İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KENTİÇİ OTOYOLLARDA MODEL TABANLI ÖNGÖRÜYE DAYALI DEĞİŞKEN HIZ SINIRLAMASI İLE AKIM DENETİMİ

DOKTORA TEZİ

Hatice GÖÇMEN DEMİR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KENTİÇİ OTOYOLLARDA MODEL TABANLI ÖNGÖRÜYE DAYALI DEĞİŞKEN HIZ SINIRLAMASI İLE AKIM DENETİMİ

DOKTORA TEZİ

Hatice GÖÇMEN DEMİR
(501012124)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ergun GEDİZLİOĞLU

TEMMUZ 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **501012124** numaralı Doktora Öğrencisi **Hatice GÖÇMEN DEMİR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"Kentiçi Otoyollarda Model Tabanlı Öngörüye Dayalı Değişken Hız Sınırlaması İle Akım Denetimi"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Ergun GEDİZLİOĞLU** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Nadir YAYLA** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Ahmet AKBAŞ Yalova Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. İsmail ŞAHİN Yıldız Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Hilmi Berk ÇELİKOĞLU İstanbul Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **1 Aralık 2011**
Savunma Tarihi : **20 Temmuz 2012**

ÖNSÖZ

Öncelikle tezin hazırlanmasında katkılarını esirgemeyen danışman Hocam Prof.Dr. Ergun Gedizlioğlu'na teşekkürlerimi sunarım. Tezin ilk taslağını inceleyip, fikir veren, Hocam Yrd.Doç.Dr.Nevzat Erselcan'a teşekkür borçluyum. Tezin son şeklinin verilmesinde incelemeleri ve değerlendirmeleri ile katkıda bulunan tüm jüri üyelerine teşekkürlerimi sunarım. Özellikle tezin başlangıç aşamasında önerilerinden faydalandığım Doç.Dr.İsmail Şahin'e, aydınlatıcı görüş ve düşünceleri ile destek olan yüksek lisans tez danışmanım Prof.Dr. Nadir Yayla'ya, sonuçlandırma aşamasında görüşlerinden faydalandığım Prof.Dr. Ahmet Akbaş'a teşekkürlerimi sunarım.

Veri toplama aşamasında binalarında video çekimi yapmama izin veren Enka ve Tatlıcı Towers yöneticilerine teşekkür ederim. Çalışma konusu ile ilgili sorduğum sorulara elektronik posta yolu ile cevap veren Dr. Andreas Hegyi, Prof.Dr. Markos Papageorgiou ve ulaşamadığım bazı kaynakları göndermede yardımcı olan Sayın Bud Cribbs, Prof.Dr. Samer Madanat, Sayın Barbara Lorenz ve Sayın Mehmet Mert'e teşekkür ederim. Ulaştırma bölümünde bulunduğum süre içerisinde iyi yaklaşımda bulunan, yabancılık duygusu hissettirmeyen, derslerine katılarak bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım Değerli Hocalarıma, arkadaşlarıma ve uğraşları için FBE personeline içtenlikle teşekkür ederim.

Bana olan sevgi ve inançlarını her zaman hissettiğim ve güç bulduğum canım aileme şükranlarımı sunarım. Bu zorlu süreçte anlayışı ve tezin her aşamasında yardımları için Sevgili Eşim Yusuf Kağan Demir'e ne kadar teşekkür etsem azdır.

Aralık 2011 Hatice G.Demir

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xxi**
1. GİRİŞ **1**
2. OTOYOLLARDA DEĞİŞKEN HIZ SINIRLAMA UYGULAMASI **5**
2.1 Otoyol Yönetim Sistemi ve Kontrol Stratejileri 5
2.1.1 Şerit yönetimi 7
2.1.2 Otoyol katılım kontrolü 8
2.1.2.1 ALINEA 11
2.1.3 Olay yönetimi 13
2.1.4 Gözlem ve tespit sistemi 13
2.1.5 Bilginin dağıtımı 14
2.1.6 Yaptırım 14
2.2 Dinamik Kontrol Sistemleri 15
2.2.1 Trafik gözlem aygıtları 18
2.2.2 Dinamik kontrol modeli (kontrolör) 19
2.2.3 Kontrol aygıtları 20
2.3 Hız Sınırlaması 20
2.3.1 Temel diyagram 25
2.3.2 Şok dalgası 28
2.4 Değişken Hız Sınırlaması, DHS 29
2.5 DHS Konusunda Yapılan Uygulamalar Ve Literatür Çalışmaları 34
3. SİMÜLASYON MODELLERİ VE CORSIM KALİBRASYONU **39**
3.1 Mikroskopik Simülasyon Modelleri 43
3.2 CORSIM (CORRIDOR SIMULATION) 43
3.2.1 CORSIM'de modelleme yaklaşımı 45
3.2.2 CORSIM'de verilerin simülasyona girilmesi 46
3.2.3 Taşıt takip mantığı 47
3.2.4 Şerit değiştirme mantığı 50
3.3 CORSIM Kalibrasyonu 51
3.4 CORSIM Simülasyon Programı ile Simülasyon Modelinin Oluşturulması 54
3.4.1 Simülasyon için verilerin elde edilmesi 54
3.4.2 Arazi verilerinin CORSIM'e girilmesi 55
3.4.3 CORSIM Run Time Extension (RTE) arabirimi ve kullanılması 57
3.4.4 Kalibrasyon 58
4. METANET MODELİ VE KALİBRASYONU **67**
4.1 METANET Bağ Eşitlikleri 72

4.1.1 İlk bağ ilk kesimdeki (m,i=1) yoğunluk ve ortalama hız hesabı 78
4.1.2 Katılım akımı ($\boldsymbol{qon}; \boldsymbol{m}, \mathbf{1}$) ve katılım kuyruklanma ($\boldsymbol{Wm}, \mathbf{1}$) hesabı 80
4.1.3 En son bağdaki ortalama hız için $\boldsymbol{\rho k + 1}$ hesabı 80
4.2 METANET Modelinin Kalibrasyonu 81
4.2.1 METANET kalibrasyonu 82
4.3 MATLAB Yerleşik İşlevleriyle METANET'in Kalibrasyonu 86
5. MODEL TABANLI ÖNGÖRÜLÜ KONROL 93
5.1 DHS değerlerinin hesaplanmasında kontrol yönteminin seçimi 93
5.2 Model Tabanlı Öngörülü Kontrol 95
5.3 MTÖK Yöntemi ile DHS Uygulaması 97
5.3.1 Tahmin modeli 97
5.3.2 Amaç fonksiyonu (hedef durumu) 98
5.3.3 Kontrol değişkenlerini hesaplayacak eniyileme algoritması 99
5.3.4 Kontrol eylemleri için kısıtlar 100
5.3.5 (k_c+1) anında, kontrol matrisi hesabı için alınacak durum değişkenleri. 101
6. UYGULAMA 103
6.1 DHS Uygulaması 106
6.1.1 Süreç modeli olarak CORSIM 106
6.1.2 Tahmin modeli METANET ve enuygun DHS değerlerinin hesabı 107
6.1.3 Kontrol eyleminin uygulanması 107
6.2 Uygulama Sonuçları ve Değerlendirilmesi 108
6.2.1 Mevcut durum (R00M00) 109
6.2.2 Uygulama 1 (R22M00) 112
6.2.3 Uygulama 2 (R02M00) 114
6.2.4 Uygulama 3 (A01M00) 117
6.2.5 Uygulama 4 (R00M11) 119
6.2.6 Uygulama 5 (R00M21) 122
6.2.7 Uygulama 6 (RXXM11) 124
6.2.8 Uygulama 7 (RXXM21) 128
7. SONUÇLAR 133
KAYNAKLAR 139
EKLER 147
ÖZGEÇMİŞ 157

KISALTMALAR

MTÖK	:Model Tabanlı Öngörülü Kontrol
DHS	:Değişken Hız Sınırlaması
MPC	:Model Predictive Control
VSL	:Variable Speed Limits
AUS	:Akıllı Ulaştırma Sistemleri
ITS	:Intelligent Transport System
ALINEA	:Asservissement Lineaire d'entree Autoroutiere
FHWA	:Federal Highway Administration
RTMS	:Remote Traffic Microwave Sensor
EIS	:Electronic Integrated Systems Inc.
HAR	:Highway Advisory Radio
DBL	:Değişken Bilgi Levhaları
HCM	:Highway Capacity Manual
CORSIM	:CORridor SIMulation
UTCS	:Urban Traffic Control System
TSIS	:Traffic Software Integrated System
TTD	:k anında ilgili bağda taşıtların katettiği toplam mesafe
TTT	:k anında ilgili bağda taşıtların harcadığı toplam zaman
RTE	:Run Time Extension
OH	:Ortalama Hata
OKH	:Ortalama Karesel Hata
OMH	:Ortalama Mutlak Hata
OHY	:Ortalama Hata Yüzdesi
OMHY	:Ortalama Mutlak Hata Yüzdesi
ME	:Mean Error
MSE	:Mean Square Error
MAE	:Mean Absolute Error
MPE	:Mean Percent Error
MAPE	:Mean Absolute Percent Error
LWR	:Lightill-Whitham-Richards Modeli
CTM	:Cell Transmission Model

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Mikroskopik trafik simülasyon yazılımları. 23
Çizelge 2.2 : Varsayılan CORSIM taşıt tipinin özellikleri. 25
Çizelge 3.1 : Mikroskopik trafik simülasyon yazılımları. 44
Çizelge 3.2 : Varsayılan CORSIM taşıt tipinin özellikleri. 47
Çizelge 3.3 : Varsayılan taşıt takip duyarlılık faktörü. 50
Çizelge 3.4 : Ana yol ağına katılan (O-1) trafik akım değerleri. 57
Çizelge 3.5 : Ana yol ağına katılan (O-1) trafik akım değerleri. 60
Çizelge 3.6 : Gözlemler ve CORSIM çıktılarının karşılaştırılması. 65
Çizelge 4.1 : METANET modelinde kalibre edilecek parametreler. 81
Çizelge 4.2 : metanet1 model girdileri ve vektörel boyutları 84
Çizelge 4.3 : %95 Güven aralığında kestirilen v*free*, *ρcritic*, ve *a* değerleri. 86
Çizelge 4.4 : Eniyileme için seçilen ilkdeğer ve sınır vektörlerine ait değerler. 87
Çizelge 4.5 : Kalibre edilmiş METANET parametreleri. 90
Çizelge 4.6 : CORSIM ve METANET çıktılarının Teil's U1 istatistikleri. 90
Çizelge 6.1 : Kontrol uygulamaları. 104
Çizelge 6.2 : DHS değerleri. 107
Çizelge 6.3 : R00M00, şok dalgası önce ve sonrası ortalama hızlar. 109
Çizelge 6.4 : R00M00, şok dalgası öncesi ve sonrası ortalama yolculuk süreleri. 110
Çizelge 6.5 : R22M00, şok dalgası önce ve sonrası ortalama hızlar. 112
Çizelge 6.6 : R22M00, şok dalgası öncesi ve sonrası ortalama yolculuk süreleri. 113
Çizelge 6.7 : R02M00, şok dalgası önce ve sonrası ortalama hızlar. 115
Çizelge 6.8 : R02M00, şok dalgası önce ve sonrası ortalama yolculuk süreleri. .. 115
Çizelge 6.9 : A01M00, şok dalgası önce ve sonrası ortalama hızlar. 118
Çizelge 6.10 : A01M00, şok dalgası önce ve sonrası ortalama yolculuk süreleri. .. 118
Çizelge 6.11 : R00M11, şok dalgası önce ve sonrası ortalama hızlar. 120
Çizelge 6.12 : R00M11, şok dalgası önce ve sonrası ortalama yolculuk süreleri. .. 120
Çizelge 6.13 : R00M21, şok dalgası önce ve sonrası ortalama hızlar. 123
Çizelge 6.14 : R00M21, şok dalgası önce ve sonrası ortalama yolculuk süreleri. .. 123
Çizelge 6.15 : RXXM11, şok dalgası önce ve sonrası ortalama hızlar. 126
Çizelge 7.1 : RXXM11, şok dalgası önce ve sonrası ortalama yolculuk süreleri. 126
Çizelge 7.2 : RXXM21, şok dalgası önce ve sonrası ortalama hızlar. 129
Çizelge 7.3 : RXXM21, şok dalgası önce ve sonrası ortalama yolculuk süreleri. 129
Çizelge A.1 : RXXM21, şok dalgası önce ve sonrası ortalama yolculuk süreleri. 148

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : O-1 çalışma kesimi. 2
Şekil 1.2 : MTÖK'ün yapısı. 3
Şekil 2.1 : Otoyol yönetim sistemini oluşturan AUS bileşenleri. 7
Şekil 2.2 : Otoyol katılım kontrolü örneği-A94 Münih 9
Şekil 2.3 : Katılım kontrolü ve temel diyagramı. 12
Şekil 2.4 : Dinamik trafik kontrolün şematik gösterimi 17
Şekil 2.5 : İndüktif dedektörün bileşenleri. 19
Şekil 2.6 : RTMS. 20
Şekil 2.7 : %85 hızın gösterildiği hız dağılımı. 23
Şekil 2.8 : Temel diyagram. 26
Şekil 2.9 : Bir otoyol kesiminde uygulanan hız sınırları. 27
Şekil 2.10 : Şok dalgalarının oluşumu. 28
Şekil 2.11 : Şişeboynu örneği. 29
Şekil 2.12 : Taşıt içi bilgi sistemi ile DHS gösterimi 30
Şekil 2.13 : Yol üzerinde radyo frekansının gösterildiği bilgi levhası örneği. 30
Şekil 2.14 : İngiltere otoyolundaki DHS uygulaması ve değişken bilgi levhası. 31
Şekil 2.15 : Değişen şartlara göre hız sınırının elle değiştirilmesi 31
Şekil 2.16 : Öğrencilerin giriş çıkış saatlerine göre aktif olan trafik ışığı. 31
Şekil 2.17 : Doğrudan dağıtılmış sistemler. 32
Şekil 2.18 : Almanya'da DBL ve DHS'ların kullanımlarına dair bir uygulama 33
Şekil 2.19 : DBL tipleri. 34
Şekil 3.1 : CORSIM ekosistemi 45
Şekil 3.2 : Erlang dağılımı ve taşıt aralıklarının hesabı. 48
Şekil 3.3 : TSIS'de olasılık dağılımının girilmesi. 48
Şekil 3.4 : Keyfi şerit değiştirme. 50
Şekil 3.5 : O-1 Otoyolunda ölçüm yapılan kesitler. 54
Şekil 3.6 : Yol ağına ait geometrik veriler ve dedektör noktaları. 56
Şekil 3.7 : TRAFED'de hazırlanmış yol ağı. 56
Şekil 3.8 : Ulaştırma sisteminde talep kapasite ilişkisi. 59
Şekil 3.9 : Gözlenen ve düzeltilen talep değerleri. 59
Şekil 3.10 : Kalibrasyon öncesi CORSIM hız ve gözlenen hız değerleri 61
Şekil 3.11 : Kalibrasyon öncesi CORSIM akım ve gözlenen akım değerleri. 61
Şekil 3.12 : Kalibrasyon sonrası CORSIM hız ve gözlenen hız değerleri. 62
Şekil 3.13 : Kalibrasyon sonrası CORSIM akım ve gözlenen akım değerleri. 62
Şekil 4.1 : METANET modelinde bağ, kesim ve kesimlerdeki akımlar. 72
Şekil 4.2 : Katılımın anaakım ortalama hızı üzerindeki etkisi. 76
Şekil 4.3 : METANET geometrisinde şerit iptali durumu. 77
Şekil 4.4 : METANET ağına eklenen sanal bağlar. 78
Şekil 4.5 : Çalışma bölgesinin CORSIM ve METANET ağ modelleri. 82
Şekil 4.6 : Matlab komut satırından metanet1 modelinin çalıştırılması. 84
Şekil 4.7 : Yoğunluk hız verilerinden türetilen dengedeki hız eğrisi (Vd) 86

Şekil 4.8 : Eniyileme için alt,üst ve başlangıç vektörlerinin tanımlanması. 88
Şekil 4.9 : Amaç fonksiyonu için oluşturulan metanetcalibration.m betiği. 88
Şekil 4.10 : Eniyileme için oluşturulan baslakalibrasyon.m betiği. 89
Şekil 4.11 : Kalibre edilmiş METANET'in bağlardaki ortalama hız tahmini. 91
Şekil 4.12 : Kalibre edilmiş METANET'in bağlardaki yoğunluk tahmini. 91
Şekil 4.13 : Kalibre edilmiş METANET'in bağlardaki akım tahmini. 92
Şekil 4.14 : Kalibre edilmiş METANET'in bağlardaki kuyruklanma tahmini. 92
Şekil 5.1 : MTÖK yönteminin işleyişi. 96
Şekil 6.1 : Çalışma bölgesi. 103
Şekil 6.2 : R00M00 hız deseni grafiği. 110
Şekil 6.3 : R00M00 yoğunluk deseni grafiği. 111
Şekil 6.4 : R00M00 arz-talep grafiği. 111
Şekil 6.5 : R00M00 kuyruklanma grafiği. 111
Şekil 6.6 : R22M00 hız deseni grafiği. 113
Şekil 6.7 : R22M00 yoğunluk deseni grafiği. 113
Şekil 6.8 : R22M00 arz-talep grafiği. 114
Şekil 6.9 : R22M00 kuyruklanmaları. 114
Şekil 6.10 : R02M00 hız deseni grafiği. 116
Şekil 6.11 : R02M00 yoğunluk deseni grafiği. 116
Şekil 6.12 : R02M00 arz-talep grafiği. 116
Şekil 6.13 : R02M00 kuyruklanması 117
Şekil 6.14 : A01M00 hız deseni grafiği. 118
Şekil 6.15 : A01M00 yoğunluk deseni grafiği. 118
Şekil 6.16 : A01M00 arz-talep grafiği. 119
Şekil 6.17 : A01M00 kuyruklanmaları. 119
Şekil 6.18 : R00M11 DHS deseni grafiği. 121
Şekil 6.19 : R00M11 hız deseni grafiği. 121
Şekil 6.20 : R00M11 yoğunluk deseni grafiği. 121
Şekil 6.21 : R00M11 arz-talep grafiği. 122
Şekil 6.22 : R00M11 kuyruklanmaları. 122
Şekil 6.23 : R00M21 DHS deseni grafiği. 124
Şekil 6.24 : R00M21 hız deseni grafiği. 124
Şekil 6.25 : R00M21 yoğunluk deseni grafiği. 124
Şekil 6.26 : R00M21 arz-talep grafiği. 125
Şekil 6.27 : R00M21 kuyruklanmaları. 125
Şekil 6.28 : RXXM11 DHS deseni grafiği. 127
Şekil 6.29 : RXXM11 hız deseni grafiği. 127
Şekil 6.30 : RXXM11 yoğunluk deseni grafiği. 127
Şekil 6.31 : RXXM11 arz-talep eğrisi. 128
Şekil 6.32 : RXXM11 kuyruklanması. 128
Şekil 6.33 : RXXM21 DHS deseni grafiği. 130
Şekil 6.34 : RXXM21 hız deseni grafiği. 130
Şekil 6.35 : RXXM21 yoğunluk deseni grafiği. 130
Şekil 6.36 : RXXM21 arz-talep grafiği. 131
Şekil 6.37 : RXXM21 kuyruklanması. 131
Şekil 7.1 : Uygulamaların ortalama hız başarımları. 134
Şekil 7.2 : Uygulamaların ortalama yolculuk süresi başarımları. 135
Şekil 7.3 : Uygulamaların kuyruklanma başarımları. 136

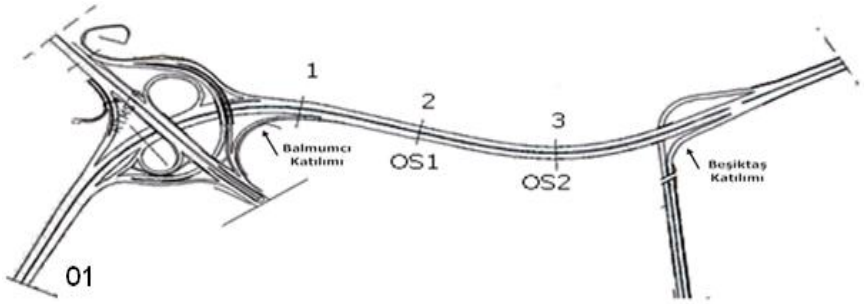
KENTİÇİ OTOYOLLARDA MODEL TABANLI ÖNGÖRÜYE DAYALI DEĞİŞKEN HIZ SINIRLAMASI İLE AKIM DENETİMİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında amaç otoyol trafik akımında uygulanabilir kontrol tekniklerinden biri olan Değişken Hız Sınırlaması (DHS, Variable Speed Limits, VSL) ile iyileştirmeler yapmaktır. Bu iyileştirmeler homojen bir trafik akımı elde edilmesi, trafik akımında oluşan şok dalgalarının, kuyruklanmaların, tıkanıklığın önlenmesi ya da geciktirilmesidir. Bu amaca yönelik çeşitli kontrol stratejileri geliştirilmiştir. Kontrol stratejilerin uygulanması birtakım araç, yöntem ve işlemlerin bir arada kullanılması ve trafik akımına müdahale edilmesini gerektirmiştir.

DHS yapılan çalışma bölgesi 2,5 km uzunluğundadır. İstanbul O-1 otoyolunun Avrupa yakası kısmında, Boğaziçi Köprüsü yakınındadır. Yol kesiminde Balmumcu ve Beşiktaş olmak üzere iki katılım (Şekil 1) bulunmaktadır. O-1, akşam saatlerinde trafiğin Avrupa'dan Asya akış yönünde trafik tıkanıklığının uzun süreli yaşandığı bir kentiçi otoyoludur. Yolun geometrisinde katılımlardan kaynaklanan şişeboynu ve yatay kurba düzensizlikleri mevcuttur. Trafik akımında yaşanan artışlar bu bölgeden akım yukarı kesime doğru yayılan şok dalgaları ve kuyruklanmalar oluşturmaktadır. Çalışma bölgesinin mevcut durumuna bakıldığında, benzetim anının 35.dakikasında Beşiktaş katılımı ile kesişen anaakım kesimi üzerinde başlayan şok dalgası akım yukarı yönünde yayılmakta ve trafik tıkanmaktadır. Şok dalgası oluştuktan sonra ortalama hızlar 94 km/sa'ten 37 km/sa düzeyine düşmekte taşıt başına ortalama yolculuk süresi ise 102 saniyeden 365 saniyeye yükselmektedir.

Yol kesiminde şişeboynu oluşan kesimden, akım yukarıda başlayan hız sınırlama uygulaması bu bölgeye gelecek olan trafik akımını azaltarak şok dalgalarının oluşumunu ve şiddetini engelleyebilecektir. Fakat uygulanan hız sınırının yeni bir şok dalgasına neden olmaması için yol kesiminde gerilerden başlayarak uygun Değişken Hız Sınırlaması (DHS) değerinin uygulanması gerekmektedir. Bu amaçla son zamanlarda literatürde adı geçen bir "optimal kontrol" yaklaşımı olan Model Tabanlı Öngörülü Kontrol (MTÖK) yönteminden yararlanılmıştır. Klasik bir kontrol problemi *(kapalı döngü kontrol*), süreçte sapma olduğu anda kontrol yaparak süreci arzulanan/hedef duruma getirmeye çalışır. Açık döngü kontrol olarakta bilinen ileri beslemeli kontrol yönteminde, klasik yöntemin (kapalı döngü kontrol) aksine süreçte sapma olmadan kontrol uygulanır. Bunun için olabilecek sapmaları tahmin eden sistem modeli kullanılır. Bu sistem modeli sayesinde süreci hedeflenen/arzulanan durumda tutan kontrol sinyalleri hesaplanır. Optimal kontrol, seçilen amaç fonksiyonuna (başarım fonksiyonu) dayanan, belirlenmiş süre için eniyi başarımı veren kontrol sinyallerini bulan kontrol yöntemidir. MTÖK ise geri besleme özelliği ile optimal kontrol yönteminin geliştirilmiş şeklidir. Kısaca süreçten ölçülen güncellenmiş durum değişkenleri ile yapılan ardışık optimizasyondur. Seçilen zaman aralığında $(T_{ö})$ süreç için tahmin ufku (N_p) boyunca bu zaman aralıkları için tahminler yapılır. Yine bu zaman aralıklarında seçilen hedef durumuna (amaç fonksiyonuna) göre süreç için bir kontrol vektörü hesaplanır. Bu vektörün eleman



Şekil 1: Çalışma bölgesi ve gözlem istasyonları.

sayısı kontrol ufku değerine (N_c) eşittir ve bu değer her zaman tahmin ufkundan küçük olur. Hesaplanan kontrol vektörünün sadece ilk elemanı sürece kontrol eylemi olarak uygulanır.

MTÖK yöntemi ile her örnekleme zaman aralığında elde edilen DHS kontrol değerleri çalışma bölgesi üzerindeki ilgili kesimlere uygulanır ve bir sonraki örnekleme zaman adımında oluşacak yeni duruma göre yeni DHS değerleri tekrar hesaplanarak ilgili kesimlere tekrar uygulanır. MTÖK yöntemi ile çalışma bölgesine DHS uygulamak ve sonuçları değerlendirmek için CORSIM mikroskopik simülasyon programından yararlanılmıştır. CORSIM ile DHS gibi kontrol araçları yardımıyla trafik sürecine müdahale edilebilmektedir. CORSIM'de simülasyon çalışması yapmak için öncelikle çalışma bölgesinin geometrik özelliklerinin yazılıma tanıtılması gerekir. IBB kent haritası ve Google Earth'den yararlanarak CORSIM'de çalışma bölgesine ilişkin geometrik bilgiler girilmiştir. Çalışma bölgesine trafik yüklemesi yapmak için, anaakım ve katılım bağlarındaki talep verilerine ihtiyaç duyulur. Arazide, 16.10.2007 tarihinde Avrupa yakasından Asya yakası yönünde geçişlerin gerçekleştiği trafiğin akşam zirve saatinde, 16:23-17.30 saatleri arasında, taşınabilir kameralar ile çekimler yapılmıştır. Daha sonra kayıtlar incelenerek, haritalar ve GPS cihazlarından faydalanarak üç adet gözlem istasyonu belirlenmiştir. Bu istasyonlardan yapılan taşıt sayımları sonucunda trafik akımının türetilmiş değişkenleri (hız, yoğunluk ve akım) hesaplanmıştır. Modele giriş noktalarından gözlenen talep değerleri, taşıt ve sürücü performansı ile ilgili parametreler girilerek, CORSIM 65 dakika süre için kalibre edilmiştir. Kalibrasyon sonucunda CORSIM'in çalışma bölgesi trafik akımını tahmin başarısını ölçmek için istatistik sınamalar gerçekleştirilmiştir.

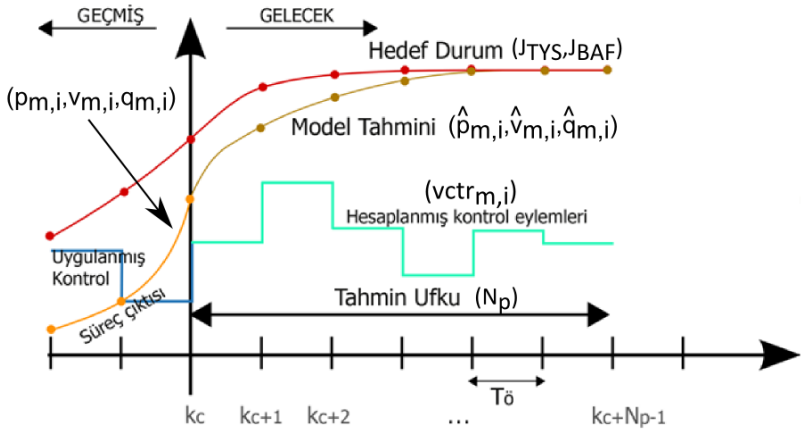
MTÖK uygulaması için gerekli olan trafiğin tahmin modeli olarak METANET kullanılmıştır. METANET ikinci dereceden deterministik bir trafik akım modelidir. Modelle ilgili literatürde trafik akımını modelleyen bir çok başarılı çalışma mevcuttur. METANET modeli trafik akımındaki kararsızlıkları, şok dalgalarını ve şişeboynu etkilerini yansıtabilmektedir. Bu nedenle de çalışma bölgesine uygun olduğu düşünülmüştür. Bununla birlikte METANET modelinin en kullanışlı tarafı bu modele DHS değişkeninin eklenebilmesidir. METANET modelinin MTÖK'te kullanılabilmesi için öncelikli olarak çalışma bölgesi trafik akımının karakteristiğini yansıtacak şekilde kalibre edilmesi gerekmektedir. METANET modelinin kalibrasyonu için MATLAB "optimizasyon toolbox" da yer alan *fmincon* fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyon ardışık kuadratik programlama algoritması kullanan nümerik eniyileme programıdır. Kalibrasyon için amaç fonksiyonu, METANET hız ve yoğunluk tahminleri ile CORSIM hız ve yoğunluk değerleri arasındaki farkın karesidir. METANET modelinin kalibrasyonu sonucunda METANET modeline ait

$(\tau, \kappa, \delta, \eta_{high}, \eta_{low}, \rho_{max}\ \varphi, \gamma, v_f, \rho_{cri}, a)$ parametreleri elde edilmiştir. Kalibre edilmiş METANET modelinin başarımı istatistik olarak sınanmıştır.

