkileyen değişkenlerin KEKKR yöntemi ile analizi	117
Tablo 5.16 Tek şeritli yan yol kapasitesini etkileyen değişkenlerin KEKKR yöntemi ile analizi	117
Tablo 5.17 Tek şeritli yan yol gecikmesi için model seçimi ve doğrulaması	119
Tablo 5.18 Tek şeritli yan yol gecikmesini etkileyen değişkenlerin KEKKR yöntemi ile analizi	119
Tablo 5.19 Tek şeritli yan yol hızları için model seçimi ve doğrulaması	120
Tablo 5.20 Tek şeritli yan yol gecikmesini etkileyen değişkenlerin KEKKR yöntemi ile analizi	121

BÖLÜM BİR

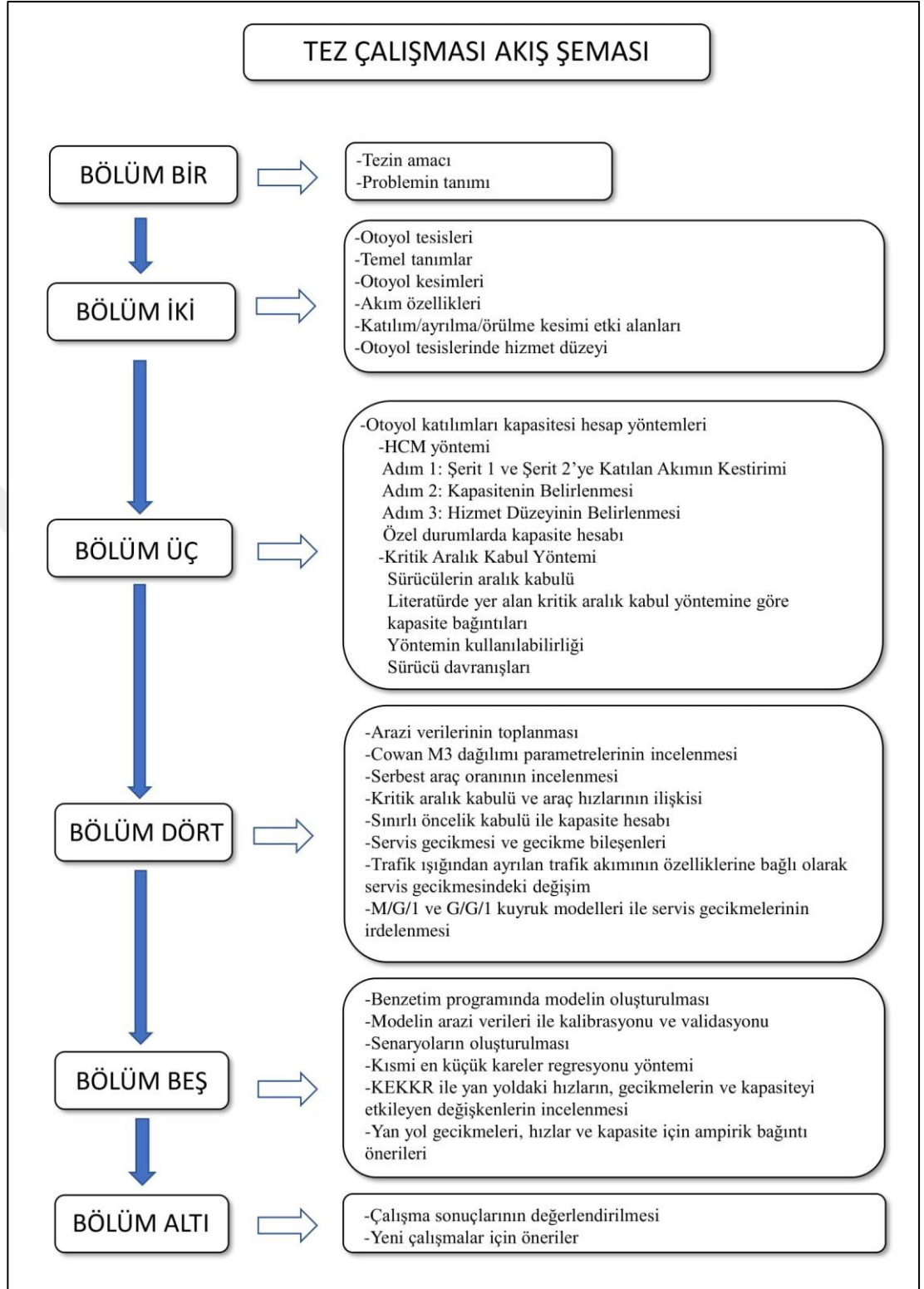
GİRİŞ

Ulaşım insanlık tarihinin ilk yıllarından itibaren günlük hayatımızda en önemli yeri tutan unsurlardan birisi olmuştur. Özellikle son 150 yıl içerisindeki sosyal ekonomik ve kültürel gelişmeler ulaşımın hayatımızdaki yerini daha da vazgeçilmez hale getirmiştir. Günümüzde insanların ve eşyaların hareketliliğini sağlamak için mümkün olduğunca sürdürülebilir ulaştırma sistemlerinin hayata geçirilmesi dünyanın geleceği açısından öncelikli konulardan biri olmuştur. Bu bağlamda özellikle raylı sistem ve deniz ulaşımı gibi ulaştırma sistemlerinin daha etkin kullanılması yönünde önemli çalışmalar bulunmaktadır. Bütün bu çalışmalara rağmen karayolu ve lastik tekerlekli taşımacılık hala günlük yaşantımızda çok büyük bir paya sahiptir ve kısa vadede bunun değişmesi de beklenmemektedir. Sürdürülebilir bir ulaştırma sisteminin hayata geçirilebilmesi için mevcut ulaştırma sistemlerinin dinamiklerinin sağlıklı bir biçimde belirlenmesi, mevcut ulaşım ağının daha etkin kullanılabilmesini ve yeni ulaşım yatırımlarının kararlarının daha gerekliliğini daha iyi tahlil edilebilmesini beraberinde getirecektir.

Özellikle ülkemizde son yıllara kadar trafik sıkışıklığının ana sebebinin karayolu yatırımlarının yetersizliğinden olduğu düşünülmekteydi ancak tüm dünyada olduğu gibi toplu taşıma sistemlerinin yeterince etkin oluşturulamaması, ulaşım planlaması kararlarının göz ardı edilmesi veya amacından farklı bir şekilde uygulanması ve mevcut karayollarının sürücüler tarafından yanlış kullanımları, (kural dışı) bu yanlış kullanımlara karşın yaptırımların zaman zaman yetersiz kalması karayolu ağının etkin kullanımını engelleyen unsurlar arasında yer almaktadır. Özellikle otoyol ve çevre yolu yatırımları yüksek maliyetli ve doğal çevreye önemli oranda geri dönülmez zararlar veren yatırımlardır. Londra'daki M25 otoyolu gibi yanlış planlama sonucunda oluşturulan çevre yolları sadece trafik sıkışıklığının artmasına değil beraberinde önemli çevre sorunlarının da oluşmasına yol açmaktadır. Bu bağlamda çevre yollarının ve otoyolların gerçek kapasite ve başarımlarının belirlenmesi ve trafik akım dinamiklerinin doğru bir şekilde tanımlanması hayati bir öneme sahiptir.

Günümüzde özellikle büyük kentlerde bulunan çevre yolu katılımları katılım kontrolü amacıyla katılım denetimi (ramp metering) uygulamaları yapılmaktadır (Yaşar, 2006; Yaslan, 2012). Ülkemizde de buna yönelik uygulamaların başladığı bilinmektedir. Ancak hala söz konusu katılımların gerçek kapasite ve başarımları hakkında yapılan çalışma sayısı yeterli değildir. Bu çalışmada bir otoyol/çevre yoluna katılımın özellikle kapasite ve başarımlarının üzerinde etkili olan parametrelerin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

Çalışmanın ilk kısmında otoyol katılımları ve özellikleri hakkında bilgiler verilmeye çalışılmış, daha sonra otoyol katılım kapasitesi ve başarımları belirlenmesinde kullanılan TRB (2000) ve kritik aralık kabul yöntemleri kısaca açıklanmıştır. Kritik aralık kabul yöntemi kullanılarak katılım gecikme değerleri hesaplanmış daha sonra kritik aralık kabul yöntemi ve AIMSUN benzetim programı kullanılarak farklı trafik talepleri ve geometriler için yan yol katılım kapasitesi ve gecikmelerinin hesaplanması amaçlanmıştır. Son olarak elde edilen bulgular Kısmi En Küçük Kareler Regresyonu ile değerlendirilmiştir. Şekil 1.1’de tez çalışmasının akış şeması görülebilir.



Şekil 1.1 Tez çalışması akış şeması

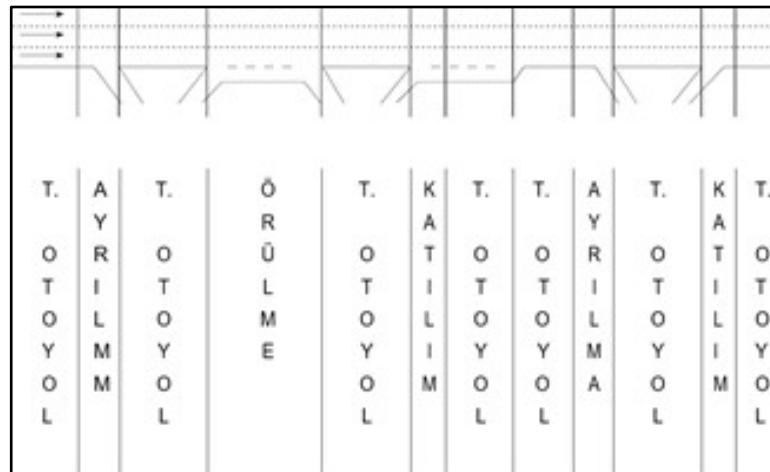
BÖLÜM İKİ

OTOYOL TESİSLERİ

Otoyollar erişim kontrolü ile ayrılmış iki veya daha fazla şeritten oluşan, kapasitesi ve hizmet düzeyi ile farklı kesimlere ayrılmış karayoludur. Highway Capacity Manual'a (HCM- Karayolu Kapasitesi El Kitabı) göre karayolunda genel olarak üç kesim bulunmaktadır (TRB, 2010). Bunlar:

- Otoyol Katılma ve Ayrılma Kesimi (Merging and Diverging Section): iki veya daha fazla trafik akımının bir araya gelmesi (katılma) ya da tek bir akımın ayrılarak iki veya daha fazla akım haline geldiği (ayrılma) kesimdir.
- Örülme Kesimi (Weaving Section): iki veya daha fazla aynı yönde ilerleyen trafik akımının trafik kontrolü olmadan (sinyal) birbirinin içinden geçmesi durumudur. Örülme kesimi genellikle birbirine yakın konumlanan katılma ve ayrılma kesimlerini içermektedir.
- Temel Otoyol Kesimi (Basic Freeway Section): Katılma, ayrılma ve örülme kesimlerini içermeyen otoyol kesimidir.

Şekil 2.1'de verilen görselde kentsel bir alanda katılım, ayrılma ve örülme kesimleri ne kadar sık olsa da temel otoyol kesimlerinin varlığı gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Örnek bir otoyol tesisinde temel otoyol kesimi, katılım ve ayrılmalar (TRB, 2000)

Bir otoyol tesisinin tam kapasite ile işletilebilmesi için temel koşullar iyi hava durumu, iyi görüş, kaza ya da yol müdahalesi olmaması ve trafik hareketini olumsuz etkileyecek bir kaplama bozulması olmaması olarak sayılabilir (TRB, 2010). Bu temel koşulların yanında sürücülerin yola aşına olduğu, şerit genişliğinin en az 3,6 m ve yan al açıklığının en az 1,8 m olduğu kabul edilir. Bu koşullar olmadığında otoyol kesimlerinde hacim, kapasite ve hizmet düzeyinin öngörülenden daha düşük olması beklenebilir. Bu etkenler dışında sürücülerin yol kenarındaki olaylardan da etkilendiği bilinmektedir.

Temel otoyol kesiminde örölme hareketleri, katılım ve ayrılmaların oluşturduğu darboğazlar trafik akımını büyük ölçüde değiştirebilir. TRB (2010)'ye göre katılım kesiminin etkisi katılım noktasının yaklaşık 450 m yukarısı ve 450 m aşağısına kadar uzanmaktadır. Ayrılma kesiminde de benzer şekilde ayrılma noktasının yaklaşık 450 m yukarısı ve 450 m aşağısına kadar uzanmaktadır. Örölme bölgesinin etkisi ise kesimin yaklaşık 150 m aşağısına ve yukarısına uzanmaktadır. Bir tıkanıklık durumunda ise bu kesimlerin etkileri daha geniş boyutlara yayılabilir. Bununla birlikte bu mesafeler başarılı bir otoyol tesisinde katılma, ayrılma ve örölme hareketinden en çok etkilenecek kesimleri tanımlarken bunun dışında kalan temel otoyol kesiminin bunlardan etkilenmediği ya da en az şekilde etkilendiği kabul edilir.

2.1 Otoyol Kesimleri ve Etki Alanları

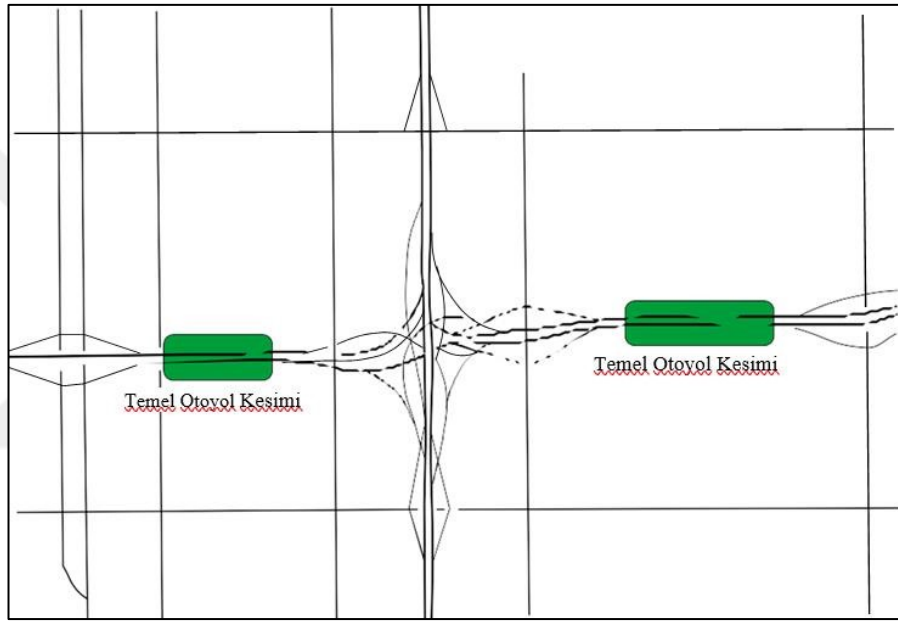
Otoyol kesimlerinin tanımlanması ve etki alanlarının belirlenmesi otoyol tesisinin en iyi şekilde işletilmesi için ve kapasitenin belirlenmesi için oldukça önemlidir. Bu bölümde otoyol kesimleri detaylı olarak incelenecektir.

2.1.1 Temel Otoyol Kesimi

Temel otoyol kesimi; katılma, ayrılma veya örölme bölgesindeki manevraların etkisi dışında kalan otoyol kesimi olarak tanımlanır. Bu kesimde anayoldaki taşıtların, şerit değiştiren taşıtlardan, rampalardan ve örölme hareketinden önemli ölçüde etkilenmediği varsayılır. Ancak yine de temel otoyol kesimi yakındaki

katılım, ayrılma ve örölme kesimlerinde meydana gelecek büyük bir tıkanıklıktan etkilenebilir (TRB, 2010).

Ayrıca katılım, ayrılma ve örölme kesimlerinin sıklığının tüm bölümlerin çalışması üzerindeki genel etkisi, tesisin serbest akım hızı ile dikkate alınmaktadır (TRB, 2010). Kentsel otoyollarda katılım, ayrılma ve örölme kesimlerinin baskın olacağı doğru olsa da temel otoyol kesimi olarak sınıflandırılan ve analiz edilen kesimler de yer alacaktır.



Şekil 2.2 Örnek bir otoyolda temel otoyol kesimi (TRB, 2000)

Bu bölümde kullanılacak olan bazı kavramların tanımlamaları aşağıda verilmiştir (TRB, 2000):

- Otoyol kapasitesi (Freeway Capacity): Bir otoyol kesiminden geçerli trafik ve yol koşulları altında bir şeritten geçebilecek en çok otomobil sayısıdır.
- Trafik karakteristikleri: Trafik akımının araç tipine göre yüzde bileşimi ve sürücülerin otoyola olan aşinalığı dahil olmak üzere kapasiteyi, serbest akım hızını veya işleyişi etkileyebilecek trafik akımının karakteristikleridir.

- Yol karakteristikleri: Şerit sayısı ve genişliği, sağ taraftaki yanal boşluk, katılım/ayrılma/örülme arasındaki mesafe, dikey hizalama ve şerit konfigürasyonları dahil olmak üzere, incelenmekte olan otoyol kesiminin geometrik karakteristikleridir.
- Serbest akım hızı (Free flow speed- FFS): Geçerli yol ve trafik koşullarında, tek tip bir otoyol kesiminde düşük ve orta akım oranları altında kalabilen ortalama otomobillerin ortalama hızıdır.
- Temel koşullar: Kapasite ve hizmet düzeyi (Level of Service- LOS) hesaplamaları için başlangıçta varsayılan geometrik ve trafik koşulları kümesidir.

Kapasite analizi, tekdüze trafik ve yol koşullarına sahip otoyol kesimlerine dayanmaktadır. Geçerli koşullardan herhangi biri önemli ölçüde değişirse, kesimin kapasitesi ve çalışma koşulları da değişir. Bu nedenle her bir homojen kesim, ayrı ayrı analiz edilmelidir (TRB, 2000).

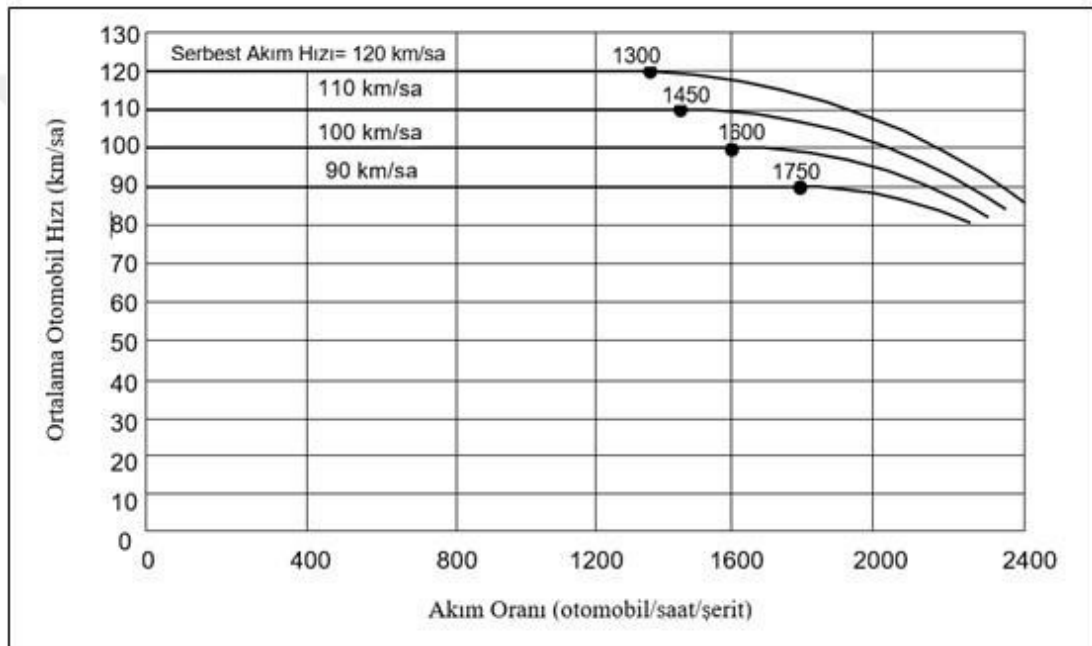
2.1.1.1 Temel Otoyol Kesiminde Trafik Akım Karakteristikleri

Temel otoyol kesimleri içindeki trafik akımı, akım aşağı yönde ve akım yukarı yönde yer alan dar boğazların akımı daraltan koşullarına bağlı olarak büyük ölçüde değiştirilebilir. Katılımlar, örülme bölgeleri, şerit azaltmaları, bakım onarım işlemleri, kazalar ve yoldaki nesneler söz konusu darboğazlara neden olabilir (TRB, 2010). Yalnızca seyahat şeridinde değil refüjde ve yol kenarında durumlarda trafik akımını etkileyebilir.

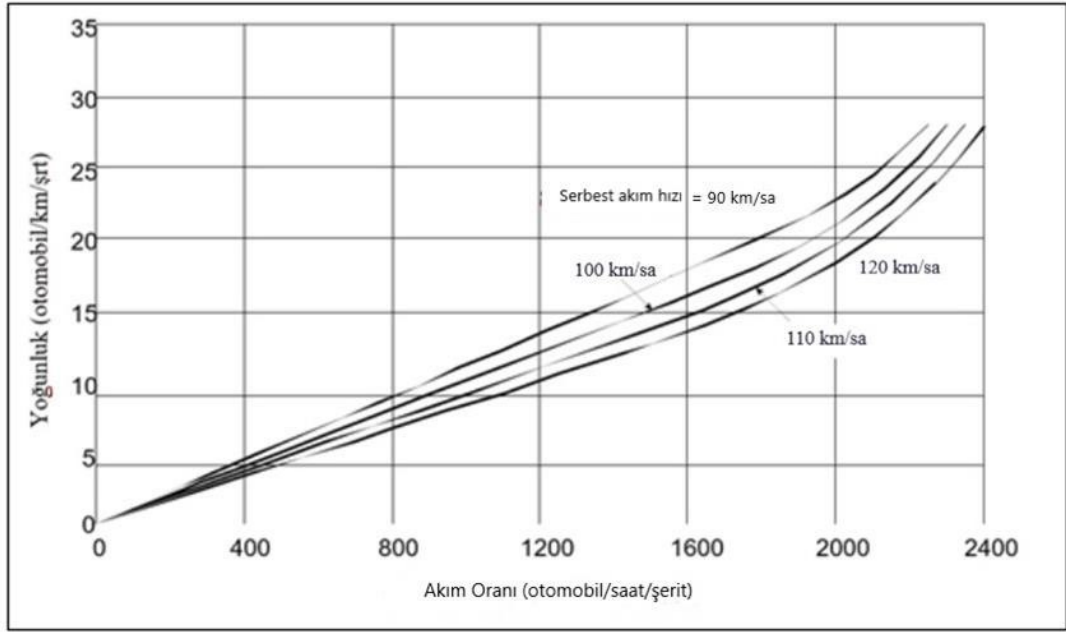
Temel otoyol kesiminde trafik akımı üç akım tipinde kategorize edilebilir: Bunlar doygun olmayan, kuyruk boşaltımı ve doygun üstü akımdır (TRB, 2010). Her akım tipi genel hız- hacim yoğunluk aralıkları içinde tanımlanır ve her biri otoyollardaki farklı koşulları temsil eder. Doygun olmayan akım, akım yukarı veya aşağı yönde akım koşullarından etkilenmeyen trafik akımını temsil etmektedir. Bu akım tipi genellikle 90-120 km/sa hız aralığında düşük ila orta akım oranlarını, 90-120 km/sa

hız aralığında ise yüksek akım oranını tanımlar (TRB, 2000). Kuyruk boşaltımı, bir darboğazdan geçen ve otoyolun serbest akım hızına geri dönen trafik akımını temsil eder. Doygun üstü akım ise akım aşağı yönde yer alan bir darboğazdan etkilenen trafik akımını temsil eder.

Serbest akım hızının bilindiği temel koşullar veya temel olmayan koşullar altında tipik bir temel otoyol kesiminin hız, akım ve yoğunluk ilişkisi Şekil 2.3'te verilmiştir.

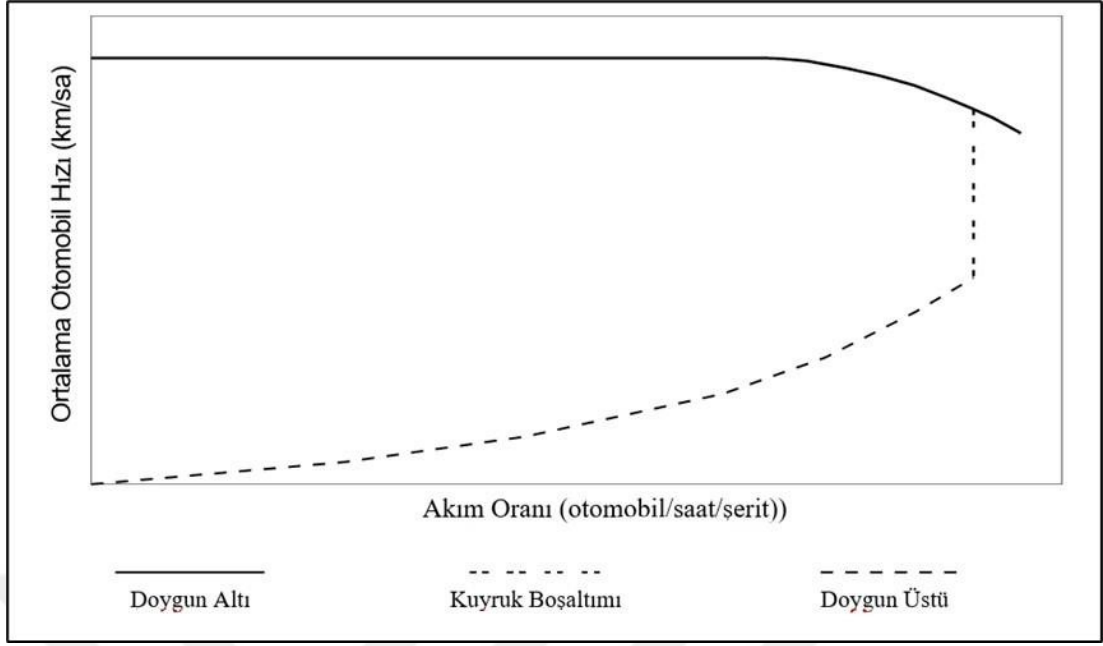


Şekil 2.3 Temel otoyol kesiminin akım-hız ilişkisi (TRB, 2000)



Şekil 2.4 Temel otoyol kesiminin akım- yoğunluk ilişkisi (TRB,2000)

Şekil 2.3'te de görüldüğü gibi serbest akım hızı 120 km/sa ve üzeri olan otoyollar temel trafik ve geometrik koşullar altında 2400 oto/sa/şrt kadar yüksek kapasitelerde çalışabilir. Serbest akım hızı azaldıkça kapasitede de azalma meydana gelir. Örneğin 90 km/sa serbest akım hızına sahip bir temel otoyol kesiminin kapasitesinin yaklaşık 2250 oto/sa/şrt olması beklenmektedir. Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'te de görüleceği gibi akım oranındaki artışın ortalama otomobil hızını etkilemeye başladığı nokta 1300-1750 oto/sa/şrt arasında değişmektedir. 120 km/sa serbest akım hızına sahip otoyol kesimleri için hız 1300 oto/sa/şrt'den sonra düşmeye başlar. Şekil 2.5, doymun altı, kuyruk boşaltımı ve doymun üstü akım durumlarında akım- hız ilişkisini göstermektedir.



Şekil 2.5 Temel otoyol kesiminde akım karakteristiğine göre akım- hız ilişkisi (Hall ve diğer., 1992; TRB, 2000)

2.1.1.2 Serbest Akım Hızını Etkileyen Faktörler

Çok şeritli bir otoyol boyunca serbest akım hızını etkileyen birçok trafik kontrolü, fiziksel koşullar ve trafik koşulları bulunmaktadır. Bu koşullar TRB (2010)'de aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Şerit Genişliği ve Yanal Açıklık: 3,6 m'den kısa şerit genişliği hareket hızlarını kısıtlarken; 3,6 m'den büyük genişliklerin hızı beklenenin üzerine çıkardığı düşünülmektedir. Yol kenarlarında ya da refüjlerde yer alan engeller (köprü ayağı, bariyer, vb.) sürücülerin engellerden kaçınmasına ve yanal hareket alanının kısıtlanmasına bu durum da hızların etkilenmesine neden olacaktır. Yanal açıklığın hızları etkilememesi için 3,6 m'den (her iki yönde de toplam) büyük olması gerekmektedir.

Şerit Sayısı: Otoyollarda şerit sayısı sürücülerin önündeki aracı geçme ve manevra yapabilme olanağını etkilediğinden serbest akım hızını da etkiler. Azalan şerit sayısına bağlı olarak azalan manevra kabiliyeti araçların ortalama hızını azaltma eğilimindedir.

Katılım/ayrılma/örölme arasındaki mesafe: Katılım ve örölme kesimlerinin bir otoyol üzerindeki yoğunluğu serbest akım hızını etkilemektedir. Örneğin ağır gelişmiş kentsel bölgelerdeki gibi yakın aralıklı katılım/ ayrılma/ örölme kesimlerine sahip otoyol kesimleri, katılım/ ayrılma/ örölme kesimlerinin daha az sıklıkta olduğu banliyö ve kırsal otoyollardan daha düşük serbest akım hızında çalışır.

Diğer faktörler: Bir otoyolun birincil fiziksel elemanlarının tasarım hızı, seyahat hızını etkileyebilir. Özellikle, yatay ve dikey hizalamalar belirli bir otoyol kesiminin serbest akım hızını etkileyebilir.

Eşdeğer Otomobil Birimi: Ağır araçlar hacim hesaplaması için (kamyon, otobüs, rekreasyon aracı vb.) eşdeğer otomobile birimine çevrilir. Ağır araçların eşdeğer otomobil birimine çevrilmesi özellikle otoyol kesimlerinin analizinde önemlidir.

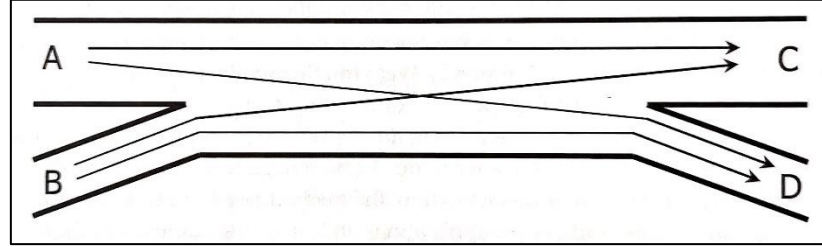
Sürücü Davranışı: Sürücülerin yaşadıkları kentsel alana göre farklı davranış göstermesi, rekreasyonel trafiğin kapasitesinin daha düşük olması gibi sebeplerle sürücü davranışları akım oranını etkilemektedir.

2.1.2 Örölme Kesimi

Örölme kesimleri trafik kontrol cihazları yardımı olmadan bir otoyol kesimi boyunca aynı yönde hareket eden iki veya daha fazla akımın kesişmesi ile oluşur (TRB, 2000). Örölme kesimleri genellikle bir katılım kesimini bir ayrılma kesimi takip ettiğinde ya da bir katılım rampasını bir ayrılma rampası takip ettiğinde oluşmaktadır.

Örölme kesimlerinde sürücülerin istedikleri çıkış noktasından uygun şeritlere erişmesi bu kesimde yoğun şerit değiştirme hareketi gözlenmesine neden olmaktadır (TRB, 2010). Bu nedenle bir örölme kesimindeki trafik, temel otoyol kesimlerinden daha fazla türbülansa maruz kalır.

Şekil 2.6’da bir örülme kesiminde akım geçişlerini göstermektedir. A kolundan örülme kesimine girip D kolundan çıkış yapan araçların B kolundan örülme kesimine girip C kolundan çıkış yapan taşıtlar ile çakıştığı görülmektedir.



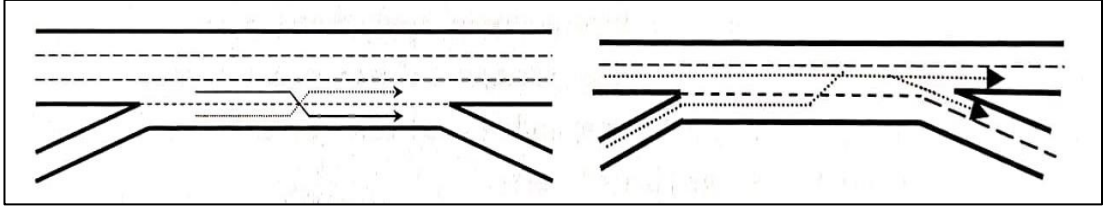
Şekil 2.6 Örülme kesimi akım hareketleri (TRB, 2010)

TRB (2010)’ye göre üç geometrik değişken örülme kesiminin işleyişini etkilemektedir. Bunlar; uzunluk, genişlik ve konfigürasyondur.

Örülme Kesimi Uzunluğu: Örülme kesimlerinin başlangıç ve bitiş noktası içinde araçlar tüm şerit değişikliği manevralarını gerçekleştirmesi gerektiğinden, örülme kesimi uzunluğu önemli bir parametredir. Örülme kesiminin uzunluğu sürücünün tüm şerit değişikliklerini yapması gereken zamanı ve alanı kısıtlar. Böylece örülme kesiminin uzunluğu azaldıkça (kesim konfigürasyonu ve örülme akımı sabitken) şerit değiştirme yoğunluğu ve ortaya çıkan türbülans artar.

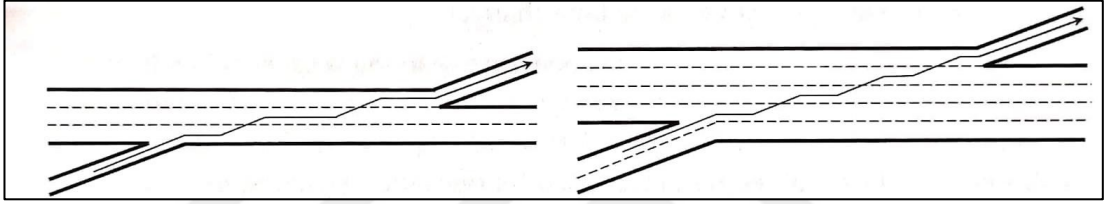
Örülme Kesimi Genişliği: Örülme kesiminde eğer varsa yardımcı şeritler de dahil olmak üzere giriş ve çıkış noktaları arasında kalan alanda toplam şerit sayısıdır. Şerit sayısı arttıkça şerit değiştirme fırsatı da artmaktadır.

Kesim Konfigürasyonu: Örülme kesimlerinde katılım ve ayrılma şeritlerinin düzenlemeleri iki farklı şekilde yapılabilir. Bunlardan ilki tek taraflı örülme kesimidir. Çoğu örülme kesimi tek taraflıdır ve bu katılım ve ayrılmaların aynı taraftan olduğu anlamına gelir. Tek taraflı örülme kesiminde bir örülme manevrasının başarıyla tanımlanabilmesi için ikiden fazla şerit değiştirme manevrasına ihtiyaç duyulmaz. Tek taraflı örülme kesimi örnekleri Şekil 2.7’de verilmiştir.



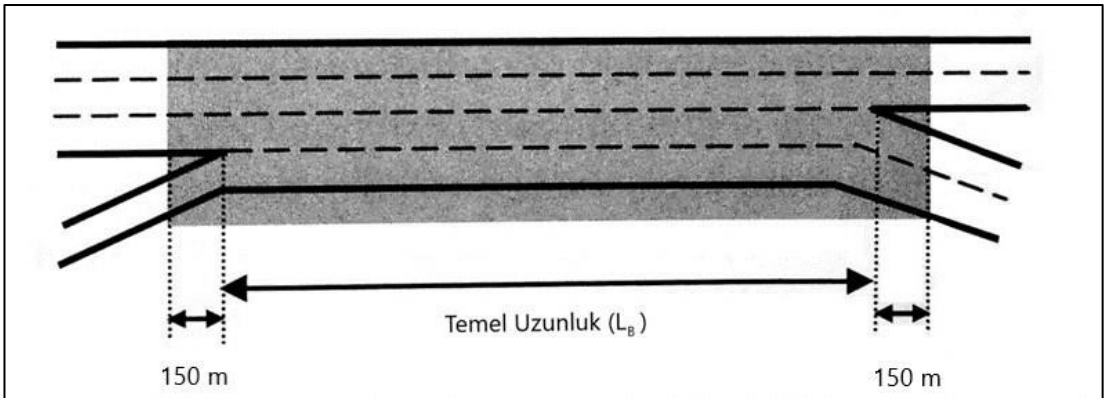
Şekil 2.7 Tek taraflı örülme kesimi örnekleri (TRB, 2010)

İki taraflı örülme kesimi ise katılım ve ayrılmanın otoyolun farklı taraflarında olduğu, bir örülme manevrasının başarıyla tanımlanabilmesi için üç veya daha fazla şerit değiştirme hareketi gerektiren otoyol kesimidir. İki taraflı örülme kesimi örnekleri Şekil 2.8’de verilmiştir.



Şekil 2.8 İki taraflı örülme bölgesi (TRB, 2010)

Örülme kesimi, temel uzunluğa ek olarak örülme bölgesine giriş noktasının 150 m yukarısı ve örülme kesiminin çıkış noktasından 150 m aşağısında olarak tanımlanır (TRB, 2010). Giriş ve çıkış noktaları katılım ve ayrılma şeritlerinin birleştiği noktalardır. Şekil 2.9’da örülme kesimi verilmiştir.



Şekil 2.9 Örülme kesimi (TRB, 2010)

Bir örölme bölgesindeki trafik bir temel otoyol kesimi ile kıyaslandığında daha çok şerit değıştiren akıma tabidir. Bu sebeple örölme kesiminde temel uzunluk (katılım ile ayrılma arasında kalan mesafe) ne kadar uzun olursa sürücüler için şerit değıştirme için yeterli alan ve süre daha çok olacaktır.

2.1.3 Katılım ve Ayrılma Kesimleri

Otoyol katılım ve ayrılma kesimleri otoyollar ile toplayıcı- dağıtıcı arterleri birbirine bağlarken yüksek hızlı katılım ve ayrılma manevrası sağlamak için özel olarak tasarlanmış yapılardır (TRB, 2010). Katılım rampası/ayrılma rampası olarak da adlandırılan bu yan yollar denetimli (sinyalize) ya da denetimsiz (sinyalize olmayan) olarak işletilebilir.

Otoyola katılım ve ayrılma sağlayan yollar; yan yol ve iki kavşak olmak üzere üç bileşen içermektedir. Kavşaklar tasarım ve kontrol özelliklerinde büyük ölçüde farklılık gösterir ancak genellikle yan yol- otoyol kavşağı ya da yan yol- kentsel arter olmak üzere iki kategoriden birine uygun olarak tasarlanır (TRB, 2010).

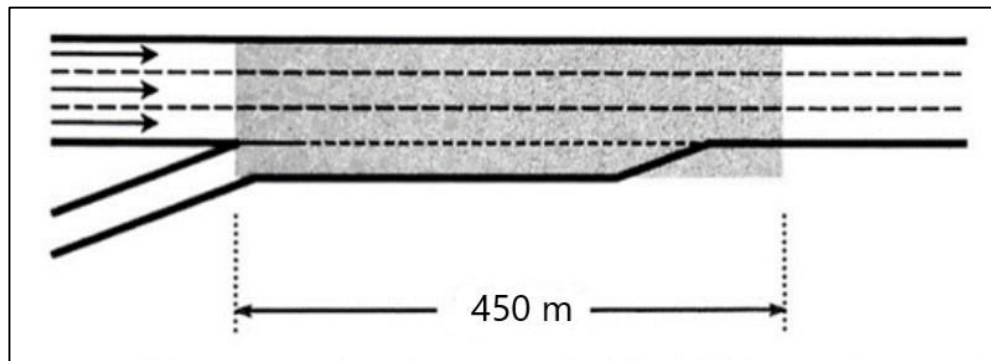
Yan yol ile kentsel arterler arasındaki kavşaklar DUR kontrollü, YOL VER kontrollü ya da denetimli olabilir. Yan yol ile otoyolu bağlayan kavşaklar ise geometrik özellikleri bakımından değışkenlik gösterir. Hızlanma ve yavaşlama şeritlerinin uzunluğu ve tipi (paralel, konik), yan yolun ve yan yolun çevresindeki otoyoldaki serbest akım hızı, diğer katılım/ayrılmalara yakınlığı bunu etkileyen parametrelerdendir. Yan yolların temel karakteristikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir (TRB, 2010):

- Yan yol- otoyol kavşakları otoyola katılım (on-ramps) ve otoyoldan ayrılma (off-ramps) hareketlerine göre ikiye ayrılır. İki akımı birleştirerek tek akım haline getiren kavşaklar katılım olarak adlandırılırken tek bir akımı birden fazla akım haline getiren kavşaklar ayrılma olarak adlandırılır.
- Genellikle yan yollar sağ taraftan katılım ve ayrılma sağlarlar. Ancak bazı durumlarda sol taraftan da bağlantı sağlanabilir.

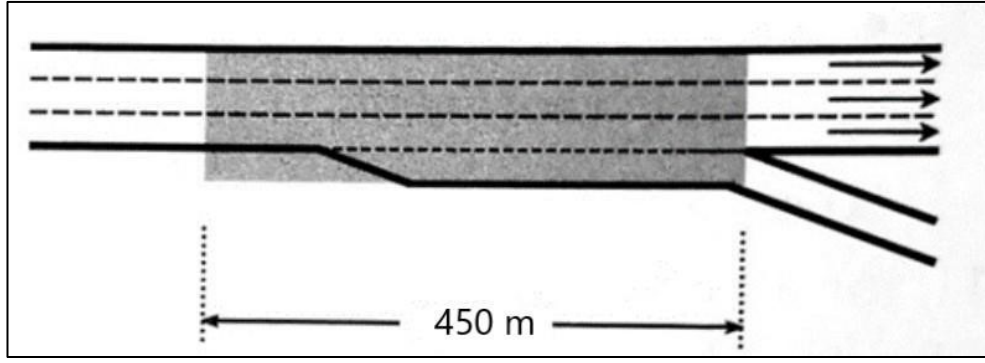
- Yan yollar birden fazla şerit içerse de genellikle otoyola bağlanan kavşaklarda iki şeritli yan yolların çoğu birleşmeden önce tek bir şeritte birleşir. Bu durumda kavşak tek bir yan yol- otoyol kavşağı olarak sınıflandırılabilir.
- İki şeritli ayrılmalarda ayrılma noktasında tek şerit bulunabilir. Kavşaktan sonra yol ayrışmadan iki şeride genişleyebilir. Katılım bağlantısında olduğu gibi tek bir kavşak kabul edilir.
- Otoyol katılım ve ayrılmaları, otoyol kesiminin büyüklüğünden etkilenir.
- Katılım bağlantıları otoyoldaki taşıtların hızlarından etkilenebilir.

Yan yollar ve yan yol kavşakları bağlandıkları otoyollardan bağımsız olarak çalışmaz (TRB, 2010). Bu nedenle otoyolların başarımı yan yolları etkilerken, yan yolların başarımı da otoyolları etkilemektedir. Özellikle yan yol- otoyol kavşaklarında yaşanan tıkanıklık akım yukarı yönde veya aşağı yönde ciddi etkilere sahip olabilir.