Çalışmada kullanılan kontrol stratejisi MTÖK yöntemi ile, sürecin *(k_c)* ayrık zaman adımından tahmin ufkunun sonuna *(k_c+ N_p-1)* kadar süreci hedef durumunda tutacak ya da getirmeye çalışacak optimal kontrol değerleri (DHS değerleri,$vctr_{m,i}$) kestirilmektedir. (Şekil 2). Kontrol değerleri *(k_c)* adımından *(k_c+N_c-1)* kontrol ufkuna kadar hesaplanır. Kontrol değişkeninin (DHS) her ayrık zaman adımı (kc) için hesaplanan değerleri matematik programlama problemi ile çözülür. Amaç fonksiyonu ve kısıtlara bağlı olarak programlama problemi doğrusal ya da doğrusal olmayan programlama teknikleri kullanılır. MTÖK yöntemi buna bağlı olarak doğrusal MTÖK ya da doğrusal olmayan MTÖK adını alır. MTÖK yönteminde kullanılan süreç modelleri türevi alınamayan karmaşık eşitliklerden oluştuğundan eniyileme sürecinde nümerik çözüm yöntemleri kullanılır. Çalışmada, MATLAB içinde bulunan nümerik çözüm yöntemlerinden biri olan *patternsearch* eniyileme algoritması kullanılmıştır. Bulunan hız değerlerinden (DHS) sadece *(k_c)* adımı için hesaplananlar MTÖK yöntemi gereğince sisteme uygulanmıştır.

MTÖK kontrol yöntemini oluşturan ögeler amaç fonksiyonu (hedef durum), süreç tahmin modeli (sistem modeli) ve kontrol değişkenine ait kısıtlardan oluşur. Süreç tahmin modeli olarak daha önce kalibre edilmiş METANET modeli kullanılmıştır. Ancak süreç tahmin modelinde kontrol değişkenlerine ihtiyaç duyulduğundan, METANET ortalama hız eşitliğine DHS kontrol değişkeni eklenmiştir. MTÖK amaç fonksiyonu trafikte hedeflediğimiz durumu yansıtmalıdır. Çalışmada bu amaçla iki farklı amaç fonksiyonu kullanılmıştır. Bunlardan ilki, çalışma bölgesindeki tahmin ufku boyunca, yolculuk süresini azaltmayı, şok dalgalarını önlemeyi amaçlayan amaç fonksiyonudur. Bu fonksiyon;

$$J_{TYS}(k_c) = T_{\ddot{o}} \sum_{j=k_c}^{k_c+N_p-1} \left\{ \sum_{(m,i)\varepsilon\mathcal{M}} \rho_{m,i}(j)\lambda_m L_{m,i} + \sum_{m\varepsilon\mathcal{O}} w_{m,1}(j) \right\} \quad (1)$$



Şekil 2: MTÖK yöntemi.

Eşitliğiyle gösterilir. Eşitlikte $\rho_{m,i}(j)$, m bağındaki i'ninci kesimdeki j adımındaki yoğunluk, λ_m, m bağının şerit sayısı, $L_{m,i}$, m bağındaki i kesiminin uzunluğu, $\mathcal{M}$, çalışma bölgesindeki bağ ve kesimleri içeren kümeyi temsil etmektedir. Bu çalışmada her bağ bir kesim içerdiğinden $\{m,i=1\}$ olur . $\mathcal{O}$ sadece kuyruklanma olabilecek kesimleri gösterir. Kuyruklanma anakımın girdiği ilk bağın gerisinde ve katılımlarda oluşur. $w_{m,1}(j)$ kuyrukta bekleyen taşıt sayısıdır.

İkinci amaç fonksiyonu, bağlar arasındaki yoğunluk farkını azaltarak, trafik akımını homojenleştirmeyi amaçlamaktadır.

$$J_{BAF}(k_c) = \sum_{j=k_c}^{k_c+N_p-1} \sum_{(m,i)\varepsilon\mathcal{M}} \left(\rho_{m,i}(j) - \rho_{m,i+1}(j)\right)^2 \quad (2)$$

Dinamik DHS çalışmasının gerçekleştirilmesi (dinamik optimal DHS probleminin çözülmesi) için birçok aracın bir araya getirilmesi ve bütünleşik olarak çalıştırılması gerekmiştir. Benzetim yazılımı CORSIM paket bir yazılım olmasına rağmen ürettiği çıktıların kullanılabilmesi için Run Time Extension (RTE) adı verilen dinamik kütüphanelere ihtiyaç duyulmaktadır. Dinamik kütüphanelerin yazılması işlemi, CORSIM geliştirme paketiyle gelen CORSIM'e ait statik kütüphaneler kullanılarak VC++ dilinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada iki adet RTE modülü geliştirilmiştir. İlk RTE modülü, METANET kalibrasyonu için CORSIM'e yerleştirilen dedektörlerden yoğunluk, hız ve akım verilerini 10 saniyelik aralıklarla veritabanına yazdırmaktadır. İkinci RTE modülü, MTÖK uygulaması sırasında CORSIM'den durum değişkenlerini her kontrol adımında almakta ve DHS değerlerinin hesaplanacağı MATLAB içinde bulunan *patternsearch* fonksiyonunu çalıştırmaktadır. Hesaplanan kontrol değerlerinin (DHS değerleri) CORSIM'e uygulanması bu modül tarafından yapılmaktadır. Bu RTE kütüphanesi ayrıca CORSIM'in ürettiği yeni verileri veritabanına yazarak, eylemlerin başarımını sonradan karşılaştırma olanağı sağlamaktadır.

MATLAB içinde kullanılan *pattersearch* fonksiyonu, nümerik ve sınır koşullu eniyileme algoritması içerir. Eniyileme için gereken başlangıç kontrol matrisleri *fmincon* kadar eniyileme sonuçlarını etkilemediğinden tercih edilmiştir. Eniyileme için kontrol matrisi sınır değerleri; endüşük 50 km/sa, enyüksek ise 100 km/sa olarak seçilmiştir. Bu seçim yapılırken serbest hız sınır değeri (100 km/sa) ve kritik hız sınır (60 km/sa) değeri dikkate alınmıştır.

Çalışma bölgesi üzerinde farklı DHS uygulamaları geliştirilmiş ve uygulanmıştır. DHS uygulamasından önce anaakıma herhangi bir kontrol uygulamadan sadece katılımlara sabit hız sınırı uygulanmıştır. Katılımlara ait çalıştırılan 49 adet hız sınırı senaryosu sonucunda anaakım ve katılımlarda en az kuyruklanma görülen senaryo hem Balmumcu hem de Beşiktaş katılımı için 20 km/sa hız sınırı uygulamasıdır. Uygulama sonucunda anaakım üzerindeki taşıtların toplam yolculuk süreleri %4 azalmıştır. Beşiktaş katılımında kuyruklanmalar artmış, şok dalgası oluşumu ötelenmiş ve ancak hızların standart sapmasında azalma görülmemiştir. DHS'den farklı diğer uygulama, Beşiktaş katılımda gerçekleştirilen katılım kontrol uygulamasıdır. Katılım kontrolü için ALINEA algoritması seçilmiştir. Algoritma için endüşük katılım değeri 30 taşıt/dak., hedef işgal değeri (O) %20, düzeltme katsayısı

K_r=70 taş/saat olarak alınmıştır. Simülasyon sonunda, ALINEA uygulaması mevcut durum dahil tüm uygulamalar içinde en iyi ortalama hız ve yolculuk sürelerine sahip uygulama olmuştur. Ancak kuyruklanma değerleri açısından en başarısız uygulamadır. Uygulama, 120. dakikanın sonunda Beşiktaş katılımının kuyruk uzunluğunu 3950 taşıta çıkartmıştır.

MTÖK yönteminden yararlanarak yapılan kontrol uygulamaları iki gruba ayrılmıştır. İlk grupta sadece anaakıma Eşitlik (1) ve Eşitlik (2) amaç fonksiyonlarını kullanarak kestirilen DHS değerleri ilgili bağlara uygulanmıştır. Bu grupta şok dalgası oluşumu ve yolculuk sürelerinde olumlu sonuçlar alınamamıştır. Katılımlardaki kuyruklanmalar kaybolurken, anaakım kuyruklanmaları artmıştır. Buna karşın şok dalgası sonrası ve tüm simülasyon boyunca ortalama hızlara ait standart sapmalar azalmıştır.

İkinci grupta, anaakıma ek olarak katılımlara DHS uygulanmıştır. Anaakım DHS değerleri birinci gruptakine benzer biçimde Eşitlik (1) ve Eşitlik (2)'de görülen amaç fonksiyonlarını enküçükleyecek şekilde kestirilmiştir. Katılımlara uygulanan DHS değerleri, eniyileme sonucu elde edilen kontrol matrisinin METANET modelinde ürettiği katılım akımlarından türetilmiştir. Bu akımlar CORSIM'de, katılıma yerleştirilen dedektörlerden alınan yoğunluk değerlerine bölünerek katılımlardaki DHS değerleri bulunmuştur.

Simülasyon sonucunda (1) nolu eşitliğe göre yapılan kontrol uygulaması, ortalama hızları şok dalgası öncesi (%40), sonrası (%3) ve toplamda (%22) düşürmüştür. Buna karşın, ortalama hızlara ait standart sapmayı şok dalgası sonrası (%53) ve toplamda (%49) azaltmıştır. Ortalama yolculuk sürelerine bakıldığında, şok dalgası öncesi yolculuk süreleri ve standart sapmalar artarken, şok dalgası sonrası ve toplamda yolculuk süreleri %17 ve %5, standart sapmalar ise %42 ve %45 oranında azalmıştır. Uygulamanın kuyruklanma değeri mevcut duruma göre 450 taşıt artışla 1500 taşıt olmuş, kuyruklanmalar anakımdan Beşiktaş akımına kaymıştır. (2) numaralı amaç fonksiyonunu kullanan bu gruptaki diğer uygulama, ortalama hızları şok dalgası öncesi 94 km/sa ten 55 km/sa'te, şok dalgası sonrası 37 km/sa'ten 36 km/sa'te, tüm simülasyon zamanı boyunca 54 km/sa'ten 42 km/sa'te düşürmüştür. Ortalama hıza ait standart sapma ise şok dalgası öncesi %73 oranında artarken, şok dalgası sonrası %54 ve tüm simülasyon boyunca %41 oranında düşmüştür. Ortalama yolculuk süreleri bu uygulamayla şok dalgası sonrası ve toplamda %19 ve %8.31 oranında gerileyerek taşıt başına düşen yolculuk süresi şok dalgası sonrası 70 saniye, toplamda ise 24 saniye azalmıştır. Şok dalgası sonrası ve toplamda ortalama yolculukların standart sapması %48 ve %50 oranında düşmüştür. Kuyruklanma (1) nolu eşitliği kullanan uygulamaya benzer şekilde Beşiktaş katılımına kaymış ve toplam simülasyon süresi sonunda 1400 taşıt olmuştur**.** Uygulama ayrıca mevcut durumda görülen şok dalgasını sönümleyebilmiştir.

Bağ uzunluklarının kısa ve yoğunluğun yüksek olduğu otoyol kesimlerinde yolculuk sürelerinin enküçüklenmesi yerine yol kesimlerinde yoğunluk farklarının enküçüklenmesinin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Bu uygulamayla, hızların standart sapması ve taşıt başına düşen yolculuk süreleri azalmış, şok dalgası sönümlenmiş, kuyruklanma Beşiktaş katılımına kaymış ve anaakımdaki kuyruklanmalar önlenmiştir. Buna karşın ortalama hızlar düşmüştür. Ancak hız sınırlarının, mevcut durumdaki hız değerinden düşük hızlar için geçerli olması nedeniyle, değişken hız sınırı uygulamalarının kaçınılmaz olarak ortalama hızları düşürmesi beklenen bir sonuçtur.

FLOW CONTROL IN URBAN FREEWAYS BY APPLYING VARIABLE SPEED LIMITS IN A MODEL-PREDICTIVE CONTROL FRAMEWORK

SUMMARY

The aim of this study is to improve freeway traffic flow on a regular basis. For this to be achieved Variable Speed Limits (VSL) is used to obtain a homogeneous traffic flow by eliminating shock waves, preventing or delaying traffic congestion.

Variable Speed Limits is applied to the 2.5 km segment of O1 Freeway, which is located on the European side of Istanbul, near the Bosphorus Bridge (Figure 1). The study segment has three entry (origin) nodes and one exit (destination) node. Congestion occurs during evening rush hours in direction from Europe to Anatolian side. Geometrical irregularities are available such as a horizontal curve and a bottleneck. The locking at the current state of the traffic flow within the working zone, at the 35^{th} minutes of the simulation time, shock waves are emerged propagating from link 5 to upstream links. After the formation of the shock wave, the average speeds reduce from 94 km/h to 37 km/h, mean travel time per vehicle increase from 102 seconds to 365 seconds.

Starting a VSL application from upstream area can reduce the amount of traffic flowing to the downstream segments where shock waves or queue occurred. Therefore, the occurrence and severity of shock waves can be diminished. However, to avoid a new shock wave occurrence, VSL should start back further upstream and should be applied in coordinated way. For this purpose, "optimal control" approach of the Model-Based Predictive Control (MPC) method recently mentioned in the literature was used. An optimal control model for VSL can be designed by selecting a traffic flow model as system model.

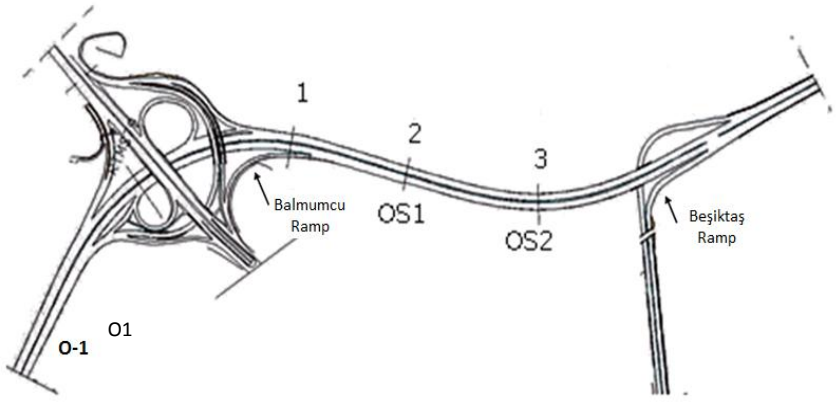


Figure 1: Working zone of O-1 freeway.

For testing the estimated VSL effects on the zone, CORSIM microscopic simulation software is used. CORSIM RTE has the capability to intervene in the system with the VSL control device. As part of the way for the creation of CORSIM simulation model, the road was coded into CORSIM network format by aid of the maps (google earth and Istanbul Municipality Maps). Traffic volume data are obtained by video recording for calibration of CORSIM model. The record was taken from 16:23 to 17:27 for evening peak period, in 16 October 2007. Then for examining the records, observation stations (OS1 and OS2 in Figure 1) were set using the maps and on site measurement by GPS devices. Speed and volume data were measured in one-minute interval. Total 65 minutes of surveys were used for calibration.

To denote traffic flow and use as system model in MPC, a second-order traffic flow model METANET was selected which has advantages to other traffic models. Achievements can be found in the literature by theoretical and practical studies. METANET can model traffic flow instabilities, shock waves and reflects the effects of bottlenecks. At each control decision interval, the effects of the VSL actions can be examined. Calibration of METANET is necessary to reflect the characteristics of O1 traffic flow. Calibration step is carried out by MATLAB functions named "optimization toolbox". Optimization toolbox consist of many optimization method and algorithms. In the study, we preferred *fmincon* numeric optimization with the sequential quadratic programming algorithm in the calibration process.

Estimation of optimum control signals are achieved by a freeway controller based on Model Predictive Control methodology. Control problem structure is not a convex problem, so a numeric optimization has to be used in order to estimate optimal control signals. Another optimization toolbox method calling *pattersearch* is selected for this computation process.

We formulated two types of objective function to estimate control signals. Following equation (1) and (2) are coded as matlab function and inputted to pattersearch for minimization.

$$J_{TYS}(k_c) = T_o \sum_{j=\mathrm{k_c}}^{\mathrm{k_c}+N_p-1} \left\{ \sum_{(m,i)\varepsilon\mathcal{M}} \rho_{m,i}(j)\lambda_m L_{m,i} + \sum_{m\varepsilon\mathcal{O}} w_{m,1}(j) \right\} + \sum_{j=k_c}^{k_c+N_p-1} \sum_{(m,i)\varepsilon\mathcal{M}} \left(\mathrm{vctr_{i,m}}(j) - \mathrm{vctr_{i+1,m}}(j)\right)^2 \quad (1)$$

$$J_{BAF}(k_c) = \sum_{j=k_c}^{k_c+N_p-1} \sum_{(m,i)\varepsilon\mathcal{M}} \left(\rho_{m,i}(j) - \rho_{m,i+1}(j)\right)^2 + \sum_{j=k_c}^{k_c+N_p-1} \sum_{(m,i)\varepsilon\mathcal{M}} \left(\mathrm{vctr_{i,m}}(j) - \mathrm{vctr_{i+1,m}}(j)\right)^2 \quad (2)$$

Subject to; $50\ \mathrm{kmhr^{-1}} \leq vctrl_{i,m} \leq 10\ \mathrm{kmhr^{-1}}$

T_o is the length of the sample time interval, $\rho_{m,i}(j)$ is the density in segment i of link m at control time step kc. $L_{m,i}$ is the length of a segment i in link m. λ_m is the number of lanes in link m, $\omega_{m,1}$ is the number of vehicles queuing at behind origins ($\mathcal{O}$). $vctrl_{m,i}(j)$ is VSL control signal in segment i of link m in the study region. The concept of objective function (1) is minimizing spending travel time on freeway segments and queues. Objective function (2) have been proposed to minimizing the density difference between links for a homogeneous flow. An extra term is added to the equation (1) and equation (2) that equalizes and penalize the speed variation betweeen links under different speed limits.

This study covers seven control applications each of which corresponds to different control structure:

- Application-1:20km/h constant speed limit to on ramps
- Application-2:20km/h constant speed limit to on ramps of Beşiktaş
- Application-3:Ramp metering control on ramps of Beşiktaş using ALINEA algorithm
- Application-4:MPC method estimating VSL speeds for mainstream correspond to Equation (1)
- Application-5:MPC method estimating VSL speeds for mainstream correspond to Equation (2)
- Application-6:MPC method estimating VSL speeds for mainstream and ramps correspond to Equation (1)
- Application-7:MPC method estimating VSL speeds for mainstream and ramps correspond to Equation (2)

Displayed speed limit for on-ramps have been calculated according to following equation:

$$v_{kont,\mathrm{r,m,i}}(k_c) = \begin{cases} 10\ \mathrm{kmhr^{-1}}, & \frac{q_{on,m,i}(\mathrm{k_c})}{\lambda_{\mathrm{m,r}}\,\rho(\mathrm{k_c})} \leq 10\ \mathrm{kmhr^{-1}} \\ 20\ \mathrm{kmhr^{-1}}, & \mathrm{w_{m,r}} \geq 250\ \text{vehicle} \\ \frac{q_{on,m,i}(\mathrm{k_c})}{\lambda_{\mathrm{m,r}}\,\rho(\mathrm{i})}, & \frac{q_{on,m,i}(\mathrm{k_c})}{\lambda_{\mathrm{m,r}}\,\rho(\mathrm{k_c})} > 10\ \mathrm{kmhr^{-1}} \end{cases} \quad (3)$$

Where $v_{kont,\mathrm{r,m,i}}(k_c)$ is speed limit applied to on-ramps at control time step (k_c). N_p is prediction horizon, q_{on}, ρ and $\mathrm{w_{m,r}}$ are ramp flow, ramp density and queue on ramp at k_c time step respectively. Total simulation time was extended to 120 minutes with keeping constant the demand from 65th minute to end of the simulation time.

The VSL impacts were criticized under different indicators such as travel times per vehicle, shock wave effects, mean travel speed, standard deviation of mean speed. The primary results show that Application 2 is capable of reducing the total travel time per vehicle as %5 percent against increasing queue length on Beşiktaş. But total queue is 50 vehicles less than uncontrolled case. In addition it shifted the beginning of the shock wave without making changes on average speeds. It can be seen that there is a trade-off between mainstream and ramps queues.

MPC in Application 7, it is observed desirable results during which VSL responses lower average travel time improvement as %8.31, lower standart deviation of mean speed, damping the shock waves with reducing the average speed.

1. GİRİŞ

Trafik tıkanıklığı büyük kentlerin önemli sorunları arasında yer alır. Kentsel alanlarda nüfus ve taşıt sayısındaki artış ile birlikte kentiçi otoyollar da tıkanmaya başlamıştır. Çözüm olarak yeni yolların yapılması, toplu taşımada etkinliğin arttırılarak bütünleşmenin sağlanması veya altyapının daha verimli kullanılması seçeneklerinin kullanımı gündeme gelmektedir. Yeni yolların inşası ve toplu taşımada etkinliğin arttırılarak bütünleşmenin sağlanması uzun vadeli projelerde yer alan, büyük yatırımlar gerektiren yüksek maliyetli uygulamalardır. Bunun yanında altyapının daha verimli kullanılması için trafik yönetimi çalışmaları yapılır. Bunlar taşıt trafiğini düzene sokmak ve trafik akımlarının kabul edilebilir hızla akmalarını sağlamak amacında olan uygulamalardır. Otoyollarda Akıllı Ulaştırma Sistemleri (AUS, Intelligent Transportation Systems, ITS) bileşenleri ile yapılan dinamik trafik kontrolüne yönelik uygulamalar da bu amaçlarla yapılır.

Pek çok ülkede AUS bileşenlerinden biri olan Değişken Hız Sınırlaması[1] (DHS,Variable Speed Limits,VSL) ile kural tabanlı veya daha gelişmiş kontrol algoritmaları kullanılarak başarılı kontrol uygulamaları yapılmaktadır. Kural tabanlı uygulamalar ile ilgili Almanya, İngiltere, ABD gibi ülke otoyollarında trafik işletimi ve güvenliğine dair tatmin edici sonuçlar alınmıştır (Wilkie, 1997; Allaby, 2006; Robinson, 2000). Son yıllarda DHS ile ilgili model tabanlı dinamik kontrol modellemesi örneklerine de rastlanılmaktadır (Hegyi, 2004).

Bu tez çalışmasında trafik tıkanıklığının ve şok dalgaları gibi trafik olaylarının yaşandığı İstanbul O-1 kentiçi otoyolunun Boğaziçi Köprüsü'ne yakın olan ve trafiğin Avrupa-Asya yönünde aktığı 2,5 km'lik kesiminde DHS uygulaması yapılmıştır (Şekil 1.1). Uygulama zamanı tekrarlı trafik tıkanıklığını içine alan akşam zirve saatidir. Bu uygulamanın amacı; şok dalgalarının sönümlenmesi, trafik

[1] Değişken Hız Sınırlamasının İngilizce karşılığı Variable Speed Limits olarak geçmektedir. Uluslararası Literatürde bu kelimenin İngilizce kısaltması VSL'dir. Bundan sonra bu kelime yerine Türkçe kısaltması olan DHS kullanılacaktır.

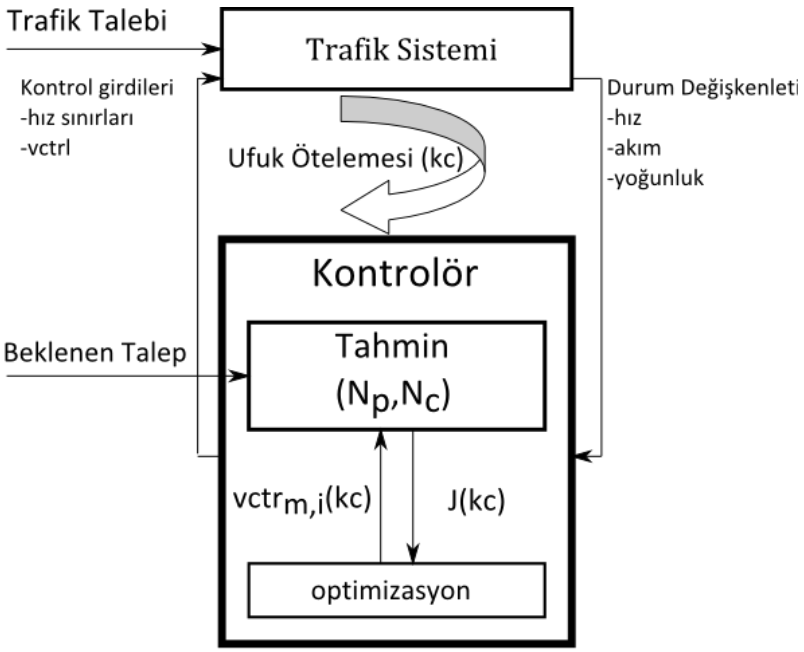


Şekil 1.1: O-1 çalışma kesimi.

tıkanıklığının giderilmesi ya da geciktirilmesi, homojen trafik akımının elde edilmesidir.

Çalışma bölgesinde değişen trafik akım koşulları nedeniyle dinamik hız kontrol çalışmasına gerek duyulur. Bunun yanında trafikte meydana gelecek olaylar ya da koşulları önceden kestiren bir kontrol modelinin kullanılması daha kazançlı olacaktır. Örneğin, akım aşağı kesiminde meydana gelen ya da gelecek olan bir şok dalgası ya da tıkanmanın kestirilmesi ile akım yukarı kesimde bölgeye giren trafik sınırlanarak, bu şok dalgasının çözülmesi sağlanabilecektir. Dinamik, trafik akımında meydana gelecek değişimleri önceden tahmin eden, yani tahmin modeline dayalı, DHS yapılarak, trafik akımının işletme ve güvenlik yönünden iyileştirilmesi amaçlanmıştır. DHS değerlerinin belirlenmesinde kapalı döngülü stratejilerden biri olan optimal kontrol esaslı Model Tabanlı Öngörülü Kontrol yönteminden (MTÖK, Model Predictive Control, MPC) yararlanılmıştır.

Model Tabanlı Öngörülü Kontrol bir optimal kontrol yöntemi olup, belirli tahmin ufkunda kontrol değişkenlerinin eniyileme sonucunda belirlenerek, sisteme ötelenmiş ufuk çerçevesi (receding control horizon) içinde uygulanması esasına dayanır. MTÖK yöntemi, bir tahmin modeline (METANET) ve standart herhangi bir optimal kontrol problemindeki, kontrol değişkenleri (hız), kısıtlar (hız sınırı) ve durum değişkenleri (yoğunluk, ortalama hız ve akım) ve amaç fonksiyonu (örneğin yolculuk süresinin en küçüklenmesi ve yoğunluk farklarının enküçüklenmesi) ögelerine



Şekil 1.2: MTÖK'ün yapısı (Burger vd, 2008).

ihtiyaç duyulur. Bununla birlikte MTÖK'ün standart optimal kontrol problemine göre üstünlükleri vardır. MTÖK'e ait blok diyagram Şekil 1.2'de görülmektedir.

MTÖK ile her kontrol adımı *kc*'de, optimal kontrol değişkenleri ($vctrl$), *Np* tahmin ufku süresince, her örnekleme aralığı ($T_{ö}$) için hesaplanmaktadır (nümerik yaklaşımla). Hesaplanan optimal kontrol değişkenlerinden ($vctrl$), sadece ilk örnekleme adımına ait olan kontrol sinyalleri, kontrol eylemi olarak sürece (trafik) uygulanmaktadır. İkinci kontrol adımında (*kc+1*), bir adım ileri ötelenmiş tahmin ufku için aynı işlemler tekrarlanmaktadır. Her kontrol adımında, sürece (trafik sistemi) ait ölçülen yeni durum değişkenlerinden (hız, akım, yoğunluk) alınan geri besleme ile kontrol değişkenleri hesaplanır ve güncellenir. Bu özelliği MTÖK tasarım yöntemini kapalı çevrim kontrol haline dönüştürmektedir.

Çalışmanın ikinci bölümünde Otoyol Yönetimi ve bu yönetim sistemlerini oluşturan Akıllı Ulaştırma Sistemleri (ITS) bileşenlerine yer verilmiştir. Ardından dinamik DHS kontrol sisteminin tasarımında gerekli olan ITS ögeleri tanımlanmıştır. Daha sonra Değişken Hız Sınırlandırması tanıtılmış, DHS uygulamalarının trafikte yarattığı etkilerden söz edilmiş ve Değişken Hız Sınırlandırması (DHS) ile ilgili literatür çalışmalarına yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde CORSIM simülasyon modeli anlatılmış ve uygulama bölgesindeki trafik akımını yansıtacak şekilde CORSIM simülasyon modeli kalibre edilmiştir.

CORSIM modelinin çalışma ilkeleri, kalibrasyonu için kullanılan parametreler ve kalibrasyon sonuçlarını gözlemlerle karşılaştıran istatistik sınamalar bu bölüm kapsamındadır. Ayrıca çalışmada oldukça önemli bir araç olan, Run Time Extension (RTE) arabiriminden 3.Bölümde bahsedilmiştir.

Dördüncü bölümde, makroskopik trafik akım modeli METANET incelenmiştir. METANET eşitlikleri ve METANET'in hesaplama ilkeleri bu bölüm kapsamındadır. Bu bölüm aynı zamanda METANET kalibrasyonunun anlatıldığı bölümdür.

Beşinci bölüm dinamik DHS kontrol uygulamasında yararlanılan MTÖK yöntemi, trafiğe uygulaması, uygulama yöntemi ve uygulamada kullanılan araçları kapsamaktadır.

Altıncı bölüm, çalışma bölgesinde yapılan, dördü DHS kontrol uygulaması olan toplam yedi adet uygulamaya ve bunların sonuçlarına yer vermektedir. Uygulamalar üç gruba ayrılmıştır. İlk grup katılımlara sabit hız uygulamasını kapsarken, ikinci grup sadece katılım kontrol uygulamasını içermektedir. Son grupta anaakım ve katılımlara gerçekleştirilen DHS uygulamaları yer almaktadır.

2. OTOYOLLARDA DEĞİŞKEN HIZ SINIRLAMA UYGULAMASI

Bu bölümde öncelikli olarak otoyol yönetimi ve otoyol yönetim sistemlerini oluşturan AUS bileşenleri incelenmiştir. Ardından AUS bileşenleriyle otoyol üzerinde dinamik bir kontrol uygulamasının tasarımına yönelik anlatıma yer verilmiştir. Bu çalışmada kentiçi otoyolunda, AUS bileşenlerinden biri olan Değişken Hız Sınırlaması (DHS) ile kontrol uygulaması gerçekleştirildiği için, bu bölümün son kısmında DHS'nın genel yapısı, DHS uygulamalarındaki yaklaşımlar ve başarımlar literatür kapsamında incelenmiştir.

2.1 Otoyol Yönetim Sistemi ve Kontrol Stratejileri

Kentiçi trafik yönetimi çalışmaları taşıt trafiğini düzene sokmak ve trafik akımlarının kabul edilebilir hızla akmalarını sağlamak amacıyla yapılan düzenlemelerdir (Gedizlioğlu, 2004). Otoyollarda trafik kontrolüne yönelik uygulamalar da bu amaçla yapılır.

Otoyollarda ilk trafik yönetim sistemi, düzenleyici ve yönlendirici bilgi veren sabit sinyaller ve trafikte meydana gelen olaylarda trafiği idare eden polis memurları ile oluşturulmuştur. Kentsel alanlar büyümeye başladığında, nüfus ve taşıt sayısı artış gösterdiğinde otoyollar daha fazla tıkanmaya başlamıştır. Artan nüfus ve taşıt sayısına paralel olarak trafik talebi artış gösterdiğinden, otoyol trafik yönetim sistemi çeşitli hizmetleri sağlamak için geliştirilmiştir (Carvell vd.,1997). Aral (2007) 'ın ifade ettiği gibi artan taşıt sahipliği ve taşıtla ulaşımın önde olduğu kentleşme modelinde otoyollar büyüyen ve eklemlenen kent parçalarını birbirine bağlamaktadır. Bugün İstanbul örneğinde olduğu gibi yüksek nüfus yoğunluğuna sahip kentsel alanlar içinden geçen otoyollarda, trafiğin zirve saatinde yaşanan tıkanıklık sıklıkla oluşan bir sorundur ve çözülmesi için yoğun çaba harcanmaktadır/harcanmalıdır. Kentiçi otoyollarda trafik akımında meydana gelen düzensizlik kent yollarına kadar uzayan, saatlerce sürecek bir kuyruklanmanın nedeni olabilmektedir.

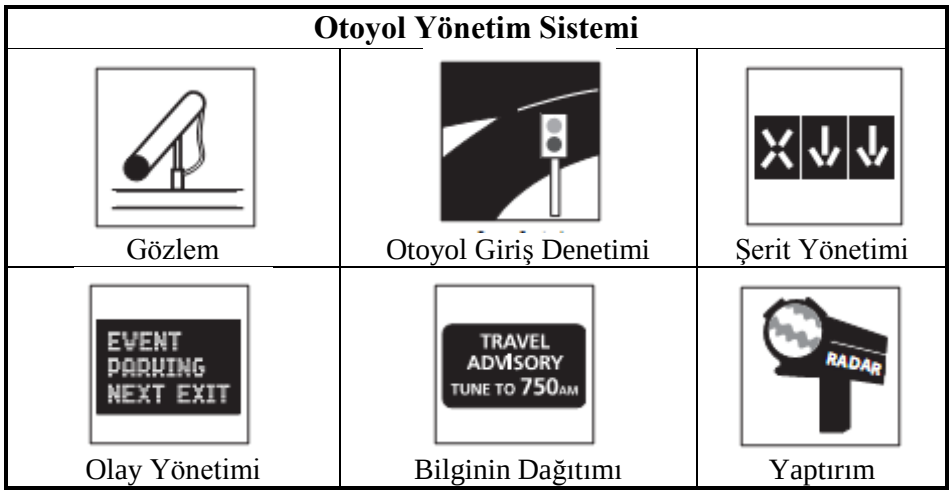
Amerika Birleşik Devletlerine ait 1983 Otoyol Yönetimi El kitabında "otoyol yönetimi, insan ve eşyaların tam erişme kontrollü yollarda, hizmet düzeyinin aksamaması için trafiğin kontrolü, yönlendirilmesi ve uyarılması" olarak geçmektedir. Kısaca otoyol yönetimi, otoyolu yönetmek için gerçekleştirilecek bütün faaliyetleri kapsamaktadır. Otoyol sisteminin amacı ve hedeflerinin sosyal ve politik nedenlere bağlı kalarak değişse de, otoyol yönetim sistemi için evrensel bir takım amaç ve arzular vardır. Bunlar sıralanacak olursa;

- Tekrarlı trafik tıkanıklığının oluşumu ve etkilerinin azaltılması,
- Tekrarlanmayan tıkanıklığın süresinin ve etkilerinin azaltılması,
- İşletmede güvenliğin ve verimliliğin arttırılması, yolculara bilgi aktarılarak otoyol sisteminden daha verimli yararlanmaları,
- Streslerinin azaltılması,
- Yolda sorun yaşayan sürücülere yardım edilmesi vb. (Carvel, 1997).

Otoyol yönetim sistemleri, kontrol stratejilerinden ve işletme faaliyetleri ve teknolojik gelişmelerden yararlanarak alt yapının daha etkin kullanılmasını sağlamaktadır. Böylelikle, tıkanıklığın oluşmasını önlemekte, geciktirmekte ve tıkanıklık süresi azaltılmaktadır.

Otoyol trafiğinin yönetimi ile ilgili kontrol stratejilerine ABD'de 1960'ların başında rastlanmaktadır. Bu tarihlerde Chicago, Los Angeles, Detroit bölgelerinde otoyol katılım kontrol uygulamaları görülmüştür (Arnold, 1998). Bunun yanında otoyol yönetimi ile ilgili dedektör uygulaması, kapalı devre televizyon sistemi, şerit kontrolü, DHS uygulamalarına da rastlanmaktadır (Carvell, 1997). Avrupa'da ise geçmiş tarihlerde pek çok anakent otoyollarında çeşitli otoyol kontrol uygulamalarına rastlanmaktadır. Örneğin Almanya'da 1972, Hollanda'da 1992, İngiltere'de 1995'den itibaren DHS uygulamaları yapılmıştır (Wilkie,1997; Robinson, 2000). Zamanla kontrol uygulamaları yaygınlaşmış ve birçok kentte uygulanmıştır. Trafik teknolojisi ve kontrol teorisinde yaşanan gelişme ve ilerlemelere parelel olarak otoyol kontrol türleride gelişmiştir. AUS teknolojisi kullanılarak otoyol kapasitesinin verimli kullanılabilmesi, trafik akımının daha etkili ve güvenli yönetilmesini sağlayan dolayısıyla otoyol performansını arttıran çeşitli otoyol kontrol stratejileri geliştirilmiştir. AUS ile otoyol işletim ve otoyol yönetim

sistemi iyileştirilmiş ve otoyol yönetimi AUS'in bir parçası haline gelmiştir. Akıllı Ulaştırma Sistemleri, mevcut ulaştırma sistemini daha verimli ve güvenli hale getirmeyi böylelikle çevresel etkileri ve tıkanıklık sorunlarını azaltmayı hedefler. Bunu yaparken iletişim ve bilgi teknolojisini bütünleştirir.



Şekil 2.1 : Otoyol yönetim sistemini oluşturan AUS bileşenleri (Url-1).

Otoyolda uygulanan en yaygın kontrol türü otoyol katılım kontrolü, bağ kontrolü (link control), olay yönetimi olarak bilinmektedir. Bu kontrol türleri bölgesel veya sistem bazında tekli ya da bütünleşik (birçok kontrol türü birarada) olarak uygulanmakta ve uygulamada çeşitli teknik ve teknolojilerden yararlanılmaktadır. Bununla birlikte Carvell (1997) Otoyol Yönetim Sisteminin fonksiyonları arasında yer alan önemli AUS bileşenleri arasına gözlem, görüntüleme (bilginin dağıtımı) ve yaptırımı da eklemiştir. Otoyol Yönetim Sistemini oluşturan altı adet önemli AUS bileşeni Şekil 2.1'de görülmektedir. Aşağıda Otoyol Yönetim Sistemini oluşturan bu AUS bileşenlerinin özelliklerine yer verilmektedir.

2.1.1 Şerit yönetimi

-Yolcu Taşıma Kapasitesi Yüksek Olan Taşıtlara Öncelik Veren Uygulamalar

Toplu taşımayı desteklemek ve otomobil kullanımını azaltarak tıkanıklığı önlemek amacıyla otobüs vb. yolcu taşıma kapasitesi yüksek olan taşıtlara öncelik verilmektedir. Bu gruba giren taşıtlar için özel şeritlerin ayrılması, otoyol katılım kontrolünde öncelikli geçiş uygulaması, olayların hızlı tespit edilip müdahale edilmesi için şeritlerin özel gözetimi bu kapsamdaki uygulamalardır (Carvell vd.1997).

Yolcu taşıma kapasitesi yüksek olan taşıtlar için yolun belirli şeritlerinin ayrılması hızlı ulaşım sağlarken, diğer taşıtlar için yol kapasitesini düşürmektedir. Bu şeritler sayesinde, bu şeritleri kullanan taşıtlar, mevcut trafik tıkanıklığına karışmadan daha kısa ve dakik yolculuklar yapabilmektedir. Bu nedenle kullanıcıların tercihi toplu taşıma veya paylaşımlı taşıtlar yönünde olmaktadır.

-Şerit Kullanım Kontrolü

Zirve saatlerde geçici olarak banket kullanımı, dönüşümlü şerit kullanımı, taşıtlara sınırlama getirilmesi ve tıkanıklığın ücretlendirilmesi, şerit kullanım kontrolüne dair örneklerdir. Bu uygulamada çeşitli aygıt/donanımlardan yararlanılmaktadır. Örneğin şerit kullanım kontrolünde yararlanılan dinamik veya statik levhalara dair şerit kontrol sinyalleri (lane control signals) bir şeridin kullanıma açık ya da kapalı olduğunu belirten ve otoyol üzerine yerleştirilen donanımlardır

-Değişken Hız Sınırlaması (DHS)

DHS otoyolda hakim olan trafik, çevre ve yol şartları gözlemlenerek otoyolda dinamik olarak değişen hız sınırları uygulamaktır. Bu tez çalışmasında Değişken Hız Sınırlaması ile kontrol uygulaması yapılacaktır. Bu nedenle Değişken Hız Sınırlaması konusunda Bölüm 2.4'de daha geniş kapsamlı bilgi verilecektir.

2.1.2 Otoyol katılım kontrolü

Kentiçi yollarda trafik akımı trafik ışıkları ile gruplandırılarak yönetilir. Kentiçi otoyollarda ise gruplanma istenmez. Çünkü oluşacak hız farkları kapasitenin kullanımını azaltır. Otoyol kapasitesini en uygun şekilde kullanmak için otoyol akımında kararlı akım şartları hüküm sürmelidir (Balta, 2001). Otoyol katılımlarında oluşan talep, otoyol kapasitesini aşıp otoyol katılımlarında tıkanıklıklara sebep olur. Otoyol katılım kontrolü otoyol kapasitesinin verimli kullanımını sağlamak ve gecikmeyi önlemek için otoyolda uygulanabilir temel tekniklerden biridir.

Otoyol katılım kontrolü Şekil 2.2'de görüldüğü üzere otoyol katılımlarına yerleştirilen trafik ışıkları ile, katılımlardan ana akıma taşıtların kontrollü biçimde katılmalarını sağlayan bir donanımdır. 1960'lardan itibaren ABD'nin pek çok kentinde uygulanmış katılım kontrolü (Arnold, 1998), bugün sıklıkla başvurulan (2200'den fazla katılım kontrolü uygulaması mevcuttur) otoyol kontrol türlerinden birisidir (Geroliminis vd., 2011). Katılım kontrolü günümüzde Amsterdam, Paris ve

Glasgow gibi Avrupa'da pek çok kentte uygulanmış, ilgi gören bir kontrol türüdür (Scariza, 2003).



Şekil 2.2 : Otoyol katılım kontrolü örneği-A94 Münih (Kaynak: Url-2).

Otoyol katılım kontrolü genel olarak aşağıdaki nedenlerden dolayı uygulanır:

-Akıcı olan otoyola artık kapasitesi kadar taşıt katılımına izin verip kapasiteden fazlasına engel olmak (Balta, 2002). Amaç gecikmeyi otoyoldan katılıma aktararak, otoyoldaki akımın mümkün olduğu kadar kesintisiz akmasını sağlamaktır (Şahin vd, 2004). Böylece otoyolun kapasitesi verimli kullanılmış, taşıt yığılmaları ve tıkanma durumu önlemiş olacaktır.

-Taşıt gruplaşmasını önlemek (Zorer, 2003). Katılım kontrolü ile taşıtların belirli aralıklarla ana akıma katılması sağlanarak, otoyol katılım noktalarında meydana gelebilecek hız farklarının azaltılması, kaza oluşumunun önlenmesi, güvenliğin sağlanması, şok dalgası ve olası tıkanma durumunun önlenmesi söz konusudur.

Katılım kontrolü uygulaması katılımın olduğu yol kesimlerinde şok dalgalarının oluşmasını önlemektedir. Ioannou (2008) 'nun belirttiği gibi otoyolda katılımın dışında, pek çok nedenden dolayı (kaza, olay, sürücü davranışı gibi) oluşabilecek hız farkları akım yukarı kesime doğru ilerleyen şok dalgalarına sebep olabilir. Bu durumda DHS uygulamaları etkili olabilmektedir.

Katılım kontrolünün bir sonucu olarak trafiğin bir kısmı alternatif güzergahlar arayacak ya da hareket saatlerini değiştireceklerdir, ancak herhangi bir türel kayma olması beklenmemelidir (Şahin vd., 2004).

Otoyol katılım kontrolünün olumsuz taraflarından birisi katılımlarda oluşabilecek kuyruklanmaların gecikmelere neden olmasıdır (Scariza, 2003). Diğer bir olumsuz tarafı otoyol katılımlarında talep artışının çok fazla olması durumunda kuyruğun

uzayarak kentsel yolları tıkamasıdır. Bu tıkanıklık otoyola katılmak istemeyen taşıtları da etkileyerek gecikmeye neden olabilmektedir. Papageorgiou vd. (2003) 'nin belirttiği gibi katılımların yukarı kesimine dedektör yerleştirilmesi sonucu katılımlarda meydana gelebilecek kuyruklanma tespit edilmektedir. Kuyruklanma tespit edildiğinde katılımlardan otoyola daha fazla taşıt katılmasına izin verilmektedir.

Taşıtların otoyola kontrollü katılmının sağlanması için katılım yapacak taşıt sayısının ve trafik ışıklarına ait devre süresinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu durum katılım kontrol yaklaşımlarına göre değişiklik göstermektedir. Otoyol katılım kontrolü yaklaşımları önceden zaman ayarlı, trafiğe uyarmalı kontrol olarak iki şekilde sınıflandırılabilir (Scariza, 2003). Önceden zaman ayarlı kontrol ile trafik gözlemleri ve ölçümlerden faydalanılarak eldeki sonuçlar değerlendirilir; günün saatine, haftanın gününe veya özel durumlara bağlı olarak otoyol katılımında trafik ışığının uygun devre süreleri hesaplanır. Trafiğe uyarmalı kontrol gerçek zamanlı trafik verilerine göre sinyal devre süresi belirlenmektedir. Trafiğe uyarmalı kontrol bölgesel (bağımsız olarak tek bir katılım) veya sistem genişliğinde (koordineli olarak) uygulanmaktadır. Bunun yanında farklı kontrol elemanlarının bir arada kullanıldığı bütünleşik kontrol uygulamaları vardır. Otoyol katılım kontrol algoritmalarının derlenmiş ve değerlendirilmiş olduğu çalışmalar için Bogenberger ve May (1999) ve Zhang (2001) bakılabilir.

Otoyol katılım sistem ve algoritmaları ile tek şeritte veya çok şeritte kontrol uygulanabilmektedir (Bhargava vd., 2006). Katılım kontrolü uygulama stratejisine tek şerit her yeşilde tek taşıt, tek şerit her yeşilde çok taşıt ve çift şerit katılım kontrolü olmak üzere üç şekilde rastlanmaktadır (Chaudhary ve Messer, 2000).

Tek şeritte kontrol uygulamasında her bir sinyal devresinde tek taşıtın geçmesine izin verilmektedir. 4 saniyelik bir devrede, 1 s yeşil, 1 s sarı ve 2 s kırmızı süre ile kapasite 900 taş/sa dolaylarındadır (Chaudhary ve Messer, 2000). 2,5-3 s'lik kırmızı süre ile katılım kapasitesi 800taş/sa~720taş/sa/şerit olur. Yani kırmızı sürenin artması katılım kapasitesini düşürür. Tek şeritte iki taşıt uygulamasında 6-6,5 s'lik bir devrede kapasite 1100~1200taş/sa dolaylarında olacaktır. Çift şeritli katılım kontrol dönüşümlü olarak şeritlerde gerçekleşmekte ve kapasite değeri 1600~1700 taş/sa olmaktadır (Chaudhary and Messer, 2000).

Chaudhary ve Messer (2000) otoyol katılım hacminin 1200taş/sa'tin altında tek şeritli katılım kontrolü, 1200 taş/sa'tin üzerinde ise çift şeritli katılım kontrolü uygulamasını önermektedir. Caltrans (California Department of Transportation) ise 900 taş/sa'lik katılım hacim değerini katılım kontrolünün tek ya da çift şeritli kontrol olarak seçiminde sınır değeri koşul olarak belirtmektedir (Caltrans, 2000).

Otoyol katılım kontrol uygulamalarını değerlendiren çeşitli alan ve simülasyon çalışmaları mevcuttur. Dünyadaki en büyük otoyol katılım kontrol sisteminden birine sahip olan Minnesota'da Eyalet Meclisi, Minnesota otoyol katılım kontrollerinin başarımını değerlendirmek amacıyla otoyol katılım kontrolünü sekiz hafta süreyle kapatmıştır. Yapılan alan çalışmasında otoyol katılım kontrolünün kapatılması ile birlikte trafik tıkanıklığı ve kaza sayısında artış yaşanmış, yolculuk zamanının güvenirliğinde de azalma olduğu tespit edilmiştir (Cambridge Systematics, 2001). Boulevard Peripherique, Paris'te ve Amsterdam A10 Otoyolunda test edilen katılım kontrol algoritmaları içinde en başarılı ALINEA bulunmuştur (Papageorgiou vd., 1997). Farklı otoyol katılım kontrol stratejilerinin, farklı çalışma bölgelerinde değerlendirildiği çok sayıda simülasyon çalışmasında (Papageorgiou vd., 1991; Zorer, 2003; Zhang vd., 2001; Bellemans, 2003) genel olarak toplam yolculuk süresinde olumlu etkiler görülmüştür.

ALINEA çok bilinen ve uygulanan bir katılım kontrol uygulaması olması nedeniyle Bölüm 6'da, Beşiktaş katılımına uygulanan ALINEA uygulamasına yer verilecektir.

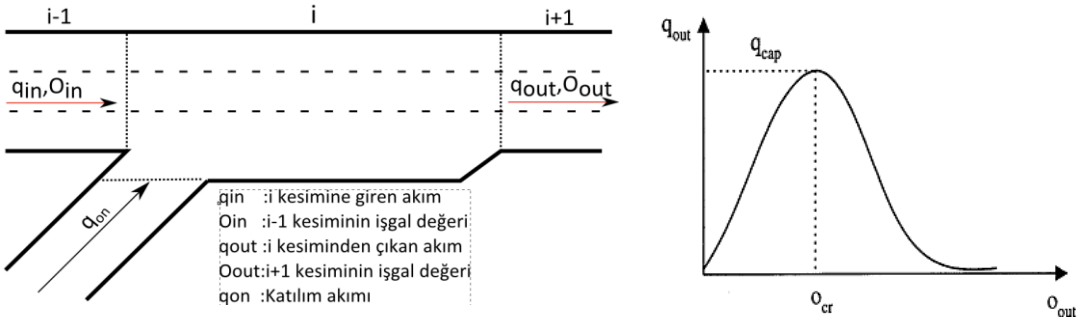
2.1.2.1 ALINEA

ALINEA (Asservissement Lineaire d'entree Autoroutiere) klasik geri besleme teorisine dayanan ilk bölgesel (local) kapalı-döngü kontrol algoritmasıdır (Papageorgiou vd., 1991). Ölçülen işgal değerini (O_{out}), hedeflenen işgal değerinin (kapasite doluluk değeri) O, altında tutmak için denetim hacmi (r(k)), ayarlanmaktadır (Şekil 2.3).

Papageorgiou v.d (1991) denetim hacmini her ayrık zaman adımı k'da hesaplamak için Eşitlik (2.1)'i tanımlamıştır.

$$r(k) = r(k-1) + K_R[O - O_{out}(k-1)] \quad \textbf{(2.1)}$$

Eşitlik (2.1)'de; k :ayrık zaman adımı, $r(k), k$ zaman adımında uygulanacak taşıt/saat cinsinden kontrol hacmidir. Bir önceki denetim hacmi $r(k-1)$, ölçülen işgal O_{out} ve hedeflenen işgal değeri O arasındaki farkın fonksiyonudur. Hesaplamada denetim hacmi $(r(k))$, 40 saniye ile 5 dakika arasında değişen sürelerde güncellenmektedir (Chu ve Yang, 2003).



a) Örnek Katılım. b) Temel Diyagram (May, 1990).

Şekil 2.3 : Katılım kontrolü ve temel diyagramı.

O: arzu edilen veya hedeflenen akım aşağı doluluk (genellikle hedeflenen akım aşağı doluluk O, kritik işgal değerinden O_{crt}'den yani kapasite işgal değerinden, biraz küçük alınır. Bunun nedeni otoyol akımının kapasite değerini aşmaması içindir). Uygulamalardan genellikle %18-%29 arasında değişen değerlerde alındığı görülmüştür (Papageorgiou vd., 1997).

$O_{out}(k-1)$: ölçülen akım aşağı kesimin işgal değeridir.

$K_R > 0$: Düzenleyici bir parametredir. Bu değer 70 taşıt/saat olarak alındığında çok iyi sonuçlar bulunmuştur. Saha çalışmalarında ALINEA'nın K_R parametresine karşı duyarlı olmadığı görülmüştür (Papagerogiou vd. 1997).

Eşitlik (2.1)'den hesaplanan $r(k)$ değeri için $[r_{min}\ r_{mak}]$ sınır değerleri belirlenir. r_{mak} değeri, katılım kapasitesidir (tek şeritli kontrolsüz bir katılım için 1800~2200 taş./sa'tir). $r_{min} > 0$ değeri kabul edilen minimum katılım hacim değeridir (200~400 taş/sa) (Papageorgiou vd., 2007).

ALINEA kontrol stratejisinin uygulanması çok basittir. Bir anayolda akım aşağı yönde, diğeri ise otoyol katılımında olmak üzere sadece iki adet dedektöre gerek duyulmaktadır. Kuyruk uzunluğunu bulmak için ise otoyol katılımının başlangıcına bir dedektör yerleştirilebilir. Akım aşağı yönündeki dedektör, anayol ile katılımın birleştiği noktanın 40~500 m uzağına yerleştirilebilir. Devre süresinin kısa olması

durumunda, talepteki değişimlere cevap verebilmesi için dedektör yerleşiminin katılıma yakın olması gerekmektedir (Chu ve Jang, 2003).

ALINEA algoritmasının MALINEA (akım yukarı işgal değeri dikkate alınıyor), FL-ALINEA (akım aşağı akım değeri dikkate alınıyor), UP-ALINEA (akım yukarı işgal değeri ile akım aşağı işgal değeri tahmin ediliyor ve hesaplamada dikkate alınıyor), UF-ALINEA (akım yukarı akım değerine dayanan algoritma), X-ALINEA/Q (ALINEA algoritmasında kuyruk kontrolü de dikkate alınıyor) gibi geliştirilmiş farklı şekilleri de mevcuttur (Scariza, 2003).

2.1.3 Olay yönetimi

Trafik tıkanıklıkları tekrarlayan ve tekrarlanmayan trafik tıkanıklığı olarak sınıflandırmak mümkündür. Tekrarlayan trafik tıkanıklıkları trafiğin zirve saatinde talebin arzı aşması sonucu meydana gelmektedir. Tekrarlanmayan trafik tıkanıklıkları ise taşıtlarda meydana gelen arıza-kaza durumu, yol bakım çalışmaları, özel olaylar gibi trafikte geçici koşulların oluşması sonucu meydana gelmektedir. FHWA'nın tahminine göre ABD'de otoyol trafiğinde oluşan trafik tıkanıklıklarında trafikte kaybedilen toplam zamanın (gecikmenin) %60'ı tekrarlanmayan trafik tıkanıklıklarından dolayı oluşmaktadır (Url-3). Anakentlerde trafik tıkanıklığının önüne geçmek için uygulanan temel strateji, trafik kazalarına ve akımı olumsuz yönde etkileyecek benzer olaylara mümkün olduğunca çabuk müdahale edilmesidir. Tekrarlanmayan trafik tıkanıklıklarında kapasiteyi düşürücü etkilerin en aza indirgenmesi istenmektedir. Olay yönetimi bu amaçla uygulanan stratejilerden biridir.

Olay yönetimi eldeki mevcut insan ve fiziksel kaynakların kullanılarak, olayların hızlı ve etkili şekilde tespit edilmesi, yönetilmesi ve giderilmesini kapsar (Carvell, 1997). Olay yönetimi geniş ve karmaşık faaliyet ve yöntemleri içerir. Çoğu kez olay yönetimi trafik yönetim merkezi tarafından koordine edilmektedir.

2.1.4 Gözlem ve tespit sistemi

Etkili bir trafik yönetiminin temel taşlarından biri gözlem ve olay tespit sistemidir. Bu sistemin kullanılması için otoyoldaki mevcut işletme durumlarının tespit edilmesi gerekmektedir. Bu pek çok kaynakla pek çok yoldan yapılabilmektedir. Akıllı

teknolojinin kullanılmasıyla ya da basit yöntemler kullanılarak bu durum tespit edilebilmektedir.