Bununla birlikte daha önceki çalışmalarda (Roess ve Ulerio, 1993) yan yolların etki alanları daha detaylı incelenmiş; katılım hareketinde katılım şeridi ile anayolun birleştiği noktadan sonra akım yönündeki 450 m'lik kesimi etkilediği (Şekil 2.10), ayrılma hareketinde ise seyahat şeritlerinin ayrıldığı noktadan akım yönünde 450 m'lik kesimi etkilediği (Şekil 2.11) sonucuna varmıştır.



Şekil 2.10 Katılım hareketinin etki alanı (TRB, 2010)



Şekil 2.11 Ayrılma hareketinin etki alanı (TRB, 2010)

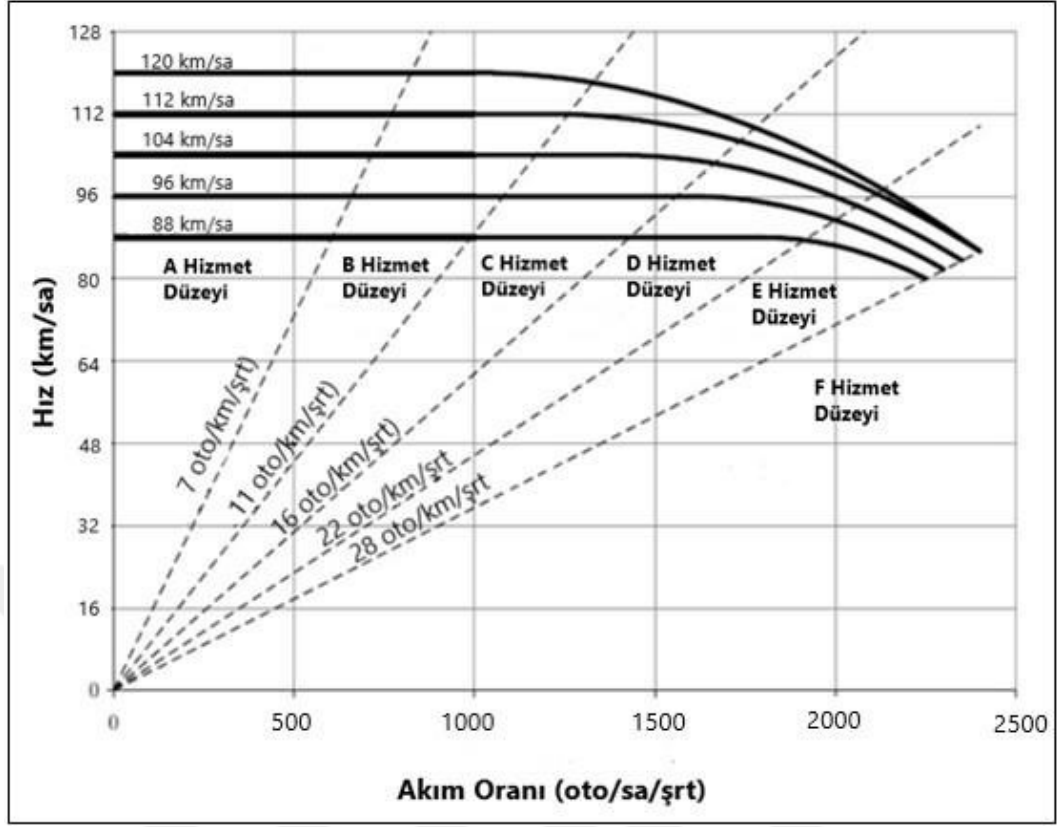
Otoyol katılımlarında veya ayrılmalarda yüksek şerit değiştirme sebebiyle türbülans oluşur. Hızlanma ya da yavaşlama şeridiyle otoyola katılan ya da ayrılan taşıtlar şerit değiştirerek türbülansdan kaçınmaya çalışırlar bu nedenle otoyolun katılım veya hızlanma şeridi olmayan kesimlerine kıyasla daha fazla şerit değiştirme oranına sahiptir.

Bunun yanında bu etkileşimler dinamik yapıdadır. Yan yolların kapasitesi ve yoğunluğu otoyoldaki taşıtların davranışlarını etkilemekle birlikte, genel olarak otoyol tıkanıklığı yan yol akımını sınırlandırmaya ve diğer kavşaklara veya rotalara sapmaya neden olabilir.

2.2 Otoyol Tesislerinde Hizmet Düzeyi

Sürücülerin ve yolcuların yoldaki trafik koşulları hakkındaki memnuniyeti olarak ifade edilebilen hizmet düzeyi, yolculara yoldaki işletme koşullarını niteliksel olarak değerlendirmede kullanılan bir ölçüttür (Yayla, 2008).

Yoldaki işletme koşullarını belirleyen başlıca parametreler; hız, yolculuk süresi, sürücünün şerit değiştirme ve önündeki aracı geçmedeki serbestlik derecesi, kavşak veya sinyal sebebiyle trafik kesikleri, sürücü/yolcu konfor ve huzuru ile trafik güvenliğidir (Yayla, 2008). Genel olarak A, B, C, D, E ve F olmak üzere altı hizmet düzeyi tanımlanmıştır. Şekil 2.12’de hız ve akım oranına göre hizmet düzeyleri yer almaktadır.



Şekil 2.12 Otoyol tesislerinde hizmet düzeyi (TRB, 2010)

Şahin (2012) ise çalışmasında hizmet düzeylerini aşağıdaki gibi detaylandırmıştır:

A hizmet düzeyi: Sürücülerin diğer sürücülerin varlığından neredeyse hiç etkilenmediği, istedikleri hızı seçebildiği ve trafik akımı içinde hareket serbestliği bulunan serbest akım koşullarını tanımlar.

B hizmet düzeyi: A hizmet düzeyine benzer şekilde yine serbest akım hızında ya da serbest akım hızına yakın hızlarda yolculuğa izin verilen sistemde manevra yapma özgürlüğü azalır.

C hizmet düzeyi: Şerit değiştirme manevraları serbest akım hızında ya da serbest akım hızına yakın yolculuk edilirken sınırlandırıldığından sürücüler tarafından dikkatli bir şekilde yapılmalıdır. Rahatlık C hizmet düzeyinde belirgin bir şekilde azalırken trafik kazası veya benzer bir olay meydana geldiğinde kuyruklar oluşmakta ve gecikmeler yaşanması olasıdır.

D hizmet düzeyi: Hızların trafik yoğunluğuna bağlı olarak düştüğü D hizmet düzeyinde manevra yapma özgürlüğü sınırlandırılmıştır. Trafik akımında meydana gelen olayları yok etmek için yeterli boşluk yoktur ve bu olaylar neticesinde uzun kuyruklar oluşmaktadır.

E hizmet düzeyi: Trafik talebinin kapasiteye oranının 1'e yaklaştığında ya da 1 olduğunda durumda araçların eğimli bölgeye girmesi ya da şerit değiştirmesi gibi küçük aksaklıklar bile gecikmelere neden olacaktır. Manevra kabiliyeti bu hizmet düzeyinde son derece kısıtlıdır.

F hizmet düzeyi: Trafik talebinin yolun kapasitesini geçtiği durumda meydana gelen bu hizmet düzeyi yolda bir aksaklık olduğunun da göstergesidir. Taşıtların düşük hızlarla hareket ettiği ve sıklıkla durma noktasına gelmesi bu hizmet düzeyinin en belirgin özelliğidir.

Bu seviyedeki tıkanıklık sebepleri TRB (2000)'de şu şekilde sıralanmıştır:

- Bir kesimde kapasitenin geçici olarak düşmesine neden olan trafik olayları
- Çakışmaya neden olan katılım ayrılma ve örülme kesimleri ve şerit azaltma noktalarında gelen araçların boşaltılan araçlardan daha fazla olması
- Tahmin durumlarında, zirve saatinde (veya diğer) akım oranının kapasiteyi aşması

TRB (2010)'de tüm otoyol kesimleri için hacim/kapasite oranının 1,0'dan büyük olduğu durumlar F hizmet düzeyi olarak tanımlanmıştır. Aynı zamanda yoğunluğun temel otoyol kesiminde 28 oto/km/şrt'den, örülme, katılım ve ayrılma kesimlerinde 27 oto/km/şrt'den yüksek olduğu durumlar da F hizmet düzeyi olarak tanımlanmaktadır. E hizmet düzeyi de aynı zamanda yüksek kapasiteyi ifade edilmektedir.

Katılım ve ayrılma kesimlerinin etki alanlarının hizmet düzeyi, temel otoyol kesiminde hizmet düzeyine benzer şekilde A ile E arasında tanımlanmıştır (TRB,

2000). F hizmet düzeyi ise akım yukarı veya aşağı yönde kapasitenin aşıldığı durumlarda gözlenir.

A hizmet düzeyi kısıtlanmayan hareketleri temsil ederken yoğunluk değeri trafik akımında türbülans olmaksızın düzgün katılım ve ayrılmalara izin verecek kadar düşüktür. B hizmet düzeyinde katılım ve ayrılma manevraları sürücüler aracılığıyla fark edilir hale gelir ve en az türbülans meydana gelir. C hizmet düzeyinde, türbülans seviyeleri fark edilir hale geldikçe etki alanındaki hız azalmaya başlar (TRB, 2000). D hizmet düzeyinde neredeyse tüm araçlar katılım ve ayrılma manevrası için yavaşlar. Otoyolun işletimi sabit kalsa da katılım ve ayrılmalarda kuyruklar oluşabilir. E hizmet düzeyi ise, kapasiteye yaklaşan koşulları temsil eder. Hızlar önemli ölçüde azalır ve türbülans neredeyse tüm sürücüler tarafından hissedilir. Hacim değeri kapasiteye yaklaşır ve otoyol, katılım ayrılmalarda küçük kuyruklar gözlenebilir.

BÖLÜM ÜÇ

OTOYOL KATILIMLARINDA KAPASİTE HESAP YÖNTEMLERİ

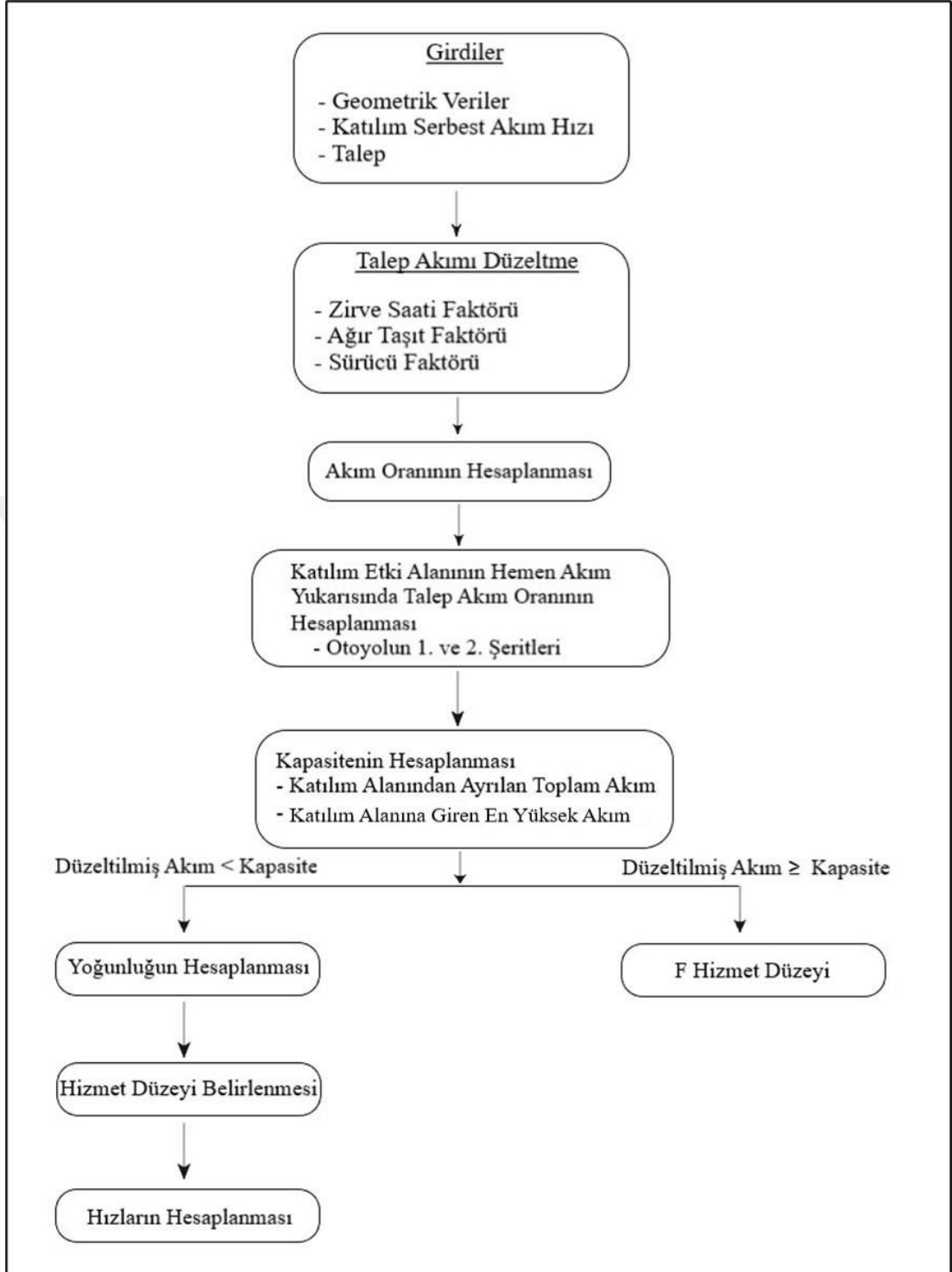
Trafik hacminin karayolu kapasitesinin altında kaldığı durumlarda serbest akım oluşmakta ama kapasiteye yaklaştıkça trafik sıkışıklığı ve gecikmeler artmaktadır (Tunç, 2003). Bu sebeple kapasitenin belirlenmesi söz konusu yol kesiminden birim zamanda geçebilecek araç sayısını belirlemek için gereklidir.

Otoyol katılımlarında kapasitenin hesaplanabilmesi için iki farklı yöntemden söz edilebilir (Tan ve diğer., 2013). Bu yöntemlerden ilki HCM’de yer alan kapasite hesap yöntemi; diğer yöntem ise Kritik Aralık Kabul Teorisi (Gap Acceptance Theory) yardımı ile kapasitenin hesaplanmasıdır.

3.1 HCM Yöntemi ile Kapasite Hesaplaması

Trafik mühendisliğinde sıkça kullanılan HCM ilk olarak Amerika Birleşik Devletleri’nde Transportation Research Board (TRB) tarafından 1950 yılında yayınlanmıştır. Günümüze kadar 6 versiyonu sunulmuştur. HCM içinde Kesintisiz akımlar ve kesintili akımlar olmak üzere ulaşım sistemleri ikiye ayrılmış; kapasite analizleri iki şeritli karayolları, çok şeritli karayolları, otoyollar, kent içi yollar, toplu taşıma, yaya hareketleri ve bisiklet yolları için birçok ulaşım sistemi için ayrı ayrı ve farklı yaklaşımlarla yapılmıştır.

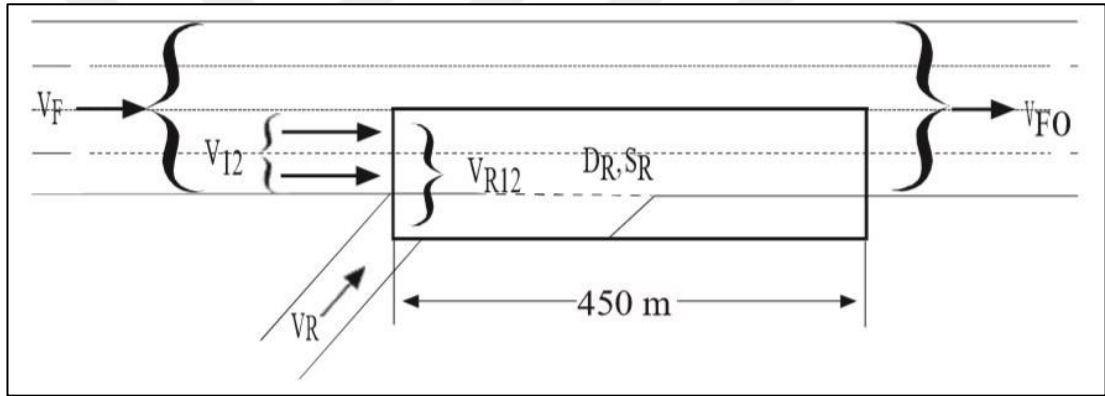
Bu bölümde TRB (2000)’de yer alan otoyol katılım kapasitesinin nasıl hesaplanacağı gösterilmiştir. Şekil 3.1 hesap yönteminin girdisini ve temel hesaplama sırasını göstermektedir. Bu yaklaşımda katılım etki alanı oluşturan hızlanma şeridi ile anayolun 1. ve 2. şeritlerinin de dahil olduğu 450 metrelik alana odaklanmaktadır. Katılım denetimi (ramp metering), doygun üstü koşullar, hız sınırlaması, akıllı ulaşım sistemlerinin (intelligent transportation system) varlığı ve özel şeritler (özellikle yüksek doluluk oranına sahip şeritler- high occupancy vehicle) bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur (TRB, 2000). Şekil 3.1’de verilen yöntem girdileri için gerekli veriler ve varsayılan değerleri Tablo 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 HCM 2000'e göre katılım kesimi kapasite hesaplama yöntemi adımları (TRB, 2000)

Tablo 3.1 Katılım kesiminde kapasite analizi için gerekli veriler (TRB, 2000)

Veriler		Varsayılan Değerler
Geometrik Veriler	Katılım şeritleri	-
	Hızlanma şeridi uzunluğu	180 m
Katılım Serbest Akım Hızı		55 km/s
Talep Verileri	Talep Hacmi	-
	Zirve saati faktörü	0,88 kent dışı, 0,92 kent içi
	Ağır taşıt yüzdesi	%10 kent dışı, %5 kent içi
	Sürücü faktörü	1,0



Şekil 3.2 Katılım etki alanı ve önemli değişkenler (TRB, 2000)

Bu bölümde katılım alanlarının analizi için modeldeki üç temel adımı açıklamaktadır. Model, tek şeritli, tek taraflı (sağ) katılım alanlarına uygulanır. İlk olarak katılım etki alanının hemen yukarısında katılım etki alanına Şerit 1 ve Şerit 2'den giren akım (v_{I2}) belirlenir. İkinci adımda, aşağıda verilen kapasite değerleri belirlenir ve tıkanıklık olasılığını belirlemek için mevcut veya tahmin edilen talep ile karşılaştırılır. Belirlenmesi gereken kapasite değerleri:

- Katılım alanına gelen toplam otoyol akımı (v_F)
- Katılım alanından ayrılan en yüksek toplam akım (v_{F0})
- Katılım etki alanına gelen en yüksek toplam akım (V_{RI2})
- Otoyola katılan en yüksek toplam akım (V_R)

Son olarak katılım etki alanı içindeki akım yoğunluğu (D_R) ve buna bağlı olarak hizmet düzeyi belirlenir. Bazı durumlarda etki alanı içindeki araçların ortalama hızı (S_R) da tahmin edilebilir.

Şekil 3.2, katılım ve ayrılma etki alanlarını ve kilit değişkenleri ve bunların birbirleriyle ilişkilerini göstermektedir. Hızlanma şeridinin uzunluğu (L_A) katılım alanlarındaki işlemleri etkileyen kritik bir geometrik parametredir.

Modelin ve hizmet düzeyi kriterlerinin tüm yönleri, ilgili saatin zirve saatin 15 dakikası boyunca temel koşullar altında otomobil araçlarda saat başına eşdeğer en yüksek akım oranı (oto/sa) cinsinden ifade edilir. Bu yüzden adımlardan herhangi biri uygulanmadan önce ilgili otoyol ve katılım/ayrılma akımları Denklem 3.1 kullanılarak oto/sa'ya dönüştürülmelidir.

$$v_i = \frac{V_i}{PHF * f_{HV} * f_p} \quad (3.1)$$

Burada;

v_i : Temel koşullar altında zirve saatinin 15 dakikasında geçen akım (otomobil/sa),

V_i : i hareketi için saatlik hacim (taşıt/sa),

PHF : Zirve saati faktörü,

f_{HV} : Ağır taşıtlar için düzeltme faktörü,

f_p : Sürücüler için düzeltme faktörüdür.

Zirve saati faktörü bir saat içindeki trafik akımındaki değişimi yansıtır. Zirve saatindeki akımın o saat içindeki en yüksek 15 dakikalık hacmin bir saatlik akıma oranıdır. Genellikle 0,80 ile 0,95 aralığında olan zirve saati faktörü kırsal alanlarda ve yoğun olmayan bölgelerde düşükken kentsel alanlarda yüksektir. Mümkünse bu değer saha verilerinden elde edilmelidir.

Kapasite hesaplarında tüm sürücülerin otoyol tesisine aşına olduğu kabul edilir. Ancak farklı özelliklere sahip sürücülerin (özellikle tatil amaçlı kullanımlarda) otoyolları daha az verimli kullandığı bilinmektedir. Bu durum da kapasitelerde

azalmalara neden olmaktadır. Bu etkiyi yansıtmak için kullanılan f_P faktörü 0,85 ile 1,00 aralığındadır. Genel olarak daha düşük bir değerin seçilmesi için yeterli kanıt yoksa otoyola aşına kullanıcıları yansıtan 1,00 değerini seçmelidir.

Tablo 3.2 Arazi yapısına göre ağır taşıt düzeltme faktörü (TRB, 2000)

Faktör	Arazi Yapısı		
	Düz Arazi	Dalgalı Arazi	Dağlık Arazi
E_T (kamyon ve otobüsler)	1,5	2,5	4,5
E_R (rekreasyon araçları)	1,2	2,0	4,0

Karışık trafik kompozisyonunda ağır taşıtları şerit başına düşen saatlik otomobil eşdeğerine çevirmek için kullanılan Ağır Taşıt Düzeltme Faktörü Tablo 3.2’den arazinin eğimine göre seçilebilir.

Tablo 3.3 Yan yol yaklaşık kapasitesi (TRB, 2000)

Katılım Serbest Akım Hızı, S_{FR} (km/sa)	Kapasite (otomobil/saat)	
	Tek Şeritli Katılım	İki Şeritli Katılım
> 80	2200	4400
65–80	2100	4100
50–65	2000	3800
30–50	1900	3500
≤ 30	1800	3200

Tablo 3.3’te otoyol katılımların kapasitesi için yaklaşık değerler verilmektedir. Bu kapasiteler daha önceki çalışmalara dayanmaktadır (Roess ve Ulerio, 1993; Leisch, 1974). Tablodaki değerlerin yan yol için olup, tüm otoyol katılım kesimi için olmadığı unutulmamalıdır. Yan yolun 2 şeritli olması daha az türbülans sağlarken aynı zamanda daha iyi bir katılım sağlar.

3.1.1 Adım 1: Şerit 1 ve Şerit 2'ye Katılan Akımın (v_{12}) Kestirimi

Katılım etki alanının hemen yukarisından Şerit 1 ve 2'de giren akımı etkileyen temel değişkenler şunlardır:

- Katılım alanına gelen toplam otoyol akımı (v_F) (oto/sa),
- Otoyola katılan en yüksek toplam akım (v_R) (oto/sa),
- Hızlanma şeridi uzunluğu (L_A) (m) ve
- Katılım noktasında serbest akım hızı (S_{FR}) (km / s).

Dört şeritli, sekiz şeritli ve on şeritli otoyollardaki katılımlar her zaman izole katılım alanları olarak analiz edilmektedir. v_{12} değeri kestirimi dört şeritli (2x2) otoyolları dışarıda bırakırken, sekiz ve on şeritli otoyollar üzerindeki etkileri belirlemek için ise yetersizdir. Altı şeritli yollarda ise sorunsuz bir şekilde kullanılabilir. Otoyola katılan araçlar Şerit 1'e dahil olduğunda ya da Şerit 1'den kaldırıldıklarında şerit dağılımları ciddi bir şekilde değişebilir (TRB, 2000). Bu etkiyi belirlemek için önemli değişkenler; katılımdan akım yukarı yönde toplam akımı (v_U) veya katılımdan akım aşağı yönde toplam akımı (v_D) (veya her ikisi de) (oto/sa) ve söz konusu katılımdan akım yukarı yönde diğer katılım/ayrılmaya olan uzaklığı (L_{UP}) veya akım aşağı yönde diğer katılım/ayrılmaya olan uzaklığı (L_{DOWN}) (veya her ikisi de) (m) içerir.

Tüm bu değişkenlerin yanında otoyoldaki akım Şerit 1 ve Şerit 2 üzerinde en belirgin etkiye sahiptir. Daha uzun hızlanma şeritleri daha az türbülansa neden olduğu için katılım kesiminde daha düşük yoğunluklara ve Şerit 1 ve Şerit 2'de daha yüksek akıma neden olur. Katılım sürücülerinin serbest hızları yüksek olduğunda ise otoyol sürücüleri yüksek hızlı türbülans olasılığını önlemek için daha sola doğru şerit değiştirme eğilimindedir.

Tablo 3.4'te katılım etki alanının akım yukarisındaki v_{12} değerini tahmin etmek için kullanılan denklemler verilmiştir. Dört şeritli yollarda (2x2) Şerit 1 ve Şerit 2'de tanım gereği $v_{12}=v_F$ 'dir.

Tablo 3.4 Katılım kesiminde v_{12} değeri kestirimi için denklemler (TRB, 2000)

$v_{12} = v_F \cdot P_{FM}$ (3.2)	
4 Şeritli Otoyollar için (2x2)	$P_{FM} = 1,00$ (3.3)
6 Şeritli Otoyollar için (3x2)	$P_{FM} = 0,5775 + 0,000092L_A$ (3.4) $P_{FM} = 0,7289 - 0,0000135(v_F + v_R) - 0,002048S_{FR} + 0,0002L_{UP}$ (3.5) $P_{FM} = 0,5487 + 0,0801 v_D/L_{DOWN}$ (3.6)
8 Şeritli Otoyollar için (4x4)	$P_{FM} = 0,2178 - 0,000125v_R + 0,05887L_A/S_{FR}$ (3.7)

Burada:

v_{12} = katılım etki alanının hemen akım yukarisından Şerit 1 ve Şerit 2'ye giren toplam akım (oto/sa)

v_F = Katılım alanına gelen toplam otoyol akımı (oto/sa),

v_R = Otoyola katılan en yüksek toplam akım (oto/sa),

v_D = Katılıma bitişik şeritteki (sağ şerit) talep akımı (oto/sa),

P_{FM} = Katılımın hemen yukarisında kalan Şerit 1 ve 2'de otoyol akımı,

L_A = Hızlanma şeridinin uzunluğu (m),

S_{FR} = Yan yolun serbest akım hızı (km/s),

L_{UP} = Katılıma bitişik şeritte akım yukarı yönde katılım/ayrılmaya olan mesafe (m),

L_{DOWN} = Katılıma bitişik şeritte akım aşağı yönde katılım/ayrılmaya olan mesafedir (m).

Genel olarak model v_{12} ile v_F 'nin arasındaki oranı vermektedir. Dört şeritli yollarda tüm katılan akım Şerit 1 ve Şerit 2'de olduğu için bu ilişki önemsizdir. Sekiz şeritli yollarda ise bitişik şeritteki akım yukarı ve akım aşağı katılım/ayrılmalara bakılmaksızın tek bir denklem kullanılır. Altı şeritli yollarda ise katılıma bitişik olan otoyol sağ şeridindeki katılım/ayrılmaların etkisini tahmin etmek ise daha karışıktır. Tablo 3.5 altı şeritli yollarda uygun P_{FM} denkleminin seçilebilmesi için katılım/ayrılma dizilerini ve denklemini vermektedir.

Tablo 3.5 Altı şeritli otoyollar için P_{FM} denklemi seçimi (TRB, 2000)

Bitişik Şeritte Akım Yukarı Yönde Katılım/Ayrılma	İncelenen Alan	Bitişik Şeritte Akım Aşağı Yönde Katılım/Ayrılma	Kullanılacak Denklem
Yok	Katılım	Yok	Denklem 3.4
Yok	Katılım	Katılım	Denklem 3.4
Yok	Katılım	Ayrılma	Denklem 3.6 ya da 3.4
Katılım	Katılım	Yok	Denklem 3.4
Ayrılma	Katılım	Yok	Denklem 3.5 ya da 3.4
Katılım	Katılım	Katılım	Denklem 3.4
Katılım	Katılım	Ayrılma	Denklem 3.6 ya da 3.4
Ayrılma	Katılım	Katılım	Denklem 3.5 ya da 3.4
Ayrılma	Katılım	Ayrılma	Denklem 3.6, 3.5 ya da 3.4

Bitişik şeritte akım yukarı veya akım aşağı yönde katılım veya ayrılma bulunmaması ya da yalnızca akım aşağı yönde katılım bulunması durumunda mevcut katılım bundan etkilenmeyeceği için analiz için Denklem 3.4'ten yararlanılmalıdır. Akım aşağı veya akım yukarı (veya her ikisi) yönde ayrılma mevcutsa hangi denklemin kullanılacağını seçmek için yan yollar arasında denge ayırma mesafesi (L_{EQ}) belirlenmelidir. Eğer katılım/ayrılmalar arası mesafe L_{EQ} değerine eşit veya daha büyükse daima Denklem 3.4 kullanılır. Katılım ile ayrılmalar arasındaki mesafe L_{EQ} değerinden daha düşükse Denklem 3.5 veya Denklem 3.6 ile hesaplama yapılmalıdır.

L_{EQ} , Denklem 3.4 ve Denklem 3.5 veya 3.6'ya aynı P_{FM} değerini verdiği mesafedir. Bu nedenle, bitişik bir akım yukarı yönde ayrılma mevcut olduğunda, Denklem 3.4 dikkate alınmalıdır. Denklem 3.5, Denklem 3.4'e eşitlenirse, L_{EQ} , Denklem 3.8'de gösterilir.

$$L_{EQ} = 0,0675 (v_F + v_R) + 0,46L_A + 10,24S_{FR} - 757 \quad (3.8)$$

Burada L_{EQ} : Denklem 3.4, Denklem 3.5'e (Tablo 3.4) eşitlendiğinde denge mesafesidir (m). $L_{UP} \geq L_{EQ}$ olduğunda Denklem 3.4 kullanılırken, $L_{UP} < L_{EQ}$ olduğu durumlarda Denklem 3.5 kullanılır. Benzer şekilde, Denklem 3.6 ve Denklem 3.4 arasında bir seçim yapılması gerektiğinde, L_{EQ} hesaplamak için Denklem 3.9 ile dikkate alınmalıdır.

$$L_{EQ} = \frac{v_D}{0,3596 + 0,001149 L_A} \quad (3.9)$$

Burada L_{EQ} : Denklem 3.4, Denklem 3.6'ya (Tablo 3.4) eşit olarak ayarlandığında denge mesafesidir (m). Bu durumda, aşağı akım yan yolun olan mesafe L_{EQ} 'dan daha büyük veya ona eşitse ($L_{DOWN} \geq L_{EQ}$) olduğu durumlarda Denklem 3.4'ten, $L_{DOWN} < L_{EQ}$ olduğu durumlarda ise Denklem 3.6'dan yararlanılmalıdır.

Hem akım aşağı hem de akım yukarı bitişik bir ayrılma olduğunda analizin akım yukarı ya da akım aşağı yönde bitişik ayrılmayı dikkate alıp almadığına bağlı olarak P_{FM} değeri için iki çözüm ortaya çıkabilir. Bu gibi durumlarda, en büyük P_{FM} değeri ile sonuçlanan denklem kullanılmalıdır.

3.1.2 Adım 2: Kapasitenin Belirlenmesi

Bir katılım alanının kapasitesi öncelikle akım aşağı yönde otoyol kesiminin kapasitesi ile belirlenir. Dolayısıyla akım yukarı yönde otoyola ve katılıma gelen toplam akım aşağı yönde temel otoyol kesiminin kapasitesini aşamaz. Çalışmalar ayrıca katılım etki alanına girebilecek toplam akım oranı için pratik bir sınır olduğunu göstermiştir. Katılım etki alanındaki toplam akım v_{I2} ve v_R 'yi içerdiğinden v_{R12} değeri Denklem 3.10'a göre verilir.

$$v_{R12} = v_{I2} + v_R \quad (3.10)$$

Tablo 3.6 toplam akım aşağı yöndeki akım oranı ($v = v_F + v_R$) ve katılım etki alanına giren en yüksek akım (v_{R12}) için kapasite değerleri verilmiştir. Bu analizde iki durum meydana gelebilir. İlk durumda, toplam otoyol akımı (v), akım aşağı otoyol kesiminin kapasitesini aşabilir. Bu durumda tıkanıklık (F hizmet düzeyi) beklenir ve katılım kesiminden yukarı yönde kuyruklar oluşacaktır.

Tablo 3.6 Katılım alanları için kapasite değerleri (TRB, 2000)

Otoyol Serbest Akım Hızı (km/sa)	En Yüksek Akım Aşağı Otoyol Akımı, v (otomobil/saat)				Katılım Kesimine Gelebilecek En Yüksek Akım, v _{R12} (otomobil/saat)
	Şerit Sayısı (Tek Yönde)				
	2	3	4	>4	
120	4800	7200	9600	2400/şrt	4600
110	4700	7050	9400	2350/şrt	4600
100	4600	6900	9200	2300/şrt	4600
90	4500	6750	9000	2250/şrt	4600

İkinci durum ise v_{R12} akımının arzu edilen en yüksek seviyeyi aşması ama toplam otoyol akımını (v) aşmamaktadır. Bu durumda bölgesel yoğunluklar olması beklenirken kuyruk oluşması beklenmez.

Toplam akım aşağı yöndeki akım, akım aşağısında yer alan temel otoyol kesiminin kapasitesini aştığında F hizmet düzeyi atanır ve daha fazla hesap yapılmaz. v_{R12} 'nin belirtilen sınırını aştığı durumlar da dahil olmak üzere diğer tüm durumlar için hizmet düzeyi, katılım etki alanındaki yoğunluk tahmin edilerek belirlenir.

3.1.3 Adım 3: Hizmet Düzeyinin Belirlenmesi

Katılım etki alanındaki hizmet düzeyi, A hizmet düzeyi ve E hizmet düzeyi arasındaki tüm durumlarda yoğunluk ile belirlenir. Katılım alanında A-E hizmet seviyesinde tıkanıklık olmadan kararlı bir akım için yoğunluk değerleri Tablo 3.7'de verildiği gibidir.

Tablo 3.7 Katılım alanları için hizmet düzeyi (TRB, 2000)

Hizmet Düzeyi	Yoğunluk (otomobil/km/şrt)
A	≤ 6
B	6-12
C	12-17
D	17-22
E	>22
F	Talep Kapasiteyi Aşmaktadır

Katılım etki alanındaki yoğunluğu tahmin etmek için Denklem 3.11'den yararlanılmalıdır. Yoğunluk denkleminin yalnızca doymuş altı akım koşulları için geçerli olduğuna dikkat edilmelidir.

$$D_R = 3,402 + 0,00456v_R + 0,0048v_{12} - 0,01278L_A \quad (3.11)$$

Burada:

D_R = Katılım etki alanının yoğunluğu (otomobil/km/şerit),

v_R = Otoyola katılan en yüksek toplam akım (oto/sa),

v_{12} = Katılım etki alanının hemen akım yukarisından Şerit 1 ve Şerit 2'ye giren toplam akım (oto/sa),

L_A = Hızlanma şeridi uzunluğudur (m).

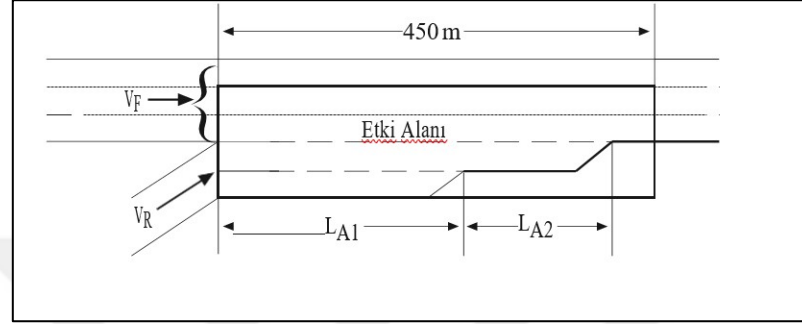
3.1.4 Özel Durumlar

Bazı katılım kesimleri tek şeritli sağ taraftan katılımlardan oluşmaz. Bu gibi durumlarda analizin özel geometriye uyarlanması için temel analiz yönteminde aşağıdaki verilen uyarlamalar yapılabilir.

3.1.4.1 İki Şeritli Katılımlar

Şekil 3.3 otoyola iki şeritli katılımı göstermektedir. Bu tür katılımlarda iki ayrı hızlanma şeridinin her biri başarılı bir şekilde sola katılım manevrasına

sağlamaktadır. Tek şeritli katılımlar ile karşılaştırıldığında Şerit 1 ve Şerit 2’de akım yukarı yönde akım daha yüksek iken katılım kesiminde iki hızlanma şeridinin varlığı ile hızlanma şeridinin daha uzun olması sebebiyle yoğunluk daha düşüktür. Bu sebeple iki şeritli katılımlar tek şeritli katılımlara göre aynı akımların taşınması durumunda daha sorunsuz ve daha yüksek hizmet düzeyinde çalışmaktadır.



Şekil 3.3 İki şeritli katılım (TRB, 2000)

İki şeritli katılımlarda v_{12} değeri tek şeritli katılımlardaki gibi Denklem 3.2 ile hesaplanabilir. Bununla birlikte Tablo 3.4’te gösterilen P_{FM} denklemleri yerine

- Dört şeritli otoyollarda, $P_{FM} = 1,000$,
- Altı şeritli otoyollar, $P_{FM} = 0,555$,
- Sekiz şeritli otoyollar, $P_{FM} = 0,209$ kullanılmalıdır.

Katılım etki alanında beklenen yoğunluğun hesaplanmasında Denklem 3.11’de, hızlanma şeridi uzunluğu (L_A) yerine hızlanma şeridinin efektif uzunluğu (L_{Aeff}) ile değiştirilir. L_{Aeff} değeri Denklem 3.12 ile hesaplanabilir. Burada L_{A1} ve L_{A2} uzunluklar Şekil 3.3’te tanımlandığı gibidir.

$$L_{Aeff} = 2L_{A1} + L_{A2} \quad (3.12)$$

En yüksek akım oranları olan v ve v_{R12} değerleri iki şeritli katılımdan etkilenmemektedir. Akım aşağı yönde temel otoyol kesiminin kapasitesi katılım kesiminin toplam çıktı kapasitesini belirlemeye devam etmektedir ve otoyolun katılım etki alanına girmek isteyen en yüksek araç sayısı iki şeritli katılım varlığı ile değişmemiştir. Bu yüzden Tablo 3.6’daki kapasite değerleri aynen kullanılır.

3.1.4.2 Şerit Eklemeleri

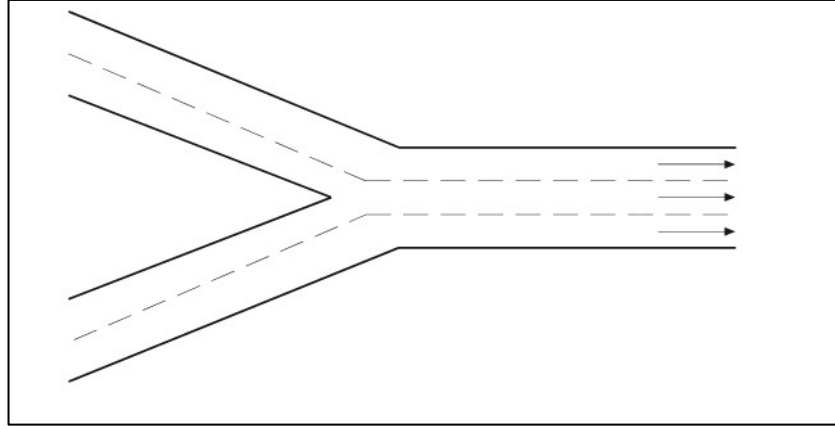
Katılımlar için eklenen hızlanma şeritleri bazen şerit eklemeleri ile sonuçlanır. Tek şeritli katılımlar otoyola şerit eklenmesi ile sonuçlanırsa , katılımın kapasitesi katılımın kendi geometrisiyle belirlenir. İki şeritli katılımlar şerit ekleme ile sonuçlanırsa bu durum ‘ana katılım’ olarak sınıflandırılır.

Tek şerit ekleme durumunun analizi nispeten basittir. Akım aşağı yöndeki kesim ilave bir şeride sahip temel otoyol kesimi kabul edilir. Ancak ilave şerit ekleme noktasından 750 m içinde ayrılma noktasına dönüşürse bu durum örülme kesimi olmasına ve örülme kesimi kapasitesi için farklı yöntem kullanılmasını gerektirir.

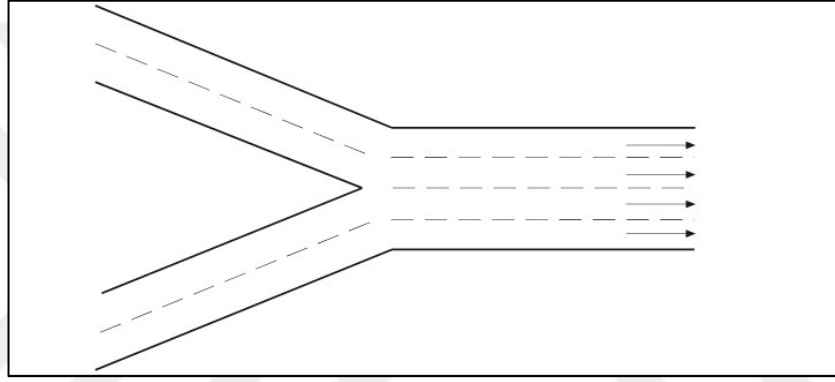
3.1.4.3 Ana Katılım Alanları

Ana katılım alanları (major merge area) her biri birden fazla şeride sahip iki ana yolun birleşerek tek bir otoyol kesimi oluşturması ile oluşur. Birleşen yollar otoyollarda, kentsel arterlerden veya kırsal yollardan oluşabilir. Ana katılımların bir veya iki şeritli rampalardan farklı olmasının sebebi her bir yolun genellikle otoyol tasarım standartlarında veya yakın olması ve katılım bir yan yol veya hızlanma şeridi içermemesidir.

Bu tür katılım alanları Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’te gösterildiği gibi iki farklı geometriye sahiptir. Şekil 3.4’te katılım alanına yaklaşan şerit sayısı katılım alanından çıkan şerit sayısından azdır. Bu geometride sol katılımın sağ şeridinin ve sağ katılımın sol şeridinin tek bir şerit oluşturmak üzere birleşmesi ile gerçekleşir. Şekil 3.5’te gösterilen geometride ise katılıma alanına gelen şeritlerin sayısı çıkan şerit sayısı ile eşittir.



Şekil 3.4 Ana katılım alanı -1 (TRB, 2000)



Şekil 3.5 Ana katılım alanı- 2 (TRB, 2000)

Ana katılım alanları için etkili bir performans modeli yoktur. Bu nedenle birleşen katılımlar ve çıkış yapan otoyol üzerindeki kapasitelerin kontrol edilmesi ile sınırlıdır. Her bir katılımın ve otoyolun kapasitesi Tablo 3.6'dan genel olarak hesaplanabilir. Katılım kesimine gelen her kolun kapasitesi her biri üzerindeki zirve talep akımı (oto/sa) ile karşılaştırılırken, katılımdan çıkan otoyolun kapasitesi iki katılımın zirve talebinin toplamı (oto/sa) ile karşılaştırılır. Ana katılım alanlarındaki problemler genellikle akım aşağı yöndeki otoyol kesiminin yetersiz kapasitesinden kaynaklanır.

3.1.4.4 On Şeritli Otoyollara Katılım (5x2)

Her ne kadar yaygın olmasa da sağ yönden tek şeritli katılıma sahip on şeritli yolları analiz etmek için farklı bir yöntem ihtiyacı vardır. Otoyolun 5. Şeridindeki

akım oranı katılım alanına gelen akımdan tahmin edilir ve düşürülür. Kalan otoyol akımını dört şeritli benzer bir otoyoldan beklenen akımdan oluşur. Dolayısıyla standart hesaplama yöntemi kullanılır. Katılım kesiminin 5. şeridindeki akım v_5 Tablo 3.8 yardımı ile tahmin edilebilir.

Tablo 3.8 Sağ taraftan tek şeritli katılıma sahip on şeritli otoyollarda 5. şeritteki akım (TRB, 2000)

Toplam Katılan Otoyol Akımı, v_F (otomobil/saat)	Şerit 5'te Akım, v_5 (otomobil/saat)
≥ 8500	2500
7500-8400	$0,285v_F$
6500-7400	$0,270v_F$
5500-6400	$0,240v_F$
< 5500	$0,220v_F$

Katılım kesimine gelen Şerit 5'teki akım belirlendikten sonra Denklem 3.13 kullanılarak hesaplanan efektif bir katılım ile sekiz şeritli bir otoyol olduğu varsayılarak normal işlemler uygulanır.

$$v_{F4eff} = v_F - v_5 \quad (3.13)$$

Burada:

v_{F4eff} : Katılım kesimine gelen otoyolun 4 şeridindeki (tek yönde) efektif otoyol akımı (oto/sa),

v_F : Katılım kesimine gelen beş şeritteki (tek yönde) toplam otoyol akımı (oto/sa),

v_5 : Tablo 3.8'den hesaplanan Şerit 5'te beklenen akımdır (oto/sa).

3.1.4.5 Otoyolun Sol Tarafında Yer Alan Katılımlar

Pek önerilmemesine rağmen bazı toplayıcı- dağıtıcı yollarda sol tarafta katılımlar yer alabilir. Sol tarafta yer alan katılımların etki alanı sağ tarafta yer alan katılımlar ile aynı uzunluktadır ve sol iki şerit ile hızlanma şeridini kapsar. Bu nedenle Sağ taraftaki katılımlarda önemli bir parametre olan v_{12} hesaplaması sol iki şerit ile

yapılır. Dört şeritli otoyollarda (2x2) bu akım oranı (v_{12}) aynı kalır. Altı şeritli yollar için ilgili akım oranı v_{23} 'tür. Sekiz şeritli yollarda ise v_{34} akım oranları kullanılır.

Sol tarafta yer alan katılımlar için doğrudan bir yöntem olmasa da mevcut yöntem üzerinde bazı değişiklikler uygulanabilir (Leisch, 1974). Bunun için öncelikle sağ tarafta yer alan katılımlar ile aynı şekilde v_{12} değeri hesaplanmalıdır. Ardından dört, altı ve sekiz şeritli otoyollara sol taraflı katılımlarda v_{12} , v_{23} ve v_{34} değerlerini elde etmek için sırasıyla 1,00, 1,12 veya 1,20 ile çarpması önerilir. Yoğunluk, hız veya her ikisi için kalan hesaplamalar devam edebilir. v_{12} yerine v_{23} veya v_{34} kullanılır ve tüm kapasite değerleri değişmeden kalır.

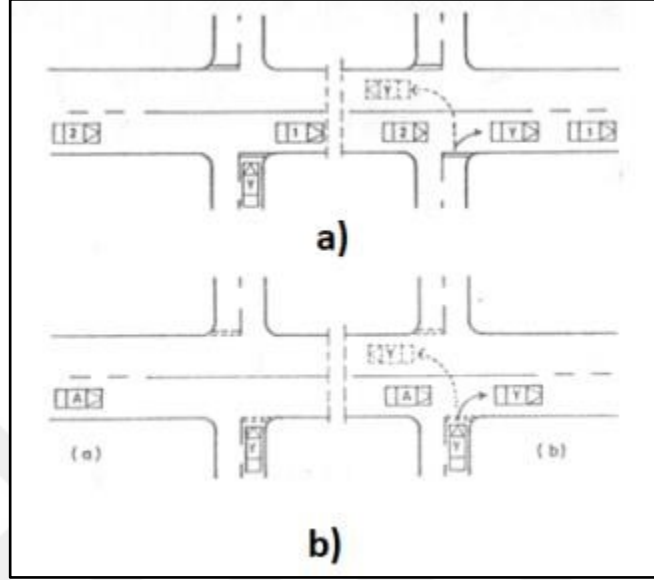
3.2 Kritik Aralık Kabulü Yöntemi

Kritik aralık kabulü yöntemi, çoğunlukla ışısız kavşaklar için geliştirilmiş ve kullanılmakta olan bir yöntemdir. Bu yöntem, daha çok anayoldaki ve yan yoldaki sürücülerin davranışlarını dikkate alan bir yaklaşım olup "davranışsal yöntem" olarak da adlandırılmaktadır.

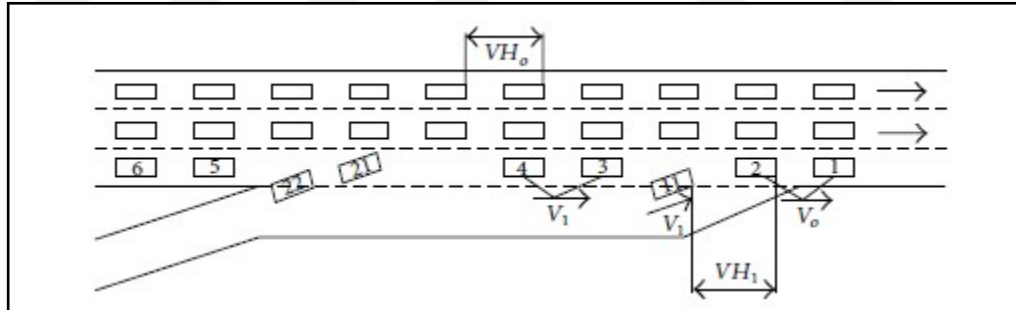
Bu yöntemin temelleri, ilk olarak Adams (1937) tarafından yayaların karşıdan karşıya geçişleri için geliştirilen gecikme modeline dayansa da yöntemin ilk olarak tanımlandığı çalışma Tanner tarafından 1962 yılında yayınlanmıştır. Kritik aralık kabul yönteminin temelinde yapılan kabuller aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

- Yan yoldan kavşağa yaklaşan bir taşıt sürücüsü için kavşak içinde üç çeşit manevra söz konusudur. Bunlar; sağa dönüşle anayoldaki yakın şerit akımına katılmak, sola dönüşle anayoldaki yakın şerit akımını kesip uzak şerit akımına katılmak ya da her iki anayol akımını da kesip karşıya geçerek karşıdaki yan yola girmek şeklinde olabilir. Bu manevralar sırasıyla kısaca katılma, kesip katılma ve kesip geçme olarak belirtilir (Gedizlioğlu, 1979).
- Yan yol sürücüleri için katılmak veya kesip geçmek istedikleri anayol akımındaki taşıtlardan, önde bulunan taşıtın arkası ile onu izleyen taşıtın önü arasındaki aralık "Araya Giriş Aralığı (GAP)" olmaktadır.

- Ayrıca yan yol taşıtının kavşağa vardığı anda kavşağa en yakın anayol taşıtı ile arasındaki uzaklık ise “Öne Giriş Aralığı (LAG)” olmaktadır (Şekil 3.6). Bir otoyol katılımlarında aralık kabulü ise Şekil 3.7’de görülmektedir:



Şekil 3.6 a) Öne giriş ve b) Araya giriş aralıkları (Gedizlioğlu, 1979)



Şekil 3.7 Bir otoyol katılımlarında sürücülerin aralık kabul davranışları (Xue ve diğer., 2014)

Hagring (1998)’e göre anayola katılmak isteyen bir yan yol sürücüsü ancak kendisi için güvenli gördüğü “T” gibi bir zaman cinsinden aralık değerine eşit veya daha büyük bir aralık bulduğunda katılabilecektir. Aralığın büyüklüğü, olası en az gecikme için seçilen en güvenli, en kısa zaman cinsinden aralık değeri olarak da ifade edilebilir.

Tüm sürücülerin kabul ettiği aralık değeri birbirinden farklı olabilir. Bir sürücünün anayola katılım için kabul ettiği bir aralık değerinden daha büyük bir

aralık değerin başka bir sürücü tarafından reddedilebilmesi de sık görülen bir olaydır (Gedizlioğlu, 1979). Her sürücü kabul edeceği aralık kişiden kişiye değiştiği gibi çoğu zaman sürücülük tecrübesine bağlı olarak bir karar verme sürecinin sonunda seçmektedir. Sürücünün yaptığı bu seçimde sürücünün yaşı, cinsiyeti, fiziksel durumunun yanında kişilik özellikleri de önemli bir rol oynamaktadır. Bazı araştırmacılar, sürücülerin aynı kavşakta farklı zamanlarda farklı davranışlarda bulunduklarını da öne sürmektedirler (Gedizlioğlu 1979; Hagring, 1996, 1998; Lassarre ve diğer., 1991; Fricker, ve diğer., 1991). Bir başka araştırmada ise, kavşağı sık kullanan sürücülerin, alışkanlık edinmeleri sonucunda daha kısa aralıkları kabul ettiklerini belirtmektedirler (Fricker, ve diğer. 1991). Ancak özellikle ikinci durum, gözlemlenmesi çok güç olduğundan kesinlik kazanmamıştır. Sürücüler arasındaki davranış farklılığı Hagring (1998) tarafından aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

- Sürücüler anayoldaki akım içinde hep aynı aralığı kabul ediyorsa bu sürücülerin davranışı tutarlı olarak tanımlanabilir. Aksi durumlarda tutarsız bir sürücü olarak tanımlanır.
- Sürücüler seçtikleri aralık değerleri bütün sürücülerini kapsayacak bir dağılıma aitse bu sürücüler homojen, aksi halde homojen olmayan sürücüler olarak tanımlanırlar.

Yukarıdaki açıklamalar ışığında sürücü davranışları Hagring (1998) tarafından dört şekilde modellenmiştir. Bunlar:

1. Homojen ve tutarlı: Her sürücü sabit bir aralık kabulüdür.
2. Homojen ve tutarsız: Sürücü, durma çizgisine her gelişinde, dağılıma ait farklı bir kritik aralık değeri seçmektedir
3. Homojen olmayan ve tutarlı: Yan yol sürücülerinin kabul ettiği sabit bir aralık değeri vardır ama bu aralık değerlerinin dağılımı bir sürücü grubu için ifade edilmektedir.
4. Homojen olmayan ve tutarsız: Sürücülerin tutarsızlığına bağlı olarak, her bir sürücü veya bir gruptaki sürücüler, ayrı bir kritik aralık dağılımına sahiptirler.

Daha önceki çalışmalarda homojen olmayan ve tutarsız sürücü davranışının gerçek akımı daha iyi temsil ettiği görülmüştür (Tanyel, 2001). Ancak bu tip sürücü davranışlarının modellenmesi çok güçtür. Bu yüzden yapılmış olan çalışmalarda sürücülerin, homojen ve tutarlı oldukları kabul edilmiştir. Bu kabule göre, belirli bir “ T ” değerinden küçük anayol aralıklarında hiçbir yan yol sürücüsü anayola katılamazken anayoldaki daha büyük aralıklarda ise tüm yan yol sürücüleri anayola katılabilir. (Gedizlioğlu 1979; Hagring, 1998). Sürücünün karar vermesinde önemli nokta, $G(h)$ 'ın “ h ” değerinin bir ön giriş aralığı mı yoksa araya giriş aralığını mı belirttiğidir. Benzer bir durumla seçilen aralığın kritik araya giriş aralığı (T_g) veya kritik öne giriş aralığı (T_l) olup olmadığının belirlenmesinde de karşılaşılmaktadır. Bu karışıklığın önlenmesi için kritik öne giriş aralığı ve araya giriş aralıklarının birbirlerine eşit olduğu kabul edilir (Tanyel, 2001).

Genel olarak, kritik aralık kabulü ile kapasite, Denklem 3.14 yardımı ile hesaplanabilir.

$$q_e = q_c \int_0^{\infty} f(t) \cdot g(t) dt \quad (3.14)$$

Burada $f(t)$; ana akımdaki aralıkların dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonunu; $g(t)$ = “ t ” aralığında yan yoldan kavşağa girebilecek araç sayısını; q_c , anayoldaki trafik hacmini (taşıt/saniye) ve q_e de yan yolun kapasitesini (taşıt/saniye) ifade etmektedir (Troutbeck ve Brilon, 1995). Kapasite hesabında kullanılacak bağıntının yapısı, anayoldaki taşıtlar arasındaki zaman cinsinden takip aralıklarının modellenmesi için kullanılan dağılıma ve $g(t)$ fonksiyonunun yapısına (sürekli veya kesikli-basamaklı fonksiyon) bağlıdır. Genel olarak literatürde, $g(t)$ 'nin bir kesikli fonksiyon olduğu kabul edilerek elde edilen bağıntıların kapasite hesabında ağırlıklı olarak kullanıldığı görülmektedir.

Anayoldaki taşıtların aralarındaki zaman cinsinden takip aralıklarının negatif üstel dağılıma uygun olduğu kabul edilirse, kapasite bağıntısı aşağıdaki şekilde yazılabilir (Gerlough ve Huber, 1975):

$$q_e = \frac{q_c e^{-q_c T}}{1 - e^{-q_c T_0}} \quad (3.15)$$

Bağıntıda " T " kritik aralık kabul değerini (saniye); T_0 değeri, yan yoldan kavşağa giren araçlar arasındaki en küçük takip aralığı değerini (saniye) göstermektedir. (3.15) bağıntısı, HCM (Highway Capacity Manual)'de ışısız kavşakların kapasitesinin hesaplanması için verilen bağıntının aynısıdır (TRB, 2000; Akçelik, 1998; Flannery ve diğer., 1998).

Tanner (1962), anayoldaki araçlar arasındaki zaman cinsinden aralıkların ötelenmiş negatif üstel dağılıma uyduğu kabulü ile yan yol kapasitesi için aşağıdaki bağıntıyı geliştirmiştir:

$$q_e = \frac{q_c(1 - \Delta q_c)}{e^{q_c(T-\Delta)}[1 - e^{-q_c T_0}]} \quad (3.16)$$

Bağıntıda, " Δ ", anayoldaki araçlar arasındaki en küçük takip aralığıdır (saniye).

Cowan (1975), taşıtlar arasındaki zaman cinsinden aralıkların modellenmesi için dört model önermiştir. Bu modellerden ilk ikisi, negatif üstel ve ötelenmiş negatif üstel dağılımlardır. Bu modeller, genel olarak aynı akımdaki sürücülerin birbirlerinden etkilenmelerini tanımlamaz veya sınırlı olarak tanımlar. Halbuki aynı şeritte hareket eden araçlar, hızlarını öndeki (lider) araca göre uydurmak zorunda kalırlarsa birbirlerini takip eden gruplar (veya katarlar) oluştururlar. Cowan diğer iki modelinde, bu gruplanma oranını tanımlamıştır. Bugün genel olarak kapasite hesaplarında yapısal olarak daha basit olan ve Cowan M3 dağılımı olarak da adlandırılan dağılım kullanılmaktadır. Dağılım aşağıda daha detaylı olarak incelenecek olup, Cowan M3 dağılımının kullanılması durumunda kapasite bağıntısı aşağıdaki şekli alır:

$$q_e = \frac{q_c \alpha e^{-\lambda(T-\Delta)}}{1 - e^{-\lambda T_0}} \quad (3.17)$$

Bağıntıda " α ", akım içindeki serbest (bağımsız) hareket eden taşıt oranı; " λ " ise bir azaltma katsayısıdır.

3.2.1 Kritik Aralık Kabul Yönteminin Uygulanabilirliği

Otoyol katılım alanlarının performansı, katılım rampası üzerindeki sürücülerin ana akımdaki araçlar ile birleşme özelliklerine; diğer bir deyişle anayolda kendilerine yakın olan şeride geçiş yapabilme yani şerit değiştirme yeteneklerine bağlıdır. Sürücüler şerit değiştirmeye karar verirken varış noktası, sürücü davranışı ve trafik akımı gibi çeşitli faktörler göz önünde bulundurulmalıdır. Trafik mikro benzetiminde şerit değiştirme zorunlu ve isteğe bağlı olarak iki kategoriye ayrılabilir:

1. Zorunlu şerit değiştirme geçerli şeridin engellenmesi durumunda gerçekleşir. Mevcut şerit ileride başka bir şeritle birleşecektir sürücülerin varış noktasına gidebilmesi için başka bir şeritte hareket etmeleri gerekmektedir.
2. İsteğe bağlı şerit değiştirme, sürücünün yavaş ilerleyen ya da ağır taşıtları geçmek istemesi ya da yan yoldan otoyola katılmak isteyen sürücü için yol vermesi gibi durumlarda meydana gelir (Hwang ve Park, 2005).

Normalde sürücüler gerek duymadıkça şerit değiştirmezler. Zorunlu durumlarda, hızlarını ve konumlarını, varış noktalarına ulaşabilmek amacıyla en iyi şekilde ayarlayabilmek için şerit değiştirmeleri gerekecektir. Bu durum, özellikle kavşak ve otoyol katılım ve ayrılma kesimlerinde veya öncesinde sık gözlemlenebilir. Özellikle üç şeritli otoyol ve çevre yolu gibi trafik akımının kavşak veya trafik ışıkları gibi sebeplerle kesintiye uğramadığı yollarda veya arterlerde, trafik etkileşiminin en fazla olduğu şeridin orta şerit olması beklenir. Bu etkileşim aşağıdaki şekillerde gerçekleşebilir (Ceyhan, 2011):

- Sol şeritteki sürücüler, aynı şeritte çok daha yüksek hızlarda seyreden taşıtlar sebebiyle orta şeride geçmek zorunda kalabilirler,

- Orta şeritteki sürücüler, aynı şeritte daha düşük hızlarda seyreden taşıtları geçmek için kısa süreli olarak sol şeridi kullanabilirler.
- Sol şeritteki sürücüler, bir sonraki kavşaktan çıkış yapabilmek veya yol kenarındaki park alanlarını kullanabilmek için orta şeritten geçiş yapmak zorundadırlar.
- Sağ şeritteki sürücüler, aynı şeritteki daha yavaş seyreden veya aynı şeritte durmuş olan bir aracı geçmek için orta şeride kayabilirler.
- Sağ şeritteki sürücü, park ettiği şeritten yeni çıkmış veya kavşağa bir önceki kavşaktan yeni katılmış olabilir. Bu sürülerin tercihi orta veya sol şeritte seyahat etmek olabilir.

Otoyol veya çevreyolu katılımlarında, katılım rampasından anayola giriş yapmak isteyen sürücüler, ana akım içinde özellikle kendilerine yakın olan şeritte uygun bir aralık gözleyecekler ve bulduklarında da şerit o şeride geçiş yapacaklardır. Katılım rampasına yakın şeritte (sağ şeritte) bulunan sürücüler de, yan yoldan katılan sürücülerin seçtikleri aralığa bağlı olarak aşağıdaki davranışları gösterebilirler:

1. Hızlarını ve şeritlerini değiştirmeden sürüşlerine devam edebilirler;
2. Hızlarını düşürmek veya durmak zorunda kalabilirler;
3. Güvenlikleri açısından şerit değiştirmek zorunda kalabilirler veya şerit değiştirme ihtiyacı hissedebilirler.

Bu üç durumdan birincisi, anayoldaki sürücülerin mutlak önceliğe sahip oldukları koşulu ifade eder. Bu durumda bile sağ şeritteki sürücüler, güvenlikleri için orta şeride geçmek isteyebilirler.

İkinci ve üçüncü koşul ise, yan yoldan anayola giriş yapan sürücülerin, katılım manevrasını tamamlamak için güvenli bir aralıktan daha kısa bir aralığı tercih etmeleri durumunda gerçekleşir. Anayoldaki sürücülerin yavaşlamak zorunda kalmaları veya hızlarını düşürmemek için şerit değiştirmeleri, sınırlı öncelik katılımı (limited priority merge) olarak adlandırılabilir. Durmak zorunda kalmaları ise, aralık zorlama (gap forcing) koşulunda gerçekleşebilir. Özellikle aralık zorlama, katılım

şeridindeki sürücülerin, uzun süre sağ şeritte uygun bir aralık bulamamaları sonucunda gözlemlenen bir olgudur.

Yukarıdan da anlaşılabilirceği gibi, bir otoyol veya çevreyolu katılımının kapasite ve başarımının belirlenmesinde kritik aralık kabul yöntemi kullanılabilir. Kritik aralık kabul yönteminin otoyol katılımlarının kapasite ve başarımlarının belirlenmesinde kullanıldığı ilk çalışmalardan biri Drew ve diğer., (1967) tarafından U.S. Bureau of Transportation için hazırlanmış olan rapordur. Raporda, gözlemlere dayalı olarak katılım başarımını etkileyen faktörler irdelenmiş ve bir hesap yöntemi aşamaları üzerinde durulmuştur. Westphal (1994), otoyol katılımlarında, yan yol gelen taşıtların, anayoldaki sağ şeritten etkilendikleri bulunmuştur (Lertworawanich ve Elefteriadou, 2003)

Szwed ve Smith (1974) ve Makigami ve Matsuo'nun (1990) çalışmaları; otoyol katılımlarının kapasite ve başarımlarını belirlemek için kritik aralık kabul yönteminin kullanıldığı araştırmalar arasındadır. Çalışmalarda kabul edilen yaklaşım, anayol akımı içerisindeki taşıtların mutlak önceliğe sahip olduklarıdır. Bu kabule göre, sistemde ana yoldaki sürücüler hiç gecikme yaşamazken yan yol sürücülerini tüm gecikmeye maruz kalmaktadırlar. Bu kabul, dönel kavşaklar ve ışısız kavşakların modellenmesinde de kullanılmaktadır. Otoyollarda katılım sürücülerinin hızlanma şeridinde uygun bir aralık beklediklerini; ana akımdaki sürücülerin bu durumdan etkilanmediklerini ve böylece mutlak önceliğin geçerli olduğunu varsaymaktadır.

Cowan (1979), anayol taşıtlarının her zaman mutlak önceliğe sahip olamayabileceklerini öngörmüş ve sağ şeritteki sürücülerin davranışlarını dört farklı şekilde modellemiştir:

- a) İlk gelen ilk servisi alır (yani sağ şeritteki taşıtlar, katılım rampasından gelen taşıtlara yol vermeden veya şerit değiştirmeden yollarına devam ederler-mutlak öncelik koşulu);
- b) Hem anayolun sağ şeridindeki, hem de katılım rampasındaki taşıtlar sıra ile aynı şeritte yollarına devam ederler (öncelik paylaşımı- priority sharing-koşulu);

- c) Ana yoldaki sürücüler, yan yoldan giriş yapanlar için ya hızlarını düşürürler ya da diğer şeride geçerler (sınırlı öncelik koşulu);
- d) Her iki akıma ait talebin çok yüksek değerlere ulaşması sonucunda, her iki akımadaki kuyrukların sırayla boşalmaya çalışması durumu.

Bunker (1996) çalışmasında, mutlak öncelik koşulunun gerçeği yansıtıp yansıtmadığını incelemiştir. Bu amaçla Avustralya'da Brisbane kentinde A-E hizmet seviyesi aralığında ve ortalama hızın TRB (2000)'de tanımlanan kritik hızdan daha yüksek olduğu koşullarda anayolun dış şeridindeki sürücülerin sıklıkla iki strateji izlediği görülmüştür. Bunlardan ilki anayol sürücülerinin yan yoldan gelen taşıtların ana akıma katılabileceği kadar yavaşlaması, ikincisi ise anayoldaki sürücülerin yan yoldaki sürücülere daha büyük aralık sağlamak için orta şeride geçmesidir. Her iki davranış da anayol sürücülerinin mutlak öncelik yerine öncelik paylaşımı veya sınırlı öncelik koşullarını temsil etmektedir. Bunker, özellikle sınırlı öncelik koşulunun geçerli olabileceğini bulmuştur. Bu sonuç daha sonra Troutbeck ve Kako (1999) ile Bunker ve Troutbeck (2003) tarafından da doğrulanmıştır.

Kritik Aralık Kabul Yöntemi'nin ana hatları ve aralık kabul yöntemiyle ilgili analizler, sonraki bölümde detaylı olarak sunulmuştur.

BÖLÜM DÖRT

OTOYOL KATILIMLARININ BAŞARIMLARININ KRİTİK ARALIK KABULÜ YÖNTEMİ İLE İRDELENMESİ

Önceki bölümde de anlatıldığı gibi, anayoldaki taşıtlara ait zaman cinsinden takip aralıklarının doğru bir şekilde modellenmesi, sonuçların geçerliliğini etkilemektedir. Bu bağlamda ilk olarak arazide yapılan gözlemlerden yararlanarak, anayoldaki taşıtların takip aralıkları modellenmeye çalışılmıştır. Analizlerde, zaman cinsinden takip aralıklarının Cowan M3 dağılımına uydukları kabul edilerek, özellikle serbest araç oranı incelenmiştir. İkinci adım olarak, otoyol katılımlarında sürücülerin kabul ettikleri aralıklar üzerine bir inceleme yapılmıştır. Üçüncü adımda ise otoyol katılımlarının gecikme modelleri üzerinde durulmuş ve otoyola bağlanan arterler üzerinde trafik ışığı bulunması durumunda otoyola katılmak isteyen taşıtların gecikmeleri üzerinde trafik ışık sürelerinin etkisi incelenmeye çalışılmıştır.

4.1 Anayoldaki Taşıtlar Arasındaki Zaman Cinsinden Aralıkların Modellenmesi

Anayoldaki taşıtlar arasındaki zaman cinsinden takip aralıklarının modellenebilmesi için öncelikle arazi verileri toplanmıştır. Verilerin toplanması, değerlendirilmesi ve zaman cinsinden takip aralıklarının modellenmesi aşağıdaki bölümlerde detaylandırılmıştır.

4.1.1 Zaman Cinsinden Takip Aralığı Verilerinin Toplandığı Gözlem Bölgeleri

Trafik akım karakteristiklerinin analizi için İzmir kenti içinde Altinyol, Bornova, Özkanlar (Ankara Caddesi) ve Ege Mah (Mürselpaşa Bulvarı); İstanbul'da ise Acıbadem (Metrobüs yanı) arteri olmak üzere 5 önemli arter incelenmiştir. Kesintisiz akım koşulları altında alınan video kamera görüntüleri üzerinden araç kompozisyonu, hız, hacim ve zaman cinsinden takip aralıkları verileri elde edilmiştir.

Şekil 4.1'de İzmir'deki dört gözlem noktasının, Şekil 4.2'de ise İstanbul'daki gözlem noktasının konumları gösterilmiştir.



Şekil 4.1 İzmir'deki gözlem noktaları (Google Earth, 2019)



Şekil 4.2 İstanbul'daki gözlem noktası (Google Earth, 2019)

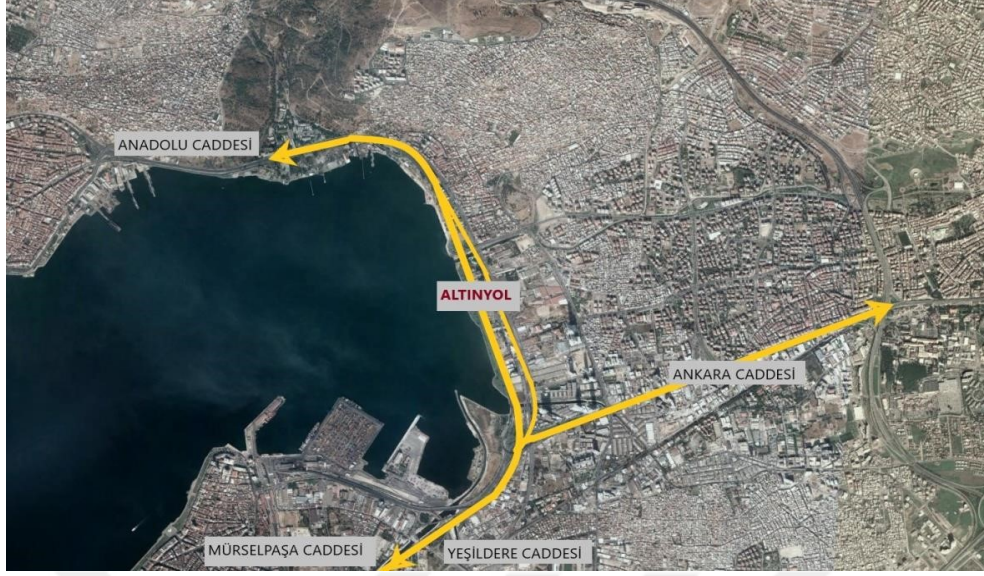
Kuzeyinde Bayraklı ilçesi ile güneyinde Bornova ilçesi arasında kalan D300 karayolunun bir parçası olan Ankara Caddesi, 3,20 m şerit genişliğine sahip 2x3 bir

kent içi arterdir. Kuzey doğusunda E881 İstanbul Caddesine ve E96 Ankara Asfaltı Caddesine; Güney batısında ise D550 Altinyol ile birleşmektedir. Metropoliten alanın kuzeyi ile Ankara Asfaltı caddesi ve İstanbul caddesini arasında bağlantıyı sağlamaktadır. Ankara Caddesinin kuzeyinde konut alanları, güneyinde küçük sanayi tesisleri ve depolama alanları bulunmaktadır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Ankara Caddesi'nin (Özkanlar) konumu (Google Earth, 2019)

İzmir körfezinin kuzey doğusunda yer alan D550 karayolunun bir parçası olan Altinyol, 3,20 m şerit genişliğine sahip; 2x3 bir kent içi ana arterdir. Kuzeyinde Anadolu Caddesi ile birleşerek Karşıyaka, Bostanlı ve Çiğli gibi körfezin kuzeyindeki yerleşim yerlerine, güneyinde Konak ve merkezi iş alanına, Yeşildere Caddesi- Mürselpaşa Bulvarı bağlantısıyla İzmir metropoliten alanının güneyine ve çevre yoluna bağlantı sağlamaktadır. Ankara Caddesine bağlantı ile de Bornova ilçesine bağlantı olanağı tanımaktadır (Şekil 4.4). Batısında açık yeşil alanlara sahip olan Altinyol, doğusunda toplayıcı yol görevindeki Anadolu caddesi ile birleşerek iş merkezleri, kamusal yapılar ve konut alanlarının trafiğini kentin diğer bölgelerine aktarmaktadır.



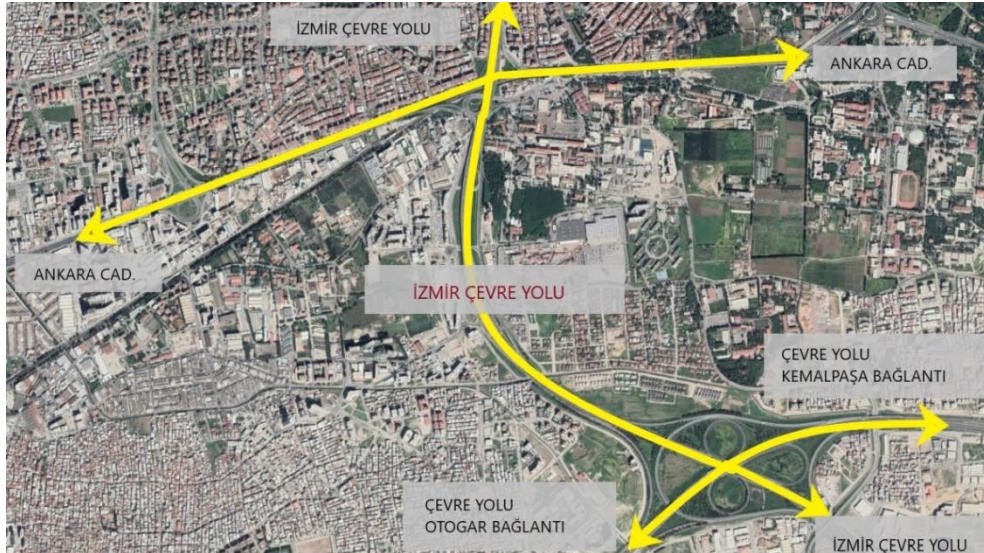
Şekil 4.4 Altinyol'un konumu (Google Earth, 2019)

Konak ilçesinde yer alan D300 karayolunun bir parçası olan Mürselpaşa Bulvarı 3,20 m şerit genişliğine sahip 2x3 bir karayoludur. Kuzey doğusunda Altinyol ve Şehitler Caddesi ile bağlanırken; güney batısında Yeşildere Caddesi ile bağlanmaktadır. Ankara Caddesi ve Altinyol ile birleşerek; körfezin kuzeyindeki yerleşimlerin, İzmir Çevre Yolu'nun, Ankara Asfaltı Caddesinin ve İstanbul Caddesinin metropoliten alanın güney doğusu ve körfezin güneyi arasındaki bağlantıyı sağlayan ana arterdir. Bulvarın kuzeyinde ve güneyinde depolama alanları, küçük sanayi tesisleri, ticari birimler ve bazı atıl durumdaki yapılar bulunmaktadır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Mürselpaşa Caddesi'nin konumu (Google Earth, 2019)

Bornova ilçesinde E87 karayolunun bir parçası olan İzmir Çevre Yolu 3,6 m şerit genişliğine sahip 2x3 bir karayoludur. Kuzeyinde Ankara Caddesi ve çevre yolunun devam eden kesimiyle bağlantı sağlarken güneydoğusunda Kemalpaşa ilçesine ve otogar bağlantısına olanak sağlamaktadır. Karayolunun doğusunda alışveriş merkezi ve ege üniversitesi bulunurken, batısında kamusal yapılar ve konut alanları yer almaktadır (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 Bornova'da Çevre Yolu'nun konumu (Google Earth, 2019)

Kuzeyinde Çamlıca ilçesi ile güneyinde Üsküdar ilçesi arasında kalan D100 karayolunun bir parçası olan Acıbadem metrobüs yolu, 3,05 m şerit genişliğine sahip 2x3 bir kent içi arterdir. Kuzey doğrultusunda D100; güneyinde E80; doğusunda ise Şile Yolu ile birleşmektedir. Metropoliten alanın E80 ve D100 bağlantıları olan köprü ve tünel geçişleri ile Asya ve Avrupa arasında bağlantıyı sağlamaktadır. Seçilmiş olan yolun kuzey bölgesinde konut alanları, güney bölgesinde üretim tesisleri bulunmaktadır (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 Acıbadem (Metrobüs Yanı) Yolu (Google Earth, 2019)

4.1.2 Zaman Cinsinden Takip Aralığı Veri Gruplarının Elde Edilmesi

Yukarıda tanımlanan gözlem noktalarında yapılmış olan video kamera çekimleri, büro ortamında incelenerek şerit bazında (sağ, orta ve sol) zaman cinsinden takip aralığı verileri elde edilmiştir. Video kamera çekimleri sabah ve/veya akşam zirve saatlerde yapılmış olup; bu çekimlerden 10~15 dakikalık veri grupları oluşturulmuştur.

Luttinen (1996), zaman cinsinden aralık verilerinin aşağıda sıralanan üç şartı sağlaması gerektiğini belirtmiştir:

1. Verilerin bir eğilim (trend) içermemesi;
2. Verilerde içsel bağımlılık (otokorelasyon) olmaması;

3. Verilerin tamamen rastgele olması.

Luttinen (1996) yine aynı çalışmada veri gruplarının eğilim içermemesi için 10~15 dakikalık veri gruplarının oluşturulmasının yeterli olabileceğini ancak yine de bir trend analizinin yapılmasının gerekli olduğunu belirtmiştir. Gözlem yapılan bölgelerden sağ, orta ve sol şeritlerden toplamda 102 veri grubu elde edilmiştir. İzmir'deki gözlem noktalarından 15 dakikalık; İstanbul Acıbadem gözlemlerinden ise 10 dakikalık veri grupları oluşturulmuştur. Elde edilen veri gruplarından sadece Acıbadem sağ şeride ait bir gözlem verisinde eğilim tespit edilmiştir. 20 veri grubunda içsel bağımlılık gözlemlenmiş; 17 veri grubu ise rastgelelik testinden geçememiştir. Bunun sonucunda 76 veri grubunun analizlerde kullanılabileceği anlaşılmıştır. Bu 76 verinin 22'si sağ şerit, 27'si orta şerit ve 27'si de sol şerit verisidir.

Analizlerde kullanılması planlanan veri gruplarına ait hacim (taşıt/saat), ortalama zaman cinsinden takip aralığı (saniye), ortanca, kip, çarpıklık ve basıklık değerleri Tablo 4.1, 4.2 ve 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.1 Sağ şeride ait hacim (tş/ta), ortalama takip aralığı (saniye), ortanca, kip, basıklık ve çarpıklık değerleri

Gözlem Noktası	Şerit	Zaman Aralığı (dk)	Ortalama	Hacim (tş/ta)	Ortanca	Kip	Basıklık	Çarpıklık
Altınyol Akşam	Sağ	0-15	10,31	349	8,13	6,06	1,68	1,23
Altınyol Akşam	Sağ	15-30	10,48	344	7,46	7,10	2,14	1,48
Altınyol Akşam	Sağ	30-45	12,10	298	10,29	9,59	13,35	2,81
Altınyol Sabah	Sağ	45-60	5,60	643	4,16	4,19	1,74	1,44
Bornova Sabah	Sağ	0-15	7,96	453	6,57	3,39	1,58	1,21
Bornova Sabah	Sağ	15-30	7,21	499	5,35	3,72	3,34	1,75
Bornova Sabah	Sağ	30-45	7,04	511	6,04	4,55	3,40	1,61
Bornova Sabah	Sağ	45-60	6,55	549	5,62	5,46	0,46	0,96
Ege Mah Akşam	Sağ	0-15	4,95	728	3,65	2,37	3,22	1,81
Ege Mah Akşam	Sağ	15-30	5,01	718	3,76	3,66	1,69	1,42
Ege Mah Akşam	Sağ	30-45	5,03	716	3,78	2,08	2,01	1,45
Ege Mah Akşam	Sağ	45-60	4,92	732	3,89	2,23	1,99	1,42
Ege Mah Sabah	Sağ	0-15	3,76	957	2,73	2,33	7,49	2,36
Ege Mah Sabah	Sağ	15-30	6,14	587	4,52	2,64	*	0,81
Ege Mah Sabah	Sağ	30-45	4,37	825	3,23	2,38	5,47	1,94
Ege Mah Sabah	Sağ	45-60	3,69	975	2,78	2,93	3,61	1,71
Özkanlar Akşam	Sağ	45-60	3,72	967	2,60	2,18	7,40	2,42
Özkanlar Sabah	Sağ	30-45	2,55	1410	1,92	2,00	17,16	3,63
Acıbadem Sabah	Sağ	0-10	2,85	1265	2,35	1,88	6,47	2,14
Acıbadem Sabah	Sağ	20-30	2,89	1244	2,12	1,86	5,28	1,98
Acıbadem Sabah	Sağ	30-40	2,77	1297	1,92	1,00	2,66	1,67
Acıbadem Sabah	Sağ	40-50	2,73	1318	2,16	1,64	5,38	1,78

Tablo 4.2 Orta şeride ait hacim (tş/sa), ortalama takip aralığı (saniye), ortanca, kip, çarpıklık ve basıklık değerleri

Gözlem Noktası	Şerit	Zaman Aralığı (dk)	Ortalama	Hacim (tş/sa)	Ortanca	Kip	Basıklık	Çarpıklık
Altınyol Akşam	Orta	30-45	3,62	995	2,89	1,61	2,85	1,62
Altınyol Akşam	Orta	45-60	3,82	943	3,17	2,17	3,58	1,56
Altınyol Sabah	Orta	0-15	2,04	1763	1,76	1,68	5,10	1,94
Altınyol Sabah	Orta	15-30	2,10	1715	1,73	1,67	5,65	1,94
Altınyol Sabah	Orta	30-45	2,19	1646	1,71	1,44	4,44	1,96
Altınyol Sabah	Orta	45-60	2,56	1405	2,23	1,60	2,98	1,57
Bornova Sabah	Orta	0-15	4,77	755	3,67	2,22	4,19	1,84
Bornova Sabah	Orta	15-30	4,55	791	0,26	2,69	7,55	2,04
Bornova Sabah	Orta	30-45	4,98	723	3,84	2,79	7,71	2,19
Bornova Sabah	Orta	45-60	5,22	690	3,48	3,57	3,99	1,91
Ege Mah Akşam	Orta	0-15	2,55	1414	1,95	1,72	5,55	2,06
Ege Mah Akşam	Orta	30-45	2,49	1447	1,93	1,46	2,71	1,55
Ege Mah Sabah	Orta	0-15	2,49	1448	1,85	1,97	2,61	1,62
Ege Mah Sabah	Orta	30-45	2,23	1615	1,74	1,78	2,94	1,65
Ege Mah Sabah	Orta	45-60	3,07	1171	2,40	1,96	2,02	1,46
Özkanlar Akşam	Orta	0-15	3,65	987	2,75	1,50	1,68	1,43
Özkanlar Akşam	Orta	30-45	2,93	1229	1,95	2,02	7,35	2,49
Özkanlar Akşam	Orta	45-60	4,71	764	3,98	2,44	-0,26	0,78
Özkanlar Sabah	Orta	0-15	3,06	1177	2,34	2,20	2,29	1,54
Özkanlar Sabah	Orta	15-30	2,76	1306	2,11	2,18	6,32	2,07
Özkanlar Sabah	Orta	30-45	2,98	1208	2,39	1,95	3,60	1,74
Özkanlar Sabah	Orta	45-60	2,84	1270	2,31	1,38	3,46	1,72
Acıbadem Sabah	Orta	0-10	2,11	1705	1,76	1,44	2,49	1,49
Acıbadem Sabah	Orta	10-20	2,11	1705	1,76	1,44	2,49	1,49
Acıbadem Sabah	Orta	30-40	2,19	1644	1,68	1,36	6,37	2,11
Acıbadem Sabah	Orta	40-50	1,92	1871	1,64	1,00	2,62	1,47
Acıbadem Sabah	Orta	50-60	2,30	1562	1,84	1,88	1,98	1,55

Tablo 4.3 Sol şeride ait hacim (tst/sa), ortalama takip aralığı (saniye), ortanca, kip, çarpıklık ve basıklık değerleri

Gözlem Noktası	Şerit	Zaman Aralığı (dk)	Ortalama	Hacim (tst/sa)	Ortanca	Kip	Basıklık	Çarpıklık
Altınyol Akşam	Sol	0-15	3,63	992	2,28	1,90	6,41	2,30
Altınyol Akşam	Sol	45-60	2,86	1258	1,79	1,79	6,93	2,20
Altınyol Sabah	Sol	0-15	1,68	2142	1,55	1,30	2,66	1,33
Altınyol Sabah	Sol	15-30	1,74	2072	1,50	1,50	5,86	1,94
Altınyol Sabah	Sol	30-45	1,82	1981	1,51	1,70	6,68	2,13
Bornova Sabah	Sol	0-15	10,23	352	7,24	9,41	10,90	2,86
Bornova Sabah	Sol	15-30	9,55	377	6,49	7,77	5,16	2,02
Bornova Sabah	Sol	30-45	10,14	355	7,17	6,57	3,05	1,67
Bornova Sabah	Sol	45-60	5,92	608	3,95	4,27	2,01	1,54
Ege Mah Akşam	Sol	0-15	2,35	1535	1,68	1,86	8,27	2,30
Ege Mah Akşam	Sol	15-30	2,14	1682	1,65	2,11	8,12	2,47
Ege Mah Akşam	Sol	45-60	2,01	1794	1,56	1,54	8,65	2,47
Ege Mah Sabah	Sol	0-15	1,62	2224	1,40	1,54	9,36	2,31
Ege Mah Sabah	Sol	15-30	1,72	2088	1,42	1,70	14,47	2,85
Ege Mah Sabah	Sol	30-45	1,63	2202	1,34	1,30	7,11	2,01
Ege Mah Sabah	Sol	45-60	1,85	1950	1,48	1,46	5,65	2,05
Özkanlar Akşam	Sol	15-30	3,19	1128	2,49	1,69	3,20	1,64
Özkanlar Akşam	Sol	30-45	2,93	1230	2,17	3,06	7,31	2,36
Özkanlar Akşam	Sol	45-60	3,99	902	2,99	2,17	5,01	1,89
Özkanlar Sabah	Sol	0-15	2,24	1610	1,76	1,72	8,65	2,46
Özkanlar Sabah	Sol	45-60	2,68	1345	1,91	1,61	15,11	3,29
Acıbadem Sabah	Sol	0-10	2,32	1550	1,72	1,68	31,15	4,35
Acıbadem Sabah	Sol	10-20	2,44	1474	1,74	1,12	7,71	2,38
Acıbadem Sabah	Sol	20-30	2,78	1297	2,04	1,56	2,36	1,54
Acıbadem Sabah	Sol	30-40	2,31	1561	1,72	1,40	11,80	2,81
Acıbadem Sabah	Sol	40-50	2,17	1661	1,80	1,96	4,11	1,77
Acıbadem Sabah	Sol	50-60	2,53	1423	1,68	1,00	7,69	2,39

Çalışma kapsamında veriler şerit bazında değerlendirilmiştir. Bu şekilde farklı şeritlerdeki sürücü davranışları hakkında daha detaylı bilgi toplanabilmesinin yanı sıra, çalışmanın ileri aşamalarında belirtileceği gibi, otoyol katılımlarında yan yoldan gelen taşıtların sadece anayoldaki sağ şeritteki trafik akımından etkilenmeleri kabulü doğrultusunda işlemler daha sağlıklı bir biçimde gerçekleştirilebilmiştir.