Genel olarak elektronik gözlem sistemi ile hacim, hız ve yoğunluk verileri elde edilmektedir. Bu veriler daha sonra otoyol işletme durumunu, tıkanıklığın derecesini ve ortalama yolculuk süresi tahmininde kullanılmaktadır. Pek çok algoritma ve başka teknikler olayların tespit edilmesinde kullanılmaktadır. Bugün otoyol yönetim sistemlerinde, en çok kullanılan elektronik aygıt, kaplama altı dedektörleri olan manyetik ve indüksiyon dedektörlerdir. Ancak, büyük hacimli trafik kesitlerinde, bu tür dedektörlerin bakımı ve yerleştirilmesinde sorunlar yaşanmaktadır. Bu durum, yol kenarına yerleştirilebilir tipteki dedektörlerin geliştirilmesinde tetikleyici olmuştur. Bu dedektörler görüntü işleme, ses, radar, kızılötesi ve kısa mesafeli iletişim (dsrc) tabanlı teknolojiler içermektedir.

Bu seçenekler büyük esneklik, güvenirlik ve düşük bakım maliyeti gerektirmektedir. Fakat ilk yapım maliyeti ilave olarak sürekli teknik destek ihtiyacı nedeniyle işletme maliyeti de yüksektir.

2.1.5 Bilginin dağıtımı

Bir otoyol yönetim sisteminin tasarımı, gelişmesi ve işletmesinde, bilginin geniş kitlelere yayılması son derece önemlidir. En uygun sistem, işletme protokollerinin, ortakların, katılımcıların tek merkezde buluşturulması ve bilginin buradan hızla kullanıcılara ulaştırılmasıdır.

Akıllı Ulaştırma Sistem teknolojisi ile sürücüler ve yolcuların trafik koşulları ile ilgili bilgilendirilmelerinde gelişmiş uygulamalar mevcuttur. Sürücüler yolculuk sırasında elektronik görüntü levhaları veya taşıt içi sistemler gibi çeşitli donanımlar yolu ile yol, hava ve trafik koşulları ile ilgili gerçek zamanlı olarak bilgilendirilmektedir. Bu durum sürücüler de davranış değişikliği yaratmakta, trafik koşullarını iyileştirmektedir.

2.1.6 Yaptırım

Hız sınırı, katılım kontrolü gibi uygulamalarda sürücü ihlallerini belirlemek ve yaptırım uygulamak için otomatik yaptırım sistem ve teknolojisinden faydalanılmaktadır. Otomatik yaptırım sistemleri trafik ihlalinde bulunan taşıtları otomatik olarak kayıt eden cihazlardır. Böylece ihlal eden taşıtlarla ilgili edinilen

bilginin sonrasında sürücü veya taşıt sahiplerine yaptırım uygulanır. İhlallerin tespit edilmesinde radar, dedektör, video görüntü işleme gibi çeşitli teknolojiler kullanılmaktadır. İhlal belirlenmesinin ardından taşıtların tespit edilmesi gerekir. Islak film kamera ile fotograflama, digital kameralar ve elektronik tespit sistemleri taşıt tespitinde kullanılan teknolojiler arasında yer alır (Sagberg, 2000).

Yukarıda söz edilen AUS kontrol bileşenleri ile yapılan dinamik trafik kontrol uygulamaları kontrol teorisinden bilinen kapalı döngü kavramına (closed loop concept) göre çalışmaktadır (Hegyi, 2004). Aşağıda dinamik kontrol sistemlerinin tasarımı için gerekli olan temel bileşenler açıklanacaktır.

2.2 Dinamik Kontrol Sistemleri

Trafik kontrol sistemleri farklı şekillerde sınıflandırılır. Statik/dinamik, tepkisel/tahmin sistemleri, kapalı döngü /açık döngü gibi. Statik kontrol sistemleri zamanın belirli bir anındaki sistemin ortalama durumu ile ilgilenir. Kontrol değişkenleri trafik koşullarına göre gerçek zamanlı olarak değiştirilmez. Bunun tersi olarak dinamik kontrol sistemleri ile kontrol parametreleri gerçek zamanlı olarak trafik koşullarına göre değiştirilir.

Trafik kontrol sistemleri açık ve kapalı döngü olmak üzere iki şekilde de sınıflandırılmaktadır. Denetim faaliyetinin sistemin çıkışına bağlı olan sistemlere kapalı döngü sistemler, denetim faaliyetlerinin sistemin çıkışına bağlı olmayan sistemler ise açık döngü sistemler denilir. Kapalı döngü sistemlerde mevcut sistemin gerçek zamanlı olarak çıkışının ölçümüne ihtiyaç duyulur. İki sistem arasındaki temel fark kapalı döngü sistem çıkış değişkeninin gerçek zamanlı olarak ölçülüp, geri besleme ile sistemde hedeflenen değişiminin sağlanması için değerlendirilerek üretilen kontrol değişkeninin, dinamik olarak güncellenmesidir.

Yukarıda belirtilen kapalı döngü sistemler genel olarak tepkiseldir (reactive). Kontrol mevcut duruma göre sisteme müdahale etmektedir. Bu tip kontrol sistemlerini trafiğe uygulamak için sistemde tıkanıklık durumunun gerçekleşmesi gerekmektedir (Owen, 1996). Tahmine dayalı kontrol sistemlerinde ise kontrol eylemleri, bir tahmin modeli ile gelecekteki trafik koşullarının tahmin edilmesiyle, uygulanmaktadır (Owen, 1996).

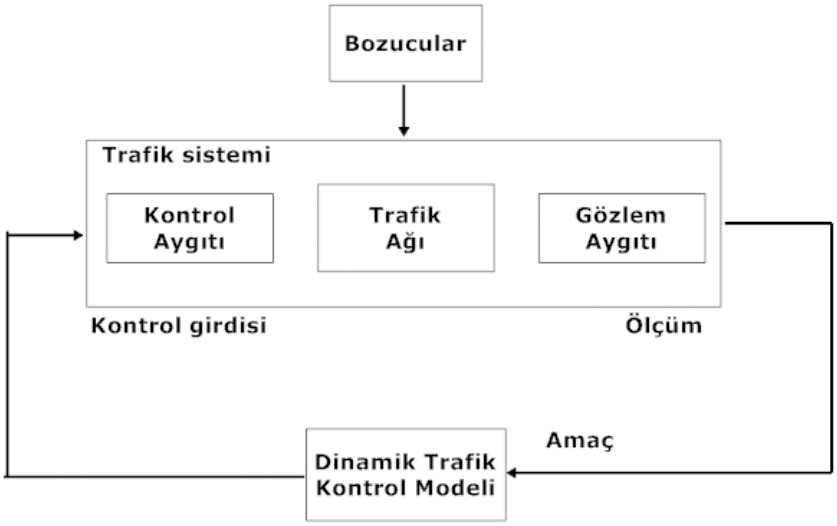
Kontrol sinyalinin üretilmesinde değişik yöntemler kullanılmaktadır. Örneğin basit kontrol sistemlerinde iki durumlu kontrolörlerin (aç-on, kapa-off) kullanıldığı görülmektedir. Bu tip sistemlerde belirlenen bir eşik değerin üstünde kontrolör çalıştırılmaz. Kontrol edilen değişkenin çok hızlı değişim göstermediği durumlarda tercih edilir. Sistemin sürekli çalışıp durması durumlarını önlemek için, açma ve kapama arasında (eşik değeri etrafında) "*histerezis"* bölge olarak adlandırılan bir nötr bölge belirlenir. MEB (2009)'da belirtildiği gibi bu aralık ne kadar geniş tutulursa sistemin kontrol hassasiyeti o derece azalır. Herhangi bir kontrol hareketinin gerçekleşmesi için bu bölgenin aşılması gerekmektedir. Bu tip kontrole "*histerizis kontrol"* denilir. Aç-kapa kontrol yönteminin sakıncalarını ortadan kaldırmak için P, I, D kontrol yöntemleri ve bunların birleşiminden meydana gelen yöntemler geliştirilmiştir (MEB, 2009).

Dinamik trafik kontrol terimi kısa dönemde trafik akımında iyileştirmeler yapmak için bir takım araçlar, yöntemler, işlemlerin bir arada kullanılmasını ve trafik akımına müdahale edilmesini ifade etmektedir (Hegyi vd., 2009). Bir dinamik trafik kontrol sisteminin temel bileşenleri Şekil 2.2'de görüldüğü üzere trafik gözlem aygıtları, trafik ağı, kontrol aygıtları ve dinamik trafik kontrol modelinden oluşmaktadır. Dışsal bozucular[1] (trafik talebindeki değişmeler ve trafik kazaları gibi) tarafından bozulan trafik durumunu sensörler belirler (Owen, 1996).

Trafik gözlem aygıtları mevcut trafik durumu konusunda dinamik kontrol modeli için gerek duyulan verileri ölçer. Dinamik kontrol modeli bu verilere dayanarak komutlar üretir. Kontrol döngüsü, gerçek zamanlı olarak kontrol modelinin mevcut ve tahmin edilen bozuculara yanıt verecek şekilde uygulanır (Owen, 1996). Bu döngünün çekirdeği kontrol modelidir. Kontrol modeli sürecin gelecekteki durumunu tahmin modellerinden elde edilen durum değişkenleriyle, amaç fonksiyonunu eniyileyecek kontrol girdilerini belirlemektedir. Elle yapılan kontrol sisteminde komutlar trafik kontrol merkezinde bulunan bir uzman tarafından, otomatik kontrol sürecinde ise algoritma tarafından üretilir (Papageorgiou, 2003; Vukanovic, 2006). Otomatik kontrol prosedüründe sistemin trafik tahmin modeli ve kısıtlar temel

[1] Bozucu Etki: Sistemin çıkış değerini ters (negatif) olarak etkileyen veya etkilemeye meyilli işarettir. Eğer sistemin içinde üretilmişse iç bozucu etki, dışında üretilmişse dış bozucu etki adı verilir (Cansever, 2007).

alınarak amaç fonksiyonu eniyilenmekte ve trafik kontrolü için kontrol sinyalleri üretilmektedir (Bellemans vd., 2002).



Şekil 2.4 : Dinamik trafik kontrolün şematik gösterimi (Kaynak: Owen, 1996).

Trafik kontrolü ile amaç fonksiyonunu eniyileyecek düzenlemeler yapılır. Trafiğin kontrolü ile istenen, faydaları maksimuma çıkartmaktır. Akbaş (2001)'da belirtildiği gibi trafiğin kontrolü bir optimizasyon problemi olarak ifade edilir. Amaç fonksiyonu trafik yoğunluğu, ortalama hız, trafik akımı vb. trafik akımını temsil eden durum değişkenleridir. Taşıtların toplam yolculuk süreleri doğrudan tıkanıklığı temsil eden bir başarım ölçütü ve amaç fonksiyonunda yer alan bir terim olmakla birlikte, çevresel maliyetler (hava kirliliği, yakıt tüketimi vb.), sosyal maliyetler (stres) ve ekonomik maliyetler (gecikme) de amaç fonksiyonuna eklenebilir. Başarım ölçütü yolculuk süresinin azalması, yakıt tüketiminin azalması, gürültü ve hava kirliliğinin azalması ve güvenlik ölçütü gibi pek çok amacı birlikte gerçekleştirme özelliğine sahip olabilir. Amaç fonksiyonları kendisine katılan terimler arasında bir ödünleşme sonucunda hesaplanmaktadır (Bellemans vd., 2003). Bu durumda terimlere ağırlık verilerek önem derecesi atanabilmektedir.

Trafiğin dinamik özelliğinden dolayı değişen trafik şartlarını hesaba katarak kontrol eylemlerinin sık sık güncellenmesi gerekmektedir. Aşağıda bir dinamik trafik kontrolünü oluşturan üç önemli bileşen olan trafik gözlem aygıtları (I), trafik kontrol aygıtları (II) ve trafik kontrol model (kontrolör) bileşenlerinin (III) özelliklerine dair bilgi verilmektedir:

2.2.1 Trafik gözlem aygıtları

Trafik kontrol sisteminin temel bileşeni veri kaynağıdır. Buna göre gerçek zamanlı veri elde edilir ve en uygun kontrol eylemine karar verilir.

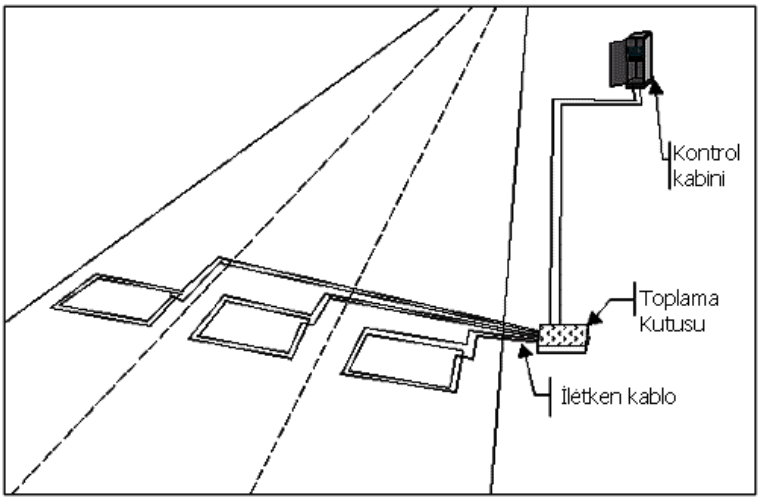
Gerçek zamanlı veri elde etmede kullanılan en bilinen aygıtlardan biri dedektörlerdir. Dedektörler kaplama altına yerleştirilen ve trafik parametrelerinin ölçümünde kullanılan aygıtlardır. Bir dedektör bir tek şeride ait bilgileri toplar. Bir bölgede birden fazla, farklı şeritlerden veri toplayan dedektör topuluğu dedektör istasyonu olarak anılır. Dedektörler çalışma ilkelerine göre türlere ayrılırlar. Bunlardan kısaca aşağıda bahsedilecektir.

İndüktif dedektör üretiminin başlangıcı olan 1960'lı yıllarından beri trafik yönetiminde faydalı olmuştur. Başlıca bileşenleri Şekil 2.5'de görüldüğü üzere; kaplama altına yuva içerisinde sığ bir şekilde yerleştirilmiş bir ya da birden fazla yalıtılmış kapalı devre kablo, kontrol kabininin içine yerleştirilmiş elektronik kontrol ünitesi ve iletim hattından oluşmaktadır (Url-4). İndüktif dedektörler genellikle taşıt hacmi, hız ve yoğunluk hesaplamada kullanılır. İndüktif dedektörler algılama mesafesi içine giren metal cisimleri (çelik, bakır, alüminyum, pirinç) algılayarak (elektrik kablosunda oluşturulan elektromanyetik alanda meydana gelen sapmanın sonucunda) sinyal üreten elektronik aygıtlardır. Bu tarz algılama sistemi doğa koşullarından en az etkilenen sistem olduğu için tercih edilmektedir.

Manyetik Sensörler 1960'larda indüktif dedektörlere alternatif olarak kullanılmaya başlamıştır. Manyetik sensörler bir metal nesnenin (örneğin taşıt) dünyanın doğal manyetik alanında sapma meydana getirmesi ilkesine göre tasarlanmıştır.

IR (infrared-kızılötesi) dedektör genellikle uzaklık ölçümünde kullanılır. Kızılötesi ışık yollayan dedektör cisimden yansıyan ışığın durumuna göre uzaklığı belirler.

Sesle engel tanıma veya uzaklık ölçümü ultrasonik (ses ötesi) ses dalgaları ile yapılır. Ultrasonik dedektör çevresine ses dalgaları yayıp, engele çarpıp geri gelen dalgalardan nesneleri belirleyen bir alettir. Kızılötesi dedektör gibi mesafe de ölçmektedir ve menzili ondan daha geniştir. Bir IR dedektör en fazla 2 metreye kadar ölçebilirken, ultrasonik dedektörler uygun koşullarda 30 metreye kadar ölçüm yapabilir.



Şekil 2.5 : İndüktif dedektörün bileşenleri (Url-4).

Gerçek zamanlı bilgi toplamanın bir yolu da radarlardır. Radarların çalışma prensibi akustik dedektörlere benzemektedir. Akustik dedektörlerden farkı yayılan sinyallerin tipinden kaynaklanmaktadır. Radarlar ölçüm için mikrodalga sinyaller kullanır ve ölçümün doğruluğu yansıyan mikrodalganın şekline bağlıdır. Örneğin, RTMS (Remote Traffic Microwave Sensor) EIS (Electronic Integrated Systems Inc.) tarafından üretilen bir radar aygıtıdır. Uzaktaki taşıtlar mikrodalga ile ölçülmektedir. Çok şeritli yollarda, her türlü hava koşullarında, çok amaçlı olarak her bir şerit için bağımsız olarak taşıt görüntülerinin tespiti ve trafik parametrelerinin ölçülmesinde kullanılabilir (Şekil 2.6). Bunlar hacim, işgal, hız ve kullanıcı tarafından tanımlanabilen bölgelere ait bilgileri sınıflandırabilmektedir. Bu bölgeler toplam sekiz adettir ve en çok 60 metre uzaklığa kadardır. Düşük maliyetli olup, yol kenarına kurulumu ve sökümü kolaydır.

Bununla birlikte hava şartları hava istasyonlarında yol hava bilgi sistemleri ile gözlenmektedir. Rüzgar hızı ve yönü, görünürlük, nem ve yağış miktarı gibi çeşitli çevresel şartlara dair veri toplanmaktadır. Kaplama sensörleri ise yoldaki kaplama şartlarına dair tam zamanlı bilgi vermektedir (kuru, karlı, buzlu vb).

2.2.2 Dinamik kontrol modeli (kontrolör)

Trafik ağında (süreçte) bir ya da bir dizi belirli kontrol fonksiyonunu yerine getirmek için kontrol modeli tasarlanır. Kontrolör, sistemi belirlenmiş bir hedefe eriştiren mekanizmadır. Kontrol fonksiyonu, kontrol aygıtı ve kontrol fonksiyonunun davranışlarını yöneten kontrol algoritması seçilerek uygulanmaktadır. Algoritma

gerekli olan girdilerin (gözlem verileri) türünü belirlemektedir ve kontrol aygıtları için kontrol komutlarını üretmektedir (Owen, 1996). Buradaki temel bileşen taşıtların davranışını temsil eden trafik akım modelidir. Sürecin gelecekteki durumu belirlemesi ve kontrol komutlarının üretiminde, trafik akım modelinden yararlanır.


RTMS (Remote Traffic Microwave Sensor) radar

Şekil 2.6 : RTMS.

2.2.3 Kontrol aygıtları

Dinamik kontrol modeli ile (kontrolörün) üretilen kontrol sinyallerinin sürücülere iletilmesi gerekir. Bu iletim uygulanan kontrol stratejisine bağlı olarak değişmektedir (Otoyol kontrol stratejileriyle ilgili Bölüm 2.1'de ve daha önce bilgi verilmişti). Elektronik görüntü levhaları, sinyal gibi aygıtlar bu amaçla kullanılmaktadır. Böylelikle kontrol girdileriyle istenen etki yaratılmış olacaktır.

2.3 Hız Sınırlaması

Trafiğin türetilmiş değişkenlerinden biri olan hız, birim zamanda alınan yol olarak ifade edilmektedir**.** Hız, sürücü davranışı, hız kontrolü, taşıt tipi ve şartları, yol sınıfı, kavşaklar, çevresel ve meteorolojik koşullar ile trafik koşulları (tıkanıklık) gibi faktörlerin etkisi altındadır.

Hız sınırlamasındaki temel amaç sürücünün yolda güvenli seyri için yapabileceği maksimum hızı belirlemektir. Bunun karşılığında belirli bir yol sınıfı ve yol kesimi için işletme ve güvenlik ölçütleri arasında uygun dengenin sağlanması gerekmektedir (TRB, 1998). Yolda güvenliği artırmak (kazaları azaltmak) için hız kısıtlaması yapıldığında işletme özelliğinin (yolculuk süresi, kapasite) kötüleştiği, işletme iyileştirilmek istendiğinde (hız arttırmak) ise yol güvenliğinin azaldığı ve kazaların artmasına yol açtığı bilinmektedir (Yol güvenliğini etkileyen başlıca faktör olarak

yolun özelliği, çevresel faktörler, taşıt aralığı, hız ve hız sınırı sayılabilir). Bunun yanında hız sınırlamasının yakıt tüketimi ve hava kalitesinin iyileştirilmesi gibi başka amaçları da olabilir. Motorlu taşıtlar yüksek hızlarda daha fazla yakıt tükettiklerinden daha fazla kirlilik yaymaktadır. Ayrıca taşıt hızı arttıkça gürültü kirliliği de artmaktadır.

Trafik kazaları insan faktörü ile yol ve taşıt özelliklerinin etkileşimi sonucunda oluşur. Türkiye'deki trafik kazalarındaki kusur oranları incelendiğinde sürücülerin yüksek hız ihlallerinin kaza ve ölüm oranlarına önemli derecede etkisi olduğu görülür. Hız kusurları kazalara doğrudan ve dolaylı olarak etki etmektedir. Arkadan çarpma, yoldan çıkma, park etmiş taşıtlara veya sabit engele çarpma vb. sürücülerin hız ihlallerinden kaynaklanan kazaların oranının topam kazaların %30'u civarında olduğu istatistiklerden tespit edilmiştir (Çavdar vd., 2008).

Pek çok çalışma ortalama hızdaki değişim ile kazalar arasında ilişki kurmuştur. Finch vd. (1994) yaptıkları trafik kazaları ile ilgili literatür ve istatistiksel model çalışmaları ile bu konuda son zamanlarda yapılan çalışmalarda ortalama hızda 1 km/saat azalmanın kaza riskinde %3'lük azalmaya neden olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bunun yanında kazalarda yol kalitesi ve fonksiyonunun da etkili olduğu belirtilmiştir.

Bu konuyla ilgili yapılan çalışmalarda Power Modeli kullanılarak, ortalama hız ve kazalar arasındaki ilişki ve alınan fiziksel önlemlerin etkisi değerlendirilebilmektedir. Power Modeli ortalama hızın değişimiyle ölümlü kazalarda değişimi şu şekilde hesaplamaktadır:

$$A_{sonra} = A_{\text{önce}} \left(\frac{V_{sonra}}{V_{\text{önce}}} \right)^{4,5} \qquad \textbf{(2.2)}$$

$V_{\text{önce}}$ başlangıçtaki hız, V_{sonra} değişen ortalama hız değerini, $A_{\text{önce}}$ başlangıçtaki ölümlü kazayı, A_{sonra} ortalama hızdaki değişim ile birlikte ölümlü kazayı temsil etmektedir. Buna göre ortalama hızdaki değişim oranı ile ölümlü kaza değişim oranı arasındaki ilişki hesaplanabilir. Bu durum ortalama hızda meydana gelen %10'luk bir artışın ölümlü kazalarda %50'den fazla artışa yol açtığı anlamına gelmektedir (Ludvigsen, 2007).

Pek çok çalışma hızın kazanın şiddetinde belirleyici faktör olmasına rağmen kaza oluşumunda hız farklarının daha etkili olduğunu göstermiştir (Garber, 1988). Otoyollarda tıkanıklık koşullarda kaza oranlarının, serbest trafik akım koşullarına göre iki kat daha fazla olduğu ortaya konmuştur. Bu nedenle homojen trafik akımın elde edilmesi için ortalama hız yerine hız farklarının azalmasının sağlanması gerekmektedir (Smulders,1990). Taşıtlar arasında artan hız farkı, genellikle geçme, şerit değiştirme ve yakın taşıt takibi hareketlerinde artışa ve hız engeliyle karşılaşan sürücülerde öfkeye neden olduğu görülmektedir. Bu konuda Solomon (1964) hız farkı ile çarpışmanın frekansı arasında parabolik bir ilişki kurmuştur. Hızın standart sapmasının trafik akımında homojenliği belirleyen bir gösterge olduğu, hızın standart sapmasında azalmanın güvenliği iyileştirdiği yönünde çalışmalar yapılmıştır. (Solomon, 1964; Baruya, 1998).

Geleneksel olarak yasal hız sınırı, yasal düzenlemelerle veya trafik mühendislik uygulamalarına yönelik araştırmalar sonucu belirlenmektedir (Sisiopiku, 2001).

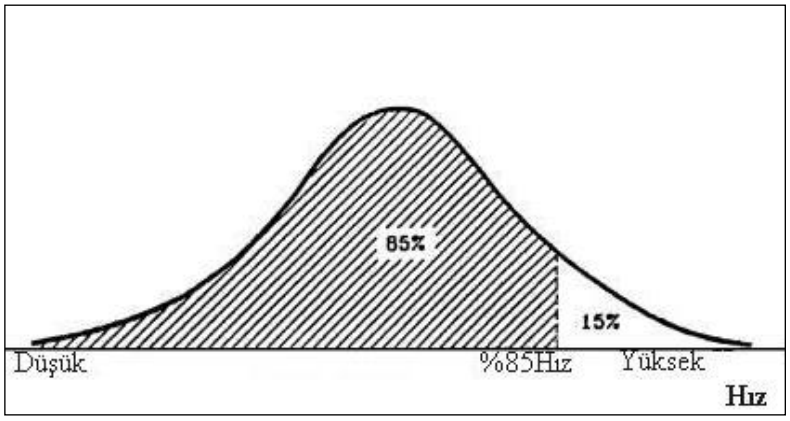
Çizelge 2.1'de Türkiye'de ve bazı ülkelerdeki yasal hız sınırları görülmektedir. Türkiye'de şehirlerarası karayollarında uygulanan hız sınırlarının tespit yetkisini İçişleri Bakanlığının uygun görüşünü almak kaydıyla Karayolları Genel Müdürlüğü'ne vermiştir. Kentiçi yollarda ise bu yetki İl Trafik Komisyonları'na bırakılmış olup, bazı illerde kentiçi hız sınırlarında yeni düzenlemeler yapılmıştır. Otomobiller için Türkiye'de uygulanan hız sınırları; otoyolda 120 km/saat, kentlerarası yollarda 90 km/saat ve kent yollarında ise 50 km/saat olarak belirlenmiştir. Karayolları Trafik Kanunu ve Yönetmeliği'nde gerekli görüldüğünde İçişleri Bakanlığı'nca otomobiller için otoyollarda hız limitlerinin Bayındırlık ve İskân Bakanlığının görüşü alınmak suretiyle 20 km/saat arttırabileceği hüküm altına alınmıştır.

Praktikte uygun yol şartlarının olduğu varsayılarak hızı etkileyen faktörlerin zamanla değişmediği kabul edilerek hız sınırlaması sabit tutulmaktadır. %85 hız değeri güvenli hız değeri kabul edilmekte ve hız sınırlaması için uygun görülmektedir. Bunun yanında hız sınırlamasında trafik koşulları, yol geometrisi ve büyüme gibi faktörler de dikkate alınmaktadır (%85 hız, yol üzerinde gözlem yapılan herhangi bir noktadan serbest hızla geçen taşıtların %85'nin nokta hızlarının aşmadığı, ancak %15'nin aştığı hız değeridir). Deneyimlerle bu değere yakın yapılan hız sınırının güvenli hız olduğu tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalar bu değerin daha çok altında

ya da üstünde hızların kaza oluşma riski arttırdığını göstermiştir. Şekil 2.7, %85 hız değerinin gösterildiği örnek bir diyagramdır (TRB,1998). Ortalama hız ile %85 hız arasındaki hız farkının azalması güvenliğin artışına işaret etmektedir.

Çizelge 2.1: Bazı AB ülkelerdeki hız limitleri (Kaynak: Çavdar vd., 2008).

Ülke	Kentiçi (km/saat)	Kentdışı (km/saat)	Otoyol (km/saat)
Almanya	50	100	Limit Yok
Avusturya	50	100	130
Belcika	50	90-120	120
Danimarka	50	80	110
Finlandiya	50	80-100	120
Fransa	50	90-110	130
Hollanda	50	80-100	120
İngiltere	50	100-110	110
İrlanda	50	100	110
İtalya	50	90-110	130
Lüksemburg	50	90	130
İspanya	50	90-100	120
İsveç	50	70	110
Türkiye	50	90	120



Şekil 2.7 : %85 hızın gösterildiği hız dağılımı (TRB, 1998).

Uniform Trafik Kontrol Aygıtları Elkitabında[2] sabit hız sınırlaması için uygun olan sayısal değeri belirlemek için aşağıdaki etkenlerin dikkate alınması gerektiği belirtilmektedir (USDOT, 2003):

- Yol yüzeyi, emniyet şeridinin durumu, eğim, aliyman ve görüş mesafesi

[2] Orijinal adı İngilizcede Manual on Uniform Traffic Control Devices

- %85 hız değeri
- yol çevresinde gelişme ve çevresel faktörler
- park ve yaya faaliyetleri
- 12 aylık dönem içindeki kazalar

Bu uygulamalar trafikte koşulların ideal olduğu varsayımına dayanmakta ve zamanla değişmeyen etkenleri dikkate almaktadır. Bazı durumlarda hız kısıtını devlet politikaları belirlemektedir (Allaby, 2006).