4.1.3 Cowan M3 Dağılımın Özellikleri ve Parametrelerinin Ölçümlendirilmesi

Luttinen (1996), negatif üstel, Erlang veya Lognormal gibi basit dağılımların zaman cinsinden takip aralığı dağılımının zirve ve kuyruk kısımlarını tanımlamalarındaki yetersizlik olduğunu belirtmiştir. Akımların çok düşük hacme sahip olduğu durumlarda bile, mod (kip) çevresinde yığılmalar görülse de daha önce yapılan çalışmalarda kuyruk kısmında dağılımın üstel dağılımla benzerlikler gösterdiğini görülmüştür (Tanyel, 2001). Bundan yola çıkarak iki araç grubunun olduğu söylenebilir. Bunlardan ilki serbest hareket eden araçlar diğeri grup halinde hareket eden araçlar olarak tanımlanır (Tanyel, 2001). Genel yaklaşımda daha önce bahsedilen karmaşık dağılımlar kullanılır. İki gruptaki araçların bulunduğu bir akımın zaman cinsinden aralıklarının modellenmesi için iki olasılık dağılım modelinin birleşmesinden meydana gelen bu dağılımların genel bağıntıları aşağıdaki şekilde yazılabilir (Luttinen, 1996):

$$f(t) = \theta f_1(t) + \alpha f_2(t) \quad (4.1)$$

Burada θ , trafik akımı içindeki bağımlı taşıt (birbirini takip eden) oranını, α , akım içindeki serbest taşıt oranını, $f_1(t)$, bağımlı taşıtlar arasındaki zaman cinsinden takip aralıklarına ait olasılık yoğunluk fonksiyonunu ve $f_2(t)$ ise serbest taşıtlar arasındaki zaman cinsinden aralıkların olasılık yoğunluk fonksiyonunu ifade etmektedir. Bağıntıdan da anlaşılabileceği üzere, gözlenen zaman cinsinden takip aralıkları, iki farklı dağılımın birleştirilmesi ile büyük doğruluk oranında tanımlanabilmektedir.

Karmaşık dağılımların en önemli özelliği yukarıda da belirtildiği gibi trafik akımı içindeki taşıtları serbest veya bağımlı sürücü olarak iki ana gruba ayırmasıdır. Dawson ve Chimini (1968)'ye göre bir aracın serbest araç olarak kabul edilebilmesi için aşağıdaki şartları sağlaması gerekmektedir:

1. Zaman cinsinden takip aralık değeri, "uygun" bir uzunlukta olmalıdır.
2. Serbest araç, hızını takip ettiği araca göre ayarlamamalı ve rahatça geçiş yapabilmelidir.

3. Takip ettiği aracı geçtikten sonra bile serbest aracın bağımsız olarak hareket edebilmesi için uygun bir hızı koruyabilmesi gerekir (Luttinen, 1996).

Diğer araçlar ise takip eden araçlar olarak adlandırılabilirler. Aslında Luttinen (1996) araç gruplarını dört farklı kategoride toplamıştır. Bunlar:

1. Serbest araçlar,
2. Takip edenler,
3. Serbest araçtan, takip eden araç konumuna geçenler,
4. Geçiş hareketine başlayan araçlardır.

Bu dört kategoride bulunan araçlardan ilk üç gruptakileri birbirinden ayırmak güç olduğundan iki ana grup kabul edilir. Bu iki ana gruptaki araçların bulunduğu akımın istatistiksel olarak modellenmesinde, basit istatistiksel dağılımlar yetersiz kaldığından, yeni bir dağılım aranması gerekmektedir.

Literatürde çok sayıda karmaşık dağılım kullanılabilmektedir: çift-üstel dağılım, Hyperlang dağılımı, Cowan M3 dağılımı, Genelleştirilmiş Kuyruk Modeli (Cowan M4) ve yarı-Poisson modeli. Bu dağılımlardan Genelleştirilmiş Kuyruk Modeli ile yarı-Poisson modeli en iyi sonuçları vermektedir ancak karmaşık yapıları sebebiyle uygulamada bazı güçlükler doğurabilmektedirler. Bu sebeple yapı olarak daha basit bir dağılımın kullanılması, basit ancak etken ve kullanılabilir modeller oluşturulabilmesi açısından önemli kolaylıklar sağlayabilir.

Cowan M3 dağılımı ilk olarak Richard Cowan tarafından 1975 yılında önerilmiştir. Deterministik kuyruk modeli olarak da adlandırılan bu dağılımın yapısı genel olarak basit olmasına rağmen, trafik mühendisliği analizlerinde önemli bir kullanıma alanına sahip olmuştur. Bunker (1996), Akçelik (2003, 2006) ve Ceyhan Yiğiter ve Tanyel (2015), Cowan M3 dağılımını kesintisiz akım içindeki taşıtların takip aralıklarının modellenmesi amacıyla kullanılmışlardır.

Cowan M3 dağılımında, akımda “ θ ” oranındaki araçların, öndeki araçların arkasında bir Δ aralığıyla bulunduğunu kabul etmektedir. Söz konusu araçların grup

halinde hareket ettiği söylenebilir. Akım içindeki diğer araçlar serbest hareket eden araçlar olarak tanımlanır. Bu araçlar serbest bir şekilde ve Δ aralığından daha büyük zaman cinsinden aralıklarla hareket etmektedirler. Böylelikle yoldaki trafik akımının bir seri grup ve aralık olarak tanımlanabilir (Sullivan ve Troutbeck, 1994). Dağılımın olasılık yoğunluk ve olasılık dağılım fonksiyonları Denklem 4.2 ile hesaplanabilir.

$$f(t) = \alpha \lambda e^{-\lambda(t-\Delta)} \quad (4.2)$$

$$F(t) = 1 - \alpha e^{-\lambda(t-\Delta)} \quad (4.3)$$

Burada " α " serbest taşıt oranını, Δ akım içindeki taşıtlara ait en küçük takip aralığı değerini ve " λ " ise aşağıdaki bağıntı kullanılarak hesaplanabilecek bir azaltma katsayısını ifade etmektedir:

$$\lambda = \frac{\alpha q}{1 - \Delta q} \quad (4.4)$$

Bağıntıda q , taşıt/saniye cinsinden trafik hacmidir.

Serbest araç oranını temsil eden ve Cowan M3 dağılımının yapısını etkileyen en önemli parametrelerden biri olan α 'nın belirlenmesi söz konusu dağılıma uygunluğunu da belirleyen önemli bir unsurdur. Bununla birlikte birden fazla bağıntılı ile hesaplanabilen bir parametre olması detaylı bir şekilde incelenmesini gerektirmektedir.

" α " değerinin belirlenmesinde grup halinde hareket eden araçların hangilerinin birbirlerini hangi uzunlukta bir aralıkla takip ederken, hangilerinin de serbest hareket eden araç olarak tanımlanabileceği en önemli problemdir. Troutbeck (1997) çalışmasında 2 saniyeden küçük zaman cinsinden takip aralıklarında araçların büyük olasılıkla grup halinde hareket ettiğini, 4 saniyeden büyük aralıklarda ise araçların serbest kabul edilebileceğini kabul edilebileceğini belirtmiştir.

Yine Troutbeck'in (1997) çalışmalarına göre, 4 saniye araçların tamamen serbest hareket ettikleri zaman cinsinden aralık sınırı olarak kabul edilebilse de bu durum her zaman geçerli bir kabul olarak öne sürülmesi de doğru değildir. Serbest araç oranının belirlenmesinde ilk olarak Tanner (1962) tarafından önerilen Denklem 4.5 aşağıda verilmiştir.

$$\alpha = 1 - \Delta q \quad (4.5)$$

Akçelik ve Chung (1994) ise, serbest araç oranının bir üstel eğriye uyduğunu ileri sürmüşlerdir ve aşağıdaki bağıntıyı önermişlerdir.

$$\alpha = e^{-b\Delta q} \quad (4.6)$$

Ayrıca denklemdeki "b" parametresinin şerit sayısına bağlı olarak değiştirdiğini belirtmişlerdir.

Plank, "α" parametresinin belirlenmesinde 3. dereceden bir denklemin daha iyi sonuçlar verdiğini belirterek Denklem 4.7'yi öne sürmüşlerdir (Hagring, 1998).

$$\alpha = 1 - \Delta^2 q^2 (3 - 2\Delta q) \quad (4.7)$$

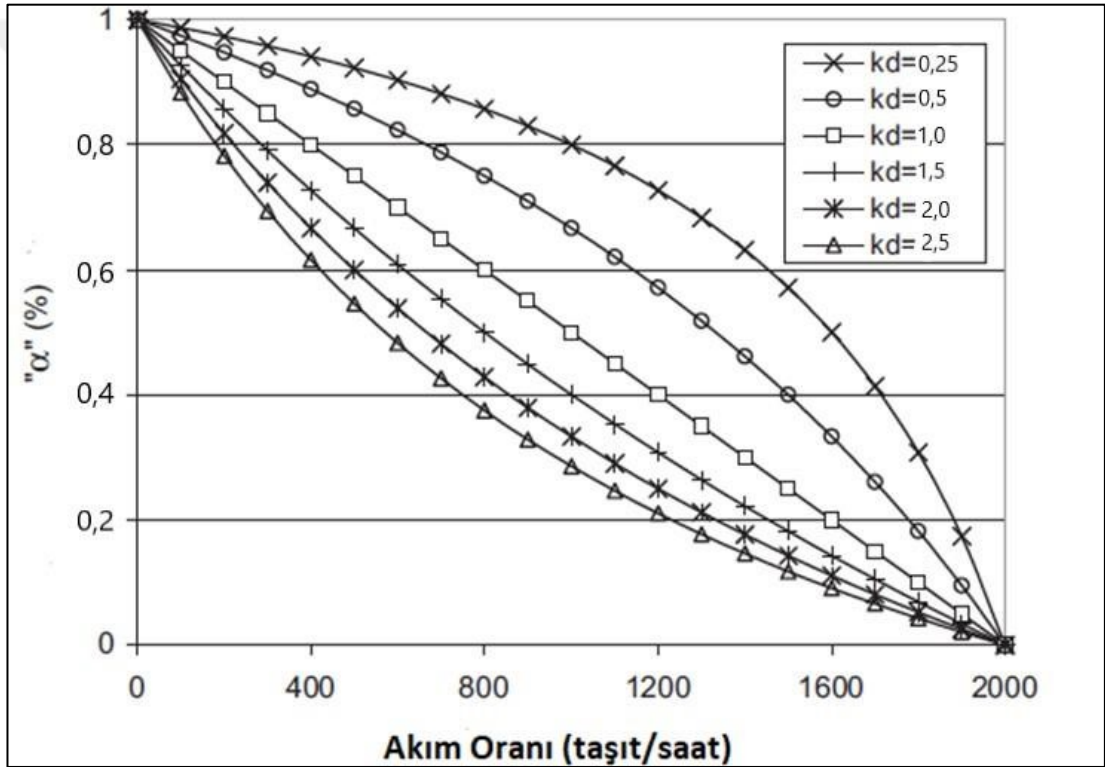
Akçelik (2003), üstel yaklaşımdan yola çıkarak serbest taşıt oranı için aşağıdaki bağıntıyı geliştirmiştir:

$$\alpha = \frac{1 - \Delta q}{1 - (1 - k_d)\Delta q} \quad (4.8)$$

Yukarıdaki bağıntılarda dikkat çekebilecek önemli bir nokta tüm bağıntılarda "Δq" teriminin kullanılmasıdır. Bu terimin önemi en küçük takip aralığı değerinin (Δ) tanımında yatmaktadır. Akçelik (2003), Δ değerinin yolun kapasitesine karşılık gelen bir değer seçilmesinin önemli olduğunu vurgulamıştır. Buradan da anlaşılabileceği gibi aslında Δ değeri bir yolun (veya şeridin) kapasitesine karşılık gelen takip aralığı değeridir ($Q_{kap}=3600/\Delta$). Bu durumda "Δq" çarpımının ise yolun o andaki doygunluk

derecesini ifade eden bir terim olduğu anlaşılmaktadır ($x=q*3600/Q_{kap}$).

Denklem 4.8’de yer alan " k_d " terimi ise "gruplanma (bunching)/gecikme" katsayısı olarak ifade edilmiştir (Akçelik, 2003). " k_d " değerinin değişimi, serbest taşıt oranına ait grafiklerinde yapısını etkilemektedir. " k_d " değerinin 1’den küçük olması durumunda " α " eğrisi dışbükey, 1’den büyük olması durumunda ise iç bükey bir form almaktadır (Şekil 4.8). Dış bükey eğriler genelde kesintisiz akımların modellenmesinde, iç bükey eğriler ise kent içi arterlerdeki zaman cinsinden aralıkların modellenmesinde kullanılmaktadır.



Şekil 4.8 " k_d " parametresi ve trafik akım oranına bağlı serbest taşıt oranının değişimi (Çalışkanelli ve Tanyel, 2010)

Çalışmada gözlemlerden elde edilen veri gruplarından yararlanılarak farklı şeritler için kullanılabilecek " k_d " değerleri elde edilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla ilk olarak gözlem verilerinden yararlanarak Cowan M3 dağılımının parametreleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda "En Küçük Kareler" yöntemi kullanılmıştır. Yöntemin detayları hakkında bilgi Tanyel (2001)'den edinilebilir. Elde edilen sonuçlar

Tablo 4.4, Tablo 4.5 ve Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.4 Sağ şerit için Cowan M3 dağılımı parametreleri

Gözlem Noktası	Şerit	Zaman Aralığı (dk)	q (tışt/sn)	Δ (sn)	Δ^*q	α
Altınyol Akşam	Sağ	0-15	0,097	4,69	0,45	0,671
Altınyol Akşam	Sağ	15-30	0,095	4,64	0,44	0,675
Altınyol Akşam	Sağ	30-45	0,083	5,59	0,46	0,66
Altınyol Sabah	Sağ	45-60	0,179	4,89	0,87	0,24
Bornova Sabah	Sağ	0-15	0,126	2,38	0,29	0,81
Bornova Sabah	Sağ	15-30	0,139	3,37	0,46	0,64
Bornova Sabah	Sağ	30-45	0,142	3,72	0,52	0,61
Bornova Sabah	Sağ	45-60	0,153	4,34	0,66	0,49
Ege Mah Akşam	Sağ	0-15	0,202	1,97	0,39	0,69
Ege Mah Akşam	Sağ	15-30	0,199	2,36	0,46	0,64
Ege Mah Akşam	Sağ	30-45	0,199	2,4	0,47	0,64
Ege Mah Akşam	Sağ	45-60	0,203	2,98	0,6	0,53
Ege Mah Sabah	Sağ	0-15	0,266	1,9	0,5	0,61
Ege Mah Sabah	Sağ	15-30	0,163	1,89	0,3	0,78
Ege Mah Sabah	Sağ	30-45	0,229	2,25	0,51	0,61
Ege Mah Sabah	Sağ	45-60	0,271	2,16	0,58	0,54
Özkanlar Akşam	Sağ	45-60	0,269	1,62	0,43	0,67
Özkanlar Sabah	Sağ	30-45	0,392	1,74	0,68	0,45
Acıbadem Sabah	Sağ	0-10	0,351	2,05	0,71	0,41
Acıbadem Sabah	Sağ	20-30	0,346	1,61	0,55	0,56
Acıbadem Sabah	Sağ	30-40	0,361	0,71	0,25	0,81
Acıbadem Sabah	Sağ	40-50	0,366	2,05	0,75	0,38

Tablo 4.5 Orta şerit için Cowan M3 dağılımı parametreleri

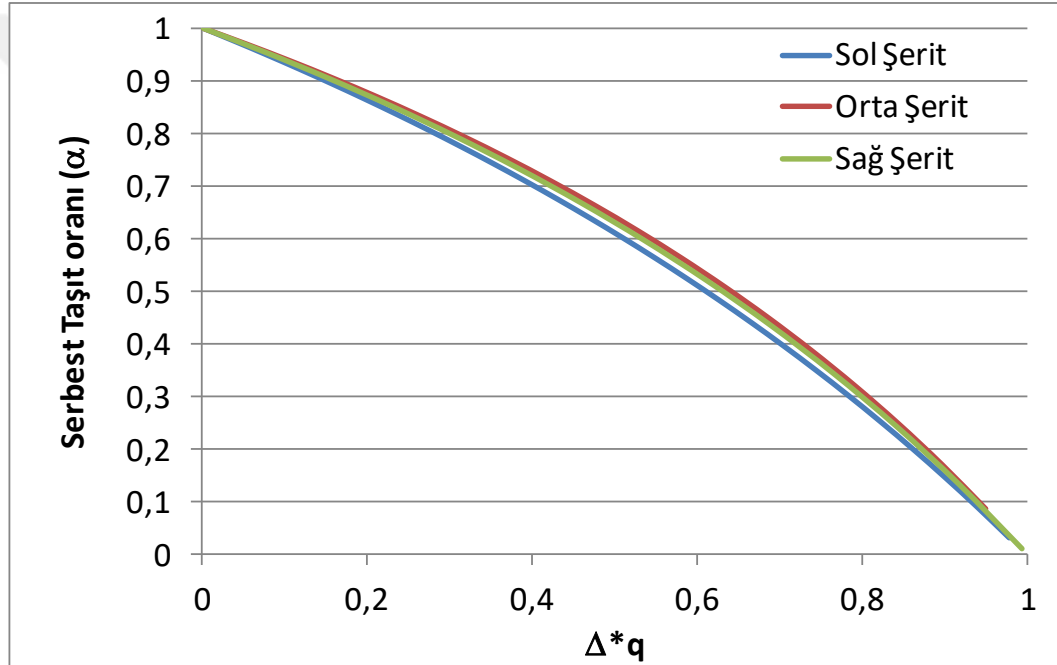
Gözlem Noktası	Şerit	Zaman Aralığı (dk)	q (tst/sn)	Δ (sn)	$\Delta*q$	α
Altınyol Akşam	Orta	30-45	0,276	2,41	0,66	0,47
Altınyol Akşam	Orta	45-60	0,262	2,30	0,60	0,53
Altınyol Sabah	Orta	0-15	0,490	1,71	0,83	0,27
Altınyol Sabah	Orta	15-30	0,477	1,73	0,82	0,29
Altınyol Sabah	Orta	30-45	0,457	1,72	0,78	0,35
Altınyol Sabah	Orta	45-60	0,390	2,12	0,82	0,29
Bornova Sabah	Orta	0-15	0,210	2,16	0,45	0,65
Bornova Sabah	Orta	15-30	0,220	2,12	0,46	0,64
Bornova Sabah	Orta	30-45	0,201	2,93	0,58	0,54
Bornova Sabah	Orta	45-60	0,192	2,78	0,53	0,73
Ege Mah Akşam	Orta	0-15	0,393	1,51	0,59	0,52
Ege Mah Akşam	Orta	30-45	0,402	1,62	0,65	0,47
Ege Mah Sabah	Orta	0-15	0,402	1,64	0,66	0,46
Ege Mah Sabah	Orta	30-45	0,449	1,85	0,83	0,29
Ege Mah Sabah	Orta	45-60	0,325	1,99	0,64	0,48
Özkanlar Akşam	Orta	0-15	0,274	1,74	0,47	0,64
Özkanlar Akşam	Orta	30-45	0,341	0,83	0,28	0,78
Özkanlar Akşam	Orta	45-60	0,212	3,22	0,68	0,45
Özkanlar Sabah	Orta	0-15	0,327	1,89	0,61	0,51
Özkanlar Sabah	Orta	15-30	0,363	1,77	0,64	0,48
Özkanlar Sabah	Orta	30-45	0,336	1,97	0,66	0,47
Özkanlar Sabah	Orta	45-60	0,353	1,71	0,60	0,52
Acıbadem Sabah	Orta	0-10	0,474	1,66	0,78	0,33
Acıbadem Sabah	Orta	10-20	0,474	1,67	0,78	0,33
Acıbadem Sabah	Orta	30-40	0,457	1,17	0,53	0,57
Acıbadem Sabah	Orta	40-50	0,521	1,67	0,86	0,24
Acıbadem Sabah	Orta	50-60	0,435	1,50	0,65	0,47

Tablo 4.6 Sol şerit için Cowan M3 dağılımı parametreleri

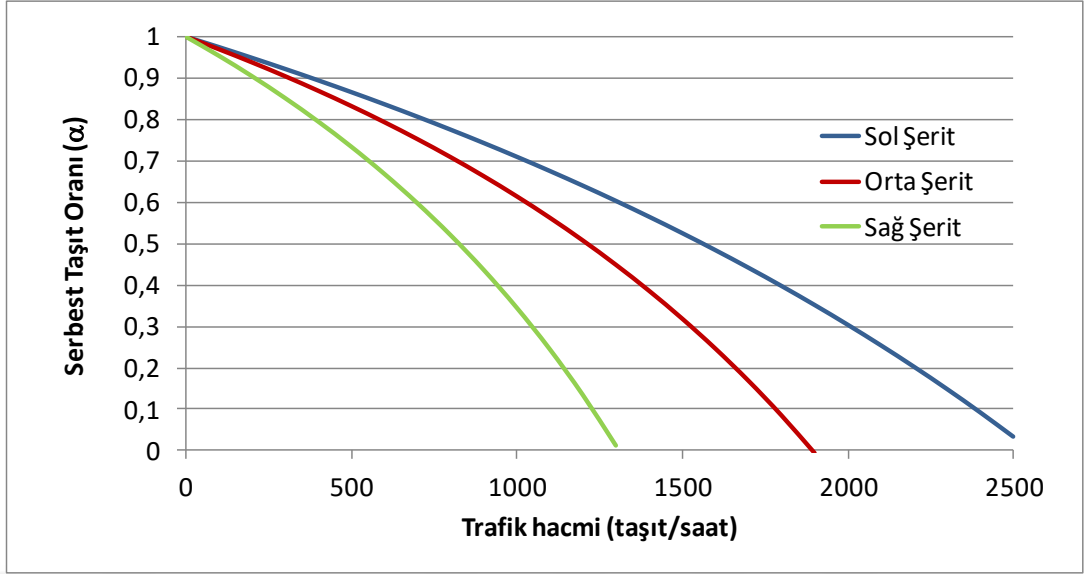
Gözlem Noktası	Şerit	Zaman Aralığı (dk)	q (tst/sn)	Δ (sn)	$\Delta \cdot q$	α
Altınyol Akşam	Sol	0-15	0,275	0,49	0,13	0,85
Altınyol Akşam	Sol	45-60	0,349	1,14	0,39	0,66
Altınyol Sabah	Sol	0-15	0,595	1,62	0,96	0,09
Altınyol Sabah	Sol	15-30	0,575	1,59	0,91	0,17
Altınyol Sabah	Sol	30-45	0,550	1,57	0,86	0,24
Bornova Sabah	Sol	0-15	0,098	2,81	0,27	0,74
Bornova Sabah	Sol	15-30	0,105	0,94	0,09	0,88
Bornova Sabah	Sol	30-45	0,099	2,24	0,22	0,85
Bornova Sabah	Sol	45-60	0,169	2,34	0,39	0,68
Ege Mah Akşam	Sol	0-15	0,426	0,98	0,41	0,67
Ege Mah Akşam	Sol	15-30	0,467	1,20	0,56	0,54
Ege Mah Akşam	Sol	45-60	0,498	1,44	0,71	0,40
Ege Mah Sabah	Sol	0-15	0,618	1,31	0,81	0,30
Ege Mah Sabah	Sol	15-30	0,580	1,36	0,78	0,32
Ege Mah Sabah	Sol	30-45	0,612	1,28	0,78	0,33
Ege Mah Sabah	Sol	45-60	0,542	1,30	0,71	0,40
Özkanlar Akşam	Sol	15-30	0,313	1,51	0,47	0,62
Özkanlar Akşam	Sol	30-45	0,342	0,54	0,18	0,82
Özkanlar Akşam	Sol	45-60	0,251	1,76	0,44	0,65
Özkanlar Sabah	Sol	0-15	0,447	1,16	0,51	0,59
Özkanlar Sabah	Sol	45-60	0,374	1,30	0,48	0,61
Acıbadem Sabah	Sol	0-10	0,431	1,16	0,49	0,60
Acıbadem Sabah	Sol	10-20	0,410	1,19	0,48	0,61
Acıbadem Sabah	Sol	20-30	0,360	1,66	0,59	0,53
Acıbadem Sabah	Sol	30-40	0,433	1,22	0,52	0,57
Acıbadem Sabah	Sol	40-50	0,461	1,69	0,77	0,34
Acıbadem Sabah	Sol	50-60	0,395	1,29	0,50	0,58

Yapılan hesaplamalar sonucunda sağ şeride ait k_d parametresi 0,586 ve ortalama Δ değeri 2,45 saniye; orta şeride ait k_d parametresi 0,561 ve ortalama Δ değeri 1,90 saniye ve son olarak sol şerit için k_d parametresi 0,636 ve ortalama Δ değeri 1,41

saniye olarak bulunmuştur. Şekil 4.9'da Δ^*q-k_d ilişkisi görülmektedir. Şekilden, her üç katsayı kullanılarak yapılan hesaplamaların çok yakın değerler verdiği anlaşılmaktadır. Ancak farklı şeritler arasındaki farklılıklar Şekil 4.10'da görülen " $q-k_d$ " grafiklerinden daha net görülebilmektedir. Şekil 4.10'daki eğriler arasındaki farklılıklar, şeritlere ait en küçük takip aralığı (Δ) değerlerinden kaynaklanmaktadır. Özellikle sağ şeridin kapasitesi çok daha düşüktür. Bunun sebebi, sağ şeritte daha fazla ağır taşıtın bulunmasıdır. Şu ana kadar yapılan araştırmalar ağır araç etkisini içermemektedir. Yapılan gözlemlerden ağır araç etkisinin irdeleneceği bir inceleme daha yapılmasında yarar vardır.



Şekil 4.9 " $\Delta^*q-\alpha$ " ilişkisi



Şekil 4.10 Trafik hacmi - " α " ilişkisi

4.2 Kritik Aralık Kabulü ve Takip Aralığı Değerleri

Daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi, kritik aralık kabulü doğrudan araziden ölçülebilen bir değer değildir. Kritik aralık kabulü değerinin belirlenmesi için literatürde tanımlanmış olan çok sayıda yöntem bulunmakla birlikte bu çalışmada bu yöntemlere değinilmemiştir. Bunun en önemli sebebi, otoyol katılımlarında kabul ve red aralıklarıyla ilgili veri toplanması çalışma süresince mümkün olamamıştır. Bu nedenle çalışmanın bu kısmında otoyol katılımları ile ilgili yapılmış önceki çalışmalar kısaca tartışılacaktır.

Otoyol katılımlarında kabul aralıklarının belirlenmesi büyük oranda ışıksız kavşaklara benzemekle birlikte önemli bazı hususların kabul aralığında etkili olabileceği düşünülmektedir:

- Otoyol veya çevreyolu katılımlarında çoğunlukla bir katılım şeridi bulunmakta ve yan yoldan giriş yapan taşıtlar bu şerit boyunca katılım manevrasını gerçekleştirmektedir.
- Buna bağlı olarak yan yol katılımlarında, iki akım arasındaki kesişme açısı nispeten küçük olacak; buna bağlı olarak yan yoldan katılan sürücülerin kabul edecekleri aralık değerleri, ışıksız kavşaklara göre daha kısa olabilecektir.

Diğer yandan söz konusu katılım manevrası bir kavşağa girişten daha çok şerit değiştirme şeklinde gerçekleşecektir.

- Otoyol katılımında özellikle anayoldaki taşıtların hızları, ışiksiz kavşaktaki taşıtların hızlarına göre daha yüksek olacaktır. Bu da kabul edilen aralık değerini etkileyecektir.

Literatürde, kritik aralık kabulü değerinin hıza bağlı olarak değiştiği yönünde önemli çalışmalar bulunmaktadır. İlk kez Greenshields (1947) tarafından ışiksiz bir kavşakta yan yoldan giriş yapacak olan sürücülerin kabul ettikleri aralıkların süre ve uzunluk olarak değerlerinin anayoldaki araçların hızlarına bağlı olduğunu vurgulanmıştır. Moore (1956), yayaların karşıdan karşıya geçerken yoldaki taşıtlar arasında kabul ettikleri uzaklık cinsinden aralık değerini aşağıdaki bağıntı ile hesaplamıştır:

$$L = 13,5 + 2,9v \quad (4.9)$$

Burada L, kabul edilen aralık değerini (metre); "v" ise anakımın hızını (m/saniye) ifade etmektedir. Bağıntı hızların 8~40 km/saat aralığında olması koşulunda geçerlidir.

Bir başka model Cooper ve diğer., (1976) tarafından yan yoldan sola dönüş yapan taşıtların ana akım içinde kabul ettikleri uzunluk cinsinden aralık değerinin hesaplanması için önerilmiştir:

$$L = 11,5 + 5v \quad (4.10)$$

Uber ve Hoofman (1988), yan yoldaki sürücüler tarafından kabul edilen aralıkların ortanca (medyan) değerinin hesaplanması için aşağıdaki bağıntıyı gözlemlerden elde etmişlerdir:

$$T_{ortanca} = 6,79 - 0,061v \quad (4.11)$$

Burada $T_{ortanca}$, kabul edilen aralıkların ortanca (medyan) değeridir (saniye). Ülkemizde Gedizlioğlu ve Yayla (1978), ışıksız kavşaklarda yan yol sürücülerinin kabul ettiği uzunluk cinsinden aralık değeri için aşağıdaki bağıntıyı geliştirmişlerdir:

$$L = 5,5v + 5,2 \quad (4.12)$$

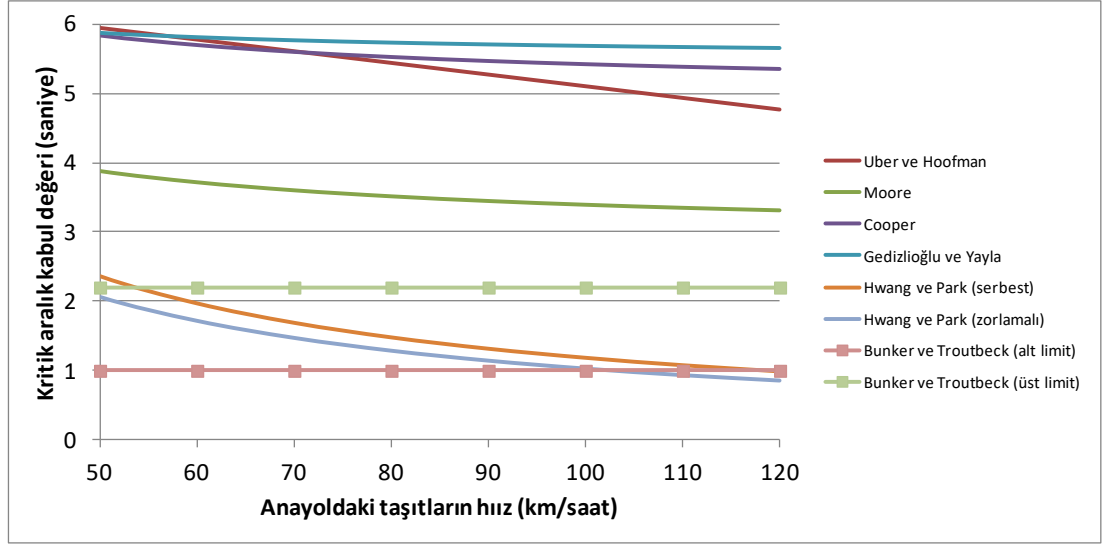
Drew ve diğer. (1967) çalışmalarında, otoyol katılımlarında anayol ve yan yol taşıtlarının hızları arasındaki farklılıkların kabul edilen aralıklar üzerinde etkili olabileceğini belirtmişlerdir. Hwang ve Park (2005), otoyol katılımları için kabul edilebilecek uzunluk cinsinden aralıkları Tablo 4.7'deki şekilde bulmuşlardır.

Tablo 4.7 Otoyol katılımlarında uzunluk cinsinden kabul edilen aralıklar (Hwang ve Park, 2005)

Trafik Akım Koşulları	Uzunluk Cinsinden Aralık (metre)	
	Reddedilen	Kabul Edilen
Serbest Akım	20,41	32,70
Zorlamalı Akım	19,19	28,71

Bunker ve Troutbeck (2003), katılım alanının geometrisine göre farklı en küçük takip aralığı ve kritik aralık kabul değeri kabul etmişlerdir. Bu kabule göre iyi bir geometriye sahip katılımlarda yan yol taşıtları arasındaki en küçük takip aralığı değeri 1,0 saniye; kritik aralık kabul değeri ise en az 1,0 saniye, en fazla 2,0 saniye olmaktadır. Dar geometride ise takip aralığı 1,2 saniye; kritik aralık kabul değeri ise en az 1,2 saniye, en fazla 2,2 saniye alınabilir.

Şekil 4.11'de, yukarıda tanımlanan bağıntılardan ve değerlerden yararlanarak hıza bağlı olarak hesaplanan zaman cinsinden kritik aralık kabul değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil incelendiğinde, otoyol katılımı için Hwang ve Park (2005) ile Bunker ve Troutbeck (2003)'in değerlerinin benzer aralıklarda yer aldığı görülmüştür. Buradan yola çıkarak bu çalışmada yan yol sürücülerine ait kritik aralık kabul değerlerinin 1,0~2,2 saniye arasında değiştiği kabul edilmiştir. Yan yol sürücülerine ait takip aralığı değerlerinin de 1,0~1,2 saniye aralığında değiştiği varsayılmıştır.



Şekil 4.11 Farklı araştırmacıların çalışmalarına göre hesaplanan kritik aralık kabul değerlerinin karşılaştırılması

Analizlerde kullanılacak diğer önemli bir parametre de anayoldaki taşıtlar arasındaki en küçük takip aralığı değeridir. Ceyhan Yiğiter ve Tanyel (2015) kesintisiz akımlarda farklı şeritler için Δ değerleri hesaplamışlardır. “ Δ ” değerinin sağ şeritlerde 1,0~4,0 saniye; orta şeritlerde 1,0~3,0 saniye ve sol şeritlerde 0,5~2,5 saniye aralığında değiştiğini vurgulamışlardır. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar da Ceyhan Yiğiter ve Tanyel'in (2015) sonuçlarıyla uyumludur.

4.3 Sınırlı Öncelik Koşulunda Kapasite Hesabı

Önceki bölümlerde de açıklandığı gibi, ışısız kavşaklarda ve otoyol katılımlarında sınırlı öncelik olarak adlandırılan bir koşul ile karşılaşılabilir. Sınırlı öncelik, yan yoldaki sürücülerin, ana akımdaki araçları yavaşlamaya veya durmaya zorlanarak kavşağa girme durumudur. Yan yoldaki sürücülerin yüksek ana akım değerleri sebebiyle uzun gecikmelere maruz kalmaları da bu durumu destekler. Troutbeck (1998), yaklaşımın kapasitesinin hesaplanabilmesi için Denklem 4.13'ü önermiştir.

$$q_e = \frac{\alpha C q_c e^{-\lambda(T-\Delta)}}{1 - e^{-\lambda T_0}} \quad (4.13)$$

Bu daha önce Troutbeck tarafından önerilen Denklem 3.16'daki kapasite bağıntısının geliştirilmiş halidir. Denklemdeki “C” katsayısı sınırlı öncelik durumunda kapasitenin hesaplanabilmesi için kullanılan bir katsayıdır ve Denklem 4.14'te verildiği gibi hesaplanabilir.

$$C = \frac{1 - e^{-\lambda T_0}}{[1 - e^{-\lambda(T-\Delta)} - \lambda(T - T_0 - \Delta)e^{-\lambda(T-\Delta)}]} \quad (4.14)$$

4.4 Gecikme

Trafikte, bir yol kesiminin, bir kavşağın veya bir otoyol tesisinin başarımını belirleyen en önemli parametrelerden birisi gecikmedir. Bu bölümde kritik aralık kabul yöntemine göre gecikme ve trafik ışığından ayrılan taşıtların trafik akım özelliklerine bağlı olarak servis gecikmesinin değişimi için yöntemler açıklanmıştır.

4.4.1 Bunker ve Troutbeck'in (2003) Gecikme Bağıntısı

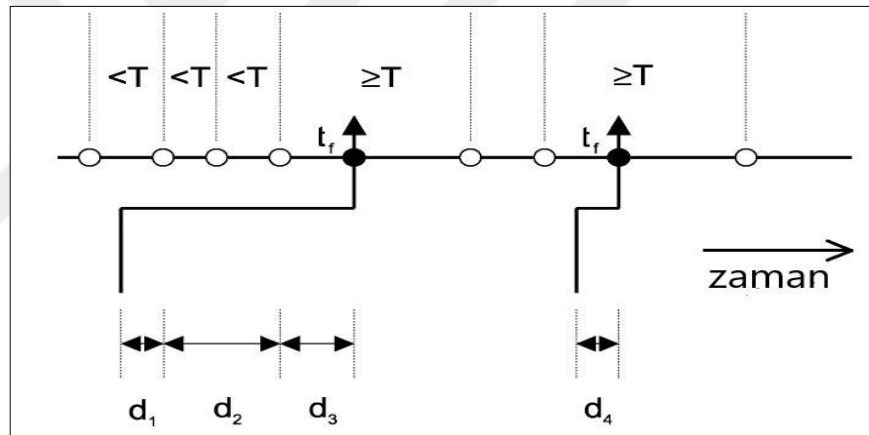
Literatürde otoyol katılımlarında gecikme hesabı üzerine yapılmış çok fazla çalışma bulunmamakla birlikte en önemli kabul edilebilecek ve kritik aralık kabulü değerine bağlı olarak geliştirilmiş olan yöntem Bunker ve Troutbeck (2003) yöntemidir.

Bunker ve Troutbeck (2003), sınırlı öncelik koşulunda otoyol katılımlarındaki taşıtlara ait ortalama gecikmenin hesaplanması için aşağıdaki bağıntıyı önermişlerdir:

$$D_{2,X} = D_{2,0} \left(1 + \frac{\varepsilon X}{1-X} \right). \quad (4.15)$$

Bağıntıda, $D_{2,X}$; yan yoldaki taşıt başına ortalama gecikme (saniye); $D_{2,0}$; yan yoldaki taşıtlara ait servis (veya en küçük veya Adams) gecikmesi (saniye) ve “ ε ” ise gecikme/doygunluk fonksiyonunun yükselme oranını ifade eden bir şekil parametresidir.

Bunker ve Troutbeck (2003) otoyol katılımları için bu gecikme değerini 4 ayrı bileşenden oluştuğunu belirtmişlerdir. Şekil 4.12’de gözlemlenen ilk kritik aralığı reddeden katılım sürücülerinin yaşadıkları gecikme d_1 , d_2 ve d_3 gecikme bileşeni, ilk gözlemlenen aralığı kabul eden sürücülerin yaşadığı gecikme ise d_4 olarak tanımlanmıştır.



Sürücü gözlemlediği ilk kritik aralık olan, ana akımdaki a ve b araçları arasındaki boşluğu kritik aralık kabul değerinden (T) küçük olduğu için reddeder. Bu gecikme d_1 bileşenidir ve aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir:

$$d_1 = \alpha q \left(\left(\frac{\Delta^2}{2\alpha} + \frac{\Delta}{\lambda} + \frac{1}{\lambda^2} \right) - \left(\frac{T^2}{2} + \frac{T}{\lambda} + \frac{1}{\lambda^2} \right) \right) e^{-\lambda(T-\Delta)} \quad (4.16)$$

Servis gecikmesinin d_2 bileşeni ise, sürücünün b ve c, c ve d araçları arasında kalan aralık, kritik aralık kabul değerinden küçük olduğu için reddettiğinde yaşadığı gecikmedir:

$$d_2 = \alpha q \left(\left(\frac{\Delta^2}{\alpha^2} + \frac{2\Delta}{\alpha\lambda} + \frac{1}{\lambda^2} \right) e^{\lambda(T-\Delta)} + \left(T^2 + \frac{2T}{\lambda} + \frac{1}{\lambda^2} \right) e^{-\lambda(T-\Delta)} - \left(\frac{2T\Delta}{\alpha} + \frac{2\Delta}{\alpha\lambda} + \frac{2T}{\lambda} + \frac{2}{\lambda^2} \right) \right) \quad (4.17)$$

Sonunda T değerinden büyük ilk aralığa giren sürücünün yaşadığı gecikme d_3 gecikmesi olarak tanımlanır ve bu gecikme en küçük takip aralığı süresine eşittir:

$$d_3 = \alpha q t_f \left(\left(\frac{\Delta}{\alpha} + \frac{1}{\lambda} \right) - \left(T + \frac{1}{\lambda} \right) e^{-\lambda(T-\Delta)} \right) \quad (4.18)$$

Sürücünün gözlemlediği ilk aralığı kabul etmesi durumunda yaşadığı gecikmeyi d_4 bileşeni tanımlar. İlk aralığı kabul eden sürücü d_1 , d_2 ve d_3 gecikmelerine maruz kalmadığı gibi, bu değer en küçük takip aralığı süresine eşittir.

$$d_4 = \alpha q \left(\frac{T_0^2}{2} e^{-\lambda(T-\Delta)} \right) \quad (4.19)$$

Sonuç olarak katılım sürücülerinin toplam ortalama gecikmesi, $D_{2,0}$; d_1 , d_2 , d_3 ve d_4 gecikme bileşenlerinin toplamına eşittir:

$$D_{2,0} = \frac{\alpha q}{2} (T - T_0) \left(T - T_0 + \frac{2}{\lambda} \right) e^{-\lambda(T-\Delta)} + \frac{e^{\lambda(T-\Delta)}}{\alpha q} - (2T - T_0) - \frac{1}{\lambda} + \frac{(\lambda\Delta^2 - 2\Delta + 2\Delta\alpha)}{2(\lambda\Delta + \alpha)}. \quad (4.20)$$

Servis gecikmesi üzerinde anayol trafik hacminin (taşıt/saniye), kritik aralık kabul değerinin (T) ve anayol ve yan yol taşıtları arasındaki en küçük takip aralığı değerlerinin (Δ ve T_0) önemli bir etkiye sahip olduğu açıktır. Servis gecikmesi üzerinde etkili olan diğer önemli unsurlar ise anayol ve yan yol taşıtlarının gözlem

kesitlerine geliş aralıklarıdır. Buna bağlı olarak çalışmada kullanılan Cowan M3 dağılımının parametrelerinin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Serbest taşıt oranı “ α ”, Cowan M3 dağılımının en önemli parametrelerinden birisi olup, farklı ülke ve/veya yerleşimlerdeki sürücü davranışlarının tanımlanmasında kullanılabilen bir değerdir. Bunker ve Troutbeck (2003) otoyollarda trafik hacmine bağlı olarak serbest taşıt oranının hesaplanmasında aşağıdaki bağıntıyı önermişlerdir:

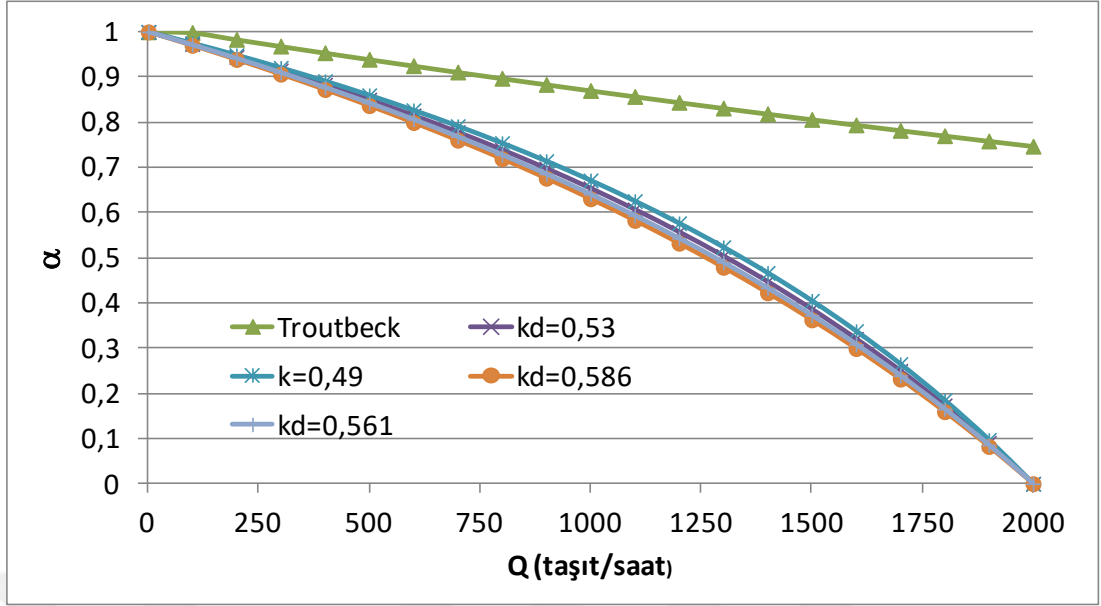
$$\alpha_1 = e^{-0,55(q_1-0,025)} \quad q_1 \geq 0,025 \text{ taşıt/san} \quad (4.21)$$

$$\alpha_1 = 1 \quad q_1 \leq 0,025 \text{ taşıt/san} \quad (4.22)$$

Ülkemizde Ceyhan Yiğiter ve Tanyel (2015), farklı şeritlerin serbest taşıt oranlarının da birbirlerinden farklı olabileceğini; özellikle orta şeritlerin diğer şeritlerdeki taşıtların şerit değiştirme davranışları sebebiyle daha fazla etkilendiklerini belirtmişlerdir. Buna bağlı olarak orta ve sol şeritlerdeki serbest taşıt oranlarının Akçelik (2002) tarafından önerilmiş olan aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabileceğini önermişlerdir:

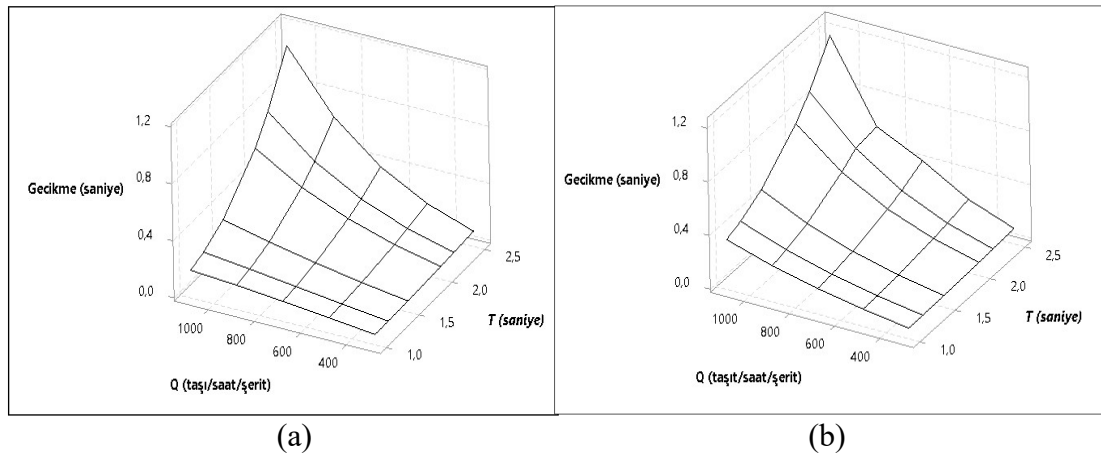
$$\alpha_1 = \frac{1 - \Delta q_1}{1 - (1 - k_d)\Delta q_1} \quad (4.23)$$

Burada α_1 , anayoldaki serbest taşıt oranını, q_1 , o şeride ait trafik hacmini (taşıt/san) ve k_d ise bir gecikme/gruplaşma oranını vermektedir. Ceyhan Yiğiter ve Tanyel (2015), sağ ve orta şeritler için k_d parametresini sırasıyla 0,53 ve 0,49 olarak bulmuşlardır. Bu çalışmada ise k_d değeri, Bölüm 4.1'de de belirtildiği gibi sağ şerit için 0,586; orta şerit için 0,651 bulunmuştur. Şekil 4.13'te her üç çalışmadan elde edilen k_d değerlerine bağlı serbest araç oranının değişimleri görülmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi Ceyhan Yiğiter ve Tanyel'in bulgularıyla bu çalışmadan elde edilen değerler birbirlerine çok yakın sonuçlar vermekte ancak Bunker ve Troutbeck'in bağıntısı serbest taşıt oranını çok yüksek hesaplamaktadır.



Şekil 4.13 Farklı serbest araç oranı bağıntısı ve parametrelerinin karşılaştırılması

Bunker ve Troutbeck (2003)'ün ve bu çalışmada ölçümlendirilmiş olan serbest taşıt oranı bağıntıları kullanılarak otoyol katılımlarındaki yan yol sürücülerinin maruz kaldıkları servis gecikmesi değerleri (4.20) bağıntısı yardımı ile bulunmuştur. Hesaplamalarda anayol trafik akımının 300~1000 taşıt/saat/şerit, yan yoldaki sürücülere ait kritik aralık kabulü değerinin 1,0~2,2 saniye ve yan yoldan giriş yapan sürücülerin takip aralıklarının 1,0~1,2 saniye aralığında değiştiği kabul edilmiştir. Sonuçlar Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14 (a) Bunker ve Troutbeck (2003) servis gecikmesi değerleri (b) bu çalışmada ölçümlendirilmiş olan serbest taşıt oranı kullanılarak hesaplanan servis gecikmesi değerleri

Her iki şekil de incelendiğinde her iki serbest taşıt oranı için hesaplanan servis gecikmesi değerleri birbirine çok yakın bulunmuştur ancak bu çalışma kapsamında ölçümlendirilen Akçelik tarafından önerilen bağıntı kullanılarak bulunan gecikme değerlerinin özellikle trafik hacmi arttıkça nispeten daha hızlı arttığı görülmektedir. Bu sonuç, Türkiye'de otoyol katılımlarında yan yol sürücülerinin anayoldaki trafik akımından nispeten daha fazla etkilenebileceklerini göstermektedir.

4.4.2 Trafik Işığından Ayrılan Trafik Akım Özelliklerine Bağlı Servis Gecikmesinin Değişimi

Özellikle büyük kentlerde (metropollerde), kent içi trafiği rahatlatmak, transit trafiği kent merkezi dışında tutmak gibi amaçlarla, şehirlerarası devlet yollarıyla otoyollara bağlanan ve otoyol standartlarında projelendirilip inşa edilen çevre yolları oldukça yaygın bir uygulamadır. Bu tür çevre yollarına olan yerleşim bölgelerinden erişim genellikle ışıklı arterler üzerinden sağlanmaktadır. Bu sebeple, özellikle bir trafik ışığından ayrılarak otoyol katılımına gelen trafik akımının özelliklerinin, katılan taşıtların gecikmelerini de etkileyeceği düşünülebilir.

Literatürde, kritik aralık kabul yönetimi ile otoyol katılımlarının öncesinde (akım yukarı) bir trafik ışığının bulunması durumunda, otoyola katılan taşıtların gecikmeleri üzerine yapılmış en önemli çalışmalardan birisi Bunker ve Troutbeck'in (2003) araştırmasıdır. Bunker ve Troutbeck (2003), anayol taşıtları için olduğu gibi, trafik ışığından ayrılarak otoyol katılımına gelen taşıtlar arasındaki zaman cinsinden takip aralığının da Cowan M3 dağılımı ile hesaplanabileceğini belirtmiş ve gözlemlerine dayanarak serbest taşıt oranı için aşağıdaki bağıntıyı önermişlerdir:

$$\alpha_2 = e^{-1,7(q_2+0,35)} \quad (4.24)$$

Bağıntıda q_2 , ışıktan ayrılarak otoyol katılımına gelen taşıt sayısını (taşıt/saniye); α_2 ise ışıktan ayrılarak katılıma gelen serbest taşıt oranını göstermektedir.

Ülkemizde ışıklı arterler için tanımlanmış iki “ α ” bağıntısı bulunmaktadır. Bunlardan ilki Çalışkanelli ve Tanyel (2010) tarafından önerilmiştir. Yazarlar çalışmalarında Akçelik (2003) tarafından önerilmiş olan (4.23) bağıntısını kullanmışlardır. Sağ ve orta şerit için “ k_d ” değıştirgesinin 0,95 olduğunu belirtmişlerdir.

Çoşkun ve diğer. (2014) tarafından yapılmış olan diğer bir çalışmada ise, sinyalden ayrılan taşıtlar arasındaki zaman cinsinden takip aralıkları Cowan M3 dağılımına göre modellenmiştir. Bu modelde, akım içindeki serbest taşıt oranının akım yukarı ışıklı kavşağa ait efektif yeşil süre (ysl)/ devre süresi (D_{ay}) oranı ile akım yukarı ve akım aşağı kavşaklara (L_{ay} ve L_{aa}) olan uzaklığına bağılı olarak hesaplanmaktadır:

$$\alpha = 0,585591 - 0,00033L_{ay} - 0,00052L_{aa} - 0,05897\mathit{ST} + 0,529183\frac{ysl}{D_{ay}} - 0,54672\Delta q_2 \quad (4.25)$$

Bağıntıda ST değeri şerit tipini ifade etmekte olup sağ şerit için “1” ve orta şerit için “2” değeri kullanılmıştır.

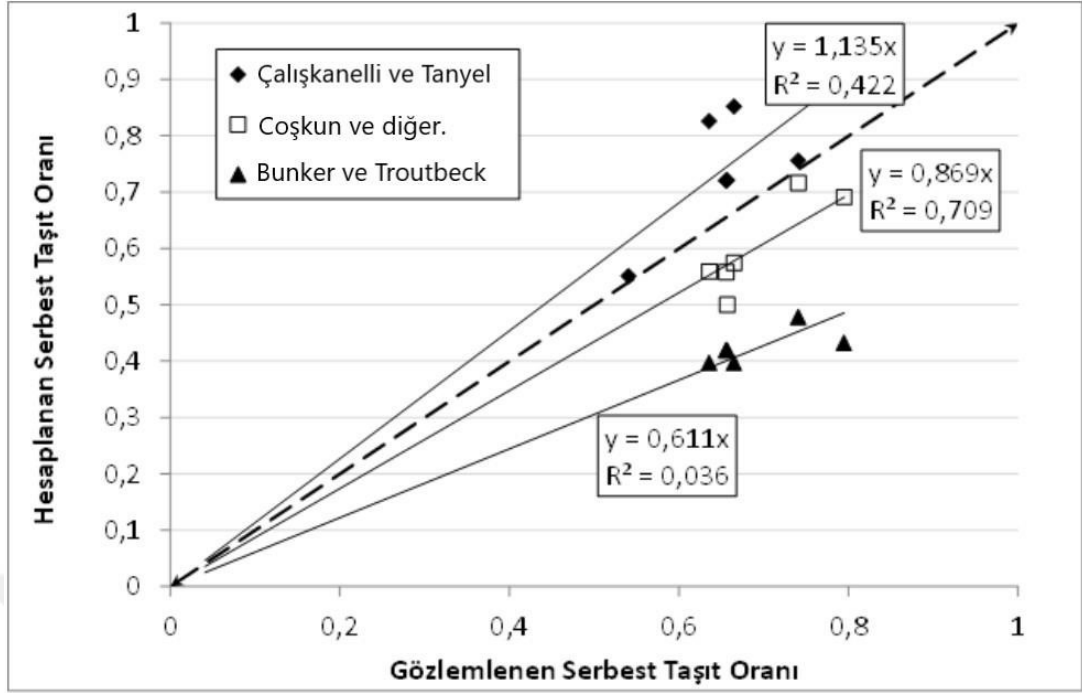
Yukarıda tanımlanan serbest taşıt oranlarından hangisinin analizlerde kullanılabileceğinin belirlenmesi için İzmir kenti içerisinde belirlenen iki gözlem noktasına ait veriler kullanılmıştır. Bu çalışmada, İzmir'in Buca İlçesi'nde yer alan Doğuş Caddesi üzerindeki ışıklı kavşak ile, İzmir Çevreyolu arasındaki bağlantı yolunda gözlemler yapılmıştır. 3 şeritli bir kent içi arter olan Doğuş Caddesi 3,6 m şerit genişliğine sahiptir. Doğuş Caddesi üzerinde yer alan ve Dokuz Eylül Üniversitesinin kent içi bağlantısını sağlayan Tınaztepe Kavşağının yeşil/devre süresi 0,75'tir. Tınaztepe Kavşağının diğer gözlem noktası ile arasında 900 m bulunmaktadır. Tınaztepe kavşağında hacim değeri sağ, orta ve sol şerit için sırası ile 343 tş/sa/şrt, 872 tş/sa/şrt ve 406 tş/sa/şrt'dir.

Diğer gözlem noktası olan Tınaztepe Bağlantı noktası yan yola 330, otoyola ise 960 m uzaklıkta yer almaktadır. Hacim değerleri ise sağ, orta ve sol şerit için sırasıyla 309 tş/sa/şrt, 802 tş/sa/şrt ve 1237 tş/sa/şrt'dir. İki gözlem noktasının konumları da Şekil 4.17'de verilmiştir.



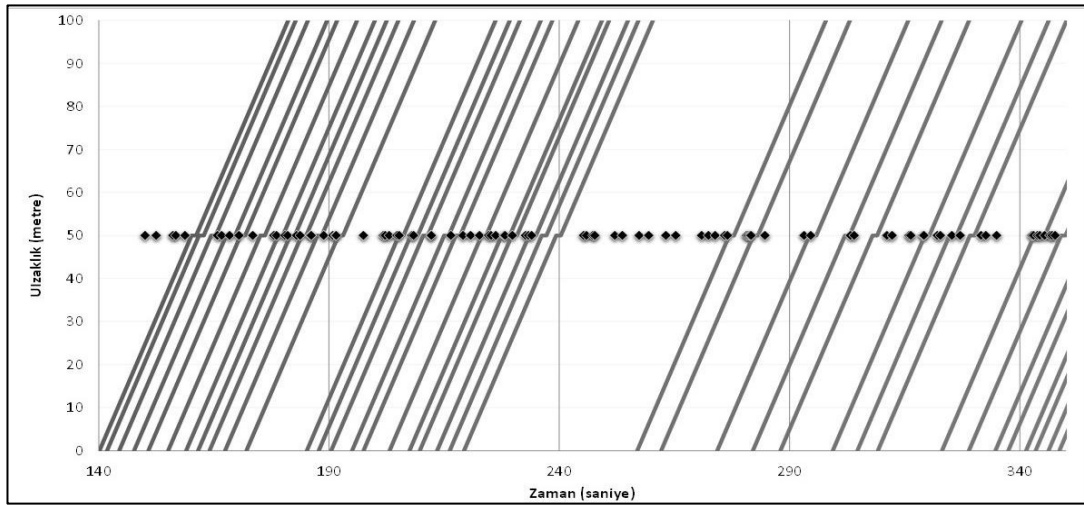
Şekil 4.15 Gözlem noktasının görünümü (Google Earth, 2019)

Veriler, sabah zirve saatinde yapılan video kamera çekimleri büro ortamında çözümlenerek toplanmıştır. Gözlemler 15'er dakikalık veri gruplarına bölünmüş ve şerit bazında elde edilen veri gruplarının Cowan M3 dağılımına uygunluğu irdelenmiştir. Şekil 4.16'da, gözlenen " α " değerleri ile Çalıkanelli ve Tanyel (2010), Coşkun ve diğer. (2014) ile Bunker ve Troutbeck (2003) bağıntılarından hesaplanan serbest taşıt oranları karşılaştırılmıştır. En iyi sonucu Coşkun ve diğer. (2014) tarafından önerilmiş olan bağıntı vermiştir.



Şekil 4.16 Serbest taşıt oranı bağıntılarının gözlemlenen değerlerle karşılaştırılması (Ulu ve diğer., 2019)

Şekil 4.17'de, ışıktan ayrıla taşıtların otoyol katılımında karşılaşabilecekleri gecikmeleri gösteren örnek bir yol-zaman grafiği yer almaktadır. Şekildeki noktalar, anayoldaki taşıtları, eğriler ise yan yoldan gelen taşıtları ifade etmektedir. Şekilde, özellikle yan yol taşıtlara ait eğrilerin birbirlerine yakın oldukları kesimler, ışıktan ayrılan taşıtların bir grup halinde kavşağa gelebileceklerini göstermektedir.



Şekil 4.17 Işıktan ayrılan taşıtların otoyol katılımında karşılaşabilecekleri gecikmeleri gösteren örnek bir yol-zaman grafiği

Bir otoyola katılmak isteyen taşıtların ortalama gecikmelerinin hesaplanması için Bunker ve Troutbeck (2003), (4.26) bağıntısını önermişlerdir:

$$D_{2,X} = D_{2,0} \left(1 + \frac{\varepsilon X}{1-X} \right). \quad (4.26)$$

Bu bağıntı, Pollaczec-Klitchine fonksiyonun farklı bir formu olup; M/G/1 (taşıtların sisteme gelişleri rastgele/ servis süresi genel bir fonksiyonla tanımlanan/ tek kanallı) kuyruk modeliyle benzerlik göstermektedir (Bunker ve Troutbeck, 2003). M/G/1 kuyruk modeli, Bunker ve Troutbeck'in (2003) yaklaşımları özelinde taşıtların kavşağa gelen taşıtlar arasındaki zaman cinsinden aralıkların negatif üstel dağılım ile, anayoldaki taşıtlar arasında bulabilecekleri uygun aralıkların ise Cowan M3 dağılımı ile tanımlanabileceği kabulünün yapılabileceği söylenebilir.

Bağıntıdaki " ε " parametresi bir şekil parametresi olup; bu değerin artması gecikme/doygunluk oranının da yükselmesi anlamına gelmektedir. Bu da doyumluğun 0~1 arasındaki değerlerinde gecikmenin daha yüksek olması, dolayısıyla katılımda gözlemlenen başarımının da daha düşük olması anlamını taşımaktadır. " ε " değerinin 1 (bir) olması ise geleneksel kuyruk kuramında servisin rastgele olduğunu göstermektedir.

Bunker ve Troutbeck (2003), " ε " parametresinin, anayol ve yan yoldaki taşıtlar arasındaki takip aralıklarının özelliklerine bağlı olarak belirlenebileceğini vurgulamış; ancak bunun çok zor bir süreç olduğunu belirtmişlerdir. Bunun yerine, katılım rampasının öncesinde bir ışıklı kavşak olması durumunda " ε " parametresinin hesabı için, anayoldaki engelleyici trafik akımı ve yan yol sürücülerine ait kritik aralık kabulü değerine bağlı aşağıdaki ampirik bağıntıyı geliştirmişlerdir:

$$\begin{aligned} \ln(\varepsilon) = & (1,491T^2 - 17,15T + 21,13).q_1^3 \\ & + (2,197T^2 + 9,292T - 17,95)q_1^2 \\ & + (-1,430T^2 - 3,238T + 6,975)q_1 \\ & + (0,3602T^2 - 0,1971T + 1,391) \end{aligned} \quad (4.27)$$

Bu çalışmada daha önce yapılmış olan gözlem ve analizlerden yola çıkarak, otoyol katılımlarında yan yoldaki taşıtlara ait gecikmelerin hesaplanmasında M/G/1 kuyruk modelinin yeterli olmayabileceği düşünülmektedir. Bunun en önemli sebebi, söz konusu modelin ışıklı kavşaktan ayrılan taşıtların etkisini belirlemede yetersiz kalabilmesidir. Yukarıdan da görülebileceği gibi, ışıktan ayrılan trafik akımı içindeki serbest taşıt oranının hesaplanmasında Coşkun ve diğer. (2014), akım yukarı trafik ışığına ait yeşil süre/ devre süresi oranı ile akım yukarı ve akım aşağı trafik akımlarına uzaklığı etkili olduğunu bulmuşlardır. Bu bilgiler ışığında farklı bir modelin kullanılmasının uygun olabileceği anlaşılmaktadır.

Çalışmada, G/G/1 kuyruk modeli (yan yoldan gelen taşıtların gelişlerinin genel bir dağılım fonksiyonuyla modellenen / servis süresi genel bir fonksiyonla tanımlanan/ tek kanallı) kuyruk modelinin uygun olabileceği düşünülmüştür. Literatürde G/G/1 kuyruk modeli için birkaç farklı gecikme yaklaşımı önerilmiş olmakla birlikte hem yapısal hem de uygulama basitliği açısından Kingsman (1961) yakınsamasının kullanılması uygun görülmüştür:

$$E(D_{2,X}) = \left(\frac{X}{1-X} \right) \left(\frac{C_a^2 + C_s^2}{2} \right) \tau \quad (4.28)$$

Bağıntıda, "X", yan yola ait doyumluk derecesini, C_a , katılıma gelen taşıtların gelişlerinin değişkenlik katsayısını (geliş sürelerinin standart sapması/geliş sürelerinin ortalaması), C_s , servis aralıklarının değişkenlik katsayısını ve τ değeri de ortalama servis süresini (saniye) göstermektedir.

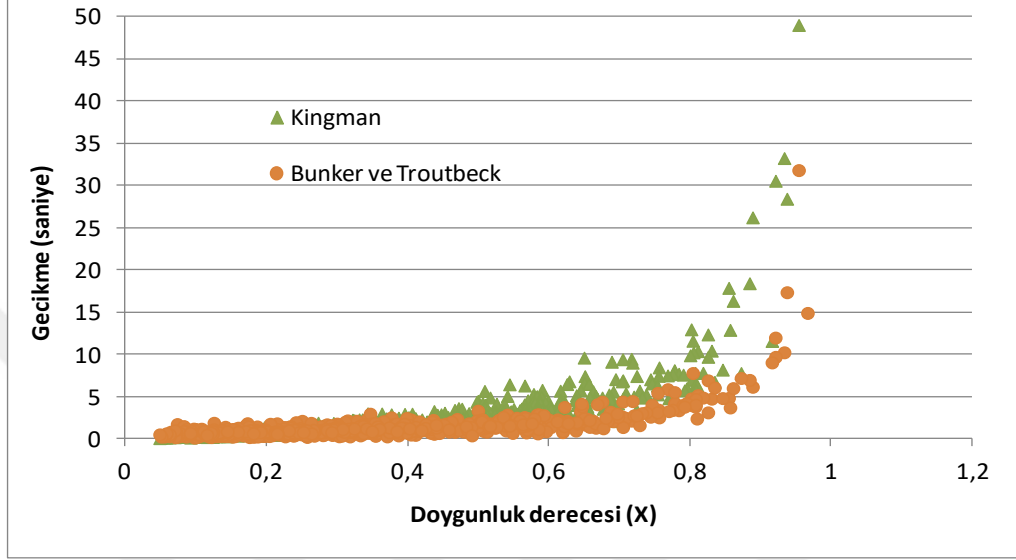
Çalışmanın bir sonraki adımında, ışıktan ayrılan trafik akımının servis gecikmesi üzerindeki etkisi çözümlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, aşağıdaki adımlar takip edilmiştir:

- Otoyol/çevreyolu üzerinde hareket eden taşıtlara ait takip aralıklarının Cowan M3 dağılımına uyduğu kabul edilmiştir.

- Çalışma kapsamında, otoyolda sağ şeritte hareket eden trafik akım oranının 200~2000 taşıt/saat/şerit aralığında değiştiği kabul edilmiş; serbest araç oranı Akçelik bağıntısında k_d değeri çalışma kapsamında sağ şerit için önerilmiş olan "0,586" değeri alınarak hesaplanmıştır.
- Anayolda sağ şeritteki taşıtların en küçük takip aralıklarının 0,5~6,0 saniye değiştiği kabul edilmiştir.
- Işıktan ayrılan ve otoyol katılımına gelen trafik akımı değerinin ise 75~1450 taşıt/saat aralığında değerler aldığı kabulü yapılmıştır.
- Otoyol katılımından akım yukarı yönde yer alan trafik ışığını katılıma olan uzaklığının 200~800 metre aralığında değiştiği varsayılmıştır.
- Akım yukarı trafik ışığına ait y_{sl}/D_{ay} değerinin ise 0,30~0,70 aralığında değerler aldığı öngörülmüştür.
- Işıktan ayrılan taşıtların arasındaki en küçük takip aralığı değeri 1,5~2,5 saniye aralığında alınmıştır.
- Otoyol/çevreyolu katılımına gelen taşıtların takip aralıklarının Cowan M3 dağılımına uyduğu kabul edilmiş ve serbest taşıt oranı değerleri (4.25) nolu bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır.
- Yan yoldaki sürücülere ait ortalama kritik aralık kabulü değerinin 1,0~2,2 saniye ve yan yoldan giriş yapan sürücülerin takip aralıklarının 1,0~1,2 saniye aralığında değiştiği kabul edilmiştir.
- Yan yol kapasitesi 4.13 ve 4.14 bağıntıları kullanılarak hesaplanmıştır.
- Yukarıdaki kabuller hem Bunker ve Troutbeck yöntemi hem de Kingsman bağıntısı için geçerlidir.

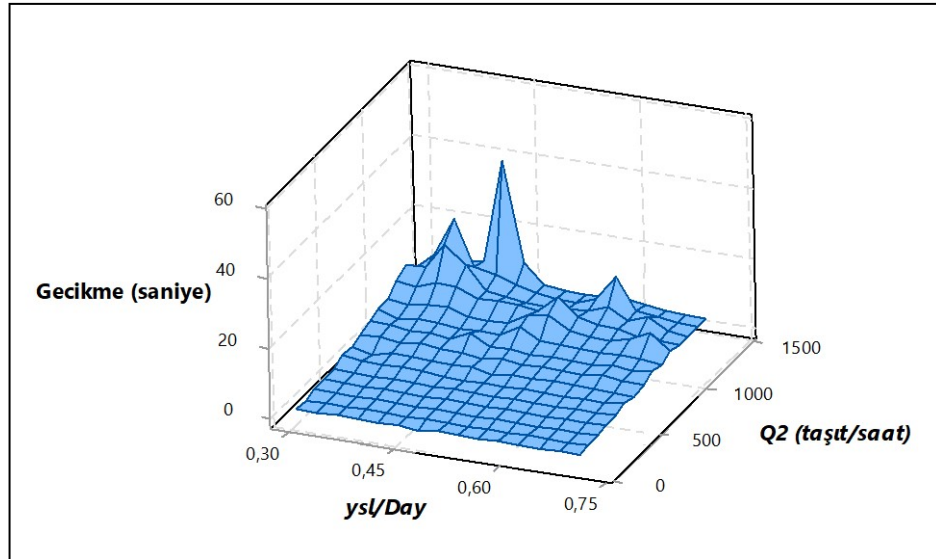
Yukarıdaki kabuller ışığında, Bunker ve Troutbeck tarafından önerilmiş olan 4.15 ve Kingsman tarafından önerilmiş olan 4.28 bağıntılarından hesaplanan gecikmelerin, yan yol akımına ait doygunluk derecesine bağlı değişimleri Şekil 4.18'de görülmektedir. Şekil incelendiğinde, düşük doygunluk derecelerinde iki bağıntının çok yakın sonuçlar verdiği; ancak doygunluk derecesinin 0,4~0,5 aralığına erişmesinden sonra Kingsman bağıntısının daha yüksek gecikme değerleri tanımladığı anlaşılmaktadır. Şekilden görülen bir önemli husus da her iki bağıntının da doygunluk derecesinin 1'e yaklaşmasında gecikmelerin sonsuza doğru arttığıdır.

Bu kuyruk kuramına bağılı gecikme bağıntılarında görülebilecek bir durumdur ve özellikle doyunluk derecesinin 1'i aştığı durumlar için yeni bazı yöntemlere (koordinat transformasyon yöntemi gibi) yaklaşımların irdelenmesi gerektiğini oryaya koymaktadır.



Şekil 4.18 Bunker ve Troutbeck bağıntısı ile Kingsman bağıntısının sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 4.19'da yan yoldan otoyola/çevreyoluna katılım talebi ile katılımdan önce bulunan trafik ışığına ait "yeşil süre/devre süresi" oranının etkisi görülmektedir.



Şekil 4.19 "yıl/Day" oranının gecikme üzerindeki etkisi

Beklenildiği gibi otoyola olan katılım talebi arttıkça, yan yolun gecikmesi de artmaktadır. Diğer yandan en büyük gecikmelerle " y_s/D_{ay} " oranının "0,45" olduğu durumda karşılaşılmaktadır. Yeşil sürenin payı arttıkça katılımdaki taşıtların gecikmeleri de önemli oranda düşmektedir.



BÖLÜM BEŞ

BENZETİM PROGRAMI İLE OTOYOL KATILIMLARINDAKİ GECİKMELERİN MODELLENMESİ

Benzetim programları, ulaşım ağının iyileştirilmesi, çevresel etki analizleri, maliyet hesapları ve güvenlik analizleri için sıklıkla ulaşım mühendisliği alanında kullanılırlar. Modellenmek istenen bölgenin ihtiyaçları, modellenecek sistem ve programın ne tür analizler yaptığı kullanılacak programın seçiminde önemli rol oynar. (Giuffrè ve diğer., 2016). Bu etkenler dikkate alınarak araştırma kapsamında AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks) trafik benzetim programı kullanılmıştır. Araştırmanın ilerleyen aşamalarında AIMSUN programından yararlanılarak kent içi arterle otoyol bağlantısı için modeller oluşturulacak ve benzetim modelleri geliştirilecektir.

5.1 AIMSUN Benzetim Programı

AIMSUN Transport Simulation Systems (TSS) tarafından geliştirilen seyahat talebi oluşturma, mezoskopik, mikroskobik ve makroskopik model oluşturma ile statik ve dinamik analizleri yapabilen bütünsel bir yazılım programıdır. Aynı zamanda programda tek bir yol şeridinden bütün bir bölgeye kadar modelleme yapılabilmektedir. AIMSUN'ın en çok kullanılma sebebi kullanım kolaylığı, zaman tasarrufu, tekrarlı çalışabilmesi ve maliyet analizidir (Yiğit, 2019). Bu çalışmada kullanılmasının nedeni ise arazide gözlemlenmesi zor, uzun ve pahalı olan trafik koşulları için benzetim yapabilmesi, tekrarlı olarak çalıştırılabilmesi ve çok sayıda senaryo oluşturulabilmesidir (Yiğit, 2019)

Kullanılan benzetim programı temelde tasarım, analiz ve sonuçlar olmak üzere üç adımda çalışmaktadır. Yiğit (2019), bu adımları aşağıdaki gibi sıralamıştır:

1. Adım

Bölgenin altlıkları yardımı ile tasarım yapılarak model oluşturulur. Yol kesiminin geometrik özellikler programa girilerek çizilir.

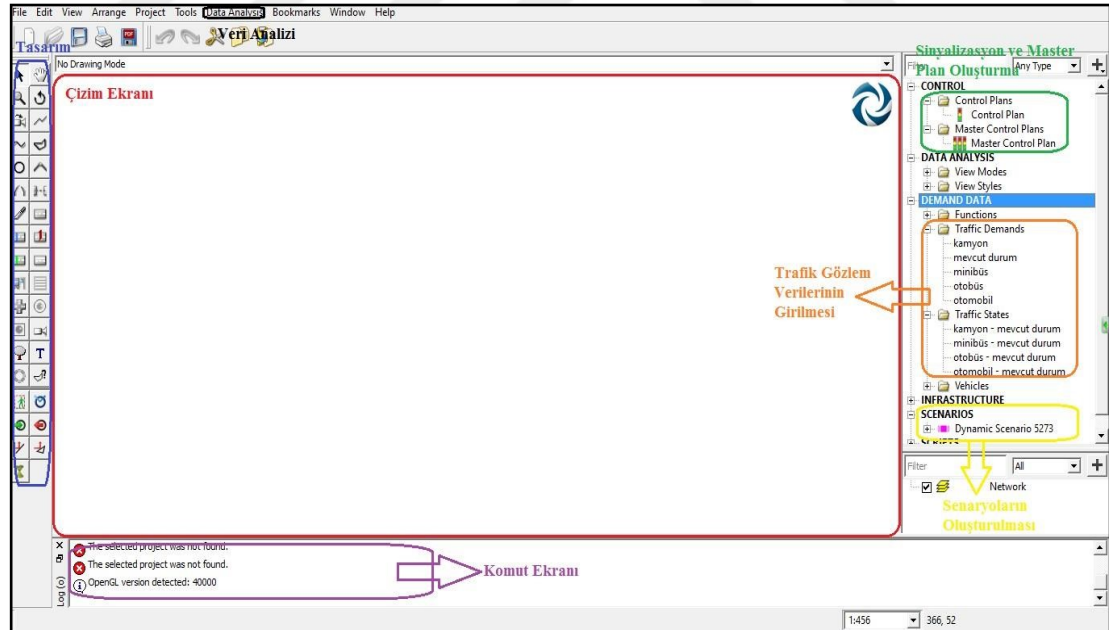
Modelde sinyalizasyon kavşak varsa sinyal kontrol planı oluşturulur. Eğer farklı saatler için farklı sinyalizasyon uygulaması yapılıyorsa ana planlar (master plan) oluşturulur. Bu şekilde birden fazla trafik sinyalinin aynı ya da farklı zamanlarda doğru bir şekilde çalışması sağlanır.

2. Adım

Bu adımda sahadan elde edilen gözlem verileri uygun bir şekilde istenilen koşullara göre tasarımı yapılan modele girilmektedir.

3. Adım

Değerlendirilmek istenen koşullara göre model için senaryolar oluşturulmaktadır. Oluşturulan senaryolar istenilen tekrar sayısı kadar çalıştırılabilmektedir. Çalıştırılan senaryolardan elde edilen sonuçlar; grafik, tablo ve model üzerinde renklere göre gösterim gibi çeşitli şekillerde model çıktıları olarak alınabilmektedir. Şekil 5.1 AIMSUN örnek proje ekranını göstermektedir.



Şekil 5.1 AIMSUN programında örnek proje ekranı (Yiğit, 2019)

Benzetim modeli oluşturulurken program üç temel çalışma prensibi ortaya koymaktadır. Bunlar; yazılımın hata kontrolü, kalibrasyon ve validasyon işlemleridir (Yiğit, 2019). Bu adımlar Tablo 5.1’de ana hatlarıyla gösterilmiştir.

Tablo 5.1 AIMSUN modeli uygulama süreci (Yiğit, 2019)

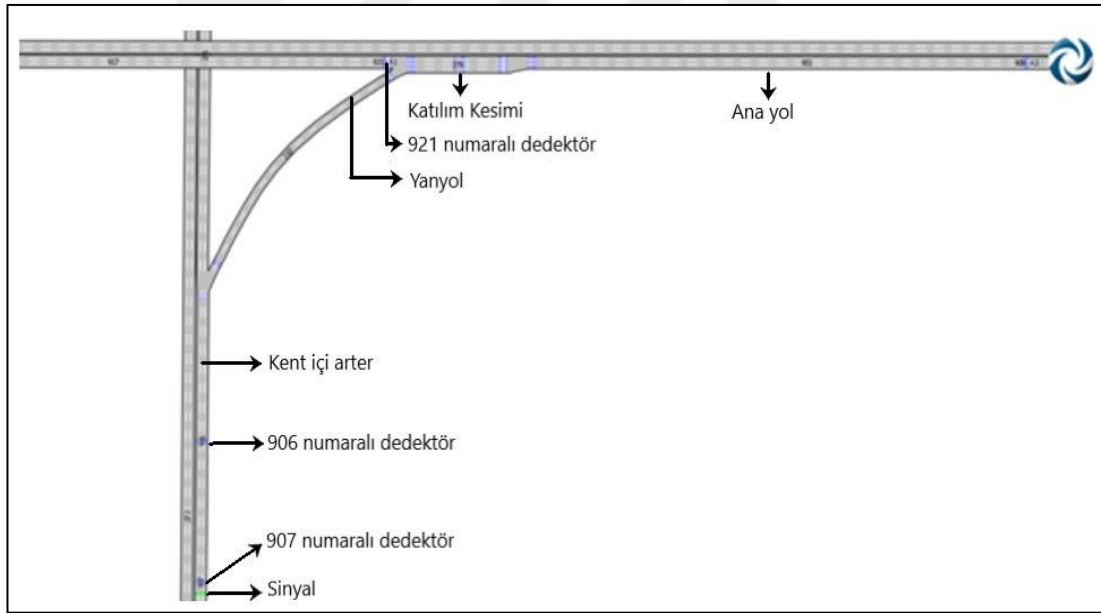
Veri Girişi
Modelin Geliştirilmesi
Yazılımın Hata Kontrolü
Kalibrasyon
Model Parametrelerinin Düzeltilmesi
Validasyon
Senaryoların Oluşturulması
Benzetim Çıktılarının Elde Edilmesi

Karayolu performansı değerlendirme, ulaşım planlaması, akıllı ulaşım sistemlerinin projelendirilmesi gibi konularda başarılı olan benzetim programları popüler ve kolay kullanılabilir olmalarına rağmen; programların güvenilirliği, varsayılan parametrelerin doğru kullanımı ve sonuçların dikkatli yorumlanması çok önemlidir (Yiğit, 2019). Fakat, uygun olmayan model parametreleri, benzetim modellerinin saha koşullarını doğru bir şekilde yansıtmamasını ve araştırmacının karar verme kriterlerini etkilemektedir (Yiğit, 2019). Bu nedenle; kullanıcı, model ve model çıktılarının gerçeği daha iyi yansıtmaları için modeldeki parametreleri kalibre ederek kullanılan modelin hassasiyetinin ayarlanmasına dikkat etmelidir (Yiğit, 2019).

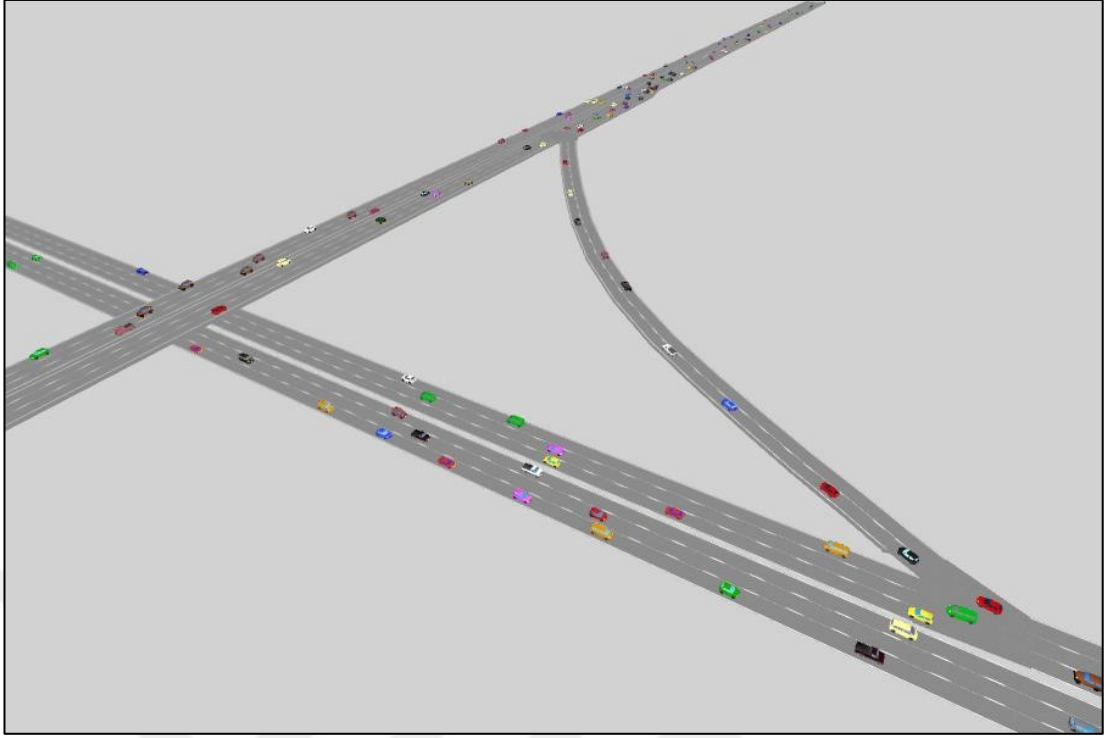
5.2 AIMSUN Programında Modelin Oluşturulması

Araştırma kapsamında kent içi arter, otoyol bağlantısı ve otoyoldan oluşan bir model kurulmuştur. Kent içi arter üzerinde yer alan sinyalden ayrılan taşıtların bir kısmının anayola katıldığı varsayılmıştır. Sinyal ile yan yol arasındaki mesafe diğer geometrik parametreler gibi senaryolara göre değişmektedir. Bölüm 5.4'te tanımlanan senaryolar için farklı geometrik parametreler ile tasarım yapılmış; yapılan tasarım üzerine trafik gözlem verileri yönlere ve otoyola katılım oranına göre programa girilmiştir.