Trafik akımı içinde değişken sürücü karakteristiği ve davranışları, yol, hava durumu ve trafik koşulları trafik akımını güvensiz koşullara her an dönüştürebilen potansiyel olarak hız farklarının oluşmasına neden olmaktadır (Allaby, 2006). Hızı etkileyen faktörlerin hızla değişkenlik gösterdiği bir çevrede sabit hız sınırlaması yetersiz kalmaktadır. Bu durumda hız sınırlamasında mevcut koşullara göre değişiklik yapmak gerekmektedir. Trafiğin değişkenlik gösterdiği bu koşullarda, trafikte oluşan istenmeyen olayları (şok dalgaları, tekrarlı ya da tekrarlanmayan tıkanıklık durumu ve kuyruklanma, oluşabilecek kazaları) önlemek için değişken hız sınırlama uygulamak homojen trafik akımının oluşması ve trafik işletimi ve güvenliği açısından daha elverişli olabilmektedir.

Ayrıca pek çok karayolu yapımı sırasında dikkate alınan proje hızı ile yasal hız sınırı arasında oldukça fark vardır. Böylelikle çok düşük makul olmayan hız sınırına sürücülerin uyması mümkün olmamakta ve hızlar arasında büyük sapmalar meydana gelmektedir. Bu durumda yaptırımın düşük olduğu koşullarda bir kısım sürücüler hız sınırı ihlal ederek, bir kısım sürücüler de yolun kalitesine, trafik hacmine, hava durumuna vb. etkenlere göre kendilerinin belirlediği maksimum güvenli hızı seçerek, hız sınırını ihlal edebilmektedir (Allaby, 2006). Çavdar vd. (2008) tarafından belirlenen sürücülerin hız seçimini etkileyen önemli faktörler Çizelge 2.2'de listelenmiştir.

Sabit hız sınırının eksik tarafları düşünüldüğünde, mevcut çevre ve trafik koşullarına göre sürücüleri yönlendirecek güvenli yolculuk hızı ve daha gerçek ve inanılır hız sınırına gereksinim vardır. DHS sürücülere daha gerçekçi hız sınırı sağlanması ile sürücülerin hız sınırına uymalarında artışa, hız varyansının düşmesine ve güvenlik artışı sağlamaktadır. Bundan sonraki bölümde, trafik sisteminin davranışı, Temel

Diyagram ile açıklanacaktır. Daha sonra bu çalışmada önlenmesi/geciktirilmesi istenen bir trafik olayı olan şok dalgası konusunda bilgi verilecektir.

Çizelge 2.2: Sürücülerin hız seçiminde etkili olan faktörler (Kaynak: Çavdar vd., 2008).

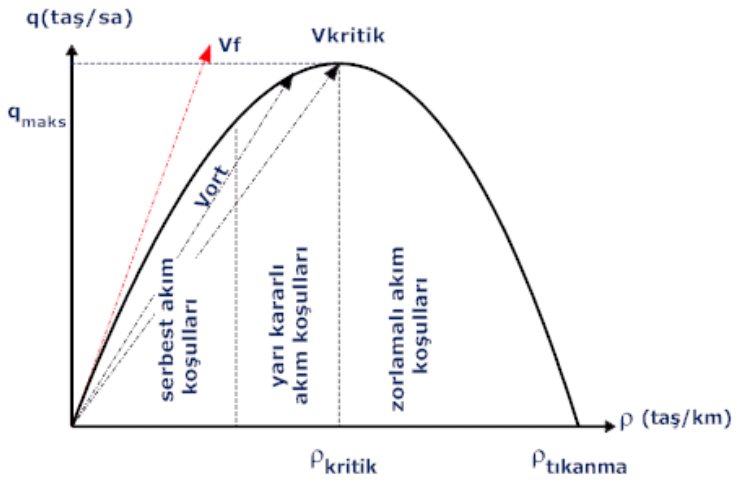
Yol ve Taşıt ile İlgili Faktörler	Trafik ve Çevre ile İlgili Faktörler	Sürücüye İlişkin Faktörler
Yol genişliği, eğim Yol çevresi ve çizgiler Düzenlemeler İşaretleme Yüzey kalitesi Taşıt	Yoğunluk Kompozisyon Hakim olan Hız	Yaş Cinsiyet Reaksiyon zamanı Davranış Heyecan Risk kabulü Hasarı algılama Alkol Düzeyi Taşıt Sahipliği Yolculuk sırasındaki olaylar Taşıt doluluğu
Taşıt Tipi Güç/ağırlık oranı Maksimum Hız Konfor	Çevre Hava Durumu Yüzey şartlar Işık durumu Yol ışıklandırması İşaretlemeler Hız sınırı Yaptırım	

2.3.1 Temel diyagram

Trafik değişkenleri ile ilgili çalışmalar yoğunluk (ρ) ile akım (q) arasında optimum yoğunluk ya da kritik yoğunluk (ρ_{kritik}) (kontrol uygulamalarında bu şekilde adlandırılması nedeniyle bu çalışmada kritik yoğunluk adı geçecektir) değerine kadar artan daha sonra azalan, Şekil 2.8'de görüldüğü gibi parabolik bir ilişki olduğunu göstermiştir. Bu ilişkiyi anlatan eğri Temel Diyagram olarak adlandırılır (May, 1990). Temel Diyagram trafik sisteminin davranışını anlatan ve akım ile yoğunluk arasındaki ilişkiyi belirten önemli bir diyagramdır. Bu diyagramın özellikleri aşağıda sıralanmaktadır:

- Sıfır yoğunlukta maksimum hız serbest akım hızı (v_f) olarak adlandırılır. Orijinden eğri üzerindeki noktalara çizilen çizgilerin eğimleri ortalama akım hız değerine eşittir. Ortalama serbest hız orjinden eğriye teğet olan çizginin eğimine eşittir.

- Çok düşük yoğunluk ve çok yüksek hız civarında serbest akım koşulları oluşur. Bu koşullarda taşıt hareketlerinde bir kısıtlama yoktur ve taşıtlar serbest hızlarını seçebilir.
- Kritik yoğunluk değerine (ρ_{kritik}) yaklaştıkça taşıtların hızlarını seçerken serbestliklerinde azalma başlar. Kerner (1999) bu durumu yarı kararlı (metastable) akım koşulları olarak tanımlamıştır. Yarı kararlı trafik akım koşullarında trafik akımında bir düzensizlik (bozucu etki) oluştuğunda trafik akımı serbest akım koşullarından zorlamalı akım koşullarına geçebilmektedir.
- Kritik yoğunluk değerinde akım enbüyük değerine (q_{maks}) erişir. Enbüyük trafik akımı otoyol kapasitesi olarak tanımlanır.
- Kritik yoğunluk değerinin üzerinde ise zorlamalı akım koşulları oluşur. Zorlamalı akım koşullarında yoğunluğun artması ile birlikte hız ve akımda azalma görülür. Zorlamalı akım koşullarında trafikte sık sık dur kalklar, ayrıca uzun kuyruklar oluşur (Yayla, 2004). Tıkanma yoğunluğunda ($\rho_{tıkanma}$) akım sıfıra yaklaşır.



Şekil 2.8 : Temel diyagram.

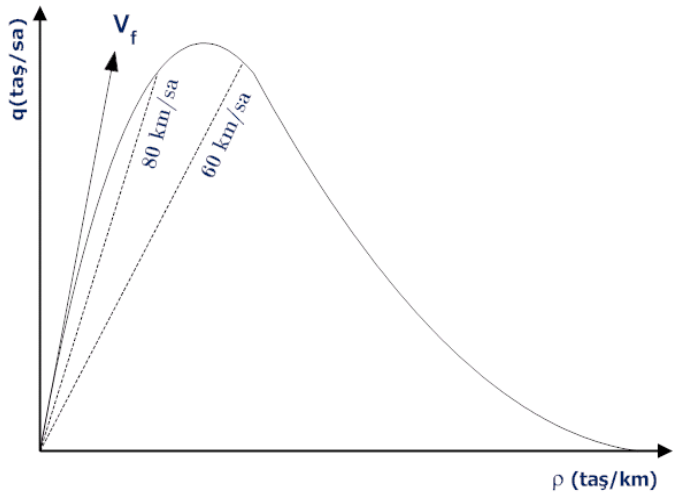
Temel Diyagram'dan da görüleceği üzere, trafiği akımının değişkenleri, hız (v), yoğunluk (ρ) ve akım (q) arasında ilişkiyi belirten,

$$q = v \cdot \rho \qquad \textbf{(2.3)}$$

şeklinde Temel Eşitlik olarak anılan bir bağıntı vardır.

Temel Diyagramda serbest akım koşullarında taşıtlar istedikleri hızda hareket edebilirken (normal koşullarda) kritik yoğunluk civarında kararsızlık işaretleri sergilemeye başladığı ve bu değerden sonra zorlamalı akım koşullarının hakim olduğu görülür. Lenz vd. (2001) ve Hegyi (2004) otoyolda Kerner (1999) 'in belirttiği yarı kararlı trafik akım koşullarında trafik akımında yapılan kontrollerin akımın başarımını iyileştirebileceğini belirtmektedir.

Örneğin bir otoyol kesiminde farklı trafik koşullarında uygulanan hız sınırları Şekil 2.9'da bir Temel Diyagram üzerinde görülmektedir. Bu durumda yolun herhangi bir kesimine uygulanacak hız sınırı, yol kesiminde mevcut durumdaki hız değerinden düşük olduğunda, mevcut hız sınırının altında kalan alanda etkili olduğu görülmektedir. Diğer bir deyişle hız sınırı mevcut trafik akım hızından yüksek ise etkili olamamaktadır. Hegyi (2004) VSL'nin bu etkisini ileride söz edilecek makroskopik model METANET içerisine yansıtmıştır. Bu durumda otoyolda akım aşağı kesiminde trafikte akımında oluşan bir şok dalgası ya da tıkanma çözülebilir. Akım aşağı kesiminde akım hızı düştüğünde, akım yukarı kesime mevcut hızdan daha düşük hız sınırı getirilebilir. Akım yukarı kesimde uygulanan hız sınırlaması ile akım aşağı kesimine daha az taşıt gelerek şok dalgasının şiddetinin azalması, tıkanmanın ve kuyruklanmanın önlenmesi sağlanacaktır (Hegyi, 2004). Akım yukarı kesimde taşıt yoğunluğunun artması yeni bir şok dalgası ve kuyruklanmaya sebep olabilir. Bu nedenle daha yukarı kesimlere hız sınırının uygulanmasına gerek duyulur.

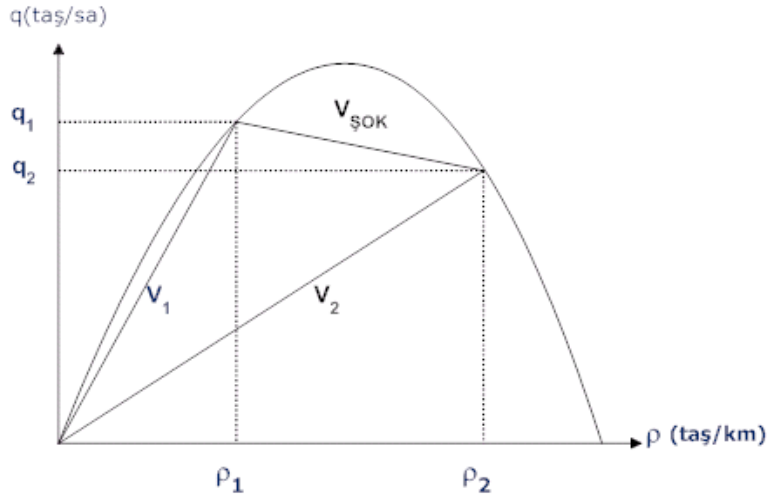


Şekil 2.9 : Bir otoyol kesiminde uygulanan hız sınırları.

Breton vd. (2002)'nin belirttiği gibi bu noktada yol kesiminde en uygun hız sınır değerlerinin seçilmesi ve uygulanması önemlidir. Böylelikle hız sınırı ile kontrol edilen otoyol kesiminde veya ağında oluşturulan etkiler (yolculuk süresi gibi) ve akım yukarı kesimde kuyruklanma gibi etkiler de başarım değeri olarak ölçülebilir. Bölüm 2.5'de DHS'nin otoyollarda uygulama biçimlerine ayrıntılı olarak değinilecektir.

2.3.2 Şok dalgası

Trafik akım değişkenlerinde oluşan ani değişimler trafikte istenmeyen olayların (fenomen) oluşmasına sebep olmaktadır. Örneğin, şok dalgası yoğunluk, akım veya hızda oluşan ani değişimdir. Şok dalgasının oluşumu Şekil 2.9'da, Temel Diyagramda görülmektedir. Trafik ρ_1 yoğunluğundan ani olarak ρ_2 yoğunluğuna geçişte iki trafik koşulları arasında ani değişim olacaktır. Yolda bu iki trafik akım rejiminin çarpıştığı herhangi bir yerde şok dalgaları oluşacaktır. Bu iki çarpışan rejimin yoğunlukları arasındaki fark yeterince büyük olursa şok dalgaları akım yukarı yönünde hareket edecektir. Bu fark durumuyla $q_2 < q_1$ olacaktır. Şok dalgaları akım aşağı, durağan, akım yukarı yönde olmak üzere akım ve yoğunluğun durumuna göre üç şekilde oluşabilmektedir.



Şekil 2.10 : Şok dalgalarının oluşumu.

Şok dalgalarının oluşumunu temsil eden matematiksel eşitlik şöyledir:

$$v_{şok} = \frac{q_2 - q_1}{\rho_2 - \rho_1} \qquad \textbf{(2.4)}$$

Yol geometrisinin değiştiği kesimler (kurba, otoyol girişi, şerit iptali gibi) veya trafikte meydana gelen trafik kazaları, taşıtlarda meydana gelen arıza durumu, yol çalışmaları gibi olaylar akım yukarı kesimden gelen taşıtlar için trafik güvenliği yönünden tehlikeli olmaktadır. Bu durumda aynı zamanda trafik akımında tekdüzeliği (her yerde aynı özellikleri görülmesi) bozularak, şok dalgaları, kuyruklanma gibi düzensizlikler meydana gelebilmektedir. Bu olayların meydana geldiği yer ya da kesimde akım yukarı yönden gelen taşıt sayısındaki artış beraberinde kuyruklanmaya neden olur. Olayların meydana geldiği kesimin akım aşağı yönünde ise trafikte serbest akım koşulları hakim olacaktır (yolda kapasitesinin değiştiği bu kesimlere şişeboynu denilmektedir (Şekil 2.11). Şok dalgaları kötü hava şartları nedeniyle ya da trafik talebinde meydana gelen artış, sürücü davranışlarında düzensizlikler gibi nedenler sonucunda da oluşmaktadır. Elbette bu trafik akımında



Şekil 2.11 : Şişeboynu örneği.

istenmeyen bir durumdur. Yapılan çalışmalarda sabit şişeboynu kesimlerde meydana gelen şok dalgaları sonucu kapasitede günlük ortalama %10 azalma oluştuğu (Cassidy ve Bertini, 1999), bunun dışında meydana gelen şok dalgaları sonucunda kapasitede %30'lara varan azalma meydana geldiği görülmektedir (Kerner ve Rehborn, 1997). Bunun yanında akım yukarı kesimden gelen taşıtların oluşturduğu hız farkları, şok dalgaları ve kuyruklanmalar, trafik işletimini ve güvenliğini olumsuz etkileyen unsurlardır. Bu çalışmadan şok dalgasının hangi türde olduğu konusunda bir ayrım yapılmayacaktır. Hegyi vd. (2002) belirttiği gibi trafikte herhangi bir dalganın olması istenmeyen bir durumdur. Burada şok dalgasına bakış açısı trafikte önlenmesi, kontrol edilmesi gereken trafik olayı olmasıdır.

2.4 Değişken Hız Sınırlaması, DHS

Değişken Hız Sınırlaması (DHS) gerçek zamanlı hava, yol ve trafik koşulları izlenerek hız değerinin bir operatör veya otomatik olarak algoritma aracılığıyla hesaplanarak sürücülere iletilmesidir. DHS değerlerinin sürücülere iletilmesi taşıt içi sistemleri (Şekil 2.12), radyo özel frekanslarından yayın (Şekil 2.13) ve en bilineni AUS elemanlarından biri olan ve Şekil 2.14'de görülen DHS levhaları ile mümkün olmaktadır.



Şekil 2.12 : Taşıt içi bilgi sistemi ile DHS gösterimi (Url-5).

HAR (Highway Advisory Radio) otoyol yönetiminde kullanılan yolculara gerçek zamanlı trafik bilgisi sağlayan uzun dalga frekansından yayın yapan bir sistemdir. Amerika Birleşik Devletleri'nde kullanılan trafik bilgi sistemi örneğinde (Şekil 2.13) sürücülere özel bir radyo kanalından yol ve trafik durumuna dair bilgiler iletilebilmektedir.



Şekil 2.13 : Yol üzerinde radyo frekansının gösterildiği bilgi levhası örneği (Url-6).



Şekil 2.14 : İngiltere otoyolundaki DHS uygulaması ve değişken bilgi levhası (Kaynak: UK Highway Agency; PIARC, 1999).

DHS'nın yukarıda sayılan uygulama tekniklerinden en yaygın kullanılan ve adı DHS ile özdeşleşmiş olan elektronik görüntü levhalarıdır (Şekil 2.14). Bu çalışmada DHS levhalarından yararlanılacaktır.

DHS sistemi ilk olarak ABD'de New Jersey Turnpike'de 1960'dan itibaren, 1970'li yıllarda Almanya'da A8 München-Salzburg otoyolunda uygulanmıştır (Robinson, 2000). Uygulamalar zamanla yaygınlaşarak ve gelişerek, günümüzde AUS'nin önemli fonksiyonu haline gelmiştir.

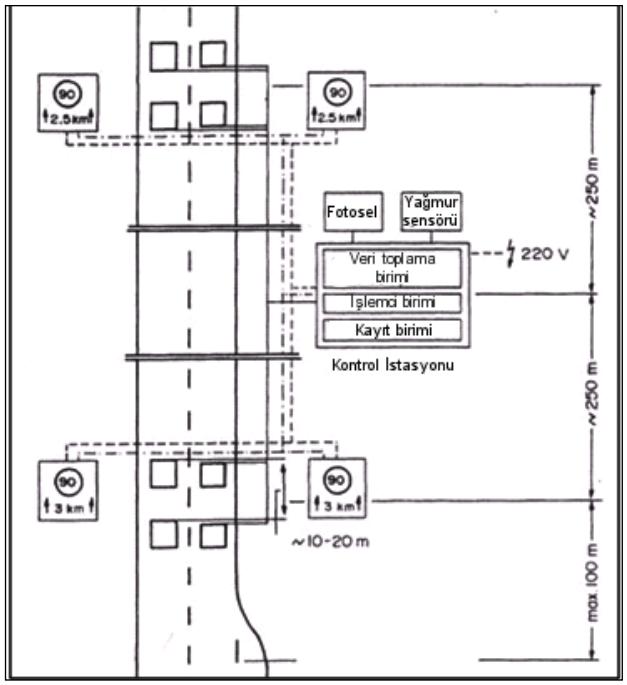
Geçmişte DHS'nin belirli zamanlarda değişen şartlara göre elle yapılan uygulamalarına rastlanmaktadır. Şekil 2.15'de kötü hava şartlarında yapılan DHS uygulaması görülmektedir (Warren, 2000). Diğer taraftan Şekil 2.16'da ise okul bölgesi içerisinde öğrencilerin okula giriş çıkış saatlerinde aktif olan trafik ışığı ile DHS uygulaması görülmektedir. Burada uygulanan hız sınır değeri yol üzerinde trafik levhası üzerinde yazılı olan değerdir.



Şekil 2.15 : Değişen şartlara göre hız sınırının elle değiştirilmesi (Warren, 2000).



Şekil 2.16 : Öğrencilerin giriş çıkış saatlerine göre aktif olan trafik ışığı.

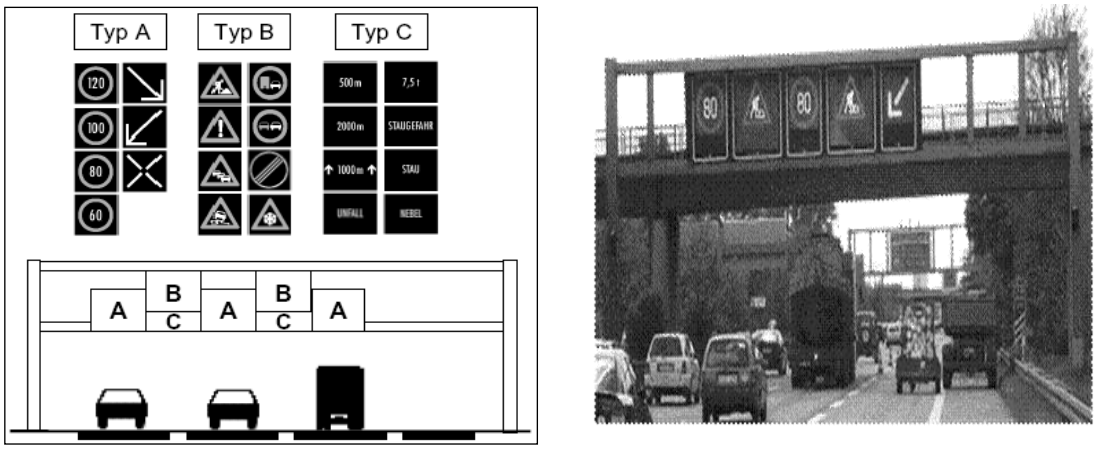


Şekil 2.17 : Doğrudan dağıtılmış sistemler (Papageorgiou, 1991).

DHS sisteminin uygun işletimi için gerçek zamanlı verilere, bu verilerin işlemesine ve DHS değerlerini sürücülere ileten araçlara gereksinim vardır. Tipik bir DHS mimarisinde trafik yönetim merkezinde çalışan bir algoritma veya uzman bulunur. Algoritma ile hesaplanan hız değeri veri bağlarınca kontrol istasyonlarına iletir. Kontrol istasyonları DHS'nın yeni değerini girmektedir. Bu işlem kontrol merkezi olmaksızın doğrudan kontrol istasyonları ile de yapılabilmektedir. Şekil 2.17 doğrudan dağıtılmış sisteme örnektir. Bu tür bir çözüm çok maliyetli olmasa da merkezi denetim ve eşgüdüm eksikliğini taşır (Papageorgiou, 1991).

DHS bazen DBL (Değişken Bilgi Levhaları) ile birlikte kullanılmaktadır. DBL, sürücülere dinamik bilgilerin iletildiği, yol üzerinde trafik, hava durumu, yol durumu

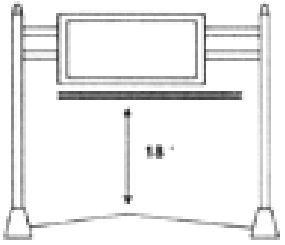
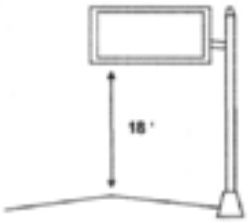
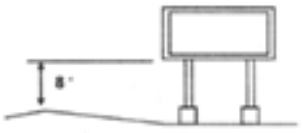
ile ilgili bilgilerin görüntülendiği levhalardır. Şekil 2.18'da Almanya'da DHS'ların kullanımına dair bir örnek görülmektedir. Burada yapılan sınıflandırmada, Tip A sürücülerin yasal olarak uyması gerek işaretleri ve DHS değerlerini, Tip B uyarı amaçlı işaretleri, Tip C ise ilave bilgileri temsil etmektedir (Vukanovic, 2006).



Şekil 2.18 : Almanya'da DBL ve DHS'ların kullanımlarına dair bir uygulama (Kaynak: Vukanovic, 2006).

DBL genellikle Şekil 2.19'da görüldüğü gibi asma, çıkma ve yol kenarında olmak üzere üç şekilde tasarlanmaktadır. İşletme merkezi ile sürücüler arasında arabirim teşkil eden görüntü levhalarında gösterimi yapılacak bilgilerin anlaşılır olması istenmektedir. DBL'larında çeşitli tipte yapılandırma ve teknolojiler kullanılmaktadır. Kullanılan teknolojiye göre çözünürlük, kalite ve iletilecek bilgilerin çeşitliliği değişmektedir. DBL'da bir kaç metin içerikli bir uygulama için düşük çözünürlüklü teknoloji yeterli olabilmektedir. Çözünürlüğün yükselmesi iletilen bilgide daha fazla grafik ve metin biçimlerinin yer alması demektir. Söz konusu teknolojilerin farklı maliyet ve çözünürlükleri vardır.

DHS genel olarak sürücülere zorunlu veya tavsiye şeklinde uygulanmaktadır. Çeşitli çalışmalarda DHS sisteminin verimli işletilmesi için sürücülerin DHS'na uymalarında yaptırım uygulanmasının önemini belirtmişlerdir (Smulders, 1992; Rama, 1999; Wilkie, 1997). Kontrol uygulamalarının başarılı olmasında sürücülerin iletişim ve yaptırım gücünün yanında DHS'nın faydasının farkına vararak kendiliğinden benimsemeleri gerekmektedir. Bu fayda sürücülerin DHS'na uyma oranını yükseltmekte ve gerekli görüldüğü takdirde yaptırımı düşürmektedir (Smulders, 1992).

DBL Uygulama Biçimi	Min. Uygulama Yükseklikleri
 Asma	Levhanın alt noktası yol ekseninden 5,5 metre yükseklikte
 Çıkma	Levhanın alt noktası yol ekseninden 5,5 metre yükseklikte
 Yol kenarında	Levhanın alt noktası yol ekseninden 2,5 metre yükseklikte

Şekil 2.19 : DBL tipleri (WDOT, 2000).

2.5 DHS Konusunda Yapılan Uygulamalar Ve Literatür Çalışmaları

Bu bölümde DHS uygulamalarının amaçları, uygulama yöntemleri ve başarımlarına, yapılan çalışmalar kapsamında değinilmektedir.

DHS uygulamalarına hava durumu (Finlandiya, Hollanda, Almanya uygulamaları), tıkanıklık (Hollanda, İsveç, İngiltere uygulamaları), olay-kaza-yol çalışmaları-tıkanıklık (New Jersey uygulaması) yönetimi ile trafik akımında güvenlik ve işletme yönünden faydalanmak amacıyla rastlanılmaktadır.

Hegyi (2004) genel olarak DHS uygulanmasında iki farklı yaklaşımın olduğunu belirtmiştir. Bunlardan birincisi homojenleştirme ikincisi ise şok dalgalarının ve tıkanıklığın yok edilmesi yaklaşımıdır. Homojenleştirme yaklaşımı ile yapılan hız kontrol önlemleri sayesinde, şeritler arasında ve şerit içinde hız farkları (ve/veya yoğunluk farkları) minimize edilerek daha kararlı ve güvenli akım elde edilebilir (Hegyi vd.2009). Şok dalgası şiddeti ve kaza riski azaltılır. Bu yaklaşımda trafik tıkanıklığının başlaması geciktirilmektedir (Smulders, 1990). Homojenleştirme yaklaşımında hız sınırı kritik hız değerinin üstünde uygulanmaktadır (Hegyi vd.2004). DHS'nın kapasitesinin %15-20 altında hacim değerlerinde uygulandığında

yararlı olduğuna dair bulgular mevcuttur (Smulders, 1990). Bunun yanınında şok dalgaları ve tıkanıklığın yok edilmesi yaklaşımında hız sınırı kritik hız sınır değerinin altında da uygulanmaktadır. Bu uygulamalar olayın (kaza, yol çalışması, şişeboynu kesiminde meydana gelen tıkanma vb.) olduğu bölgenin akım yukarı kesiminde taşıt hızını azaltan uygulamalardır. Böylelikle akım yukarı kesiminden sorunlu bölgeye taşıtların girişi azaltılmış olmakta ve kuyruklanma önlenmiş veya geçiktirilmiş olmaktadır (Hegyi, 2004).