Taşıtların davranışlarının daha iyi incelenebilmesi için modele çok sayıda dedektör yerleştirilmiştir. Bunlardan ilki sinyalden 10 metre sonrasında (907 numaralı dedektör), sinyal ile yan yol orta noktasında (906 numaralı dedektör), yan yoldan hemen önce, yan yolun başlangıç ve bitişinde yer almaktadır. Anayolda ise katılım kesiminin etkisinin bittiği varsayılan katılım noktasının 450 m gerisinde ve ilerisinde, katılım noktasından hemen önce (921 numaralı dedektör) ve hemen sonrasında yer almaktadır. Katılım kesiminin de başlangıç, orta nokta ve bitiminde dedektörler yerleştirilmiştir. Bunların dışında şerit değiştirme davranışının gözlenebilmesi için özellikle katılım kesiminde, öncesinde ve sonrasında birçok tek şeritlik dedektör yerleştirilmiştir. Şekil de görülen 906, 907 ve 921 numaralı dedektörler daha sonra modelin tutarlılığı için gerekli olan gözlem verileri ile kalibrasyon için de kullanılmıştır. AIMSUN programında oluşturulan modelin 2 boyutlu görseli Şekil 5.2’de, 3 boyutlu görseli Şekil 5.3’te verilmiştir



Şekil 5.2 AIMSUN modelin 2 boyutlu görüntüsü



Şekil 5.3 AIMSUN modelin 3 boyutlu görüntüsü

5.3 Modelinin Kalibrasyonu

Modelin tutarlılığını kontrol etmek için ilk adım olarak mikro-benzetim modelinin sonuçları yazılımın hata kontrol aracı tarafından doğrulanmıştır. İkinci adım olarak, bir saatlik gözlem verileri ile mikro-benzetim sonuçlarının karşılaştırmasının yapılması kalibrasyon ve validasyon işlemleri içerisinde yapılmıştır.

Kalibrasyon işlemi model parametrelerini değiştirerek model çıktılarını, gözlemlenen yerel trafiği ve sürücü davranışını yansıtacak şekilde elde edip bunu bir dizi gerçek veri ile karşılaştırma işlemidir (Yiğit, 2019). Bu işlem için üç gözlem noktasından elde edilen veriler ile program sonuçları karşılaştırılarak her bir nokta için de oluşturulan modellerin tutarlılığı değerlendirilmiştir.

5.3.1 Gözlem Noktaları

Çalışma kapsamında model kalibrasyonu için İzmir ilinden üç nokta seçilmiştir (Şekil 5.4). Bu üç noktadan iki tanesi Buca ilçesinde kent içi arterlerden biri olan

Doğuş Caddesi ile İzmir Çevre Yolu bağlantısı üzerinde seçilmiştir. Üçüncü nokta ise, kent içi ana arterlerden biri olan Mürselpaşa Bulvarı üzerinde seçilmiştir.



Şekil 5.4 Gözlem noktaları (Google Earth, 2019)

Gözlem için belirlenen Tınaztepe Kavşağı ve Tınaztepe Bağlantı noktasının yer aldığı Doğuş Caddesi 3,6 m şerit genişliğine sahip 3 şeritli bir ana arterdir ve Buca ilçesi kent merkezi ile İzmir Çevre Yolunu birbirine bağlamaktadır (Şekil 5.5). Doğuş Caddesi üzerinde yer alan Tınaztepe kavşağı ise Dokuz Eylül Üniversitesi Kaynaklar Yerleşkesinin artere bağlantısını sağlamaktadır (Şekil 5.6). Devre süresinin 100 saniye olduğu kavşakta, çevre yolu yönünde yeşil süresi 75 saniyedir.

Üçüncü gözlem noktası olan Mürselpaşa Bulvarı ise, Konak ilçesinde yer alan D300 karayolunun bir parçasıdır (Şekil 5.7). 3,6 m şerit genişliğine sahip 3 şeritli bir karayolu olan bulvar, Kuzey doğusunda Altınyol ve Şehitler Caddesi ile bağlanırken, güney batısında Yeşildere Caddesi ile bağlanmaktadır.



Şekil 5.5.Tınaztepe bağlantı (Google Earth, 2019)



Şekil 5.6 Tınaztepe kavşağı (Google Earth, 2019)



Şekil 5.7 Mürselpaşa Bulvarı (Google Earth, 2019)

Tınaztepe Kavşağındaki ve Tınaztepe Bağlantısındaki trafik akımı 20 Mart 2019 Çarşamba günü, sabah 08.30- 09.30 saatleri arasında İZUM uygulamasının kameraları ile video olarak kaydedilmiştir. Mürselpaşa Bulvarında ise 2008 yılında hafta içi 08.30 ve 09.30 arası sabah zirve saatinde video kameralar ile kayıt yapılmıştır. Bu videolar daha sonra ofis ortamında incelenmiş; zaman cinsinden takip aralığı, dakikalık hacim, dakikalık hız, taşıt kompozisyonu ve sinyal fazı verileri elde edilmiştir.

Veri toplanan üç noktanın şeritlere göre hacimleri, ortalama takip aralıkları ve ortalama hızları standart sapmaları ile Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2 Üç Gözlem noktasındaki şeritlerin hacim değerleri, ortalama zaman cinsinden takip aralığı, ortalama hız ve standart sapmaları

Gözlem Noktası	Şerit	Hacim (tst/sa/şrt)	Ortalama Zaman Cinsinden Takip Aralığı (sn)	Standart Sapma	Ortalama Hız (km/sa)	Standart Sapma
Tınaztepe Bağlantı	Sağ	308	11,06	10,75	34,66	8,68
	Orta	901	4,33	4,64	53,73	13,84
	Sol	1236	2,85	3,76	54,92	11,22
Tınaztepe Kavşağı	Sağ	342	10,47	12,49	21,75	7,96
	Orta	871	4,11	5,18	27,70	8,94
	Sol	405	8,72	11,32	39,36	16,93
Mürselpaşa Bulvarı	Sağ	830	4,30	3,46	65,83	11,76
	Orta	1443	2,50	1,72	68,21	12,41
	Sol	1963	1,82	1,29	61,89	13,58

Tabloya göre en düşük ortalama hızlar Tınaztepe kavşağında gözlenirken en yüksek ortalama hızlar Mürselpaşa Bulvarı'nda gözlenmiştir. Saatlik hacimlerin en yüksek Mürselpaşa Bulvarı'nda olduğu, aynı zamanda tüm gözlem noktalarının sağ şeridinde zaman cinsinden takip aralıklarının diğer şeritlere kıyasla daha yüksek olduğu ve standart sapmasının da büyük olduğu görülmektedir.

5.3.2 Kalibrasyon ve Validasyon İşlemleri

Benzetim programında modelin kalibrasyonu, model çıktılarının doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamak için en önemli adımlardan birisidir (Yiğit, 2019). Bir trafik benzetim programında modelin kalibrasyonu, bazı model parametrelerinin değiştirilmesi ve düzeltilmesi ile devam eden bir süreçtir (Chaudhry ve Ranjitkar, 2009; Giuffrê ve diğerleri, 2016). Kalibrasyonun amacı modelin gerçekteki yerel sürücü davranışını ve trafik performans özelliklerini yansıtacak şekilde model parametrelerinin ayarlanmasıdır. Yani amaç, en iyi yerel trafik koşullarını üreten model için parametre değerlerini bulmaktır (Yiğit, 2019).

Tüm olası trafik değişkenlerini içeren bir model bile gerçek dünyadaki trafik koşullarının bir kısmını içerebilir. Tek bir model değişkenlerin tamamını içermeyeceğinden her model yerel koşullara, araştırmaya ve veri grubuna göre ayarlanmalıdır. Bu nedenle kalibrasyon adımı oldukça gereklidir (Yiğit, 2019). Genellikle trafik benzetim programları modeli yerel koşullara göre kalibre etmek için kullanıcı tarafından ayarlanabilir parametrelerle birlikte gelir. Bu sayede program üç gözlem noktasından elde edilen veriler ile kalibre edilmiştir.

Kalibrasyon adımının yanında validasyon işlemi de oldukça önemlidir. Validasyon, araştırmacının karayolu ağı için öngördüğü model ile mevcut koşullar arasındaki farkı azaltmaya çalıştığı süreç olarak tanımlanmaktadır (Yiğit, 2019). Diğer bir deyişle, validasyon model kalibrasyonu sonucunun geçerli olup olmadığını belirleme işlemidir. Bu nedenle, kalibrasyon ve validasyon işlemleri birbiriyle oldukça bağlantılı ve modelin duyarlılığı için birlikte daha iyi sonuç vermektedir.

Kalibrasyon ve validasyon için önerilen parametreler araştırmalarda sıklıkla kullanılabilen istatistiki parametrelerdir. Bu araştırmada bu iki işlem için Geoffrey E. Havers (GEH) ve Root Mean Square Error (RMSE) parametreleri kullanılmıştır.

GEH parametresi, trafik mühendisliğinde tahmin ve modellemede iki ayrı trafik veri grubunu karşılaştırmak için kullanılmaktadır. GEH formülü, adını 1970'lerde Londra İngiltere'de ulaşım planlaması üzerine çalışmış Geoffrey E. Havers'dan almaktadır. Matematiksel formu ki-kare testine benzese de gerçek bir istatistiksel test değildir (Yiğit, 2019). Çeşitli trafik analizleri için kullanılan ve yararlı olduğu kanıtlanmış ampirik formüldür. GEH parametresi iki veri setini karşılaştırmak için basit yüzdelerde kullanıldığında ortaya çıkan hataları önlemektedir. Bunun nedeni; ulaşım sistemlerinde trafik hacimlerinin geniş bir aralıkta değişmesidir. Örneğin bir otoyol hattı ile herhangi bir şehir içi karayolu kesiminin taşıdığı hacimler birbirinden farklıdır. GEH parametresi bu problemi azaltmaktadır. GEH değeri doğrusal olmadığı için GEH değerine dayanan kabul eşiği, oldukça geniş trafik hacim aralığında kullanılabilmektedir (Yiğit, 2019).

GEH, bahsedildiği gibi trafik mühendisliğinde iki veri grubunu karşılaştırmak kullanılan bir değerdir. Economic Evaluation Manual (EEM-I) ve birçok araştırmacı ulaşım modeli validasyonu için GEH kavramını sunmaktadır. GEH değeri de bir modelin kabulü veya reddi için ölçüt olarak kullanılmaktadır. Her simülasyon değerinin, her gözlem ölçümüne göre 5'ten küçük olması modelin güçlü olduğunu kanıtlamaktadır. Denklem 5.1'de GEH değerini hesaplamak için kullanılan ampirik formül yer almaktadır. Formülde yer alan Q_{model} ve $Q_{gözlem}$ değerleri model ve gözlem verilerine ait hacim değerleridir. GEH değeri birimsiz kabul edilmesine rağmen kullanılan Q hacim değerleri araç/saat olduğu için GEH için de (araç/saat)^{0,5} olarak kabul edilebilir (Feldman, 2012).

$$GEH = \sqrt{\frac{2*(Q_{model}-Q_{gözlem})^2}{(Q_{model}+Q_{gözlem})}} \quad (5.1)$$

Değerin kabul şartları aşağıdaki gibidir;

0-5	İyi bir model oluşturulmuştur.
5-10	Daha fazla araştırma gerektirmektedir.
> 10	Model kabul edilemez.

Kalibrasyon ve validasyon işlemleri için önerilen bir diğer kriter de EEM-I'de belirtilen yüzde olarak hesaplanan RMSE değeridir. Hesaplanan ya da tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki farkların standart sapmasını hesaplayarak RMSE değeri elde edilmektedir. Diğer bir deyişle, hesaplanan değerler ile gerçek değerler arasındaki farkların karelerinin ortalamasının kareköküdür (Chaudhry ve Ranjitkar, 2009). EEM-I kriterlerine göre RMSE %30'dan daha az olmalıdır.

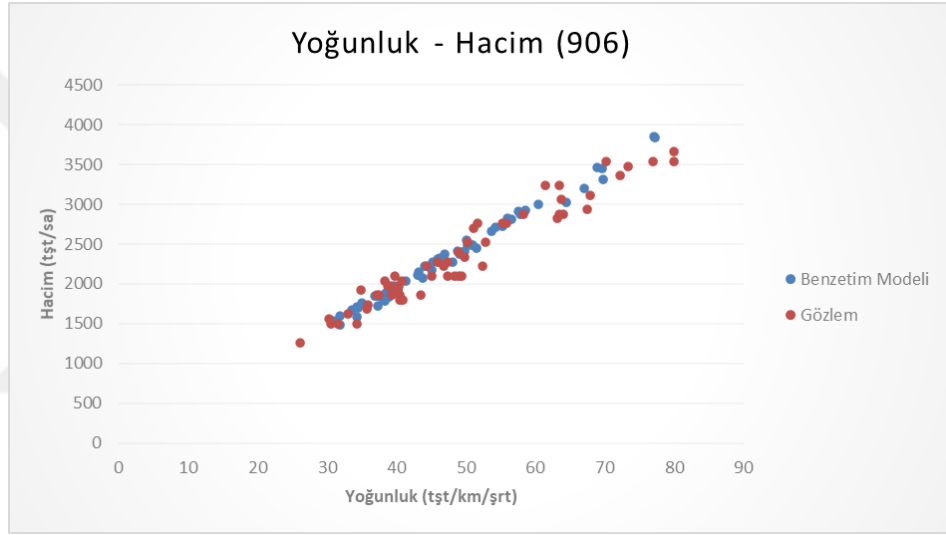
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Q_{model}-Q_{Gözlem})^2}{sayımlar-1}} \quad (5.2)$$

Gözlem sonuçlarından elde edilen veriler ile benzetim sonuçları karşılaştırılarak modelin tutarlılığı kalibrasyon ve validasyon işlemleri ile değerlendirilmiştir. Model

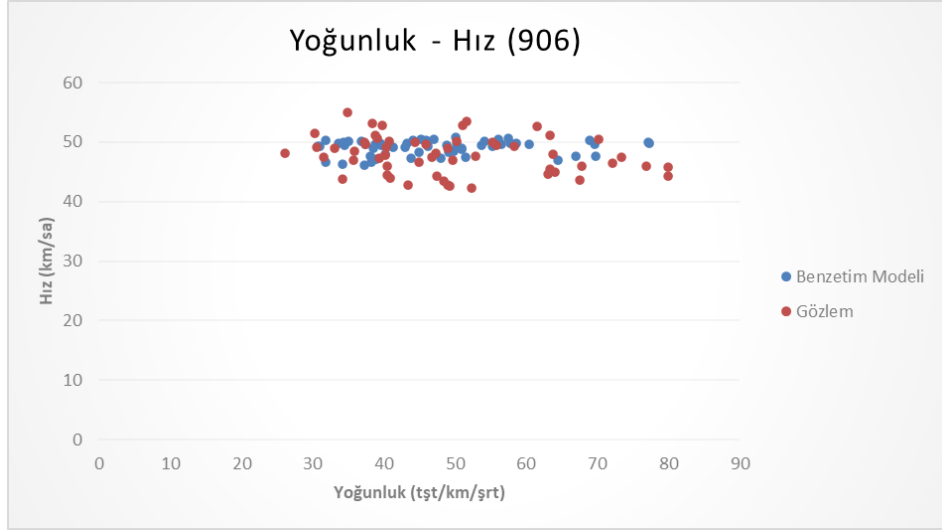
değerleri ile gözlemlenen hacim değerleri kullanılarak Denklem 5.1 ve 5.2 yardımıyla hata yüzdeleri GEH ve RMSE değerleri hesaplanmıştır.

5.3.3 Gözlem Verilerinin AIMSUN Modeli Kalibrasyon ve Validasyon İşlemlerine ait Sonuçları

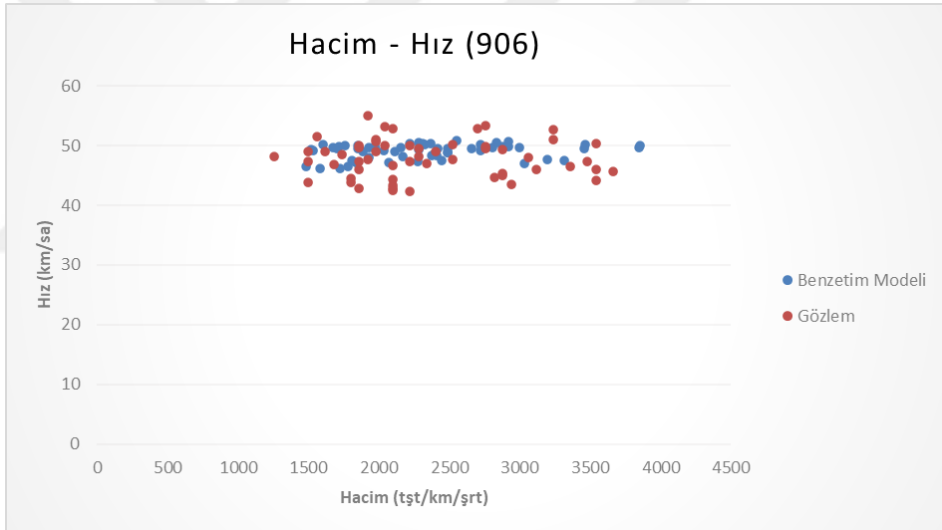
Gözlem yapılan üç noktadan elde edilen veriler ile kurulan modelin kalibrasyon ve validasyon işlemleri yapılmıştır. Öncelikle modelin gerçeği yansıtabilmesi için kalibrasyon işlemi uygulanmıştır. Model hacim değerlerine göre kalibre edilmiştir.



Şekil 5.8 906 numaralı dedektörden elde edilen yoğunluk ve hacim verilerinin gözlem verileri ile karşılaştırılması

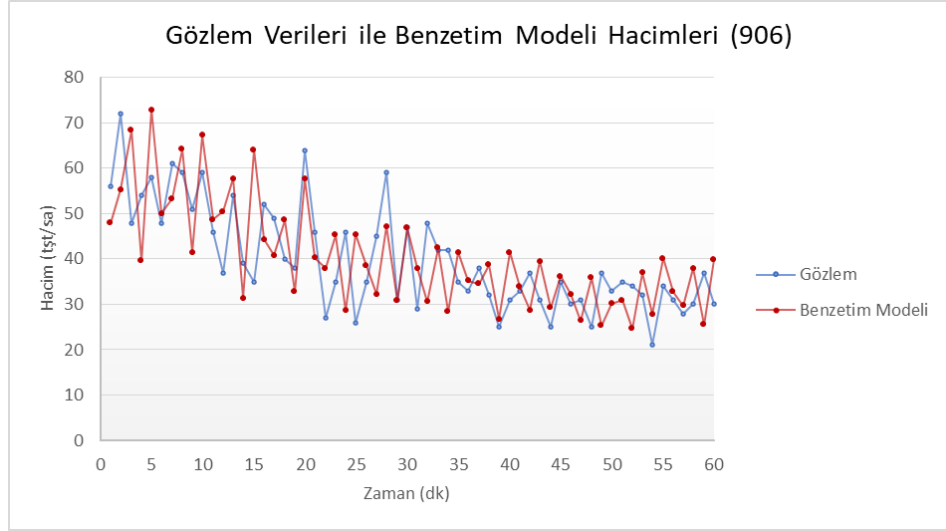


Şekil 5.9 906 numaralı dedektörden elde edilen yoğunluk ve hız verilerinin gözlem verileri ile karşılaştırılması

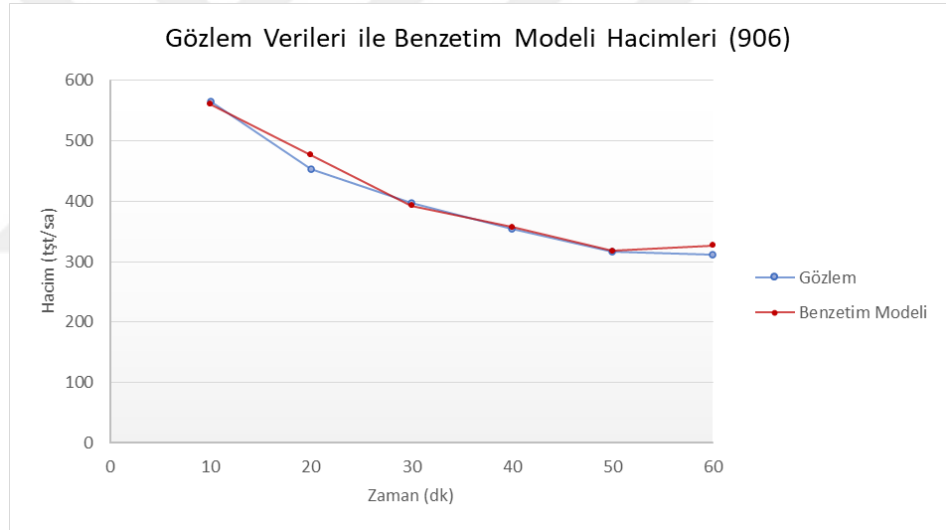


Şekil 5.10 906 numaralı dedektörden elde edilen hacim ve hız verilerinin gözlem verileri ile karşılaştırılması

Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10 Tınaztepe bağlantı verileri ile kalibre edilmiş 906 numaralı dedektörden elde edilen veriler ile gözlem verilerini karşılaştırmaktadır. Model ve gözlemlerin birbiri ile uyumlu oldukları görülmektedir.

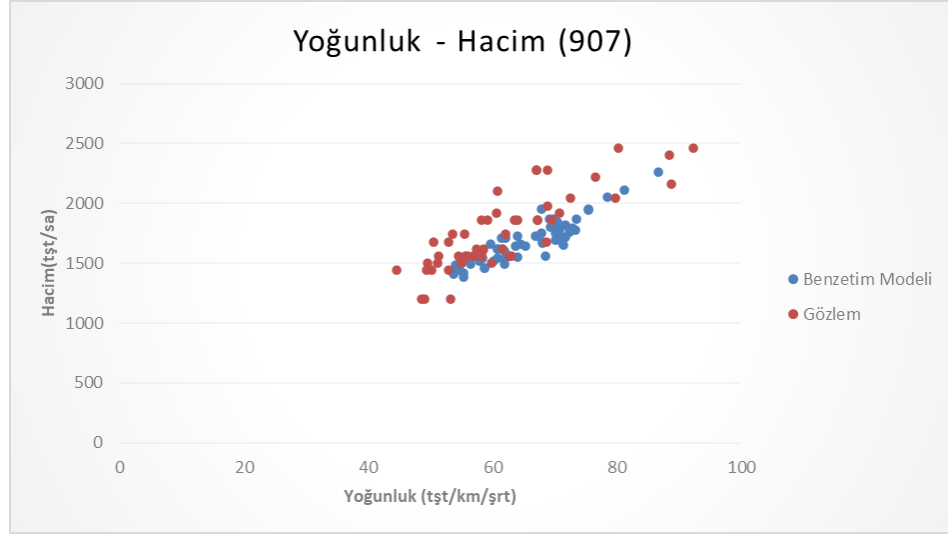


Şekil 5.11 906 numaralı dedektörden elde edilen hacim verilerinin dakikalık olarak gözlem verileri ile karşılaştırılması

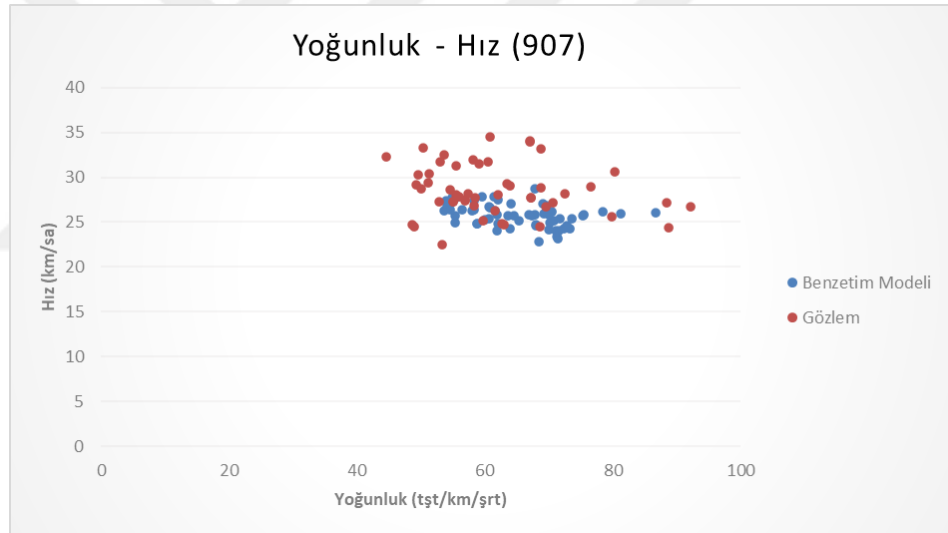


Şekil 5.12 906 numaralı dedektörden elde edilen hacim verilerinin 10'ar dakikalık ortalamalarının gözlem verileri ile karşılaştırılması

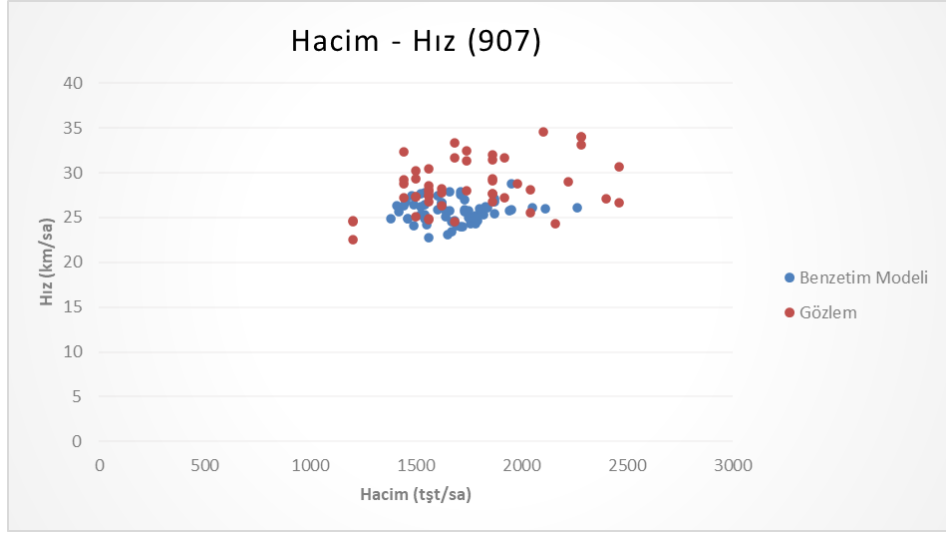
Şekil 5.11 ve Şekil 5.12 906 numaralı dedektörden elde edilen hacim verilerinin dakikalık ve 10'ar dakikalık ortalamalarının gözlem verileri ile karşılaştırılmasını göstermektedir. Şekillerden benzetim modeli ile gözlem verilerinin benzer eğilimler gösterdiği görülmektedir.



Şekil 5.13 907 numaralı dedektörden elde edilen yoğunluk ve hacim verilerinin gözlem verileri ile karşılaştırılması

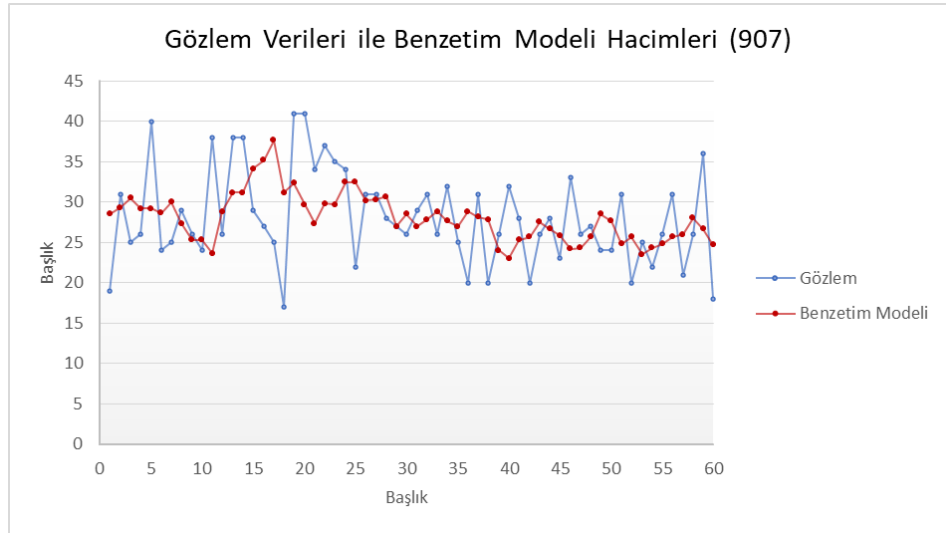


Şekil 5.14 907 numaralı dedektörden elde edilen yoğunluk ve hız verilerinin gözlem verileri ile karşılaştırılması

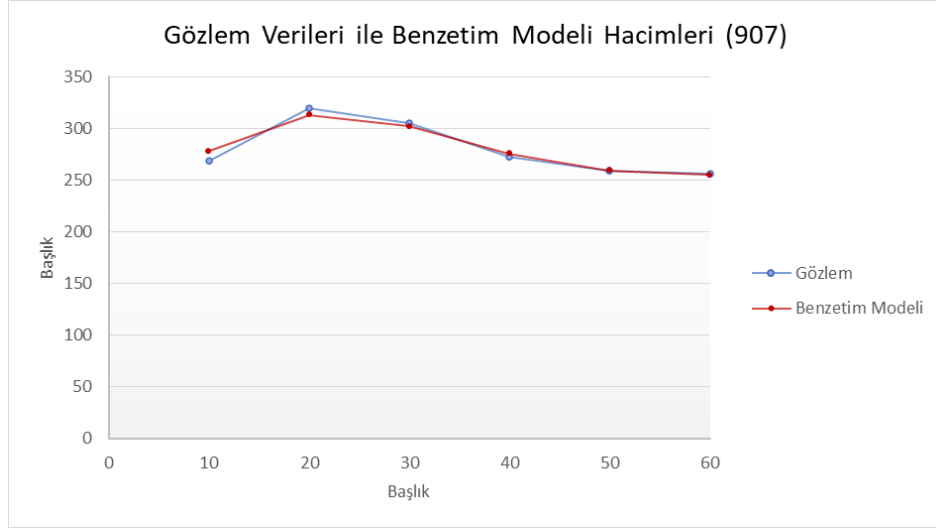


Şekil 5.15 907 numaralı dedektörden elde edilen hacim ve hız verilerinin gözlem verileri ile karşılaştırılması

Tınaztepe kavşağından elde edilen veriler ile kalibre edilen modelde 907 numaralı dedektörden elde edilen verilerin gözlem verileri ile karşılaştırılması Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'te verilmiştir. Grafiklere göre model ile gözlem birbirine uyumludur.

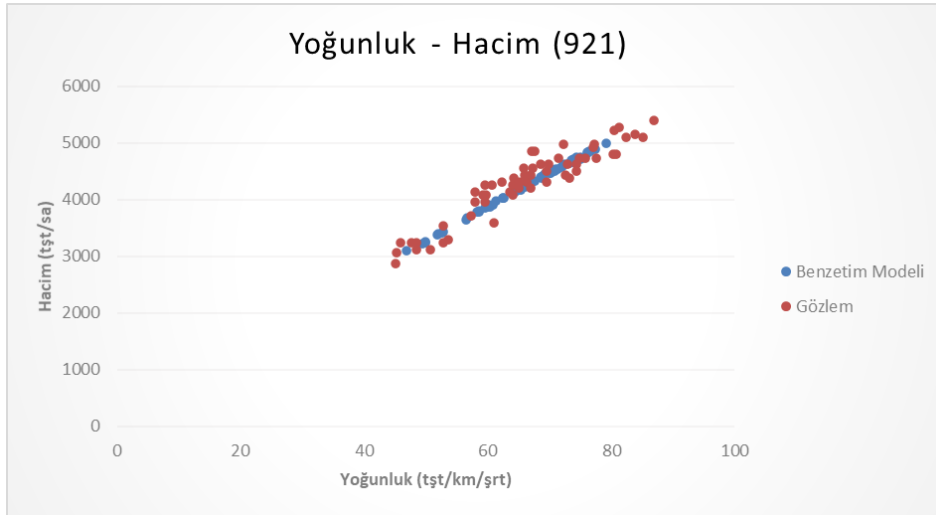


Şekil 5.16 907 numaralı dedektörden elde edilen hacim verilerinin dakikalık olarak gözlem verileri ile karşılaştırılması

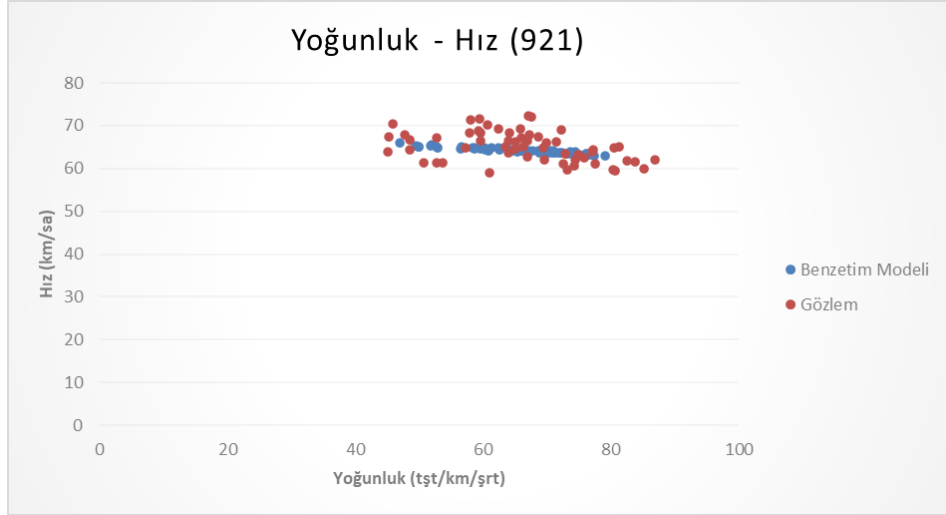


Şekil 5.17 907 numaralı dedektörden elde edilen hacim verilerinin 10'ar dakikalık ortalamalarının gözlem verileri ile karşılaştırılması

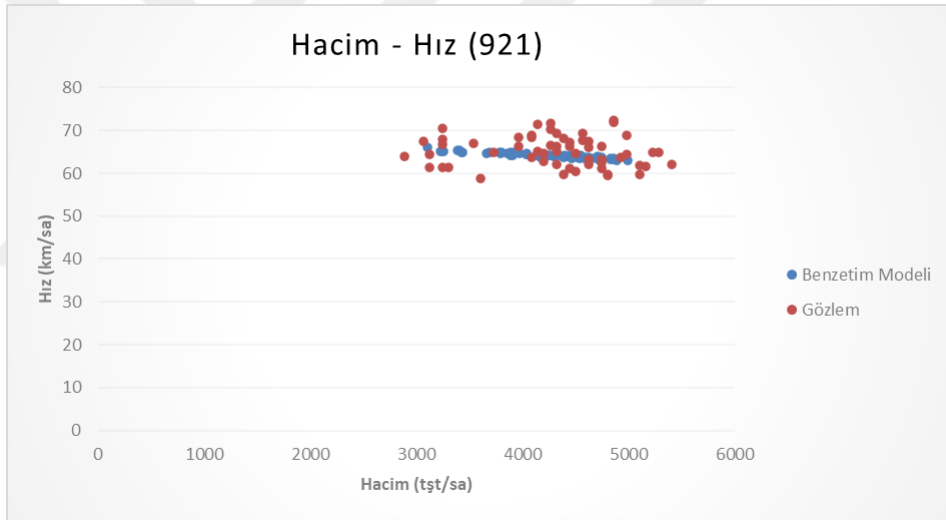
Şekil 5.16 ve Şekil 5.17 907 numaralı dedektörden elde edilen hacim verilerinin dakikalık ve 10'ar dakikalık ortalamalarının gözlem verileri ile karşılaştırılmasını göstermektedir. Şekillerden benzetim modeli ile gözlem verilerinin benzer eğilimler gösterdiği görülmektedir.



Şekil 5.18 921 numaralı dedektörden elde edilen yoğunluk ve hacim verilerinin gözlem verileri ile karşılaştırılması

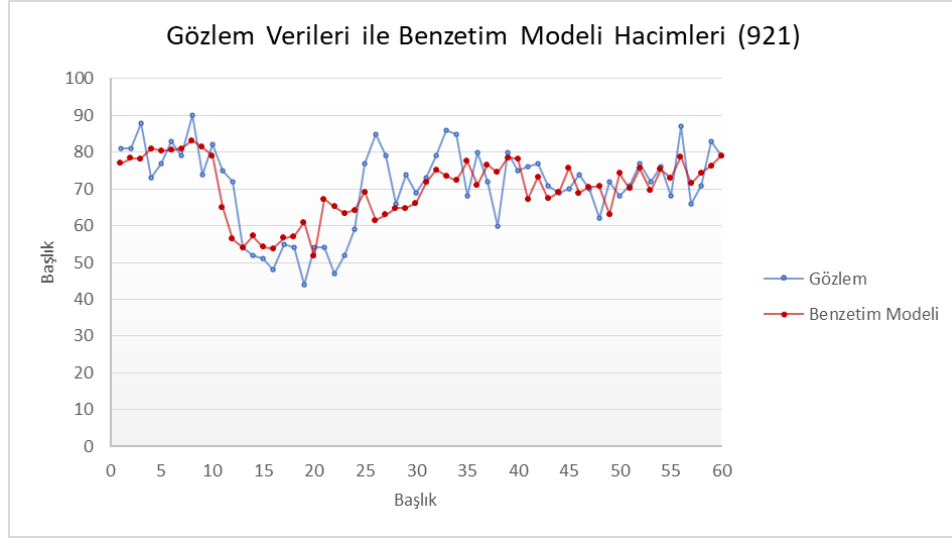


şekil 5.19 921 numaralı dedektörden elde edilen yoğunluk ve hız verilerinin gözlem verileri ile karşılaştırılması

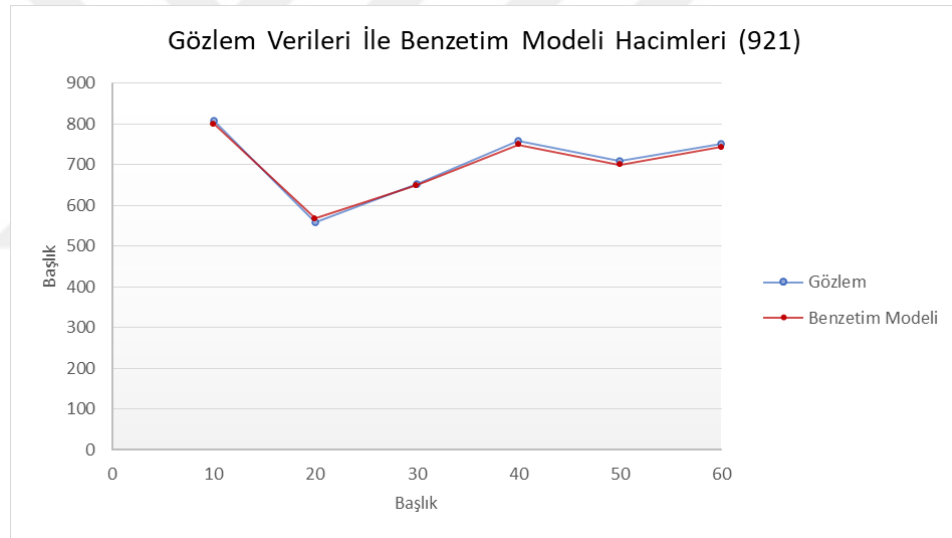


şekil 5.20 921 numaralı dedektörden elde edilen hacim ve hız verilerinin gözlem verileri ile karşılaştırılması

şekil 5.18, şekil 5.19 ve şekil 5.20 Mürselpaşa Bulvarı'ndan elde edilen gözlem verileri ile 921 numaralı dedektörden elde edilen verilerin karşılaştırılmasını göstermektedir. Model ile gözlem sonuçlarının birbirlerine oldukça yakın değerler verdiği görölmektedir.



Şekil 5.21 921 numaralı dedektörden elde edilen hacim verilerinin dakikalık olarak gözlem verileri ile karşılaştırılması

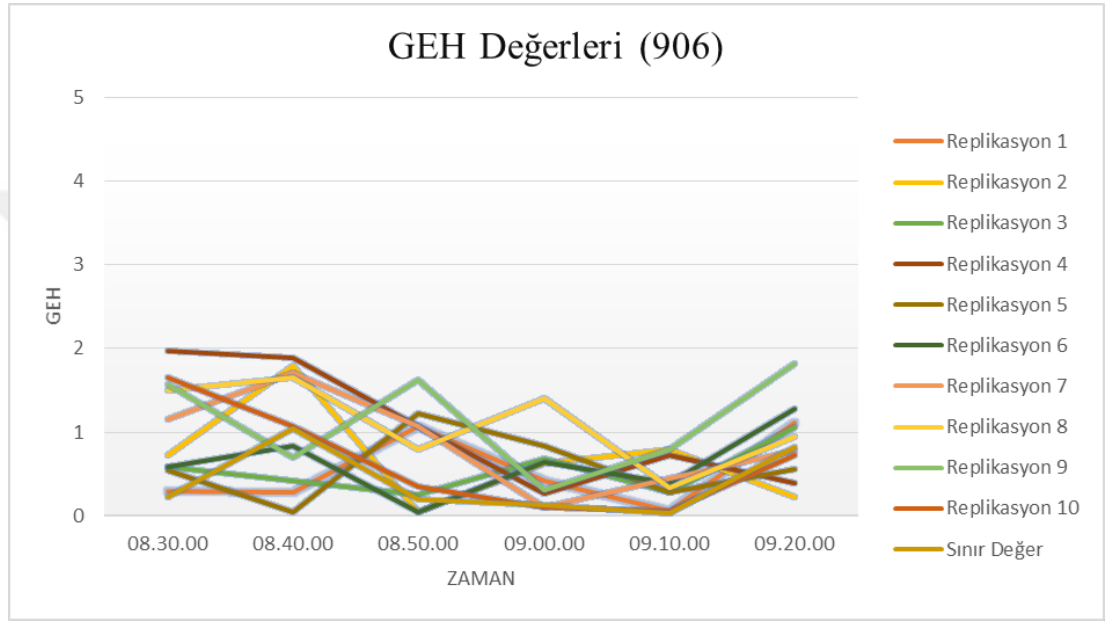


Şekil 5.22 921 numaralı dedektörden elde edilen hacim verilerinin 10'ar dakikalık ortalamalarının gözlem verileri ile karşılaştırılması

Şekil 5.21 ve Şekil 5.22 907 numaralı dedektörden elde edilen hacim verilerinin dakikalık ve 10'ar dakikalık ortalamalarının gözlem verileri ile karşılaştırılmasını göstermektedir. Şekillerden benzetim modeli ile gözlem verilerinin benzer eğilimler gösterdiği görülmektedir. Dakikalık hacim verilerinin karşılaştırıldığı grafiklerde gözlem verilerinde sapmalar daha fazla iken benzetim modelinin 10 replikasyonun ortalamasını alması sebebiyle değerlerin daha az sapma gösterdiği görülmektedir. Her üç kalibrasyon sonucuna göre dedektörlerden elde edilen hız, hacim ve yoğunluk

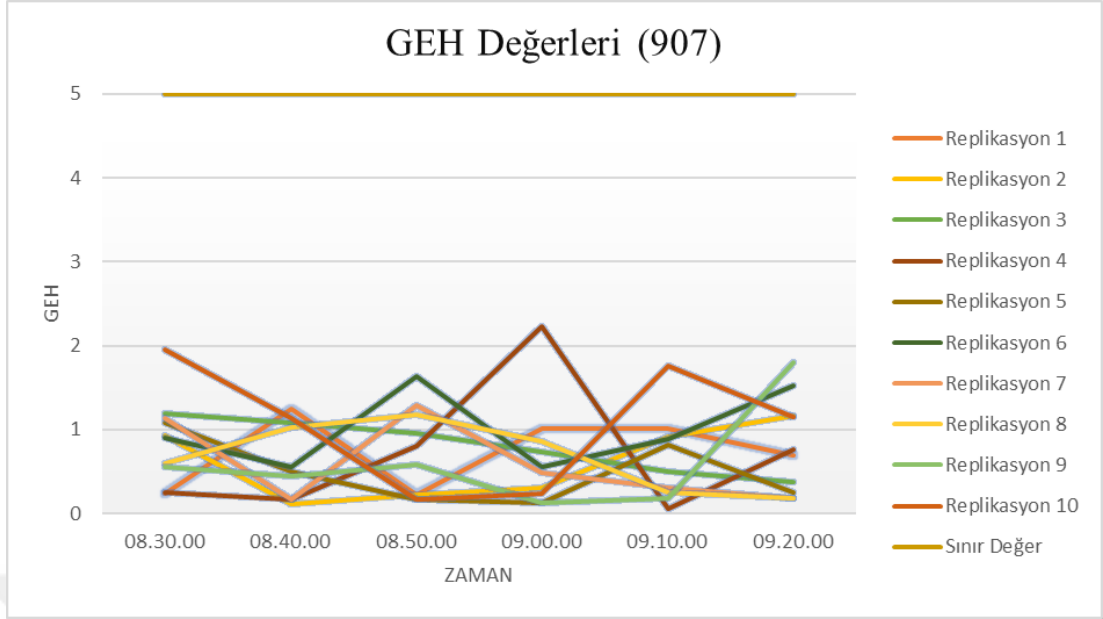
verilerinin gözlemlenen değerler ile karşılaştırıldığında kurulan modelin gözlem verileri ile uyumlu olduğu söylenebilir.

Kalibrasyon işlemleri işlemi tamamlandıktan sonra modelin tutarlılığını doğrulamak için validasyon işlemi yapılmıştır. Validasyon için Denklem 5.1 ve Denklem 5.2 yardımı ile GEH ve RMSE değerleri hesaplanmıştır.



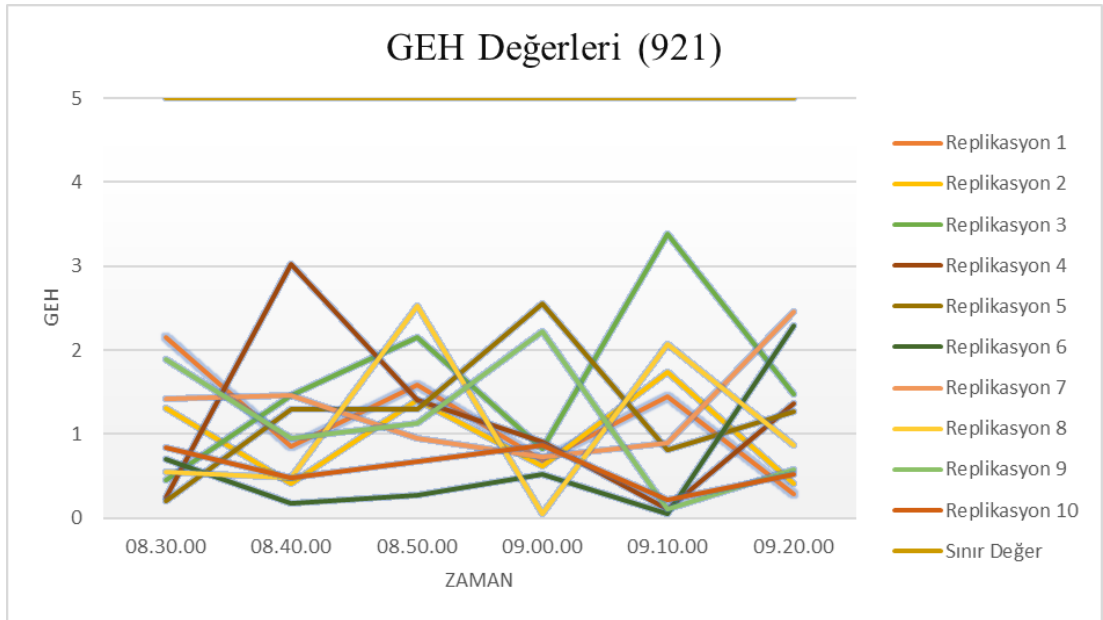
Şekil 5.23 906 numaralı dedektöre ait GEH değerleri

Şekil 5.23'te 906 numaralı dedektörün simülasyon tekrar sayısına göre GEH değerlerini göstermektedir. Denklem 5.1'e göre hesaplanan GEH değerlerinin en yüksek 4. replikasyonda yer alan 1,97 ile 5 sınır değerinden küçük olduğu görülmektedir.



Şekil 5.24 907 numaralı dedektöre ait GEH değerleri

Şekil 5.24 907 numaralı dedektörden elde edilen verilere göre hesaplanan GEH değerlerini göstermektedir. Grafikte, GEH değerlerinin en yüksek 4. replikasyonda 2,22 ile sınır koşulları sağladığı görülmektedir.



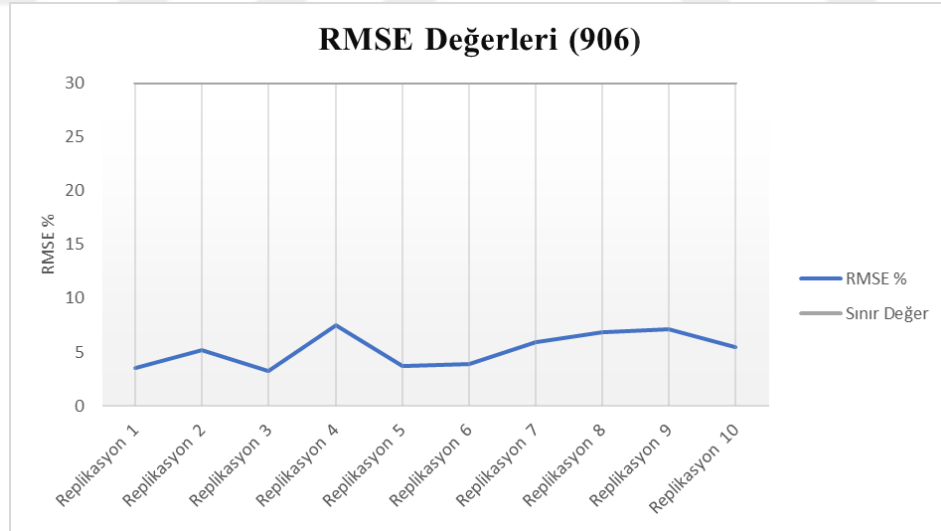
Şekil 5.25 numaralı dedektöre ait GEH değerleri

Şekil 5.25 921 numaralı detektöre ait GEH değerlerini göstermektedir. En yüksek GEH değerinin 3. replikasyonda yer alan 3,38 olduğu grafikte, tüm değerler sınır koşulları sağlamaktadır.

Tablo 5.3 906, 907 ve 921 numaralı dedektörlerden elde edilen GEH değerleri

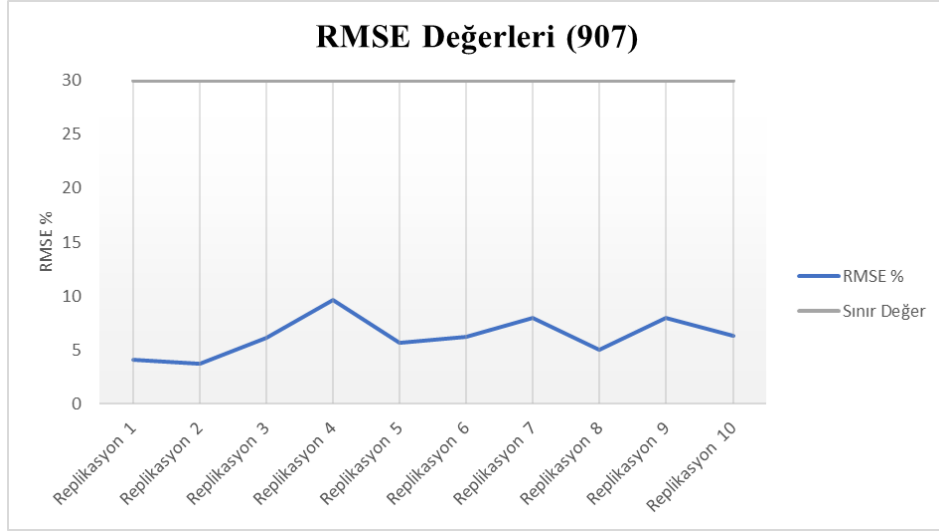
	906	907	921
08.30.00	0,23	0,86	0,40
08.40.00	1,04	0,28	0,48
08.50.00	0,20	0,37	0,16
09.00.00	0,13	0,11	0,44
09.10.00	0,30	0,14	0,47
09.20.00	0,81	0,11	0,33

Tablo 5.3 906, 907 ve 921 numaralı detektörlerden 10 replikasyondan elde edilen 10'ar dakikalık hacimlerin ortalamasına göre hesaplanan GEH değerlerini göstermektedir. Tüm değerler sınır değer olan 5'in altındadır.



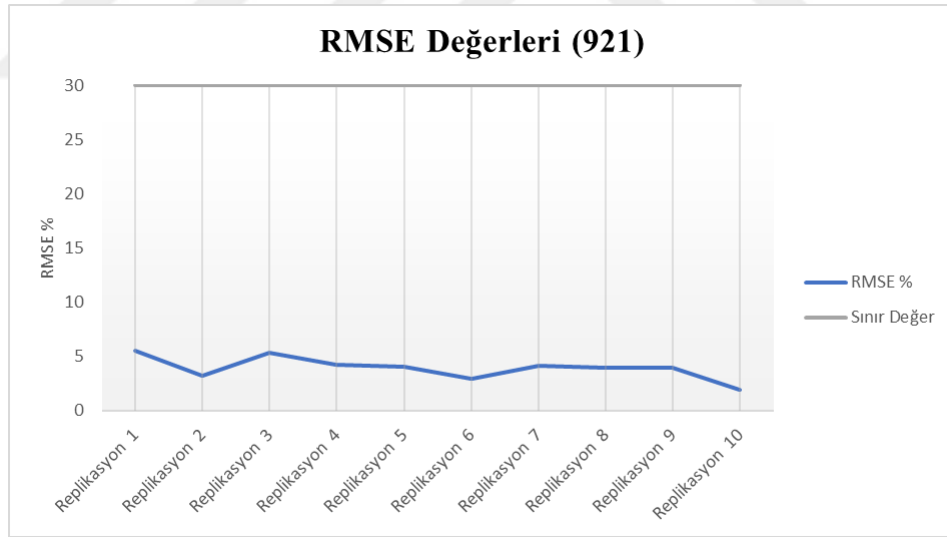
Şekil 5.26 906 numaralı dedektöre ait RMSE yüzdeleri

Şekil 5.26 906 numaralı dedektörden elde edilen RMSE değerlerini göstermektedir. En yüksek değer %7,42 olduğu grafikte tüm değerler sınır koşullarına uygundur.



Şekil 5.27 907 numaralı dedektöre ait RMSE yüzdeleri

Şekil 5.27 907 numaralı dedektörden elde edilen RMSE değerlerini göstermektedir. En yüksek değer %9,63 olduğu grafikte tüm değerler sınır koşullarına uygundur.



Şekil 5.28 921 numaralı dedektöre ait RMSE yüzdeleri

Şekil 5.28 921 numaralı dedektörden elde edilen verilerle hesaplanan RMSE değerleri incelendiğinde en yüksek değer %5,53 olduğu görülmektedir.

Şekil 5.26, Şekil 5.27 ve Şekil 5.28 modele ait RMSE değerlerini replikasyonlara göre göstermektedir. Değerler incelendiğinde tümünün %30'un altında oldukları

görülmektedir. Tablo 5.4'te ise 10'ar dakikalık tekrar sayılarına göre Denklem 5.2 ile hesaplanan RMSE değerlerinin ortalamaları verilmiştir.

Tablo 5.4 Ortalama RMSE değerleri

	906	907	921
RMSE %	3,10	3,81	1,16

GEH ve RMSE değerleri incelendiğinde oluşturulan modelin tutarlı ve güvenilir olduğu görülmektedir.

5.4 Senaryolar

Otoyol katılımlarındaki trafik akım karakteristiklerini daha sağlayabilmek için farklı parametrelerden oluşan 100 senaryo hazırlanmış ve 20 replikasyon ile 1 saatlik zaman aralığında için çalıştırılmıştır. Parametrelerin sınır değerleri belirlenirken Bölüm 5.3.1'de anlatılan 3 gözlem noktasının yanı sıra İzmir ili içinde 6 adet otoyola katılım kesimi ve 3 adet katılımdan önce kent içi arterde yer alan sinyalizasyon sistemi incelenmiştir. Tablo 5.5'te incelenen katılım kesimlerinin geometrik özellikleri, Tablo 5.6'da ise incelenen sinyalizasyonların devre ve yeşil süreleri verilmiştir.

Tablo 5.5 İzmir ilinde yer alan örnek katılım alanları geometrileri

	Akçay Caddesi (D550) – İzmir Çevre Yolu	Akçay Caddesi (D300) – İzmir Çevre Yolu	Doğuş Caddesi – İzmir Çevre Yolu	Atatürk Caddesi – İzmir Çevre Yolu	Limontepe Kavşağı - İzmir Çevre Yolu	Girne Bulvarı - İzmir Çevre Yolu
Anayol Şerit Genişliği (m)	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
Anayol Şerit Sayısı	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Kent içi Arter Şerit Genişliği (m)	3,6	3,6	3,6	3,0	3,0	3,6
Kent İçi Arter Şerit Sayısı	3	3	3	2	2	3
Katılım Şeridi Uzunluğu (m)	150	150	110	150	80	100
Yan yol Genişliği (m)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
Yan Yol Şerit Sayısı	2	2	2	2	2	2
Yan Yoldaki Eğim	%2,7	%2	%4	%3	%4	%5
Yan Yol ile Sinyal Arasındaki Mesafe (m)	800	800	800	-	-	250

Tablo 5.6 İzmir ilinde yer alan katılım öncesi sinyalizasyon sistemlerinde devre süresi ve yeşil süre

	Devre Süresi	Yeşil Süre
Girne Bulvarı	110 sn	80 sn
Doğuş Caddesi	100 sn	75 sn
Serbest Bölge	100 sn	38 sn

Yukarıda verilen örneklere göre senaryolar içerisinde değişen parametrelerin sınır değerleri belirlenmiştir. Buna göre değişen parametreler için kabuller aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Anayolda şerit genişliği 3,6 m’dir ve 3 şeritlidir.

- Kent içi arterin şerit sayısı 2 veya 3 iken şerit genişliği 3 m ile 4 m,
- Katılım şeridi uzunluğu 80 m ile 150 m,
- Anayol trafik hacmi 350 tş/sa/şrt ile 1600 tş/sa/şrt,
- Yan yol trafik hacmi 400 tş/sa ile 2400 tş/sa,
- Kent içi arterden anayola katılan taşıt yüzdesi %25 ile %75,
- Kent içi arter üzerinde yer alan sinyalizasyon sisteminin devre süresi 70 sn ile 120 sn,
- Yeşil süre ise devre süresinin %35'i ile %60'ı,
- Kent içi arter üzerinde yer alan sinyalizasyon sistemi ile yan yol arasındaki mesafe 200 m ile 800 m

arasında rastgele değişmektedir. Burada veriler Excel programında RASTGELEARADA fonksiyonu kullanarak türetilmiştir. Mersenne Twister algoritması ile çalışan fonksiyonda tanımlanan sınır değerler arasında rastgele değerler elde edilebilmektedir (Office Support, 2020).

AIMSUN programı hazırlanan her senaryo için ayrı bir Access dosyası vermektedir. Bu dosyalarda benzetim çıktıları, yol kesimi, dedektörler ve tüm sistem için ayrı sayfalarda gruplandırılmışlardır. Benzetim programında tüm sistem, yol kesimi veya yerleştirilen her bir dedektörlerden elde edilen veriler hem benzetim tekrarı ile ortalama için hem araç türü için hem de istenen zaman aralığı için ayrı ayrı alınabilmektedir. Programdan her senaryo için hacim, hız, şerit kullanımı, yoğunluk ve zaman cinsinden aralık yolculuk süresi, durma süresi ve gecikme verileri elde edilebilmektedir.

5.5 Gecikmeler İçin Ampirik Bağntı Önerisi

5.5.1 Kısmi En Küçük Kareler Yöntemi

Kısmi En Küçük Kareler Regresyonu (KEKKR) yöntemi ilk kez Herman Wold tarafından 1966 yılında önerilmiştir (Bulut ve Alın, 2009). Yöntemin çıkış noktası bağımsız değişkenlerin çok sayıda ve ilişkili olması durumunda kestirime yönelik modeller elde etmektir. KEKKR yönteminde amaç, bağımsız X değişkenleri ve bir

ya da birden fazla bağımlı Y değişkenlerinin oluşturduğu iki veri bloğu için elde edilmiş gizli değişkenler (Latent Variables/LV) kullanılarak, bu iki veri bloğu arasında ilişki bulmaktır (Polat, 2014). Bulut ve Alın (2009) KEKKR analizini aşağıdaki gibi açıklamışlardır.

“KEKKR analizi, NIPALS Algoritması (Non-Linear Iterative Partial Least Squares) kullanılarak gerçekleştirilebilir (Bulut ve Alın, 2009). Klasik, standart algoritma olarak da bilinen NIPALS, KEKK’ in temelini oluşturmaktadır ve tek bağımlı değişken (KEKKR1) ve çok bağımlı değişken (KEKKR2) durumlarında kullanılabilir. Kovaryans matrisini en çoklayan bileşenleri elde etmeyi amaçlayan algoritmada tüm bileşenler aynı anda elde edilmez. Her bir adımda tek bir bileşen ve bu bileşene ait ağırlık ve yük değerleri elde edilmektedir. Algoritma istenilen bileşen sayısı elde edilince ya da matrisi sıfır matrisi olunca sonlandırılır (Bulut ve Alın, 2009). NIPALS yinelemeli bir algoritma olup $N \times P$ boyutlu $\mathbf{X}$, açıklayıcı değişkenler matrisi ve boyutlu $N \times P$ boyutlu $\mathbf{Y}$, bağımsız değişkenler matrisi ile ilgilenmektedir. Burada, $\mathbf{K}$: açıklayıcı değişken sayısını, P : bağımlı değişken sayısını vermektedir. Algoritmada a bileşen sayısını göstermekte olup $a = 1, 2, \dots, A$ dır. İlk adımda orjinal matrisler $(\mathbf{X}_i = \mathbf{X}, \mathbf{Y}_i = \mathbf{Y})$ ’in kullanıldığı algoritma aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır:

1. Bağımlı değişken çok sayıda ise bu değişkenlerden oluşan $\mathbf{Y}$ matrisinin en yüksek varyansa sahip olan sütunu ya da ilk sütunu, bağımlı değişken sayısı tek ise direkt o değişken sütunu vektörü $\mathbf{u}_a$ olarak alınır.
2. $\mathbf{X}$ ’in $\mathbf{Y}$ ’nin ilgili bileşeni üzerine regresyonundan $\mathbf{X}$ ve $\mathbf{u}$ arasındaki kovaryansı en çoklayan $\mathbf{w}$ ağırlık vektörü $\mathbf{w}_a = \mathbf{X}'_a \mathbf{u} / (\mathbf{u}'_a \mathbf{u}_a)$ ile elde edilir.
3. $\mathbf{w}_a / \|\mathbf{w}_a\|$ ile $\mathbf{w}_a$ vektörü normuna bölünerek boyu 1 olacak şekilde ölçeklendirilir.
4. $\mathbf{t}_a = \mathbf{X}_a \mathbf{w}_a$ eşitliği ile $\mathbf{X}$ ’in ilgili bileşeni $\mathbf{t}_a$, $\mathbf{w}_a$ ağırlık vektörü ile $\mathbf{X}$ ’in doğrusal bir kombinasyonu olacak şekilde hesaplanır.
5. $\mathbf{t}_a$ bileşeninin $\mathbf{Y}$ ’yi modellemedeki katkısını açıklayan $\mathbf{c}_a$ ağırlık vektörü $\mathbf{c}_a = \mathbf{Y}'_a \mathbf{t}_a / (\mathbf{t}'_a \mathbf{t}_a)$ ile $\mathbf{Y}$ ’nin $\mathbf{t}_a$ üzerine regresyonundan elde edilir.

6. $\mathbf{c}_a$ ağırlık vektörü normuna bölünerek boyu 1 olacak şekilde ölçeklendirilir. Yani $\mathbf{c}_a / \|\mathbf{c}_a\|$ hesaplanır.

7. $\mathbf{Y}$ için ilgili bileşen $\mathbf{u}_{a(\text{yeni})}$, $\mathbf{c}_a$ ağırlık vektörü ile $\mathbf{Y}$ 'nin doğrusal bir kombinasyonunu oluşturacak şekilde $\mathbf{Y}_a \mathbf{c}_a / (\mathbf{c}'_a \mathbf{c}_a)$ ile hesaplanır.

8. Adım 2' de kullanılan $\mathbf{u}_a$ değeri ile Adım 7'de kullanılan $\mathbf{u}_{a(\text{yeni})}$ değeri arasında bir yakınsama sağlanıp sağlanmadığına bakılır. Bu yakınsama, iki vektörün farkının normunun 10^{-6} gibi sıfıra çok yakın bir değer olması ile tespit edilir. Bu yakınsama sağlanır ise sonraki adımlara geçilerek algoritma sonlandırılır, aksi takdirde Adım 7'de elde edilen $\mathbf{u}_{a(\text{yeni})}$ değeri Adım 2'de yerine koyularak algoritmaya devam edilir.

9. $\mathbf{X}'$ in ilgili bileşeni üzerine regresyonundan, bileşenin açıklayıcı değişken üzerindeki etkisini ifade eden yük vektörü $\mathbf{p}_a$, $\mathbf{X}'_a \mathbf{t}_a / (\mathbf{t}'_a \mathbf{t}_a)$ ile elde edilir.

10. $\mathbf{Y}$ 'nin ilgili bileşeni $\mathbf{t}_a$ üzerine regresyonundan, bileşenin bağımlı değişken üzerindeki etkisini ifade eden yük vektörü $\mathbf{q}_a$, $\mathbf{Y}'_a \mathbf{u}_a / (\mathbf{u}'_a \mathbf{u}_a)$ ile elde edilir.

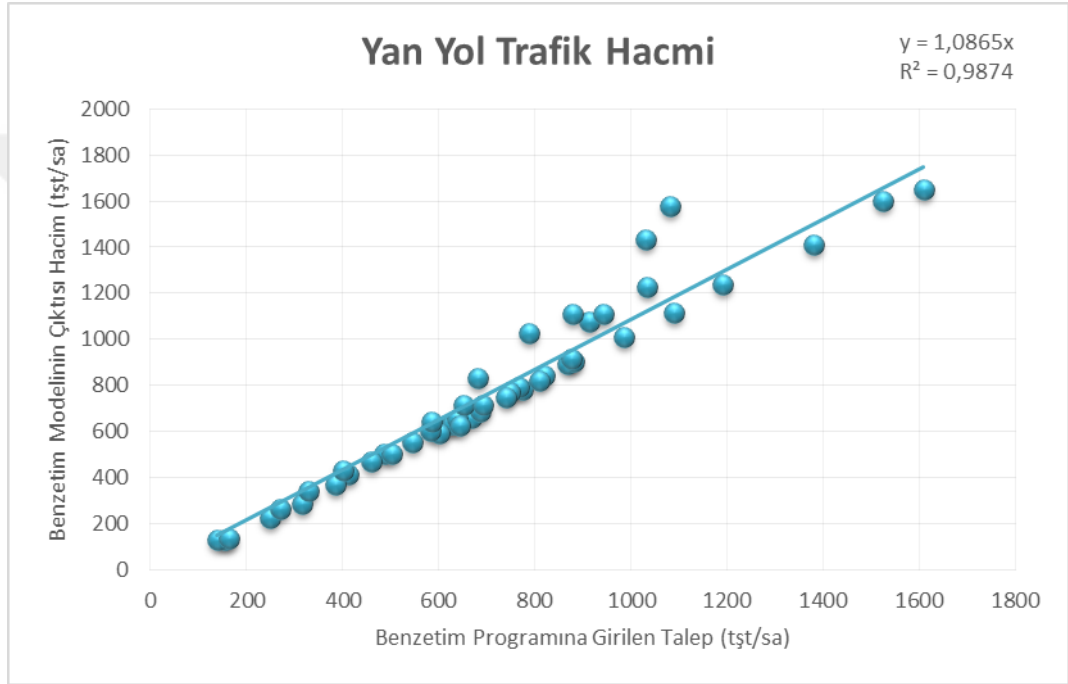
11. Hem $\mathbf{X}$ hem de $\mathbf{Y}$ için bileşenler ayrı hesaplandığından bileşenler arasında zayıf bir ilişki olmakta. Bu durumu ortadan kaldırmak için her bir bileşen için $\mathbf{Y}$ 'nin ilgili bileşeni $\mathbf{u}_a$ 'nın $\mathbf{X}$ 'in ilgili bileşeni $\mathbf{t}_a$ üzerine regresyonundan elde edilen içsel bir ilişkiyi tanımlayan $\mathbf{b}_a$ katsayısı $\mathbf{b} = \mathbf{u}'_a \mathbf{t}_a / (\mathbf{t}'_a \mathbf{t}_a)$ ile hesaplanır

12. Elde edilen bileşenler ve yükler bağımlı ve açıklayıcı değişkeni $\mathbf{X}' = \mathbf{P}\mathbf{Y}'$ ve $\mathbf{Y}' = \mathbf{B}\mathbf{T}\mathbf{C}'$ modellemede kullanılmaktadır. Sırasıyla açıklayıcı ve bağımlı değişken ve ile modellenmektedir. Algoritmanın bu adımında bir sonraki bileşeni elde etmek için kullanılacak olan $\mathbf{X}_{a+1}$ ve $\mathbf{Y}_{a+1}$ artık matrisleri $\mathbf{X}_{a+1} \rightarrow \mathbf{t}_{ap}'_a$ ve $\mathbf{Y}_{a+1} \rightarrow \mathbf{b}_{ta}\mathbf{c}'_a$ ile hesaplanmaktadır.

Algoritmaya açıklayıcı değişkenlerdeki ve bağımlı değişkenlerdeki değişimin büyük bir kısmı açıklanıncaya kadar devam edilir. Algoritma ihtiyaç duyulan en az sayıda bileşen sayısını vermektedir.” (s. 129-130)

5.5.2 Ampirik model önerisi

KEKKR yöntemi ile bir model hazırlanmaya çalışılan modelde, senaryolarda kullanılan değişkenlerin etkisini incelenmiştir. Bunun için yan yolun tek ve iki şeritli olma durumuna göre İlk adımda benzetim modeline girilen yan yol trafik talebi ile benzetim modelinin çıktısı olan hacim değerlerinin birbiri ile uyumlu olup olmadığı kontrol edilmiştir (Şekil 5.29).



Şekil 5.29 Benzetim modeline girilen yan yol talebi ve benzetim modelinin çıktısı hacim değerleri

Modelde en anlamlı sonuç veren değişkenler incelenmiştir (Tablo 5.7). Katılım şeridi uzunluğu beklenildiği gibi katılım kapasitesini artırırken eğimin artması tam tersi şekilde kapasiteyi düşürmektedir (Tablo 5.8). Katılıma en yakın şeridin (sağ şerit) hacmi ne kadar yüksekse katılım kapasitesi o kadar düşmektedir. Orta ve Sol şeritte hacimlerin arttıkça katılım kapasitesinin de artmasının sebebi ise anayoldaki hacmin şeritler arasında dağılımına bağlı olarak sağ şerit üzerindeki hacmin azalmasıdır.

Tablo 5.7 İki şeritli yan yol kapasitesi için model seçimi ve doğrulaması

Bileşen	X Sapma	Hata	R ²
1	0,67	4827959	0,01
2	0,81	4675892	0,04
3	0,99	4472624	0,08
4	0,99	1090127	0,77
5	1,00	1031873	0,78

Tablo 5.8 İki şeritli yan yol kapasitesini etkileyen değişkenlerin KEKKR yöntemi ile analizi

	Yan yol Kapasitesi (Q _{kap} Yanyol)	Standardize Edilmiş Yan Yol Kapasitesi
Sabit	194,41	0,00
Katılım Şeridi Uzunluğu	1,64	0,11
Eğim	-90,02	-0,24
QAnayolSağ	-9,28	-10,88
QAnayolSol	4,76	5,60
QAnayolOrta	4,57	5,17

Sunulan argümanların doğrulamak için yapılan bir diğer analiz sonuçları Tablo 5.8’de verilmiştir. Tablodan da görülebileceği gibi katılım şeridi uzunluğu ve eğim değerlerinin yan yol kapasitesine etkisi önceki analizdekine benzer şekilde elde edilmiştir. Sağ şeritteki trafik hacmi oranı ne kadar yüksekse yan yol kapasitesi o kadar düşmektedir. Her iki analizden de yan yol kapasitesinin anayol hacminin şeritlere dağılımından etkilendiği söylenebilir.

Tablo 5.9 İki şeritli yan yol kapasitesini etkileyen değişkenlerin KEKKR yöntemi ile analizi 2

	Yan Yol Kapasitesi ($Q_{kap}Yanyol$)	Standardize Edilmiş Yan Yol Kapasitesi
Sabit	5686,52	0,00
Katılım Şeridi Uzunluğu	1,67	0,11
Eğim	-188,32	-0,51
$QAnayolSağ/(QAnayolOrta + QAnayolSol)$	-9816,24	-0,83

KEKKR yöntemi ile yapılan analizler sonucunda yan yol kapasitesi için önerilen bağıntı aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned}
 Q_{kap}Yanyol = & 194,411 + 1,641 * L_{katılım} - 90,025 * Eğim \\
 & - 9,287 * QAnayolSağ + 4,762 * QAnayolSol \\
 & + 4,577QAnayolOrta
 \end{aligned}
 \tag{5.3}$$

Burada;

$L_{katılım}$: Katılım şeridi uzunluğu (m),

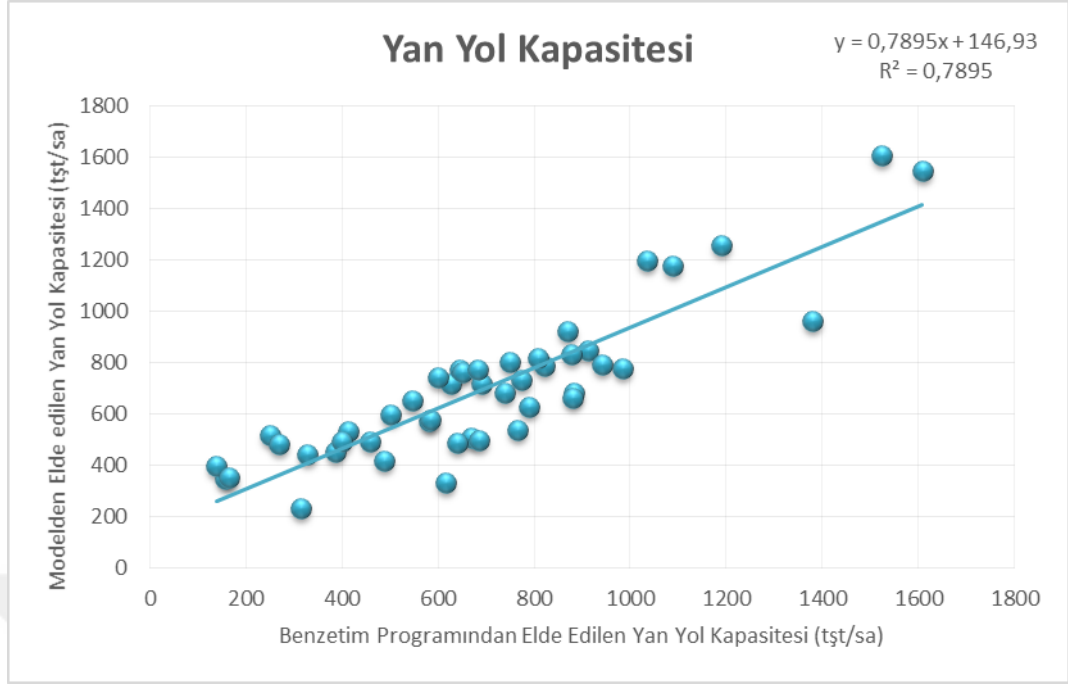
Eğim: Yan yolun eğimi,

$QAnayolSağ$: Benzetim programından elde edilen anayolun sağ şeridindeki hacim (tışt/sa/ışrt),

$QAnayolOrta$: Benzetim programından elde edilen anayolun orta şeridindeki hacim (tışt/sa/ışrt),

$QAnayolSol$: Benzetim programından elde edilen anayolun sol şeridindeki hacimdir (tışt/sa/ışrt).

Benzetim modelinden elde edilen çıktılar ile hesaplanan yan yol kapasitesi KEKKR yöntemi ile hesaplanan kapasite değeri ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.30’da her iki yöntemin de benzer sonuçlar verdiği görölmektedir.



Şekil 5.30 Benzetim programından elde edilen veriler ile hesaplanan ve KEKKR yöntemi ile hesaplanan iki şeritli yan yol kapasite değerleri

Yan yol gecikmesinin geometrik parametrelerden etkilendiği bilinmektedir, (Asgharzadeh ve Kondyli, 2018). Yapılan analizlerde yalnızca geometrik parametreler değil; bir önceki sinyalin otoyol katılımına olan uzaklığı ve söz konusu sinyalin yeşil/devre süresi, anayol ve yan yol hızları arasındaki oran, anayol ve yan yol arasındaki trafik hacmi oranı ve anayoldaki hacmin şeritlere göre dağılımının da yan yol gecikmesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. KEKKR yöntemi ile yapılan analizlerde gecikmeyi en anlamlı şekilde etkileyen 4 değişken belirlenmiş ve X sapma, hata ve R^2 değerleri ile Tablo 5.10’da verilmiştir.

Tablo 5.10 İki şeritli yan yol gecikmesi için model seçimi ve doğrulaması

Bileşenler	X Sapması	Hata	R^2
1	0,35	0,41	0,86
2	0,66	0,05	0,98
3	0,79	0,04	0,98
4	1,00	0,03	0,98

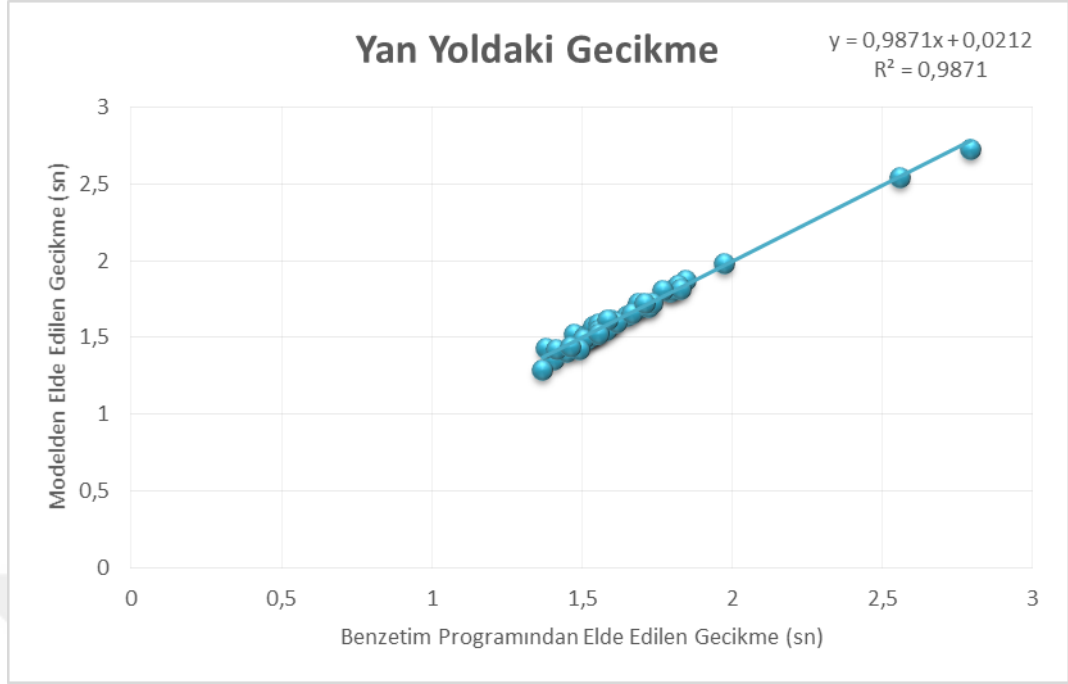
Tablo 5.11 İki şeritli yan yol gecikmesini etkileyen değişkenlerin KEKKR yöntemi ile analizi

	Yan Yol Gecikmesi	Standardize Ezilmiş Yan Yol Gecikmesi
Sabit	18,92	0,00
Katılım Şeridi Uzunluğu	-0,00	-0,03
Anayol Hacmi/Yanyol Hacmi	0,00	0,02
QAnayolSağ/(QAnayolOrta + QAnayolSol)	0,36	0,03
Yan Yol Hızı	-0,29	-1,00

Analizlerde yan yol gecikmesi üzerinde anlamlı etkiye sahip parametreler Tablo 5.11’de verilmiştir. Katılım şeridi uzunluğu arttıkça araçlar anayola daha kolay katılabildiği için gecikmelerin düşmesi beklenmektedir ve analiz sonucu da bunu desteklemektedir. Anayol talebi ve yan yol talebi de gecikmeyi artırmaktadır. Anayolda sağ şeritteki trafik hacminin diğer şeritlere oranı arttıkça yan yoldan katılım güçleştiği için gecikmeler o oranda artacaktır. Yan yoldaki hızlar her iki analizde de yan yol gecikmesini en çok etkileyen parametredir. Yan yoldaki hızlar ne kadar yüksekse anayola katılım kolaylaştığı için gecikmeler azalmaktadır. Modelden edinilen gecikme bağıntısı Denklem (5.4)’te verilmiştir

$$\begin{aligned}
 Gecikme = & 18,9261 - 0,0004 * L_{katılım} + 0,0013 * (Q_{Anayol}/Q_{Yanyol}) \\
 & + 0,3634 * (Q_{anayolsağ}/Q_{anayolorta} + Q_{anayolsol}) \\
 & - 0,2920 * V_{katılım}
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Burada $L_{katılım}$, katılım şeridi uzunluğu (m); $V_{katılım}$, yan yoldaki hızlardır (km/sa). Şekil 5.31’de benzetim modelinin bir çıktısı olan yan yol gecikmesi ile KEKKR yöntemiyle hesaplanan gecikme değerleri karşılaştırılmıştır. Her iki yöntemden elde edilen değerlerin birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 5.31 Benzetim programından elde edilen ve KEKKR yöntemi ile hesaplanan iki şeritli yan yoldaki gecikme değerleri

Gecikmeyi en çok etkileyen parametre olan hız değeri senaryoları etkileyen tüm parametreler ile incelendiğinde yan yoldaki hızı en çok etkileyen 4 parametre (Tablo 5.12) ve katsayıları aşağıda (Tablo 5.13) verilmiştir.