Genel olarak DHS ile ilgili uygulamalar incelendiğinde, DHS değerlerinin seçiminde pratik kontrol mantığı uygulandığı görülmektedir (Wilkie, 1997; Allaby, 2006; Robinson, 2000). Smulders (1990) DHS'nın trafik akımında homojenliği sağlama ve tıkanıklığı geciktirici etkisini göstermek için bir yol kesiminde, hız kontrol değerinin yoğunluğa göre belirlendiği DHS ile histerisiz kontrol uygulaması yapmıştır. Allesandri vd. (1999) yoğunluğun gerçek zamanlı olarak tahmin edildiği dinamik bir makroskopik model geliştirerek, DHS değerinin yoğunluğa göre belirlendiği (hız değeri 70-90 km/sa aralığında değişmektedir) bir çalışma yapmıştır. Finlandiya'da E18 otoyolunda uygulanan DHS değerinde hava ve yol yüzeyinin durumunun (Rama, 1999), Hollanda A2 otoyolunda ortalama hız, ortalama hacim ve olay tespit sisteminin (Robinson, 2000), Hollanda A16'da görüş mesafesinin ve olay tespit sisteminin (Robinson, 2000), Almanya A5'de ortalama hız, yoğunluk ve hızın standart sapmasının (Kühne, 1991), A8 ve A3 örneğinde ortalama hacim ve ortalama hız verileri ile çevresel verilerin (rüzgar, buz, sis vd sensörler) (Robinson, 2000), İngiltere'de M25 hacim ve olay tespit sisteminin (Wilkie, 1997; Robinson, 2000; Allaby, 2006), İsveç Mölndal E6'da işgal verilerinin (hız değerleri 90-70-50-30 km/sa aralığında değişmektedir) (Lind, 2007) ve ABD New Jersey'de ortalama hızın (Robinson, 2000) DHS değerinin seçiminde dikkate alındığı görülmektedir. Belirli zaman aralıklarında (bu genellikle 1-2 dakika arasında değişmektedir) gerçek zamanlı olarak dedektörlerden, sensörlerden vb. donanımlardan gelen veriler (ortalama hız, ortalama hacim, hız varyansı, sis, yağış miktarı vs.) sistemin mimarisine göre trafik yönetim merkezinde veya kontrol istasyonlarında bir algoritmanın çalıştırılması ve hız değerinin DHS levhalarına iletilmesiyle gerçekleşmektedir.

Bazı çalışmalarda DHS değerlerinin seçiminde gelişmiş kontrol yöntemlerinden yararlanıldığı görülmektedir. Carlson vd. (2010) geliştirdikleri bir yazılım aracı ile

Amsterdam çevre yoluna DHS ile birlikte farklı AUS bileşenlerinden oluşan optimal kontrol uygulamıştır. Farklı kontrollerin farklı senaryolar uygulayarak test ettikleri bu çalışmada, başarımın artması için optimal kontrolün ötelenmiş ufuk çevresi içerisinde uygulanmasını önermişlerdir. Çalışmada geliştirilen yazılım aracı (software tools) ile ilgili bir ayrıntıya rastlanmamaktadır. Sınırlandırılmış doğrusal olmayan optimal kontrol probleminin çözümü için sayısal bir çözüm algoritmasının kullanıldığı belirtilmektedir. Bunun dışında çok katmanlı kontrol (Papageorgiou, 1983) ya da uzman sistemler (Lenz, 2001) gibi kontrol yöntemleri görülmektedir. Hegyi (2004) bir optimal kontrol yaklaşımı olan Model Tabanlı Öngörülü Kontrol yönteminden yararlanarak, DHS çalışması yapmıştır. Bu çalışmada şok dalgalarının oluşmunun önlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma trafikte kısa bir süre yoğunluk artışı yaratılmış ve DHS'nın başarımı simülasyon modeli ile sınanmıştır. Şok dalgalarının oluşumunun önlendiği görülmüştür. Fakat simülasyon uygulamasına dair bilgi mevcut değildir. Lin (2004) trafik akım modelinden yararlanarak yol çalışması için sanal bir otoyol kesiminde talep senaryoları oluşturarak dinamik DHS kontrol çalışması uygulamıştır. Çalışma CORSIM simülasyon modeli ile sınanmıştır. Bununla birlikte çalışmada simülasyon modelinin nasıl oluşturulduğuna dair ayrıntılı bilgi yoktur.

DHS'ların etkileri ampirik ve simülasyon çalışmaları ile test edilmektedir. Temel olarak Rama (1999) Finlandiya'da E18'de kötü hava koşullarında uygulanan DHS uygulamalarının taşıtların hız farklarında ve ortalama hızında azalmaya neden olduğunu saptamıştır. Smulders (1992), Hoogen ve Smulders (1996) Hollanda'da A2 otoyolunda kötü hava şartları ve tıkanıklık koşullarında uygulanan DHS çalışmasında homojen trafik akımının elde edildiğini ve şok dalgalarının azaldığını ortaya koymuştur. Robinson (2000) Hollanda A16'da sisli hava şartlarında ortalama hızda 8-10km/saat azalma oluştuğunu belirtmiştir. Almanya'da trafik akımını homojenleştirmek ve güvenlik amaçlı A3, A5 ve A8 otoyollarında yapılan DHS uygulamalarında, trafik kazalarında %20-%30 oranında azalma sağlandığı tespit edilmiştir (Robinson, 2000). İngiltere M25 otoyolunda homojen trafik akımın elde edilmesi ve güvenlik için uygulanan DHS sistemiyle kazalarda %28 azalma gözlenmiştir (USDOT, 1999). İsveç Mölndal E6'da DHS uygulaması ile yaralanmalı trafik kazalarının oranında azalma olduğu, hızın varyansının ve kuyruklanmanın azaldığı görülmüştür (Lind, 2007).

Park ve Yadlapati (2004) DHS stratejilerini VISSIM ve Lee vd. (2004) PARAMICS Simülasyon yazılım ile test etmiştir. Park ve Yadlapati (2004) yol çalışması yapılan bir yol kesimi için üç farklı DHS mantığı geliştirmiştir ve VISSIM bilgisayar simülasyon modelinden yararlanarak, bir yol kesimini kodlanmış, modellemiş ve test etmiştir. DHS'nın güvenlik ve hareketliliği iyileştirdiğini bulmuştur.

Bu çalışmada Değişken Hız Sınırlaması ile dinamik bir hız kontrol uygulaması yapılacaktır ve Model Tabanlı Öngörülü Kontrol Yönteminden yararlanılacaktır. Çalışma MTÖK yönteminin kullanıldığı bir doğrusal olmayan optimal kontrol yaklaşımıdır. Burada amaç otoyolda meydana gelen şok dalgalarını sönümlemek, ortalama hızın varyansını düşürmek ve bağlarda tıkanıklık oluşumunu geciktirmektir. Bu çalışmanın önceki çalışmalardan farkı (Hegyi, 2004) MTÖK'den yararlanılarak gerçek bir otoyol kesimine ve tıkanıklığın yaşandığı akşam zirve saatlerinde (tekrarlı trafik tıkanıklığında) uygulanıyor olması ve gerçek trafik akım koşullarını yansıtıyor olmasıdır. Çalışmada diğer çalışmalara göre en belirgin fark otoyol katılımlarına da hız kısıtı uygulanıyor olmasıdır. Uygulama bakımından daha pratik olabilmesi bakımından katılım kontrolüne bir alternatif olarak, katılıma hız kısıtı uygulama yoluna gidilmiştir. Bunun yanında otoyolda DHS ile trafik kontrol uygulamasının simülasyon yazılımı yardımıyla gerçek zamanlı olarak gerçekleştirme ayrıntılı anlatılmıştır. Çalışma sistemine ait trafik akım değerleri (verileri) kamera ile elde edilmiştir.

Yol ağı fiziksel olarak CORSIM ile benzetimi sonucunda oluşturulmuş ve kontrol modeli CORSIM ile test edilmiştir. Bundan sonraki bölümde kullanılan yöntem ve modellerden ayrıntılı olarak söz edilecektir.

3. SİMÜLASYON MODELLERİ VE CORSIM KALİBRASYONU

Çalışma bölgesine DHS uygulamak ve sonuçları değerlendirmek için CORSIM simülasyon yazılımından yararlanılmıştır. Bu bölümde öncelikle simülasyon modellerine ve CORSIM simülasyon programı ile ilgili anlatımlara yer verilmiştir. Ardından, CORSIM simülasyon yazılımı ile çalışma bölgesine ait modelin oluşturulması ve kalibrasyon aşamaları anlatılmıştır.

Simülasyon yöntemi son yıllarda çeşitli dinamik problemlerin çözümlenmesinde ilgi gören etkili bir araçtır. Söz konusu dinamik problemler, genellikle matematiksel terimlerle ifadesi yeterli olmayan, pek çok sistem bileşeni ya da girdilerinin etkileşiminden oluşan karmaşık süreçlerdir. Süreçlerdeki her bir bileşenin davranışı ve bileşeni oluşturan değişkenlerin birbiriyle olan etkileşimleri iyi anlaşılıp, mantıksal ve matematiksel olarak temsil edilebilse de, pek çok sistem bileşeninin bir arada karmaşık, ardışık ve etkileşimli çalışmasını mantıksal ve matematiksel olarak modellemek oldukça zordur. Simülasyon modelleri bu tür sistemlerin davranışını taklit etmek için tasarlanmaktadır. Düzgün tasarlanmış bu tür modeller sistem başarımını ayrıntılı ve sayısal olarak tanımlanmak için kendisini oluşturan ayrık davranışları ve etkileşimi bütünleştirir. Simülasyon modelleri gerçek hayattaki karmaşık süreçlerin matematiksel/mantıksal gösterim haline getirilerek sayısal bilgisayarlar ortamında yazılımlar aracılığıyla canlandırıldığı bir çeşit laboratuvardır. Banks ve Carson (1984) simülasyon ister elle, isterse bilgisayar ile yapılsın, bir sistemin yapay kayıtlarının oluşturulması ve gerçek sistemin işletim özellikleriyle ilgili sonuçlarının elde edilmesinde bu yapay kaydının incelenmesini kapsadığını belirtmektedir. Simülasyonun çalıştırılmasından sonra çıkan sonuçlar sistem başarımı için ölçülebilir değerler verir. Simülasyon model sonuçları sistemin işletimini istatistiksel ve grafiksel olmak üzere iki biçimde verir. Sayısal sonuçlar kullanıcıya sistemin "*ne*" olacağına dair bilgi verir. Grafiksel ve görsel sonuçlar ise sistemin "*neden*" öyle davrandığı konusunun anlaşılmasını sağlar. Bununla birlikte simülasyon sonuçlarından neden-sonuç ilişkisini anlamak çözümlemek kullanıcının görevidir (Lieberman ve Rathi, 2005).

Simülasyon tasarım ve gerçek sistemler için de kullanılabilir. Tasarımın ve alternatif tasarımların etkisinin sınanmasında, bir takım kritik parametre değerlerinin öngörülmesinde kullanılır. İşletme stratejilerinin bütün olarak sistem başarımına olan etkisinin denemelerine olanak sağlar. Böylelikle, hedeflenen çözümün değerlendirilmesi ve farklı çözümler ile karşılaştırılması mümkün olur. Bu özelliği Taha (2000) simülasyonun bir optimizasyon tekniği olmayıp modellenen sisteminin başarımını tahmin etmede kullanılan bir yöntem olduğunu belirtmiştir.

HCM (Highway Capacity Manual), simülasyon modelini ulaştırma tesis ya da sistemindeki trafik olaylarıyla beraber deneyimleri nakletmek için belirli bir zaman aralığında matematik model kullanan bir bilgisayar programı olarak tanımlanmaktadır (TRB, 2000). Simülasyon modelleri sistem performansını tahmin etmek için belirli bir zamanda ve yol kesiminde ulaştırma sistemi içindeki trafik davranışını benzetmek için tasarlanmıştır. Modeller farklı tasarım ve kontrol senaryolarını değerlendirmek amacıyla geliştirilmiştir. Günümüzde, Trafik Mühendisliği ve Ulaştırma ile ilgili pek çok çalışmada simülasyondan yararlanıldığı görülmektedir. Sistem üzerinde çok maliyetli olabilecek tasarım ve kontrol uygulamalarının değerlendirme olanağı simülasyon sayesinde yaratılmış olur. Verilerin gerçek hayattan daha kolay ve ucuz elde edilebilirliği, araziden yeterli verilerin elde edilmediği durumlarda simülasyon modellerinden yararlanılmaktadır. Bu çalışmada DHS ile dinamik kontrol uygulamasında simülasyon programından yararlanılmasını zorunlu kılan başlıca nedenler, çalışmanın araziye uygulanma koşullarının olmaması, gözlem zamanından daha fazla veri gereksinimi, trafik koşullarınının farklı kontrol uygulamaları ile hızlı biçimde benzetilebilmesi ve maliyettir. Simülasyon ile var olan çalışma bölgesinde tasarlanan DHS kontrol stratejilerinin (kurulan DHS kontrol modellerini) performansını hızlı ve daha az maliyetle anlamak mümkündür.

Günümüzde simülasyonun çalışması Monte Carlo yöntemindeki örnekleme düşüncesine dayanır. Monte Carlo simülasyonunda bir deneyin sonucunu (çıktısını) tahmin etmek için rastgele örneklemeden yararlanılır. Bu yöntem günümüz simülasyonunun önde gelen yöntemidir (Taha, 2000). Rastgele değişkenler, değeri kesin olarak tahmin edilemeyen değişkenlerdir. Rastgele değişkenlere örnek verilmek istenirse; gelecekteki maliyetler, faiz oranları, yağış yükseklikleri, talep değerleri, trafik yoğunlukları, yapıların inşa süreleri sayılabilir. Bu şekilde rastgele

değişkenler içeren modellerle uğraşan karar verici, rastgele değişkeni bir dağılımla tanımlamaya çalışıp, ardından bu dağılıma uyan rastgele sayılar üretir. Üretilen bu rastgele sayılar modelde yerine konulup (rastgele değişken türetilir) modelin davranışı gözlenir. Bu yaklaşım Monte Carlo Simülasyonu olarak adlandırılır (Ulucan, 2007). Monte Carlo tekniği, özel bir denemede ya da bir simülasyon çalışmasında bir veya birden fazla olasılık dağılımından rastgele sayılar seçme tekniğidir. Monte Carlo Simülasyonu genellikle statik simülasyon modellerinde kullanılır ve statik simülasyon modeli, zamanın belirli bir anındaki sistemin durumunu temsil etmektedir. Dinamik simülasyon modelleri ise, sistemin zamana göre değişimini göstermektedir. Bu modellerdeki değişkenler zamana göre değişim ve etkileşim gösterirler.

Simülasyon modelleri kesikli veya sürekli modeller olarak sınıflandırılabilir. Sürekli modeller davranışları zamana göre devamlı değişim gösteren sistemlerle ilgilenmektedir. Sürekli simülasyonun tipik bir örneği dünya nüfusundaki hareketliliğin araştırılmasıdır. Sürekli sistemlerde, durum değişkenleri zaman içinde sürekli değiştiğinden, istatistikler yalnızca sistemin sürekli gözlenmesiyle elde edilebilir.

Kesikli (ayrık) modellerde sistemlerin durumu sadece belirli anlarda değişmektedir. Buna tipik bir örnek olarak, bekleme hatlarında kuyrukta ortalama bekleme süresinin ve kuyruk uzunluğunun tahmini gösterilebilir. Sistemin durumu sadece bir müşterinin sisteme girdiği ya da sistemden çıktığı anda değişir. Diğer tüm anlar istatistik veri toplama açısından hiçbir şey ifade etmez. Sistemde değişiklik meydana geldiği anda modeldeki olaylar tanımlanmış olur (örneğin müşterilerin gelmesi ve gitmesi). Bu olaylar zaman içinde kesikli noktalarda meydana geldikleri için kesikli olay simülasyonu adı ortaya çıkmıştır (Taha, 2000). Zaman içerisinde kesikli veya sayılabilir noktalarda sistemin değişken değerleri değişime uğramaktadır. Şunu belirtmek gerekir ki kesikli modeller her zaman kesikli sistemleri, sürekli modellerde, sürekli sistemleri temsil etmezler. Hangi modelin kullanılacağı çalışmanın amacına, sistemin özelliğine göre değişebilir.

Doğasında rastgelelik olan bir veya daha fazla sayıda rastgele değişkene dayalı olarak kurulan modellere stokastik (rastgele) modeller denir. Davranışı daha önceden bütünüyle kestirilemeyen modellerdir. Ancak bazı olayların hangi olasılıklarla

meydana geleceği hakkında çeşitli değerlendirmeler yapılabilir. Bu tip modellerde girdi değerleri ve süreç, olasılık dağılımları ile temsil edilmektedir.

Değişkenleri (girdisi) rastgele olmayan modele de deterministik model denir. Deterministik modelde bütün girdi verileri tanımlanmıştır. Deterministik modeldeki hareketler her zaman aynıdır ve aynı sonuçları üretir. Rastgele girişler dışında deterministik simülasyon modeli stokastik simülasyon modeline tamamen benzer şekilde kurulur. Temel farkları çıktıların çözümleme yöntemindedir. Deterministik modelde simülasyon modelinin bir defa çalıştırılmasıyla elde edilen sonuç modelin performansının tam olarak ölçümünü verir. Rastgele modeller içinse simülasyon birçok defa çalıştırılır ve sonuçların ortalaması alınır. Bu sonuç sadece modelin beklenen performansının tahmini değerini verir (Yeroğlu, 2001).

Simülasyon modellerinin çalıştırılması iki ayrı tip hesaplama gerektirmektedir. Bunlar;

1) Modelin olaylarının işlenmesi ve kronolojik sıraya konulmasıyla ilgili dosya kullanımları
2) Modelin istatistiklerinin tutulması ve rastgele sayı üretimiyle ilgili aritmetik işlemler.

Birinci gruptaki hesaplamalar işlemler listesinde kapsamlı bir mantık sıralaması gerektirir. İkinci gruptaki hesaplamalar ise sıkıcı ve zaman alıcı işlemlerden oluşmaktadır. Bu yapı, simülasyon modellerinin kullanımı için bilgisayarları gerekli bir araç haline getirirken, özel simülasyon dillerinin geliştirilmesi de bu hesaplamaların daha uygun ve verimli bir biçimde yapılmasına yol açmıştır (Taha, 2000).

Simülasyon modelleri trafik akımını temsil edecek şekilde ayrıntılarına göre (Url-7) mikroskopik, makroskopik ve mezoskopik olmak üzere üç sınıfa ayrılır. Aşağıda mikroskopik simülasyon modellerine ve bu tez çalışmasında kullanılacak CORSIM'e açıklık getirilmektedir. Çalışmada CORSIM aşağıdaki nedenlerden dolayı tercih edilmiştir.

- FHWA (ABD Federal Yol İdaresi) tarafından geliştirilmiş bir mikroskopik yazılımdır ve sonuçları birçok defalar bu kurumca sınanmış ve kullanılmıştır.
- Kentiçi yol ağlarını, otoyol ağlarına bağlayabilmektedir. Böylelikle bu iki tip ağın etkileşimi sınanabilmektedir.

- Kontrol aygıtları kullanılarak ağa müdahale imkanı sunmaktadır.
- Lisans ücreti diğer ticari mikroskopik yazılımlara göre oldukça düşüktür.

3.1 Mikroskopik Simülasyon Modelleri

Mikroskopik simülasyon modelleri ilk kez 1955 yılında D.L. Gerlough *"Simulation of Freeway Traffic on a General-purpose Discrete Variable Computer"* isimli tezini California Üniversitesi'ne takdim etmesiyle ortaya çıkmıştır (Figueiredo vd., 2004).

Mikroskopik trafik simülasyon modelleri ulaştırma tesislerinin oluşturduğu sistem içinde taşıtların hareketlerini dinamik ve rastgele modellenmesidir. Her bir taşıtın ağ içerisindeki hareketi taşıtların fiziksel karakteristiği (taşıt uzunluğu, maksimum ivmelenme değeri vb.), hareketin temel kanunları ve sürücü davranış kurallarına göre saniyede bir güncellenmektedir (Url-7).

Bugün bir çok alternatif mikroskopik trafik simulasyon yazılımı mevcuttur. Leeds Üniversitesi tarafından yürütülen SMARTEST projesi çeşitli trafik simülasyonu özellikleri konusunda geniş kapsamlı çalışma niteliği taşımaktadır. Bu çalışma ticari, serbest ve geliştirilmekte olan sistemleri içeren dünyadaki 58 mikroskopik simülasyon yazılımı saptamıştır. Bunlardan geniş kapsamlı analiz için seçilen 32 simülasyon yazılımı uygulandığı yol şartlarına göre Çizelge 3.1 deki gibi sınıflandırılmaktadır:

Pek çok simülasyon modeli yol ağ üzerinde taşıtların hareketlerini modellemek için çeşitli algoritmalar ve davranış modelleri kullanmaktadır (Johnes, 2004).

3.2 CORSIM (CORRIDOR SIMULATION)

CORSIM (CORridor SIMulation) ulaştırma uzmanları arasında adı yaygın olarak bilinen ve kullanılan bir mikrosimulasyon yazılımıdır. CORSIM'in başlangıcı 1970 yılları başında Kent Trafik Kontrol Merkezinin (UTCS-1, Urban Traffic Control System) gelişmesiyle başlamıştır. Daha sonra kentiçi yollar için NETSIM mikroskopik simülasyon yazılım programına dönüşmüştür. Bir süre sonra otoyollar

Çizelge 3.1 : Mikroskopik trafik simülasyon yazılımları (Kaynak:Algers vd.,1997).

Modelleme Türleri			
Kentiçi	**Otoyol**	**Bütünleşik**	**Diğer**
CASIMIR	AUTOBAHN	AIMSUN2	ANATOLL
DRACULA	FREEVU	CORSIM	PHAROS
HUTSIM	FRESIM	FLEXSYT II	SHIVA
MICSTRAN	MIXIC	INTEGRATION	SIMDAC
NEMIS	SISTM	MELROSE	
NETSIM		MICROSIM	
PADSIM		MITSIM	
SIGSIM		PARAMICS	
SIMNET		PLANSIM-T	
SITRA-B+		TRANSIMS	
SITRAS		VISSIM	
THOREAU			

için INTRAS mikroskopik simülasyon yazılımı geliştirilmiş ve en sonunda gelişimini FRESIM simülasyon modeli olarak tamamlamıştır. NETSIM ve FRESIM ardışık olarak CORSIM simülasyon programına entegre edilmiştir. FHWA şu anda TSIS kullanıcı dostu arabirimine bu iki modülü yerleştirmiştir. CORSIM'in geliştirilmesi, bakımı ve desteğini Florida Üniversitesi sürdürmektedir (McHale vd., 2002).

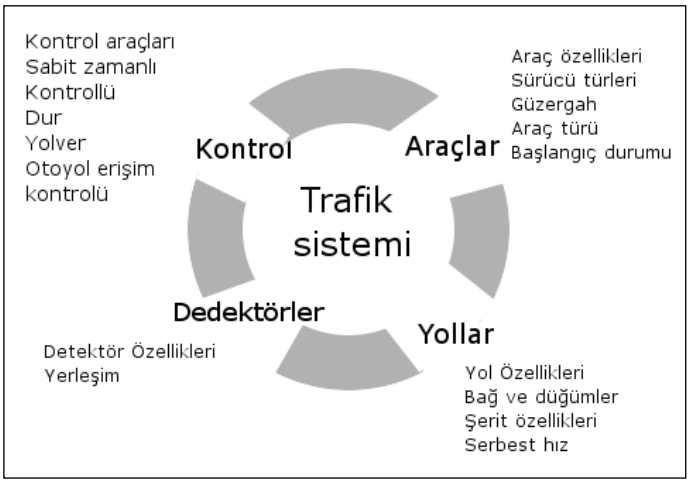
Bu çalışmada Entegre Edilmiş Sistem Trafik Yazılımı TSIS (Traffic Software Integrated System) 6.1 yazılım paketi kullanılmıştır. TSIS'in ana bölümünü trafik simülasyon programı olan CORSIM oluşturmaktadır. CORSIM geniş kapsamlı rastgele bir simülasyon programı olup basit ya da karmaşık kontrol şartları olan yol, otoyol veya bütünleşik ağları modellemek için geliştirilmiştir. TSIS, CORSIM simülasyon modelini yürütmek için entegre, kullancı dostu bir arayüz ve çevre sağlamaktadır (Owen vd., 2000). CORSIM simülasyon programı FRESIM ve NETSIM olmak üzere iki simülasyon modelinin bütünleştirilmesiyle oluşmuştur. FRESIM otoyollar, NETSIM ise kentiçi trafik akımının taşıt bazında benzetimini yapabilmektedir. Bu çalışmada geliştirilen model, kent içindeki otoyol trafik akımı ve trafik kontrolü söz konusu olduğu için modelin benzetim tekniğine dayalı incelenmesinde sadece FRESIM modeli kullanılacaktır.

TSIS'in iki önemli elemanı TRAFED ve TRAVFU'dur. TRAFED grafiksel ağ düzenleyici kullanılarak CORSIM benzetim modeli girdi dosyaları *(.trf)* hazırlanmaktadır. Mevcut girdi *"dosyaadı.trf"* dosyasını TRAFED *"dosyaadı.tno"* ağına dönüştürerek grafik düzenlemeyi mümkün kılabilmektedir. TSIS yazılımının

benzetim sonuçları bir çıktı işlemcisi olan TRAFVU (görselleştirme aracı) tarafından görsel olarak da kullanıcıya sunulmaktadır. Aynı zamanda TRAFVU benzetim sonuçlarını çizelge veya grafik olarak gösterebilmektedir.

3.2.1 CORSIM'de modelleme yaklaşımı

CORSIM mikroskopik trafik simülasyon yazılımı kullanıcılara kentiçinde ve otoyollarda taşıtların hareketlerinin modellenmesini, başka deyişle taşıtların birbirleriyle, trafik kontrol donanımları ve yol geometrisi ile etkileşiminin modellenmesini sağlamaktadır. CORSIM modelinin özellikleri Şekil 3.1'de görülmektedir. Buradan görüldüğü gibi CORSIM trafik sistemini yol, dedektör, trafik kontrol donanımları ve taşıtlarla etkileşim içinde bulunarak modellemektedir. Bunların herbirinin kendi özellikleri mevcuttur (McHale vd., 2002). Genel olarak trafik işletmesinde, sinyalizasyon kontrolünde, geometrik tasarım ve değerlendirmede, olay yönetiminde, otoyol katılım kontrolü ve yolcu taşıma kapasitesi yüksek taşıtlara ayrılan şeritlerin analizinde kullanılmaktadır. Trafik analizi ile belirli şartlar altında trafik işletimi değerlendirilmektedir. Simülasyon akım şartlarını ve trafik akımını modellemektedir.



Şekil 3.1 : CORSIM ekosistemi.

CORSIM trafik simülasyon yaklaşımında *verilerin toplanması*, *modele girilmesi* ve *kalibrasyonu* olmak üzere üç adım vardır. CORSIM için veri toplama işlemi çalışma bölgesinde bir zaman kesitinde, dakikalık trafik hacim değerleri, hız değerleri ve yolun geometrik ölçüleri (şerit uzunluğu, şerit sayısı, hızlanma ve yavaşlama şerit uzunluğu), proje hızı vb. bilgilerin elde edilmesini kapsar. Bunun yanında CORSIM simülasyon modelinde önceden tanımlanmış pek çok parametre vardır. Ancak

sürücü davranış ve yol karakteristiklerini kapsayan bu parametreler ortalama trafik davranışını temsil edecek şekilde, önceden varsayılarak tanımlanmıştır. İncelenen yol kesiminde varsayılan parametrelere çok aykırı durumlar olmadıkça değişiklik yapılmadan kalibrasyona devam edilir. Aşağıda CORSIM'e verilerin girilmesi, CORSIM'in çalışma mantığı ve önemli parametreler konusunda bilgi verilecektir. Daha sonra CORSIM'de kalibrasyon sırasında etkili parametrelerden söz edilecek ve ardından CORSIM modelinin oluşturulması işlemine geçilecektir.

3.2.2 CORSIM'de verilerin simülasyona girilmesi

CORSIM'de taşıt performansı ve sürücü davranışı ile ilgili çok sayıda model parametresi vardır. Dört farklı taşıt türü modellenebilmektedir. Bunlar otomobil, kamyon, otobüs ve paylaşımlı otomobildir. Bunlara ait 9 taşıt tipi (farklı işletme ve başarım özelliğine sahip) belirlenmiştir. Yol ağına giren her taşıt için Çizelge 3.2' de görülen bir taşıt türü (otomobil, kamyon, otobüs, paylaşımlı taşıt) ve ilgili taşıt özellikleri (hızlanma, yavaşlama ivmeleri, hız ve dönüş karakteristikleri) atanmaktadır. Her bir taşıt türünün oranı %100 tamamlayacak şekilde seçilmesine dikkat edilmelidir. Ayrıca her bir taşıta yol ağı boyunca taşıyacağı 10 sürücü karakteristiğinden (1:tedbirli ile 10:atılgan arasında değişen) bir tanesi rastgele atanmaktadır. CORSIM'de girdiler (taşıt ve sürücü davranışı ile ilgili karakteristikler) TSIS aracılığıyla ya da *.trf* uzantılı dosyaya ilgili kolona elle girilir (ITT, 2006).