Tablo 5.12 İki şeritli yan yoldaki hızlar için model seçimi ve doğrulaması

Bileşen	X sapma	Hata	R ²
1	0,24	18,85	0,47
2	0,41	17,67	0,50
3	0,72	17,66	0,50
4	1,00	17,66	0,50

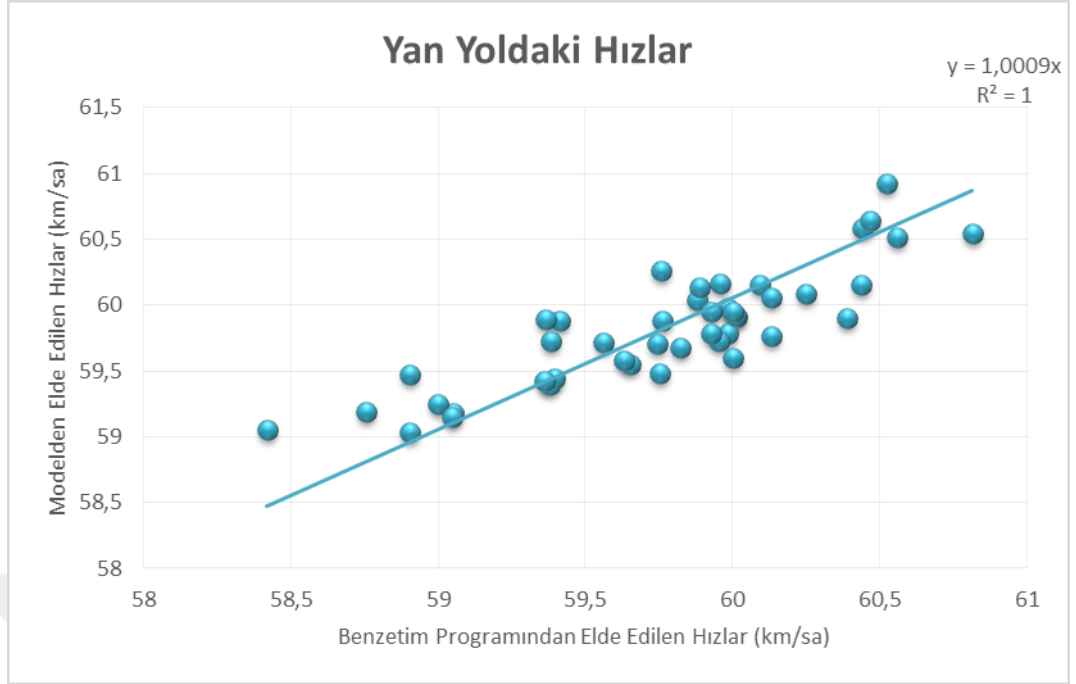
Tablo 5.13 İki şeritli yan yol hızları etkileyen değişkenlerin KEKKR yöntemi ile analizi

	Yan Yol Hızı	Standardize Edilmiş Yan Yol hızları
Sabit	60,78	0,00
Yeşil/Devre Süresi	1,44	0,22
Yan Tol Trafik Hacmi	-0,00	-0,65
Anayola Katılan Kent İçi Arter Akım Yüzdesi	-2,24	-0,62
Katılıma Olan Uzaklık	0,00	0,13

Tablo 5.13'te verildiği gibi yeşil/devre süresi değeri büyüdükçe yan yoldaki hızlar artmaktadır. Bunun sebebi yeşil/devre süresinin artması dur, kalk eylemlerinin azalmasına neden olmaktadır. Yan yoldaki trafik hacmi ne kadar yüksekse ve anayola katılan akım yüzdesi arttıkça hızlar beklenildiği gibi düşecektir. Sinyalizasyon ile katılım arasındaki mesafenin artması ise araçlar arasındaki etkileşimin mesafeye bağlı olarak azaldığı için gecikmelerin düşmesine neden olacaktır. Ayrıca bu durumda araçların kendilerine ait hızı seçme olasılığı artacaktır. İki şeritli yan yoldaki araç hızları için önerilen bağıntı aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 Vyanyol = & 60,7864 + 1,4492 * (\text{yeşil/devre süresi}) - 0,0005 * QYanyol \\
 & - 2,2483 * (\text{anayol katılan akım yüzdesi}) + 0,0004 \\
 & * (\text{katılıma olan uzaklık})
 \end{aligned}
 \tag{5.5}$$

Şekil 5.32'de KEKKR yöntemi ile elde edilen hız değerlerinin benzetim modelinden edinilen yan yol hızı ile karşılaştırılmıştır ve değerlerin birbirine oldukça yakın görülmektedir.



Şekil 5.32 Benzetim programından elde edilen ve KEKKR yöntemi ile hesaplanan iki şeritli yan yoldaki hızlar

Yan yolun gözlem noktalarında olduğu gibi iki şeritli olması durumunda kapasite, gecikme ve hız değerleri incelenmiş ve bağıntılar önerilmiştir. Bazı durumlarda kent içi arterle anayolu bağlayan yan yol tek şeritli de olabilir. Yan yolun tek şeritli olması durumu da aynı senaryo şartları yeniden kullanılarak incelenmiştir.

Tablo 5.14 Tek şeritli yan yol kapasitesi için model seçimi ve doğrulaması

Bileşen	X Değişkeni	Hata	R ²
1	0,52	7472430	0,04
2	0,83	7162485	0,08
3	0,97	6904678	0,11
4	0,99	5978896	0,23
5	1,00	1667315	0,78

Tablo 5.15 Tek şeritli yan yol kapasitesini etkileyen değişkenlerin KEKKR yöntemi ile analizi

	Yan Yol Kapasitesi ($Q_{kapYanyol}$)	Standardize Edilmiş Yan Yol Kapasitesi
Sabit	-274,82	0,00
Katılım Şeridi Uzunluğu	1,59	0,09
Eğim	-111,34	-0,02
QAnayolSol	1,06	1,74
QAnayolOrta	10,28	9,47
QAnayolSağ	-11,51	-11,23

Tablo 5.14'te tek şeritli yan yol kapasitesini etkileyen değişkenler, Tablo 5.15'te ise bu değişkenlerin yan yol kapasitesine etkisi incelenmiştir. Buna göre katılım şeridi uzunluğunun artması kapasiteyi artırırken yan yoldaki eğimin artması kapasiteyi düşürmektedir. Anayol hacminin şeritlere göre dağılımına bakıldığında ise hacmin sağ şeritte artması yan yol kapasitesinin azalmasına neden olmaktadır. Bu durumu incelemek için yeniden KEKKR yöntemi ile elde edilen değerler Tablo 5.16'da verilmiştir.

Tablo 5.16 Tek şeritli yan yol kapasitesini etkileyen değişkenlerin KEKKR yöntemi ile analizi

	Yan Yol Kapasitesi ($Q_{kapYanyol}$)	Standardize Edilmiş Yan Yol Kapasitesi
Sabit	5849,3	0,00
Katılım Şeridi Uzunluğu	3,7	0,22
Eğim	-170,8	-0,40
QAnayolSağ/(QAnayolOrta+ QAnayolSol)	-10578,3	0,75

Tablo 5.16'da verilen analiz sonucuna göre katılım şeridi uzunluğu kapasiteyi olumlu etkilerken, yan yoldaki eğim ve anayolun sağ şeridindeki hacmin diğer şeritlerin toplamına oranı arttıkça kapasite düşmektedir. KEKKR yöntemi ile yapılan analizler sonucunda elde edilen tek şeritli yan yol için önerilen kapasite bağıntısı

Denklem 5.6’da, modelden elde edilen kapasite değerlerinin benzetim modeli ile karşılaştırılması ise Şekil 5.33’te verilmiştir.

$$Q_{kap}Yanyol = 5849,3 + 3,7 * Lkatılım - 170,8 * Eğim - 10578,3 * \frac{QAnayolSağ}{(QAnayolOrta + QAnayolSol)} \quad (5.6)$$

Burada;

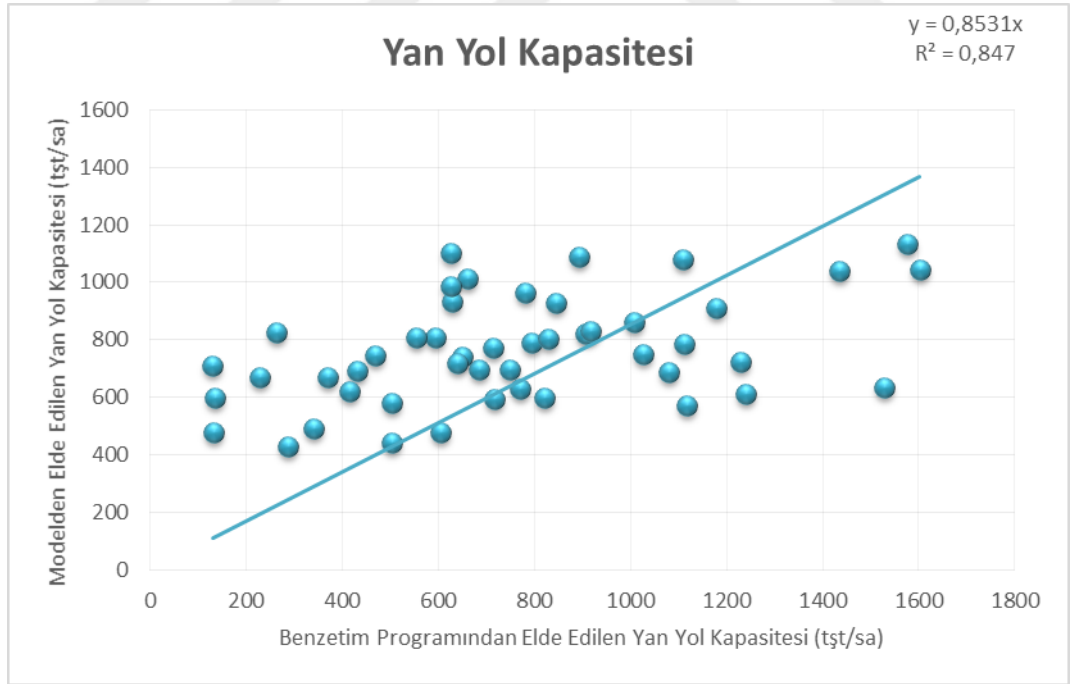
Lkatılım: Katılım şeridi uzunluğu (m),

Eğim: Yan yolun eğimi,

QAnayolSağ: Benzetim programından elde edilen anayolun sağ şeridindeki hacim (tışt/sa/şrt),

QAnayolOrta: Benzetim programından elde edilen anayolun orta şeridindeki hacim (tışt/sa/şrt),

QAnayolSol: Benzetim programından elde edilen anayolun sol şeridindeki hacimdir (tışt/sa/şrt).



Şekil 5.33 Benzetim programından elde edilen veriler ile hesaplanan ve KEKKR yöntemi ile hesaplanan tek şeritli yan yol kapasite değerleri

Tablo 5.17 Tek şeritli yan yol gecikmesi için model seçimi ve doğrulaması

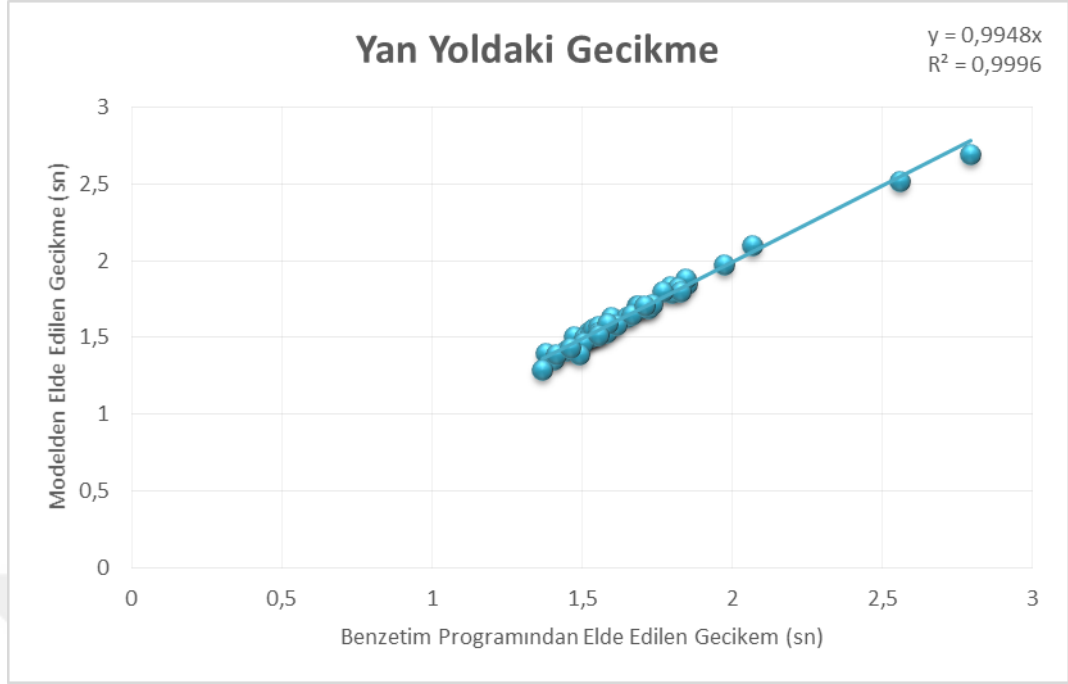
Bileşen	X Değişkeni	Hata	R ²
1	0,63	2,76	0,41
2	0,87	2,34	0,49
3	1,00	1,93	0,58

Tablo 5.18 Tek şeritli yan yol gecikmesini etkileyen değişkenlerin KEKKR yöntemi ile analizi

	Yan yoldaki gecikme	Standardize edilmiş yan yoldaki gecikme
Sabit	-15,12	0,00
QAnayolSağ/ (QAnayolOrta+QAnayolSol)	5,85	0,52
Vanayol/Vyanyol	7,99	1,17
Yeşil/Devre Süresi	-0,27	-0,07

Yan yoldaki gecikmeleri etkileyen parametreler incelendiğinde en çok etkileyen 2 parametre ile gecikme değerleri KEKKR yöntemi ile değerlendirilmiştir. Analiz sonucuna göre gecikmeyi en çok etkileyen parametrenin anayoldaki hızların yan yoldaki hızlara oranı olduğu görülmektedir. Bu durum anayol ile yan yoldaki hızların birbirine yaklaştıkça gecikmelerin azaldığı şeklinde yorulanabilir. Anayolda sağ şeritteki hacmin diğer şeritlerin toplamına oranı arttıkça gecikmeler de artarken, yeşil/devre süresinin artması gecikmeleri azaltmaktadır. Bu analizden elde edilen tek şeritli yan yol için gecikme bağıntısı aşağıdaki gibidir. Modelden elde edilen gecikme değerleri ile benzetim programından elde edilen değerlerin karşılaştırılması ise Şekil 5.34’te verilmiştir. Şekle göre sonuçların birbirine uyumlu olduğu söylenebilir.

$$Gecikme = -15,1228 + 5,8536 * QAnayolSağ / (QAnayolOrta + QAnayolSol) + 7,9929 * VAnayol / VYanyol - 0,2682 * Yeşil/devre \quad (5.7)$$



Şekil 5.34 Benzetim programından elde edilen ve KEKKR yöntemi ile hesaplanan tek şeritli yan yoldaki gecikme değerleri

Tablo 5.19 Tek şeritli yan yol hızları için model seçimi ve doğrulaması

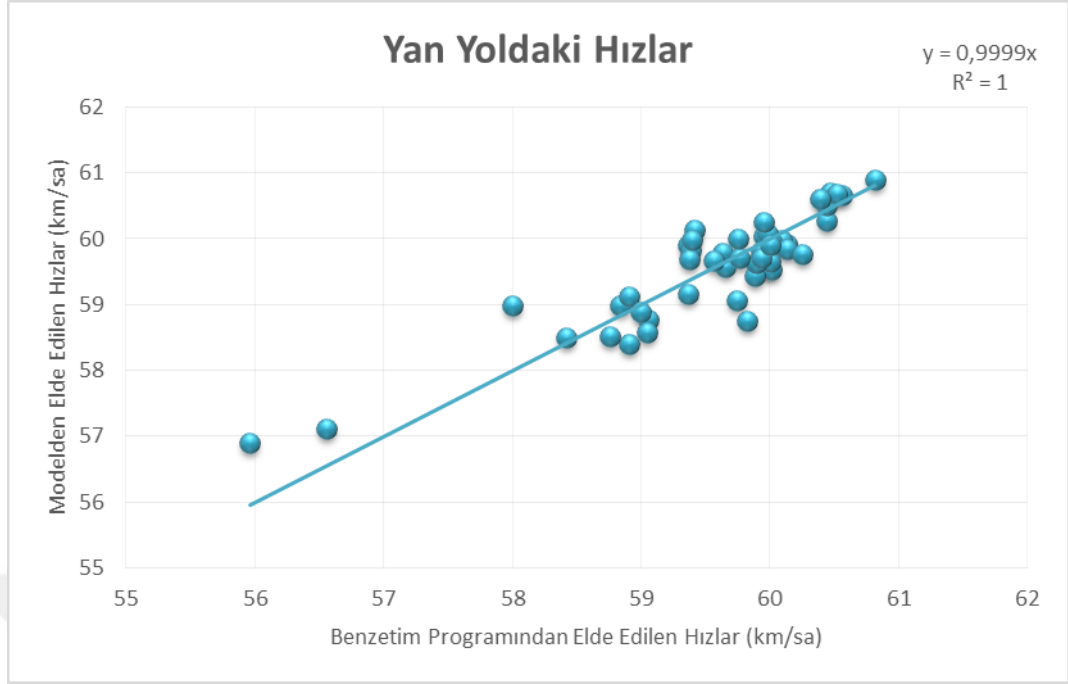
Bileşen	X Değişkeni	Hata	R ²
1	0,28	9,72	0,74
2	0,53	8,04	0,79
3	0,64	7,67	0,80
4	0,81	7,61	0,80
5	1,00	7,61	0,80

Tablo 5.20 Tek şeritli yan yol gecikmesini etkileyen değişkenlerin KEKKR yöntemi ile analizi

	Yan Yol Hızları	Standardize Ezilmiş Yan Yol Hızları
Sabit	40,82	0,00
Yeşil/Devre Süresi	0,69	0,06
Eğim	-0,28	-0,28
Katılıma Olan Uzaklık	0,00	0,06
Anayol Hızı	0,19	0,63
Yan Yol Hacmi	-0,00	-0,46

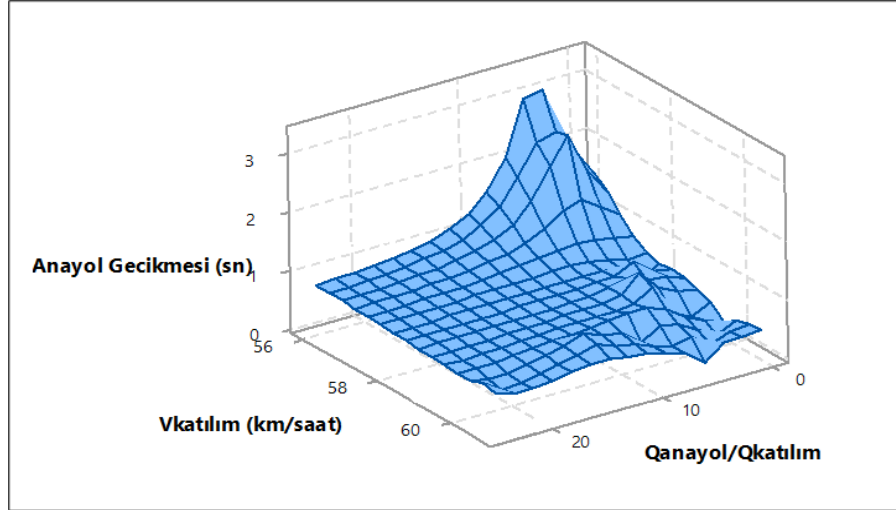
Yan yoldaki hızları etkileyen parametreler incelendiğinde ise en çok etkileyen parametrenin yeşil/devre süresi olduğu görülmektedir. Yeşil/devre süresi, katılıma olan uzaklık ve anayolun hızı arttıkça yan yoldaki hızların da arttığı, eğimin ve yan yol hacminin ise tam tersi etki gösterdiği sonucu elde edilmektedir. Modelden elde edilen yan yoldaki hızlar için bağıntı Denklem 5.8’de, hesaplanan değerlerin benzetim programından elde edilen hızlar ile karşılaştırılması ise Şekil 3.35’te verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 Yanyol\ hız = & 40,8266 + 0,6912\ Yeşil/Devre\ süresi - 0,2867 * Eğim \\
 & + 0,0004 * Katılıma\ Olan\ Uzaklık + 0,1911 * VAnayol \\
 & - 0,0013 * QYanyol
 \end{aligned}
 \tag{5.8}$$



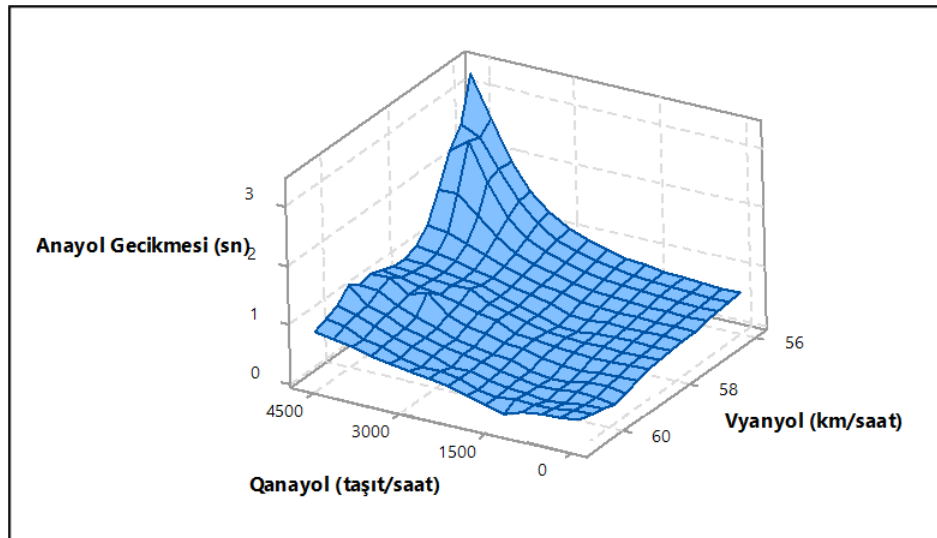
Şekil 5.35 Benzetim programından elde edilen ve KEKKR yöntemi ile hesaplanan iki şeritli yan yoldaki hızlar

Her ne kadar genelde hesaplamalarda katılım üzerindeki araçların gecikmeleri incelenirse de katılım denetimi gibi uygulamalar büyük oranda anayoldaki taşıtların gecikmeleri azaltmak için tercih edilen yöntemlerdir. Bu sebeple anayol gecikmesini etkileyen faktörlerin neler olabileceği de benzetim modelinin sonuçlarında belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 5.36’da anayoldaki taşıtların ortalama gecikmelerin katılımdaki araçları hızlarına ve anayol trafik hacmin katılım hacmine oranının etkisi görülmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi anayolun trafik hacmi (Q_{anayol}) katılım trafik hacmi ($Q_{katılım}$) oranı düştükçe anayol gecikmelerinin önemli oranda arttığı anlaşılmaktadır. Diğer bir değişle iki trafik hacmi arasındaki fark yan yoldaki sürücüler anayoldaki sürücüleri durmaya, şerit değiştirmeye ya da yavaşlamaya zorlamakta ve buna bağlı olarak da anayolun gecikmesi artmaktadır. Diğer önemli bir bulgu ise katılım araçlarının hızı arttıkça anayoldaki araçların gecikmelerinin düşmesidir. Bu da iki akım arasındaki hız farklılığı ne kadar azsa iki akımın birbiriyle etkileşiminin gerçekleşebildiğini göstermektedir.



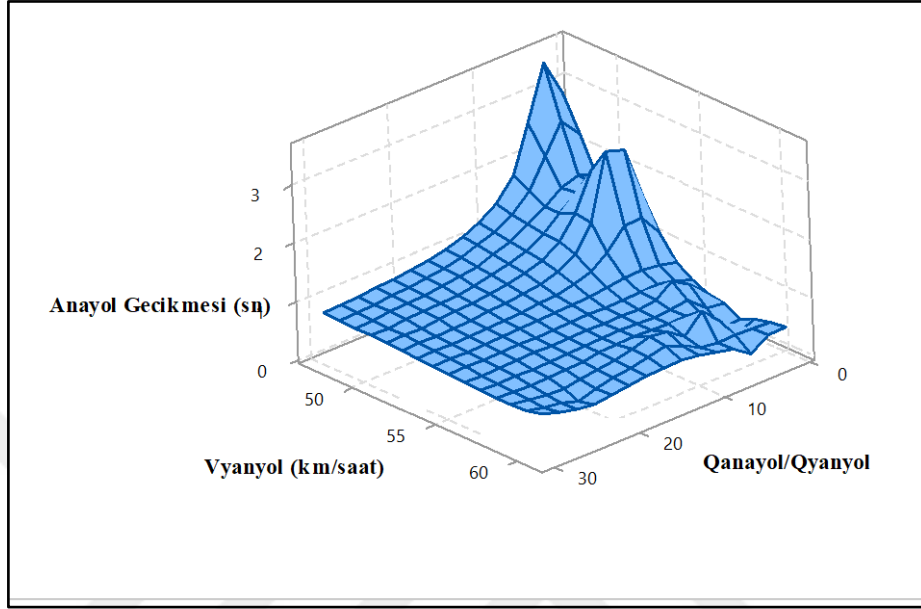
Şekil 5.36 İki şeritli yan yol katılımlarında anayol gecikmesine V_{yan} ve $Q_{anayol}/Q_{katılım}$ etkisi

Anayoldaki gecikmelerde anayol hacminin çok büyük bir etkisi olduğu bilinmektedir. Anayoldaki araç sayısı arttıkça anayoldaki araçların hızlarının düşmesi sebebiyle gecikmelerinin de artabileceği söylenebilir. Şekil 5.37’de yan yoldan katılan araçların hızlarıyla anayol trafik hacminin anayoldaki taşıtların gecikmeler üzerindeki etkisi görülmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi yan yoldan katılan araçların hızının düşük olması durumunda anayol gecikmelerinin çok yüksek değerler alabileceği anlaşılmaktadır. Bu durum özellikle anayoldaki trafik talebinin arttığı durumlarda daha belirgin hale gelmektedir



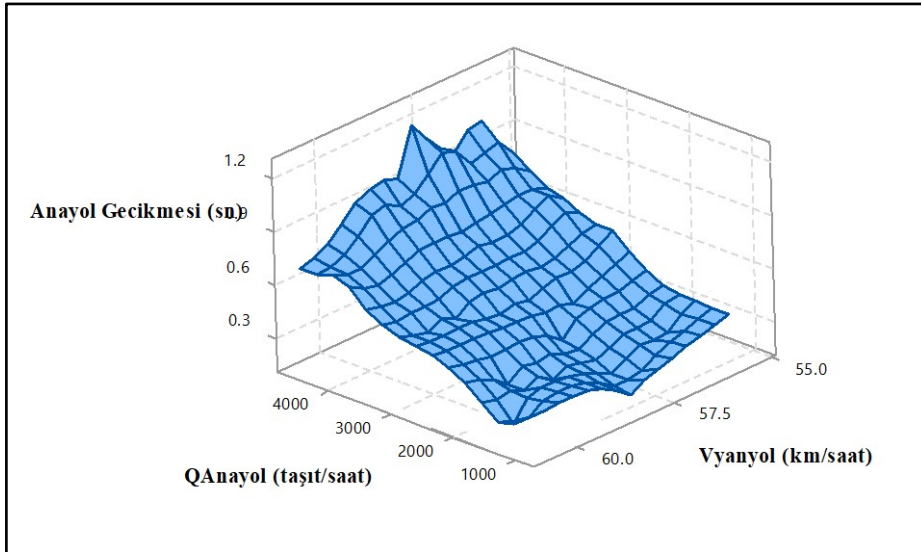
Şekil 5.37 İki şeritli yan yol katılımlarında anayoldaki gecikmeye $V_{yanayol}$ ve Q_{anayol} etkisi

Yan yolun tek şeritli olduğu durumlarda ise anayoldaki gecikmeye yanyoldaki hızların, anayol hacminin ve anayol hacminin yan yol hacmine oranının etkisi Şekil 5.38 ve 5.39’da verilmiştir.



Şekil 5.38 Tek şeritli yan yol katılımlarında anayol gecikmesine Vyanyol ve Qanayol/Qyanyol etkisi

Şekil 5.38’de düşük yan yol hızlarının özellikle yan yol hacminin anayol hacmine yaklaştığında anayol gecikmesine neden olduğu görülmektedir.



Şekil 5.39 Tek şeritli yan yol katılımlarında anayol gecikmesine Qanayol ve Vyanyol etkisi

Şekil 5.39'dan ise, tek şeritli katılımlarda anayol gecikmesinin iki şeritli yan yol katılımlarına kıyasla daha az gözlendiği (Şekil 5.37), yan yoldaki sürücülerin hızları arttıkça anayoldaki sürücülerin yavaşlayarak yol vermesi sebebiyle daha çok gecikmeye maruz kalacağı sonucu çıkmaktadır. Ayrıca anayoldaki trafik hacminin arttıkça anayoldaki gecikmeyi artıracak beklenmektedir. Özellikle düşük yan yol hızı ve yüksek anayol hacminde anayol gecikmesinin artması beklenir.



BÖLÜM ALTI

SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada otoyol veya çevre yolu yan yol katılımlarının gecikmeleri ve gecikme üzerine etki eden parametreler incelenmeye çalışılmıştır bu bağlamda iki ayrı yöntem izlenmiştir:

1. Kritik aralık kabul yöntemi
2. Benzetim modeli kurgusu

Çalışma kapsamında elde edilen bulgular aşağıda kısaca sıralanmaktadır.

1. Kritik aralık kabul yönteminden anayoldaki ve yan yoldaki taşıtların otoyol katılımına geliş özelliklerinin kavşak kapasitesi üzerinde etkili olduğu anlaşılmaktadır. Yine kritik aralık kabul yöntemi kapsamında yapılan analizler anayoldaki taşıt hızlarının yan yoldaki sürücülerin aralık kabul davranışları üzerinde etkili olabileceğini göstermiştir.
2. Kritik aralık kabul yöntemi kapsamında kullanılan Troutbeck bağıntısı ile GG1 kuyruk modeliden (Kingsman yaklaşımı) elde edilen gecikme değerlerinin yan yolun doygunluk derecesinin 0,8 olması durumuna kadar benzerlik gösterdiği, bu değerden sonra GG1 kuyruk modelinin daha uzun gecikme değerleri verdiği ancak her iki modelden elde edilen gecikmelerin de doygunluk derecesi 1'e yaklaştıkça çok yüksek değerler aldığı (sonsuzya yakınsadığı) görülmüştür. Bu da her iki modelin dayandığı kuyruk kuramının özellikle yan yol talebi arttıkça gecikmeleri modellemede yetersiz kaldığını göstermektedir.
3. AIMSUN program kullanılarak yapılan benzetim modelinde yan yoldaki gecikmelerin büyük oranda yan yol taşıtlarının hızlarına bağlı olduğu görülmüştür. Gecikmeyi etkileyen diğer önemli parameter ise anayolda sağ şeritte bulunana taşıt sayısının orta ve sol şeritte bulunan taşıt sayısına oranıdır. Buradan da görülebileceği gibi otoyol katılımlarının kapasite ve başarımları

daha çok anayolun sağ şeridindeki trafik akımının özelliklerine bağlıdır.

4. Diğer bir parametre ise anayoldaki trafik akımı ile yan yol talebi arasındaki orandır. Beklenildiği gibi anayoldaki trafik hacmi iki akım arasındaki oran büyüdükçe yani anayoldaki trafik hacmi yan yoldaki trafik talebine göre daha yüksek bir değer aldığında gecikmelerine arttığı ancak yan yol trafik hacmi anayol trafik hacmine yaklaştıça gecikmelerin azaldığı görölmektedir. Bu sonuç Bunker ve Troutbeck tarafından da ortaya konulan sınırlı öncelik koşulunun düşünölenen daha etkili olduğunu kanıtlayan bir unsurdur.

5. Analizlerden elde edilen diğer bir sonuç da beklenildiği gibi katılım şeridi uzunluğu artıkça yan yol gecikmelerinin düşmesidir.

Yukarıdan da görölebileceği gibi yan yoldaki trafik hızı yan yol gecikmesini etkileyen en önemli parametreler arasında yer almaktadır. Çalışmada hızın üzerinde etkili olan unsurlar da yine benzetim programı yardımı ile değerlendirilmeye çalışılmıştır. Hız değerı üzerinde etkili olan parametreler incelendiğinde en ilgi çekici olan parametrenin akım yukarı trafik ışığına ait yeşil /devre süresinin olduğu görölmektedir. Yeşil/devre süresi arttıkça taşıtların hızları da artmakta ve bu hızlarla otoyol katılımlarına eriştiklerinde anayoldaki trafik akımı içerisindeki aralıklara daha rahat giriş yapabilmekte ve anayoldaki trafiği daha az etkilemektedirler.

Çalışma sonucunda yan yol katılımlarındaki gecikmelerin en aza indirilebilmesi için katılıma gelen araçların hızlarının otoyoldaki taşıtların hızlarına yaklaşmasının önemli bir etmen olduğu görölmektedir. Aynı şekilde yan yoldaki taşıtların hızları anayoldaki taşıtların hızlarına yaklaştıkça anayol gecikme değerinin de düştüğu anlaşılmaktadır. Bu benzer hızlarda hareket eden akımlarda bulunan sürücülerin uygun aralıklara daha rahat giriş yapabilmelerine olanak sağlamaktadır. Buradan yola çıkarak yan yol trafik talebinin düşük veya orta hacim değerlerin sahip olduğu koşullarda mümkün olduğuca katılım

öncesinde yer alan trafik ışıklarındaki yeşil/devre süresi oranının yüksek tutulmasında yarar olduğu düşünülmektedir.

Bu çalışmada anayolda ve yan yoldaki trafik akımlarının sadece otomobillerden oluştuğu varsayılmış, ağır araç etkisi dikkate alınmamıştır. Sonraki çalışmalarda ağır araçların gecikmelerin üzerindeki etkisinin araştırılmasında büyük yarar olduğu düşünülmektedir



KAYNAKLAR

- Adams, W. F. (1937). *Road traffic considered as a random series*. Londra: Institution of Civil Engineers.
- Akcelik, R. (2006). Speed-flow and bunching models for uninterrupted flows. *Transportation Research Board 5th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, Yokohama, Japan*, 1-11.
- Akçelik ve Associates. (2002). *aaSIDRA User Guide*. Melbourne, Australia: Akçelik and associates Pty Ltd.
- Akçelik, R. (1998). Roundabouts: Capacity and performance analysis. *ARRB Research Report*, ARR 321, Vermont, Australia.
- Akçelik, R. (2003). Speed-flow and bunching relationships for uninterrupted flows. In *25th Conference of Australian Institute of Transport Research (CAITR 2003)*, University of South Australia, Adelaide, Australia, 38, (7/8), 1-23.
- Akçelik, R. ve Chung, E. (1994). Calibration of the bunched exponential distribution of arrival headways. *Road and Transport Research*, 3 (1), 42-59.
- Asgharzadeh, M. ve Kondyli, A. (2018). Comparison of highway capacity estimation methods. *Transportation Research Record*, 2672 (15), 75-84.
- Bulut, E ve Alın, A. (2009). Kısmi en küçük kareler regresyon yöntemi algoritmalarından Nipals ve PLS - Kernel algoritmalarının karşılaştırılması ve bir uygulama. *Dokuz Eylül Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 24 (2), 127-138.
- Bunker, J. M. (1996). *Microscopic modelling of freeway operations*. Doktora Tezi, Queensland University of Technology, Brisbane, Avustralya.

- Bunker, J. ve Troutbeck, R. (2003). Prediction of minor stream delays at a limited priority freeway merge. *Transportation Research Part B: Methodological*, 37 (8), 719-735.
- Ceyhan Yiğiter, Ö. ve Tanyel, S. (2015). Lane by lane analysis of vehicle time headways - Case study of Izmir ring roads in Turkey. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19 (5), 1498-1508.
- Ceyhan, Ö. (2011). *Modelling of traffic flow interactions at uninterrupted flow facilities*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Chaudhry, M. S. ve Ranjitkar, P. (2009). *Capacity analysis of signalised intersection using micro-simulation*. Doktora Tezi, University of Auckland, Auckland, Yeni Zelanda.
- Cooper, D. F., Smith, W. ve Broadie, V. (1976). Traffic studies at T-Junctions (1) The effect of approach speed on merging gap acceptance. *Traffic Engineering and Control*, 17 (6), 256-257.
- Coşkun, F., Çelik K., Çalışkanelli S. P. ve Tanyel, S. (2014). Sinyalize arterlerde araç takip aralıklarının mesafeye ve devre süresine bağlı değişimi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20 (9), 338-343.
- Cowan, R. J. (1975). Useful headway models. *Transportation Research*, 9 (6), 371-375.
- Cowan, R. J. (1979). The uncontrolled traffic merge. *Journal of Applied Probability*, 16 (2), 384-392.
- Çalışkanelli, S. P. ve Tanyel, S. (2010). Investigation of vehicle bunching at signalized arterials in Turkey. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37 (3), 380-388.

- Dawson, R. F. ve Chimini, L. A. (1968). The hyperlang probability distribution – A generalized traffic headway model. *Highway Research Board*, (230), 1-14.
- Drew, D. R., LaMotte, L. R., Buhr, J. H. ve Wattleworth, J. A. (1967). Gap acceptance in the freeway merging process. *Highway Research Record*, 208, 1-36.
- Feldman, O. (2012). The GEH measure and quality of the highway assignment models. *Association for European Transport and Contributors*, 1-18.
- Flannery, A., Elefteriadou, L., Koza, P. ve McFadden, J. (1998). Safety, delay and capacity of single-lane roundabouts in the United States. *Transportation Research Board*, 1646 (1), 63–70.
- Fricker, J., Gutierrez, M. ve Moffet, D. (1991). Acceptance, wait time and risk acersion at unsignalized intersections, *Intersections Without Traffic Signals II*. Bochum, Almanya, 297-307.
- Gedizlioğlu, E. (1979). *Denetimsiz kavşaklarda yanyol sürücülerinin davranışlarına göre pratik kapasite saptanması için bir yöntem*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Gedizlioğlu, E. ve Yayla, Y. (1978). Kontrolsüz eşdüzey kavşaklarda giriş aralığı kavramı. *Türkiye İnşaat Mühendisliği 7. Teknik Kongresi*, 785-801.
- Gerlough, D. L. ve Huber, M. J. (1975). Traffic flow theory. H. P. Orland, (Ed), *Special Report 165-Transportation Research Board* içinde (1-223) Washington, DC: National Research Council.
- Giuffrè, O., Granà, A., Marino, S., ve Galatioto, F. (2016). Microsimulation-based passenger car equivalents for heavy vehicles driving turbo-roundabouts. *Transport*, 31 (2), 295-303.

Google Earth. Erişim adresi: <https://www.google.com/earth>

Greenshields, B. D. (1947). Application of statistical sampling methods to traffic performance at urban intersections. *Highway Research Board Proceedings*, 26, 377-389.

Hagring, O. (1996). The Use of the Cowan M3 Distribution for Modelling Roundabout Flow. *Traffic Engineering & Control*, 37 (5), 328-332.

Hagring, O. (1998). *Vehicle-vehicle interactions at roundabouts and their implications for the entry capacity*. Doktora Tezi, Lund Institute of Technology, İsveç.

Hall, F. L., Hurdle, V. F. ve Banks, J. H. (1992). Synthesis of recent work on the nature of speed- flow and flow- occupancy (or density) relationship on freeways. *Transportation Research Record*, (1365), 12- 18.

Hwang, S.Y. ve Park, C. H. (2005). Modeling of the gap acceptance behavior at a merging section of urban freeway. *The Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5, 1641 – 1656.

Kingman, J. F. C. (1961). The single server queue in heavy traffic. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 57 (4), 902-904.

Lassarre, S., Lejeune, P. ve Decret, J. C. (1991). Gap acceptance and risk analysis at unsignalised intersections. W. Brilon (Ed), *Intersections Without Traffic Signals II* içinde (258-269). Heidelberg, Almanya: Springer-Verlag.

Leisch, J. (1974). *Capacity analysis techniques for design and operation of freeway facilities*. Washington, DC: Federal Highway Administration, Offices of Research and Development.

- Lertworawanich, P. ve Elefteriadou, L. (2003). A methodology for estimating capacity at ramp weaves based on gap acceptance and linear optimization. *Transportation Research Part B: Methodological*, 37 (5), 459–483.
- Luttinen, R. T. (1996). *Statistical analysis of vehicle time headways* (2. Baskı). Saarij arvi, Fillandiya: Gummerus Printing.
- Makigami, Y. ve Matsuo, T. (Temmuz, 1990). A merging probability calculation method considering multiple merging phenomena. *Transportation and Traffic Theory: 11th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, 21-38.
- Moore, R. L. (1956). Psychological factors of importance in traffic engineering. Presented at *International Study Week in Traffic Engineering, Stresa, Italy*, 1-5.
- Office Support, Excel formulas and functions, RAND function. (12 Nisan 2020). Erişim adresi: <https://support.microsoft.com/en-us/office/rand-function-4cbfa695-8869-4788-8d90-021ea9f5be73>
- Polat, E. (2014). *Sağlam kısmi en k   k kareler regresyon analizinde yeni yaklaşımlar*. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Roess, R. P. ve Ulerio, J. M. (1993). Capacity of Ramp-Freeway Junctions. Final Report, NCHRP Project 3-37. *Transportation Training and Research Center*. NY, Brooklyn: Polytechnic University.
- Sullivan, D. P. ve Troutbeck, R. J. (1994). The use of Cowan's M3 headway distribution for modelling urban traffic flow. *Traffic engineering & control*, 35(7/8).
- Szwed, N. ve Smith, N. M. (1974). Gap acceptance and merging. *Australian Road Research Board (ARRB) Conference, 7th, Adelaide*, 7 (4), 126 – 151.

- Şahin, M. (2012). *Türkiye’de Bölünmüş Yolların Trafik Güvenliğine Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Tan, H., Yang, X. ve Wu, A. (2013). In intelligent and integrated sustainable multimodal transportation systems. *Social and Behavioral Sciences*, 96, 1764-1773.
- Tanner, J. C. (1962). A Theoretical Analysis of Delays at an Uncontrolled Intersection. *Biometrika*, 49 (1-2), 163-170.
- Tanyel, S. (2001). *Türkiye’deki dönel kavşaklar için kapasite hesap yöntemi*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Transportation Research Board (2000). *Highway Capacity Manual*. Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, USA.
- Transportation Research Board (2010). *Highway Capacity Manual*. Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, USA.
- Troutbeck, R. J. (1997). A review on the process to estimate the Cowan M3 headway distribution parameters. *Traffic Engineering & Control*, 38 (11), 600-603.
- Troutbeck, R. J. (1998). The capacity of a limited priority merge, *Physical Infrastructure Centre Research Report*, 98 (4), 98-104.
- Troutbeck, R. J. ve Kako, S. (1999). Limited priority merge at unsignalized intersections. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 33 (3-4), 291-304.
- Troutbeck, R. ve Brilon, W. (1995). Unsignalized intersection theory. *Traffic Flow Theory A State of Art Report*, 8 (1), 8-44.

Tunç, A. (2013). *Trafik mühendisliği ve uygulamaları*. Ankara: Asil Yayın Dağıtım.

Uber, C. B. ve Hoffmann, E. R. (1988). Effect of approaching vehicle speed on gap acceptance. *Australian Road Research Board (ARRB) Conference, 14th, Canberra, 14* (2), 118-124.

Ulu, İ. M., Tanyel, S., Dünder, S. ve Gökaşar, I. (2019). Işıklı kavşaktan ayrılan taşıtların otoyol katılımlarının başarımları üzerindeki etkilerinin incelenmesi, TMMOB İMO, 13. *Ulaştırma Kongresi Bildiri Kitabı*, 267-277.

Westphal, S. (1994). Capacity of freeway on-ramps on German motorways. *The Second International Symposium On Highway Capacity*, 2, 707-715.

Xue, Y., Kang, S. J., Lu, W. Z. ve He, H. D. (2014). Energy dissipation of traffic flow at an on-ramp. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 398 (15), 172-178.

Yaslan, G. (2012). *Otoyol ve ekspres yollarda katılım denetimi*. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.

Yaşar, I. (2006). *Development and evaluation of feedback-based freeway ramp metering strategies*. Doktor Tezi, The State University of New Jersey, Rutgers.

Yayla, N. (2008). *Karayolu Mühendisliği*. İstanbul: Birsan Yayınevi.

Yiğit, B. (2019). *Araç kompozisyonunun şehir içi trafik akımlarındaki etkilerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.