Her bir taşıtın ağdaki durumu ve hızı, taşıtın performansına ve sürücü karakteristiğine, etrafındaki taşıtların hareketine, yol özelliğine ve trafik kontrol aygıtlarına bağlı olarak her saniye güncellenmektedir. Taşıt yol, taşıt taşıt ve taşıt kontrol aygıtları arasındaki etkileşim modellenir. Belirli bir senaryo için gerçek trafik şartlarını yansıtması açısından varsayılan taşıt ve sürücü karakteristiğini de değiştirmek mümkündür.

CORSIM'de taşıt performansı ve sürücü davranışı ile ilgili karakteristikler atandıktan sonra taşıtın ağ içindeki hareketi üç temel mantığa dayanarak gerçekleştirilir.

Çizelge 3.2 : Varsayılan CORSIM taşıt tipinin özellikleri (FHWA, 2007).

Taşıt Tipi	Performans İndeksi	Filo Bileşeni	Uzunluk (feet)	Taşıtta Ortalama Kişi Sayısı	Tipin Tanımlanması	Filo Bileşeninin Yüzdesi
(FRESIM) 1-(NETSIM) 5	1	Otomobil	14	1.3	Düşük Performanslı Otomobil	25(F)- 25(N)
(FRESIM) 2-(NETSIM) 1	2	Otomobil	16	1.3	Yüksek Perfomanslı Otomobil	75(F) -75(N)
(FRESIM) 3-(NETSIM) 2	3	Kamyon	35	1.2	Kamyon	31(F) -100(N)
(FRESIM) 4-(NETSIM) 6	4	Kamyon	53	1.2	Yarı Treyler (Orta Yüklü)	36(F)- 0(N)
(FRESIM) 5-(NETSIM) 7	5	Kamyon	53	1.2	Yarı Treyler (Tam Yüklü)	24(F)- 0(N)
(FRESIM) 6-(NETSIM) 8	6	Kamyon	64	1.2	İki Vagonlu Treyler	9(F)- 0(N)
(FRESIM) 7-(NETSIM) 4	7	Otobüs	40	25	Geleneksel Otobüs	100(F) -100(N)
(FRESIM) 8-(NETSIM) 9	8	Taşıt Paylaşımı	14	2.5	Düşük Performanslı Otomobil	25(F)- 0(N)
(FRESIM) 9-(NETSIM) 3	9	Taşıt Paylaşımı	16	2.5	Yüksek Perfomanslı Otomobil	75(F) -100(N)

F: **FRESIM, N:NETSIM**

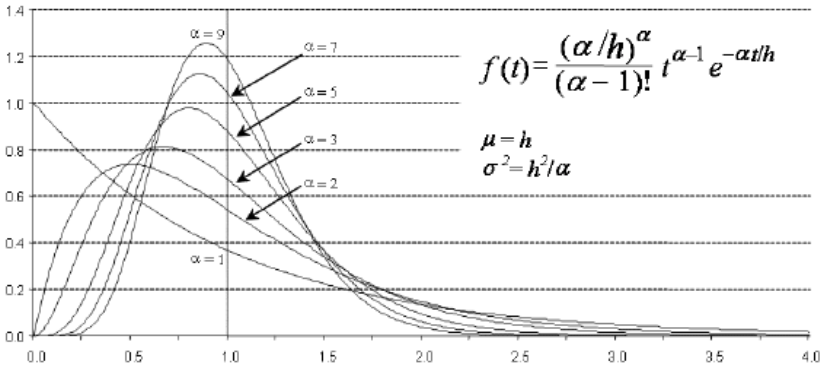
Bunlar taşıt takip mantığı, şerit değiştirme mantığı ve boşluk bırakma mantığıdır (Johnes, vd. 2004). Burada FRESIM'de kullanılan şerit değiştirme ve taşıt takibi mantığı açıklanmaktadır. Bununla birlikte kalibrasyon kısmında modellemede etkili olan temel parametreler üzerinde durulacaktır.

3.2.3 Taşıt takip mantığı

CORSIM rastgele mikroskopik simülasyon modeli olup taşıt aralığına dayanan (güvenli mesafe modeli) taşıt takip modelini kullanmaktadır. Taşıt takip modeli rastgele taşıt giriş aralıklarına dayanmaktadır.

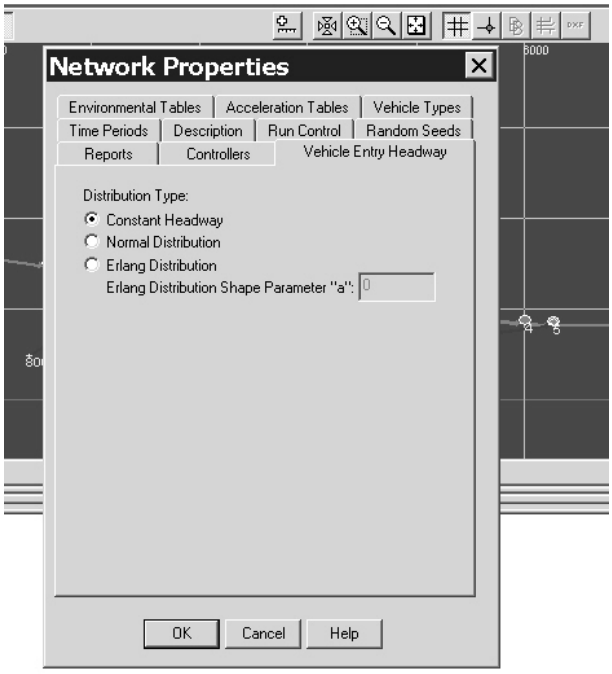
CORSIM giriş yapan taşıtların aralıklarını varsayılan ayarlarda düzgün dağılıma (uniform) göre yapmaktadır. Düzgün dağılımda taşıt aralıkları aynı olasılıklara sahiptir. Ancak kullanıcı bunun yerine taşıt aralıklarının normal dağılım veya Erlang dağılımına uygun biçimde rastgele olarak üretebilir. Arterler için normal, otoyollar için Erlang dağılımı tercih edilmektedir. Bu tercih yapıldıktan sonra ağa giren taşıtların aralıkları bu dağılıma göre belirlenir. Erlang dağılımı Şekil 3.2'de görülen

$\propto$ parametresine göre değişim gösterir. Taşıt aralıklarının dağılımının yüksek rastgelelikle üretilmesi isteniyorsa $\propto = 1$ alınır. Bu değerin üzerinde seçilen değerlerde rastgele taşıt aralığı üretimi düşer.



Şekil 3.2 : Erlang dağılımı ve taşıt aralıklarının hesabı.

Şekil 3.2'de $f(t)$, t aralığının olasılığını, h ise talep değerlerinden hesaplanan ortalama taşıt aralığını temsil etmektedir. CORSIM'de $\propto$ parametresi Şekil 3.3'de görüldüğü gibi "a" ile gösterilmektedir. Erlang dağılımının "a" parametresi (Şekil 3.3 Ağ Özellikleri) ilgili kutucuğa girilmelidir.



Şekil 3.3 : TSIS'de olasılık dağılımının girilmesi.

Gerçek hayatta sürücüler reaksiyon süresi ve fren mesafesini düşünerek öncül taşıt ile aralarında güvenli mesafe bırakmak durumundadırlar. Takip mesafesine sürücülerin, taşıtların özellikleri ve etrafını çevreleyen kısıtlar etki etmektedir.

CORSIM'de taşıt takip modeli ile her bağımsız sürücü (kullanıcı tanımlı sürücü tipleridir) için lider taşıt ile aralarında arzu edilen mesafe düzenlenebilmektedir. Trafik kontrol ekipmanları gibi var olan kısıtlar içerisinde sürücüler minimum takip mesafesini ve maksimum hızı korumaktadır (Bloomberg ve Dale, 2000).

FRESIM Pitt taşıt takip modelinden yararlanmaktadır. Bu model Pittsburgh Üniversitesi tarafından geliştirilmiştir (Halati et al., 1997) ve General Motors modelinin (May, 1990) farklı bir versiyonudur. Bu modele göre takip eden taşıt yeterince takip mesafesi bırakmak ve yetersiz takip mesafesi oluştuğunda yavaşlamak durumundadır (Turley, 2007).

Temel model Eşitlik 3.1'de görüldüğü üzere iki bağımsız değişken; öncül ve takip eden taşıt arasındaki mesafe taşıt aralığını ve taşıtların hız farklarını içermektedir. Kararlı durumda taşıtların hızlarının eşit olduğu düşünüldüğünde, modelin üçüncü terimi sıfır olmaktadır. Takip eden taşıt ile öncül taşıtın hızının büyüklüğüne göre kalibrasyon sabiti b'nin alacağı değer Eşitlik (3.2) ile belirtilmektedir. Tıkanıklık olmayan durumda ise Eşitlik (3.3)'de görüldüğü üzere maksimum hıza kısıt getirilmektedir (Rakha ve Crowther, 2002).

$$h(t) = L + m + kv_2(t) + \text{bk}\,[v_1(t) - v_2(t)]^2 \qquad \textbf{(3.1)}$$

Burada,

$h(t) = t$ anında uzunluk cinsinden aralık (ft)

$L =$ Öncül taşıtın uzunluğu (ft)

$m =$minimum taşıt takip mesafesi (PITT sabiti, 3ft-10 ft arasında değişmektedir)

$k =$izleyen taşıt için sürücü duyarlılık faktörü (s)

$b =$izafi hassaslık sabiti (s/ft) (kalibrasyon sabiti)

$v_1(t) = t$ anında öncül taşıtın hızı (ft/s)

$v_2(t) = t$ anında takip eden taşıtın hızı

$v_{f.}$ serbest hız

Kalibrasyon sabiti b,

$$b = \begin{cases} 0.1, & (v_1 - v_2) \leq 10 \\ 0, & (v_1 - v_2) > 10 \end{cases} \quad \textbf{(3.2)}$$

$$v_2(t) = \min\left(\frac{h - (m + L)}{k}, v_f\right) \quad \textbf{(3.3)}$$

Taşıt takip duyarlılık faktörü sürücülere göre farklılık göstermektedir. Agresif sürücüler tedbirli sürücülere göre öncül sürücüyü daha yakın takip etmektedir. Sürücünün koruduğu mesafeye agresifliği, taşıtın özellikleri ve etrafındaki karakteristikler etki etmektedir. Aşağıdaki Çizelge 3.3'de CORSIM tarafından varsayılan tutucu sürücülerden agresif sürücülere doğru sıralı taşıt takip duyarlılık faktörleri görülmektedir.

Çizelge 3.3 : Varsayılan taşıt takip duyarlılık faktörü (saniye cinsinden).

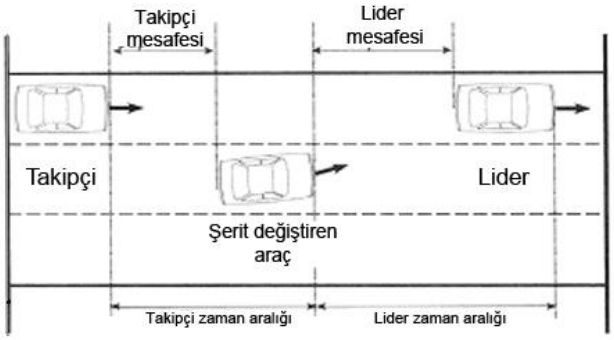
Sürücü Tipi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Duyarlılık Faktörü,k	1.25	1.15	1.05	0.95	0.85	0.75	0.65	0.55	0.45	0.35

3.2.4 Şerit değiştirme mantığı

Şerit değiştirme algoritmaları trafik akımı içerisinde taşıtların katılım, örülme ve şerit değiştirme hareketlerini kontrol etmektedir. Şerit değiştirme sürücü davranışı, taşıt performansı ve trafik akımı içerisindeki şartları içeren karmaşık bir manevradır. Sürücüler farklı sebeplerden dolayı şerit değiştirme yapmaktadırlar (Johnes, vd. 2004).

FRESIM modeli üç çeşit şerit değiştirme durumu dikkate almaktadır. Zorunlu, rastgele (beklenen) ve isteğe bağlı (keyfi) şerit değiştirmedir (Şekil 3.4).

Genel olarak modelde her bir sürücüye aşağıdaki şerit değiştirme karakteristikleri atanmıştır (Johnes, 2004): Bunlar;



Şekil 3.4 : Keyfi şerit değiştirme.

- Şerit değiştirme yapabilmek için kabul edebildikleri maksimum yavaşlama ivme değeri
- Şerit değiştirme için gerekli ortalama zaman/mesafe
- Bitişik trafik akımı ile kabuledilebilir minimum boşluk
- Şerit değiştirme için doğrultuya girme
- Keyfi şerit değiştirme için istek ve kazanç

karakteristikleridir. Şerit değiştirme parametrelerinin çok dikkatli kodlanması gerekir. Ağ performansına etkisi büyüktür. Gerçek dışı şerit değiştirme davranışları büyük gecikmelere neden olabilir (Johnes, 2004).

Keyfi şerit değiştirmede ise üç parametre önem arz etmektedir. Bunlar ise;

- Motivasyon (hıza bağlı arzu edilen şerit değiştirmeyi yapabilmek için)
- Üstünlükler (sürücü daha iyi bir koşula mı geçecek)
- Acelecilik (sürücü tipine bağlı sabırsızlık faktörü) (MDOT, 2008)

olarak sıralanır.

3.3 CORSIM Kalibrasyonu

Sistemin simülasyonu yapıldıktan sonra model sonuçlarının elde edilmesinden önce, çıktıların gerçek trafik koşullarını ve davranışını yansıttığından emin olmak gerekir. Bu işleme kalibrasyon denilir. Beklenmedik sorunlar veya gerçek dışı davranışlar oluştuğunda CORSIM'de içsel parametrelerde değişiklik yapılabilmektedir (Daigle vd, 1998). Pek çok CORSIM girdisi kalibrasyon parametresi olarak bilinmektedir. Bu girdiler kullanıcıya CORSIM'in gerçek trafik koşullarını yansıtması bakımdan hassas ayarlama olanağı verir. Kalibre edilecek parametreler hem taşıt hemde sürücü karakteristiği ile ilgilidir (CORSIM User Guide, 2006). CORSIM'de önem teşkil eden başlıca kalibrasyon parametreleri aşağıda görülmektedir:

-Taşıt Takibi Duyarlılık Faktörü (car following sensivity factor): Genel bir parametredir. Her bir sürücü tipinin farklı değeri vardır. Bu değer zaman cinsinden aralığın hesaplanmasında temel parametredir. Bu değerin yüksek olması taşıtlar arasında mesafenin fazla ve kapasitenin düşük olması demektir. Tutucu sürücülerden agresif sürücülere doğru 1,20 s-0,35 s arasında değer alır (Çizelge 3.3). Bu değer

şerit iptali, katılım ve örülme durumunda kapasiteyi etkilemektedir (Scabardonis, 2002).

-Taşıt Takibi Çarpanı (car following multiplier): Bu değer her kesim için ayrı ayrı ayarlanabilmektedir. Taşıt takip duyarlılık faktörü için bir çarpandır. Varsayılan değeri 100'dür. Bu değerin yükselmesi taşıtlar arasında daha fazla mesafe olması anlamına gemektedir. Dolasıyla kapasitenin düşük olması demektir.

-İvmelenme için Reaksiyon Süresi: Taşıtların hızlanma ve yavaşlama anında kaybedilen zamanı diğer bir deyişle reaksiyon süresini ifade etmektedir. Bu değerin yüksek olması reaksiyonun zayıf olması ve dolayısıyla kapasitenin düşük olması demektir. Bu değer için varsayılan değer 0,3 saniyedir.

-Minimum Taşıt Takip Mesafesi (İzleme Sabiti): Otoyolu etkileyen global bir parametredir. Öncül taşıt ile izleyen taşıt arasındaki minimum mesafeyi göstermektedir. Varsayılan değer 3,05 metredir (10 feet). Bu değerin yüksek olması kapasitenin düşük olduğunu göstermektedir. Scabardonis (2002) şerit iptali ve katılım durumunda izleme sabitinin kapasiteyi etkilediğini belirtmiştir. Kabul edilebilir değeri 3-10 ft arasındadır.

Yukarıda söz edilen parametreler kapasiteyi dolayısıyla otoyol sistem başarımını doğrudan etkilemektedir. Bununla birlikte sistem başarımını etkileyen diğer parametreler şunlardır:

- Şerit değiştirmek için gerekli olan süre: Bu evrensel bir parametredir. 2 saniye varsayılan değeridir.
- Yol Veren Sürücülerin Yüzdesi (Driver Yield Value): Anayolda örülme kesimine yaklaşan sürücülerden, katılıma yaklaştıklarında bulundukları sağ şeritten sol şerite geçenlerin sayısını yüzdelik (%) cinsinden ifade etmektedir. Burada aynı zamanda anayolda katılımlara yaklaştığını belirten uyarı levhalarının yerleşimi de önemlidir. Taşıtların belirli mesafeden önce şerit değiştirmeyi tamamlamış olması gerekmektedir.
- Şerit Değiştirme Sırasında Sürücü Agresifliği: 1 (çok agresif)-6 (az agresif) değerleri arasındadır. Bu parametre değeri sürücülerin şerit değiştirme manevrası sırasında bıraktıkları minimum boşluk, hızlanma ve yavaşlama ölçüsünü ifade etmektedir.

– Ortalama otoyol serbest hızı: Bu bağ bazında bir değerdir ve sürücü tipine göre değişmektedir. Genel bir çarpana göre her sürücü tipi için serbest hızdaki değişim belirlenir. Bu çarpan tutucu sürücüler için %88, agresif sürücüler için %112 aralığında değişmektedir.

Ortalama otoyol serbest hızı (model) saha koşulları ile eşleşmediğinde bazen bu değerde değişiklik yapmak kalibrasyonun başarımını arttırmaktadır. Örnek vermek gerekirse hava durumu veya yol geometrisinden dolayı sistemin başarımı düşerse, daha tutucu sürücü davranışları oluşur. Uygun olan yöntem sahada ölçülen serbest hızın yazılıma girilmesidir. Ancak sürücü davranışları, ölçümün yapılmasında zorlanılan durumlar ve gözlenemeyen koşullar nedeniyle ortalama serbest hız parametresi kalibrasyon ile tahmin edilebilir (Holm, 2007).

CORSIM benzetim süresi sonunda, benzetimle ilgili birçok istatistik bilgisinin yer aldığı çıktı dosyası üretmektedir. Bu dosya, içinde her simülasyon zaman aralığı sonunda ilgili bağa ait ortalama hız, yoğunluk, hacim, toplam yolculuk süresi, gecikme süresi, şerit değiştirme sayısı, yakıt tüketim değerleri, emisyon miktarı gibi pek çok değeri içermektedir. Bu dosyayı CORSIM çalışma sırasında oluşturulur.

Ortalama hız, yoğunluk gibi trafik akım değişkenlerini doğrudan elde etmek mümkün olmadığında RTE arabirimine ihtiyaç duyulur. RTE modülü pek çok veriye erişebilir ve bunları çıktı dosyasına ya da veritabanına yazma olanağı sağlar. Örneğin, bağın herhangi bir andaki ortalama hızını bulmak için ilgili zaman aralığında taşıtların aldıkları yol, aynı zaman diliminde harcadıkları süreye bölünerek bulunabilir. Bağ verileri zaman ekseninde toplanarak (kümülatif olarak) tutulmaktadır. Herhangi bir andaki uzunluk anlamlı hız değeri için aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$v_{ort}^{b}(k) = \frac{TTD(k) - TTD(k-1)}{TTT(k) - TTT(k-1)} \qquad \textbf{(3.4)}$$

Eşitlikte TTD toplam alınan yol, TTT toplam harcanan süreyi temsil etmektedir. k zaman adımını gösteren sayaçtır.

Bağ istatistiklerinin diğer önemli özelliği ölçümlerin hatasız olmasıdır. Bunun anlamı simülasyonun çalışması sırasında tutulan kayıtlarından hangi taşıtın tam olarak

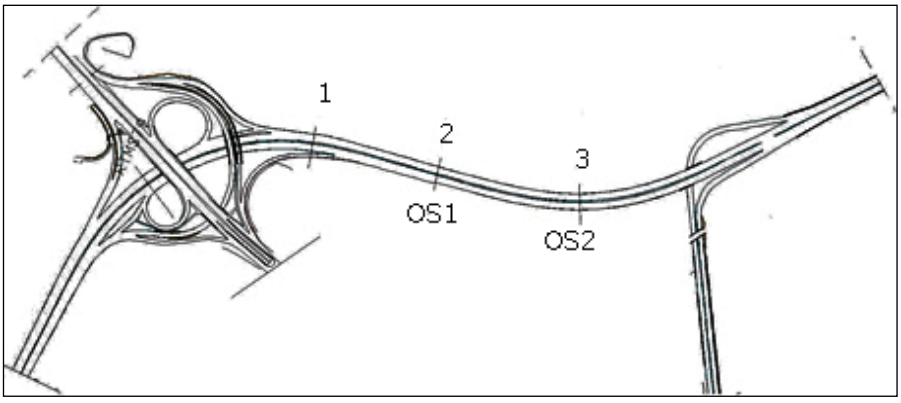
nerede ve ne zaman bulunduğuna dair istatistiklerin oluşturulmasıdır. Dedektör ölçüm hataları bağ istatistiklerinde görülmez. Bu nedenle bağ ve dedektör verileri CORSIM'de tam olarak örtüşmez.

3.4 CORSIM Simülasyon Programı ile Simülasyon Modelinin Oluşturulması

Bu çalışma kentiçi otoyolunda uygulanacağı için CORSIM simülasyon programının FRESIM benzetim modeli kullanılacaktır. Modelin oluşturulması için yapılan işlemler sırasıyla aşağıda başlıklar halinde anlatılmıştır.

3.4.1 Simülasyon için verilerin elde edilmesi

Simülasyon için verilerin elde edilmesinde uygulama bölgesi olarak seçilen O-1 otoyolunun Boğaziçi Köprüsüne yaklaşan yol kesiminin geometrisinin oluşturulması için bu yol kesimini kapsayan haritalardan faydalanılmıştır (Google Earth, 2007; İBB, 2007). O-1 kentiçi otoyolunun Avrupa-Asya yönünde Boğaziçi Köprüsüne yakın kesiminde akşam zirve saatinde tekrarlı trafik tıkanıklığı yaşandığı, Balmumcu ve Beşiktaş katılımları ve yol geometrisi nedeniyle trafikte düzensizliklerinin oluştuğu, yapılan gözlem ve incelemeler sonucu görülmüştür. Yapılan ön incelemelerden sonra ölçümlerin yapılacağı istasyon yeri olarak Şekil 3.5 'de belirtilen üç ayrı kesit uygun görülmüştür. Yol kesiminin seçiminde üç faktör etkili olmuştur. Bunlardan bir çevreseldir. Üç şeritli ve katılımları olan kentiçi otoyolunun bütünüyle gözlenebileceği istasyon yeri bulmakta güçlük çekilmiştir. İkinci olarak donanım sıkıntısı olmuştur, çünkü yol kesimi uzun tutulduğunda kalibrasyon verisi artmakta buna karşın donanım ve eleman ihtiyacı da artmaktadır. Bölgenin bazı kesimlerinde



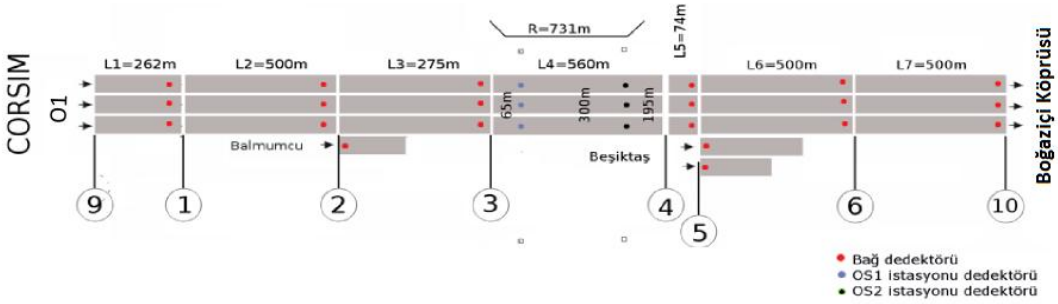
Şekil 3.5 : O-1 Otoyolunda ölçüm yapılan kesitler.

RTMS radar cihazları mevcut olsa da, bu radar verilerinin hacim değerleri araziden ölçülen değerlerle karşılaştırıldığında istatistik olarak trafiği temsil etmekten uzak olduğu saptanmıştır (Demir ve Demir, 2008). Üçüncü olarak bu tür bir uygulamanın yapılması için herşeyden önce finansal desteğin ve geniş zamanın olması gerekmektedir. Bu şartlar altında uygulama kesimi ve istasyon yeri belirlendikten sonra arazi çalışmalarına başlanmıştır. Hangi verilerin simülasyonda kullanılacağı kararına varmak için bölgede farklı günlerde yapılan video çekimlerinden, hava koşullarının trafiği etkilemediği, trafik koşullarını etkileyecek bir olayın ya da kazanın meydana gelmediği günlerdeki çekimler dikkate alınmıştır.

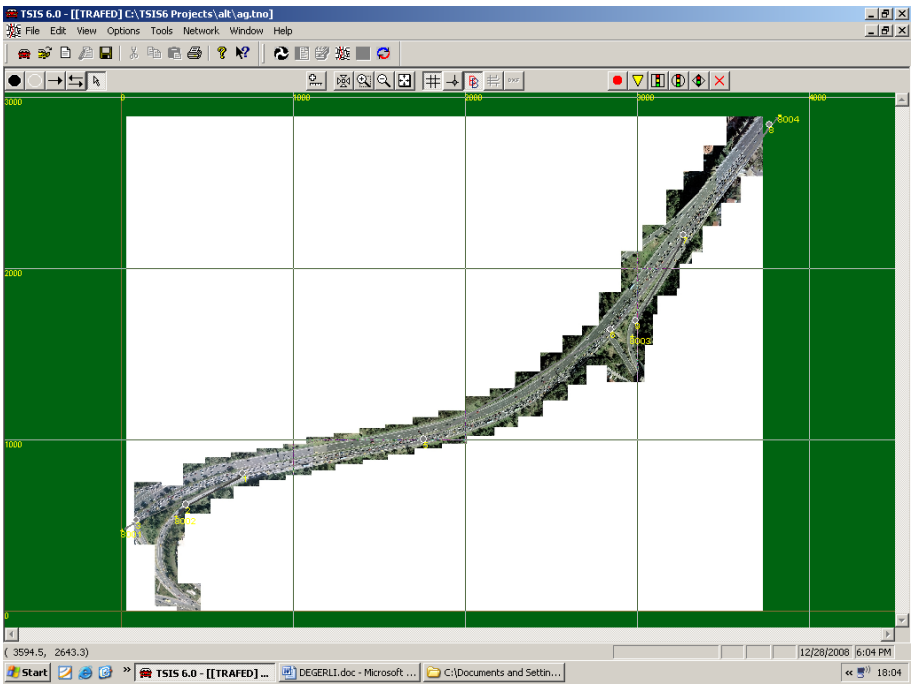
Arazide, 16.10.2007 tarihinde Avrupa yakasında Asya yakası doğrultusunda trafikte akşam zirve saatinde, 16:23-17.30 saatleri arasında, taşınabilir kamera ile çekimler yapılmıştır. Daha sonra kayıtlar incelenerek Şekil 3.5'de görülen yol kesiminde gözlem istasyonlarının yeri belirlenmiştir. Gözlem istayonlarının yerinin belirlenmesinde GPS cihazından (güzergah üzerinde bulunan köprü uzunluğu, elektrik direkleri gibi sabit yerler arasındaki uzunluk ölçülmüştür) ve haritalardan yararlanılmıştır. Kayıtlardan ilgili istasyonlardan üç şeritli yol kesitinden bir dakikalık aralık için trafik akım hacim değerleri elde edilmiştir. Sonra istasyonlar arasında yol kesiminden her bir dakikalık zaman dilimi içinde örnekleme yolu ile seçilen taşıtların hızları bulunmuştur. Yoğunluk için 0, 15, 30, 45. saniyelerde kayıt durdurulmuş ve belirlenmiş olan uzunluk (istasyonlar arasında) içinde taşıt sayılarına bakılmıştır. Daha sonra trafik akım değerleri tablolaştırılmıştır.

3.4.2 Arazi verilerinin CORSIM'e girilmesi

TSIS'de simulasyonun ilk adımı bir proje klasörü yaratmaktır. TSIS içinde simülasyonla ilgili oluşturulacak tüm dosyalar ve çıktıları bu klasör içinde tutulur. Çalışma bölgesi bağların ve düğümlerin birleşiminden olmak üzere yedi bağa bölünmüştür (Şekil 3.6). Öncelikli olarak çalışma kesiminin geometrisi TSIS içinde bulunan TRAFED kullanılarak Şekil 3.7'de görüldüğü gibi çizilmiştir.



Şekil 3.6 : Yol ağına ait geometrik veriler ve dedektör noktaları.



Şekil 3.7 : TRAFED'de hazırlanmış yol ağı.

Ağ geometrisi oluşturduktan sonra, simülasyon süresi, simülasyon aralığı ve talep değerleri girilerek proje oluşturulmuştur. Yola katılımın olduğu (ana yol ve iki yan yol) üç noktaya, bu noktalardan 5 dakikalık aralıklarda, büro çalışmaları sonucu elde edilen trafik akım değerleri (talepler) saatlik olarak hesaplandıktan sonra girilmiştir. Birer dakikalık sayımlardan elde edilen (Ek.A) beş dakikalık akım değerleri (sahada ölçülen) Çizelge 3.4'de görülmektedir.

Modelde ana yol için serbest hız 65 mil/h, katılım ve varyant için 60 mil/h seçilmiştir. Yol kaplaması bütün yollarda kuru asfalt seçilmiştir. Diğer değerler varsayılan değer olarak kullanılmıştır.

Simülasyon süresi (4500 saniye) gözlem süresinden (3900 saniye) daha büyük seçilmiştir. Böylelikle kalibrasyon sonrası, gözlenen sürenin ötesinde çalışma

bölgesindeki trafik durumunu gözlemek mümkün olacaktır (CORSIM kalibrasyonu 65 dakika için yapılmıştır).

Çizelge 3.4 : Ana yol ağına katılan (O-1) trafik akım değerleri.

Zaman Dilimi*	O-1		Balmumcu		Beşiktaş	
	5dk. Hacim Göz.	Q(h)	5dk. Hacim Göz.	Q(h)	5dk. Hacim Göz.	Q(h)
1	359	4308	19	228	103	1236
2	362	4344	26	312	142	1704
3	396	4752	36	432	137	1644
4	362	4344	24	288	160	1920
5	370	4440	25	300	154	1848
6	403	4836	24	288	165	1980
7	379	4548	24	288	217	2604
8	378	4536	31	372	146	1752
9	416	4992	23	276	165	1980
10	440	5280	49	588	169	2028
11	424	5088	50	600	183	2196
12	322	3864	51	612	177	2124
13	316	3800	73	876	203	2436

Göz.: Gözlenen Talep **Düz.**: Düzeltilmiş Talep

On saniye simülasyon zaman aralığında simülasyon verilerini toplamak için OS1 ve OS2 noktalarına iki dedektör yerleştirilmiştir. OS1 noktası 2 No'lu düğüm noktasından 340 m uzaklıktadır. OS2 noktası ise OS1 noktasından 300 metre uzaklıktadır. Bu dedektörlerden her on saniye (T_{sim} =10 saniye) için hız ve akım verileri toplanmaktadır. Bu verileri CORSIM'den OS1 ve OS2 istasyonlarıdaki dedektörlerden almak için RTE (Run Time Extension) dinamik kütüphanesi yazılmıştır. Bunun nedeni CORSIM'in çalışma sırasında ve sonrasında, istenen verileri kullanılabilir biçimde üretmemesidir. Ayrıca daha sonra bu çalışma kesimi üzerinde hız sınırlaması uygulaması için yine RTE arabirimine ihtiyaç duyulacaktır.

3.4.3 CORSIM Run Time Extension (RTE) arabirimi ve kullanılması

CORSIM çalışma anında benzetim ile ilgili binlerce farklı veriyi paylaştığı bir bellek bölgesine yazar. Bu bölgeye (RTE) adı verilen dinamik kütüphanelerle erişerek bir çok değer okunabilir.

CORSIM çalıştığında, her benzetim adımında, CORSIM sunucusu CORSIM yazılımı içindeki bir dizi fonksiyonu çağırır ve işletir. Eğer bu çağrı sırasında kullanıcı tarafından yazılmış fonksiyonlar varsa (RTE) bu fonksiyonlar çağrılır ve

işletilir. CORSIM yazılımının çalışması CORSIM'e özgü tanımlanmış bir zaman çizgisinde gerçekleşir. Bu zaman çizgisi aşağıda belirtilen altı adımdan oluşur:

1-Ağın yüklendiği ve uygunluklarının ve hatalarının kontrol edildiği, *Initialize*

2-Benzetimin başladığı *BeginSimulation*

3-Benzetim zaman adımı, *TimeStepComplete*

4- Benzetim zaman aralığı,*TimeIntervalComplete*

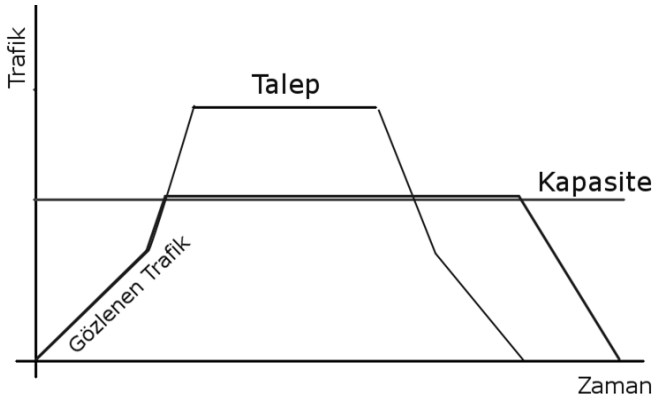
5- Benzetim zaman periyodu, *TimePeriodComplete*

6-Benzetim sonlanması, *SimulationComplete*

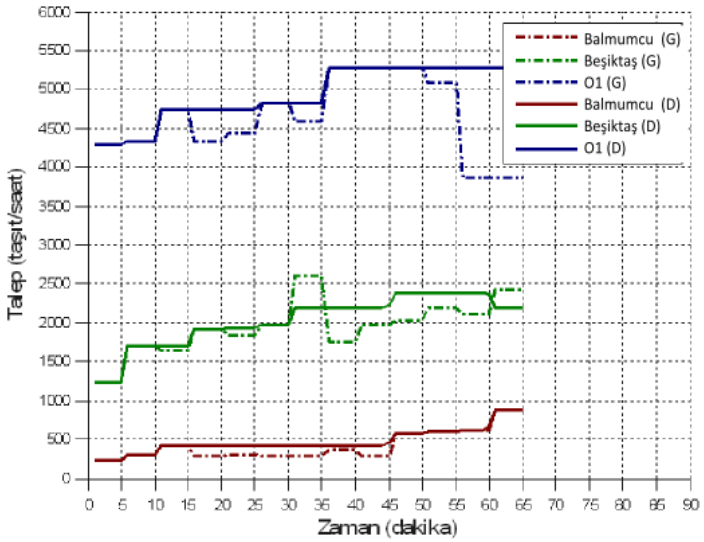
RTE arabirimi bir dinamik kütüphanedir. Bu nedenle de bir programlama dilinde yazılıp dinamik kütüphane olarak derlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada kullanılan dinamik kütüphaneler, MS Visual Studio ortamında C++ yazılımı ile oluşturulmuştur.

3.4.4 Kalibrasyon

Ulaştırma taleplerinin belirlenmesi karmaşık ve emek-yoğun bir süreçtir. Büyük ölçekte planlama çalışmalarında, yol kenarı sayımları dışında anket yöntemiyle elde edilen verilerden talep modelleri üretilir. Bir yol kesimindeki talep için, bu yol kesimine giriş yapan trafik sayımı yeterli olabilir. Ancak tıkanıklığın uzun ve sürekli olduğu yol kesimlerinde gözlemler sonucu elde edilen veriler talebi yansıtmaktan uzak kalır. Talep kapasitenin altına düştüğünde trafik talebi gözlenen trafiktir (Şekil 3.8). Talep kapasitenin üzerine çıktığında gözlenen yol kesminde tıkanıklık oluşur ve kapasite ya da kapasitenin altında bir trafik geçebilir. Bu durumda gözlenen trafik talebi yansıtmaz. Bu çalışmada düzeltilmemiş girdilerden elde edilen simülasyon anayol ve katılımda kuyruklanma üretmemiştir. Oysa çalışma bölgesinde gözlem süresinin sonunda anaakım ve katılımlarda kuyruk oluşumlarının başladığı gözlenmiştir. Bu nedenle CORSIM'e girilecek Çizelge 3.4'deki talepler, OS1 ve OS2 istasyonundan elde edilen CORSIM değerleri ile gözlenen hız ve akım değerleri örtüşünceye kadar, deneme yanılma yoluyla arttırılmıştır. Gözlemler ile CORSIM çıktıları yeterli derecede örtüştüğünde talep düzeltme işlemi tamamlanmıştır. Şekil 3.9'da CORSIM kalibrasyonu için kullanılan düzeltilmemiş talep değerleri ve kalibrasyon sonrası düzeltilmiş talep değerleri görülmektedir.



Şekil 3.8 : Ulaştırma sisteminde talep kapasite ilişkisi.



Şekil 3.9 : Gözlenen ve düzeltilen talep değerleri.

CORSIM'e öncelikle sadece geometri ve düzeltilmemiş gözlemler girilmiş ve benzetim yazılımı çalıştırılmıştır. Sabit zaman aralıklarıyla taşıtların kesime bırakıldığı bu çalıştırma sırasında OS1 ve OS2 istasyonlarındaki dedektör verilerinden 10 saniye aralıklarla hız ve akım değerleri okunmuştur.

Taleplerde herhangi bir değişikliğe gidilmeksizin (Çizelge 3.4) OS1 ve OS2 gözlem istasyonları için ölçülen hız ve akım değerleri ile gözlenen hız ve akım değerlerinin grafiksel gösterimi Şekil 3.10 ve Şekil 3.11'de görülmektedir. Bu grafiklerde CORSIM çıktılarının gözlenen hız değerleriyle uyuşmadığı görülmektedir. Katılımlarda gözlenen ve CORSIM'e girilen taleplerin, OS1 ve OS2 istasyonlarında gözlenen tıkanıklık durumunu yaratmadığı (Çizelge 3.4) anlaşılmaktadır. Daha önce bahsedilen kapasite talep ilişkisi nedeniyle düzeltilmiş yeni talepler CORSIM'e girilmiş ve benzetim yazılımı tekrar çalıştırılmıştır (Çizelge 3.5).

Çizelge 3.5 : Ana yol ağına katılan (O-1) trafik akım değerleri.

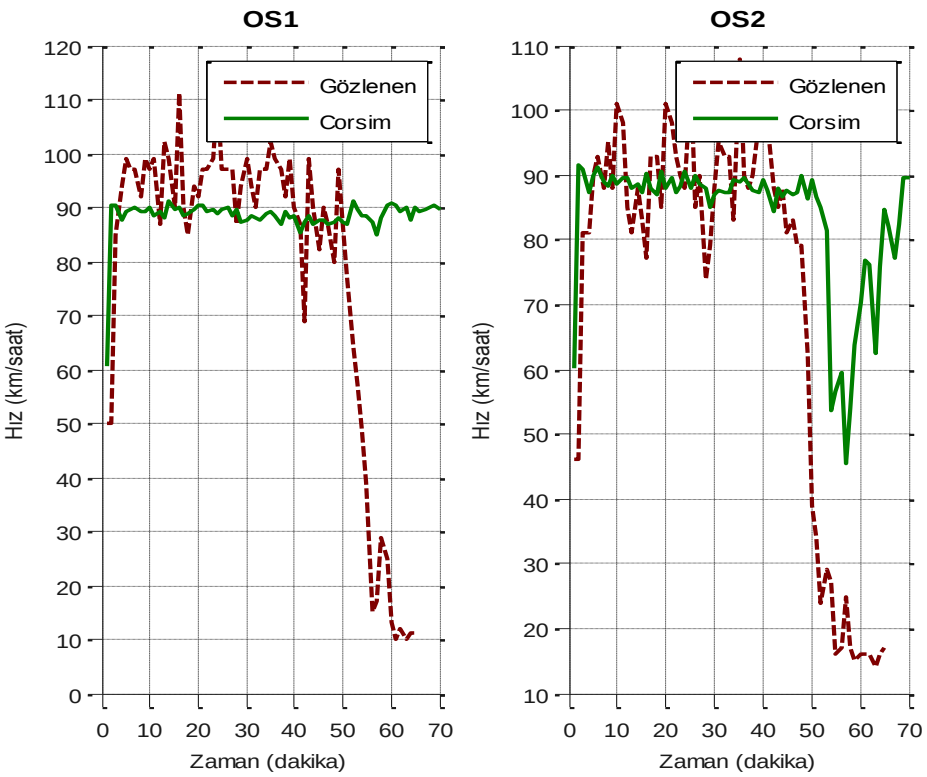
Zaman Dilimi*	O-1			Balmumcu			Beşiktaş		
	5dk. Hacim Göz.	Q(h)	Q(h) Düz.	5dk. Hacim Göz.	Q(h)	Q(h) Düz.	5dk. Hacim Göz.	Q(h)	Q(h) Düz.
1	359	4308	4308	19	228	228	103	1236	1236
2	362	4344	4344	26	312	312	142	1704	1704
3	396	4752	4753	36	432	432	137	1644	1704
4	362	4344	4753	24	288	432	160	1920	1920
5	370	4440	4753	25	300	432	154	1848	1940
6	403	4836	4836	24	288	432	165	1980	1980
7	379	4548	4836	24	288	432	217	2604	2200
8	378	4536	5280	31	372	432	146	1752	2200
9	416	4992	5290	23	276	432	165	1980	2200
10	440	5280	5290	49	588	588	169	2028	2400
11	424	5088	5290	50	600	600	183	2196	2400
12	322	3864	5290	51	612	612	177	2124	2400
13	316	3800	5290	73	876	876	203	2436	2200

Göz.: Gözlenen Talep **Düz.**: Düzeltilmiş Talep

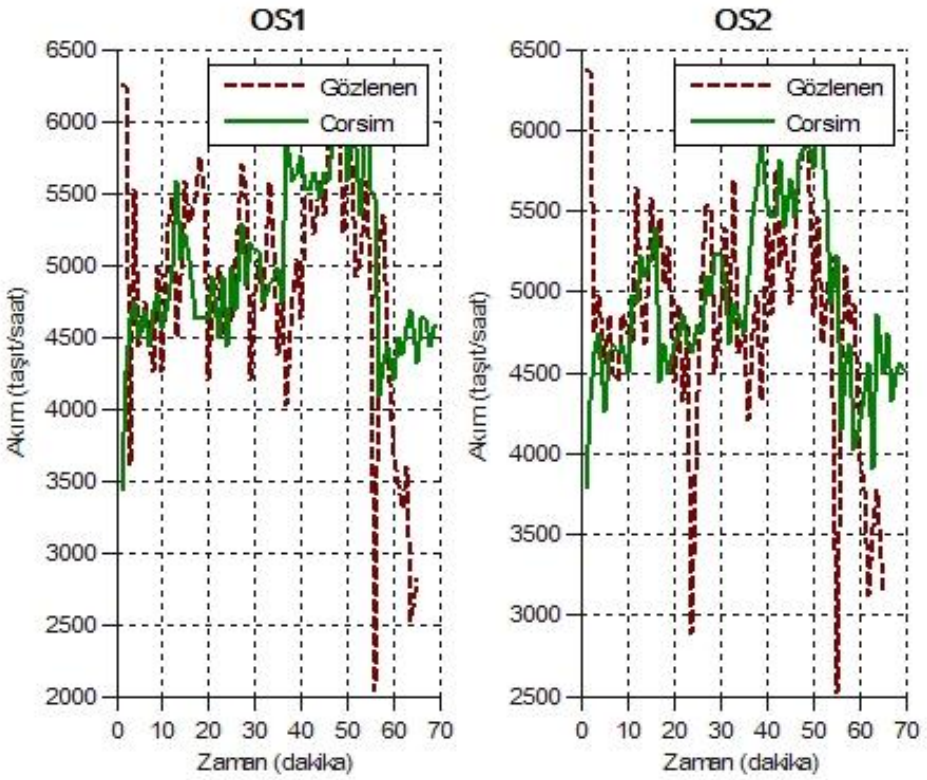
CORSIM'in çalışma bölgesindeki trafiği doğru yansıtıp yansıtmadığından emin olmak için CORSIM içinde bulunan Normal dağılım ve Erlang dağılımı seçeneklerinden her biri için CORSIM 10 defa çalıştırılmıştır. Her çalışmada olasılık dağılımına ait parametreler CORSIM içinde bulunan rastgele sayı üreteci tarafından belirlenmiştir. Çoklu çalıştırma sonucu OS1 ve OS2 gözlem istasyonlarına ait hız ve akım verileri elde edilmiştir. İstasyonlara ait hız ve akım değerlerine karşılık gelen on adet çıktı kümesinin ortalamaları alınarak yine ilgili istasyona ait gözlemlerle karşılaştırılmış ve istatistik sınamaları yapılmıştır. Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'de düzeltilmiş talep ve farklı olasılık dağılımlarına göre çalıştırılan CORSIM hız ve akım değerleri ortalamaları görülmektedir.

Benzetim modelinin doğru olarak kalibre edildiği, sahadan elde edilen hız ve akım değerlerinin CORSIM'in ürettiği değerlerle aynı örnekleme uzayından geldiği, istatistiksel olarak doğrulanmasıyla anlaşılır. Kalibrasyon sonucunda CORSIM'in çalışma kesimini temsil edebildiğini nesnel anlamda ölçebilmek için aşağıdaki ölçütler kullanılmıştır:

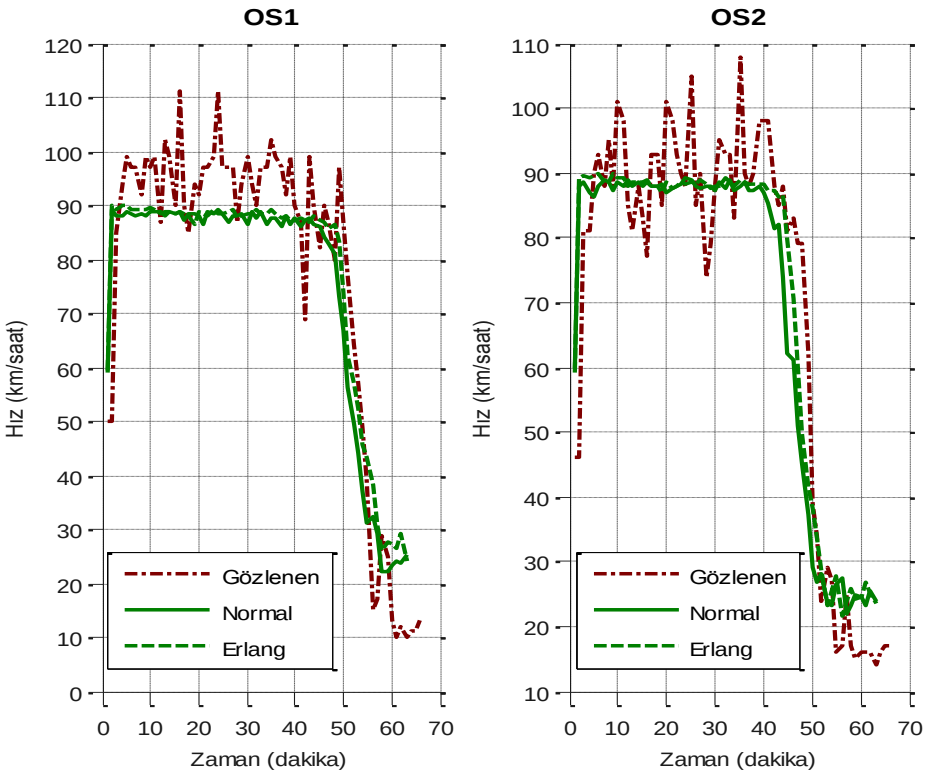
- ortalama hata (OH, Mean Error, ME)
- ortalama karesel hata (OKH, Mean Square Error, MSE)
- ortalama mutlak hata (OMH, Mean Absolute Error, MAE)



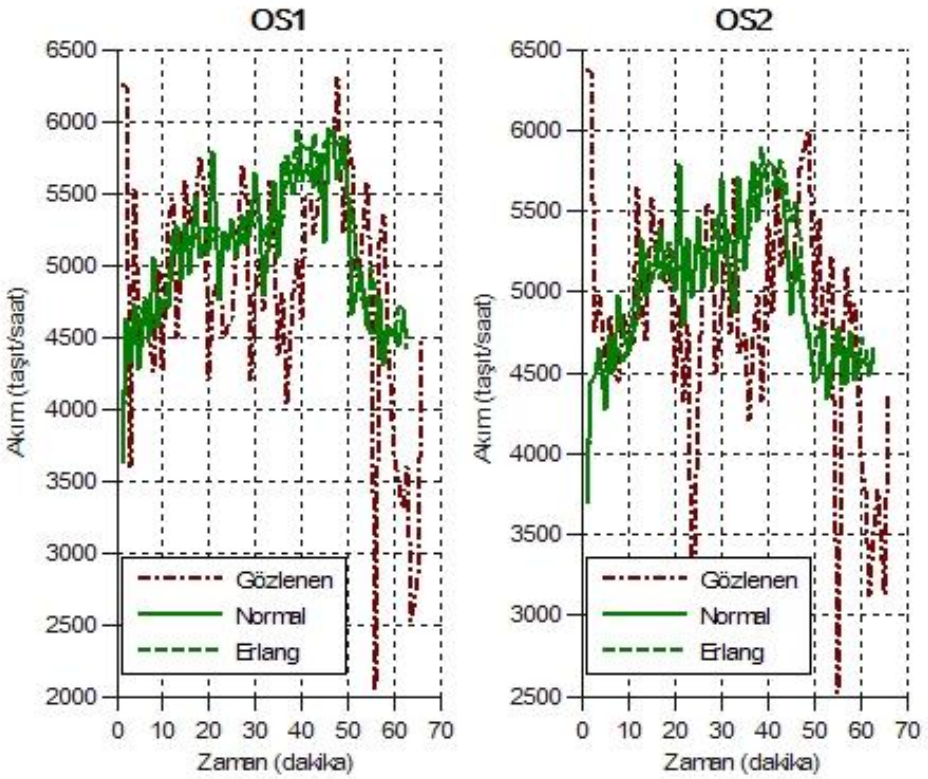
Şekil 3.10 : Kalibrasyon öncesi CORSIM hız ve gözlenen hız değerleri



Şekil 3.11 : Kalibrasyon öncesi CORSIM akım ve gözlenen akım değerleri.



Şekil 3.12 : Kalibrasyon sonrası CORSIM hız ve gözlenen hız değerleri.



Şekil 3.13 : Kalibrasyon sonrası CORSIM akım ve gözlenen akım değerleri.

- ortalama hata yüzdesi (OHY, Mean Percent Error, MPE)
- ortalama mutlak hata yüzdesi (OMHY, Mean Absolute Percent Error, MAPE)
- Theil's U1 istatistiği

Bazı ölçütler hesaplama yöntemlerinden kaynaklanan bu nedenle değerlendirme sırasında tek başına bir ölçüt olarak alınması yanıltıcı olabilecek eksiklikler taşırlar. Bunlara aşağıda kısaca değinilmiştir.

Ortalama Hata (OH): CORSIM tahmininin yaptığı hatanın hangi tarafta kaldığını (taraflı) gösteren bir istatistiktir. Ters işaretli büyük tahmin hatalarını gözardı edememesi bu istatistiğin zayıf yanıdır. Sıfır değeri, gözlem ve tahmin arasındaki uyumu gösteren eniyi derecedir. Ancak bu değer tahmin modelinin hatasız tahmin yaptığını her zaman göstermez. Eğer her iki tarafa (artı ve eksi) dağılmış hatalar varsa, bu ters işaretli değerler birbirini yok edeceğinden bu istatistiğin verdiği küçük değerler yanıltıcı da olabilir. Ancak bir tarafa doğru yığılmış (+ veya -) hataların ortalaması için kullanılabilir.

$$OH = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(a_i - f_i) \qquad \textbf{(3.5)}$$

a_i:Gözlenen değerler (actual value)

f_i: Tahmin değerleri (forecast)

Ortalama Karesel Hata (OKH) ve Ortalama Mutlak Hata (OMH): OKH, OH gibi artı ve eksi hatalardan etkilenmez. Toplam hatayı bulmak için uygun bir ölçüttür. Ancak tahmin gücünün doğruluğunu verilerin ölçeğini göz ardı etmesi nedeniyle yansıtmayabilir. Örneğin akım ve hız için hesaplanan bu değer akım değerlerinin daha büyük ölçekte olmasına karşılık aynı hata ortalamasını verebilir.

$$OKH = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(a_i - f_i)^2 \qquad \textbf{(3.6)}$$

OKH ölçütünde hataların karesinin alınması nedeniyle büyük hataların etkisi daha fazla yansıtılmıştır. OMH küçük hatalarla büyük hatalara aynı ağırlık vermektedir.

$$OMH = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |a_i - f_i| \quad \textbf{(3.7)}$$

OHY, OMHY ve U1 ölçütü: Çalışılan verinin ölçeğinden bağımsız olarak oranlama yaparak hataları ölçmektedir. Bu açıdan bu ölçütlerin verdikleri değerlerle tarafsız karşılaştırmalar yapmak mümkündür. Bu dört ölçüt aşağıdaki eşitliklerle hesaplanırlar:

$$OHY = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} (\frac{a_i - f_i}{a_i})100 \quad \textbf{(3.8)}$$

$$OMHY = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{|a_i - f_i|}{a_i} 100 \quad \textbf{(3.9)}$$

$$U_1 = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} (a_i - f_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} a_i^2} + \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} f_i^2}} \quad \textbf{(3.10)}$$

$\bar{a}$:gözlenen değerlerin ortalamasıdır.

OHY, zaman serisi değerleri hatalarının (tahmin yapılan zaman serisi değerleri ile gözlenen zaman serisi değerleri arasındaki farkın) gözlenen değerlere oranıdır. Verilerin ölçeğinden bağımsızdır. Artı ve eksi hatalar biribirini yok etmektedir.

OMHY, zaman serisi değerleri hatalarının, gözlenen seri değerlerine bölünmesinden elde edilen mutlak orandır. Eğer değer sıfır olursa tahmin için kullanılan yöntemin gözlenen olayı temsil ettiği anlaşılır. OMHY'de artı ve eksi hatalar biribirini yok etmemektedir. OMHY değerinin 0~%10 arasında olması yöntemin tahmin gücünün çok iyi olduğunu ifade etmektedir.

U1 istatistiği diğer ölçütlerden farklı olarak 0 ve 1 arasında değerler alır. Eğer ölçüte ait değer sıfıra yakın ise tahmin edilen zaman serisinin, ölçümlere yakın olduğu

kabul edilir. U1 değeri 1 değerine yaklaştıkça, tahmin için kullanılan yöntemin, gözlenen olayı temsil edebilen bir model olmadığını söyleriz.

Buna göre OS1 ve OS2 istasyonlarından alınan hız ve akım değerleri ortalamaları ve gözlemler Şekil 3.11'de gösterilmiş, hız ve akıma ait sınamalar ise Çizelge 3.6'da listelenmiştir.

Çizelge 3.6 : Gözlemler ve CORSIM çıktılarının karşılaştırılması.

			OH	OMH	OKH	OKHK	OHY	OMHY	Theil's U1
OS1	Hız Km/sa	N	4,61	9,75	140,49	11,85	-4,20	21,14	0,07
		E	2,65	8,85	124,00	11,14	-9,18	21,54	0,07
	Akım Taş/sa	N	-160,53	613,23	608.350	779,97	-5,95	13,92	0,08
		E	-196,83	611,22	623.029	789,32	-6,83	14,10	0,08
OS2	Hız Km/sa	N	2,27	8,94	142,35	11,93	-3,72	18,39	0,08
		E	0,51	7,38	109,75	10,48	-6,43	16,03	0,07
	Akım Taş/sa	N	-122,96	625,40	661.403	813,27	-5,08	13,99	0,08
		E	-157,78	603,28	649.860	806,14	-5,85	13,71	0,08

N=Normal dağılım **E**=Erlang dağılımı

Kalibrasyon sonuçlarının değerlendirilmesi aşağıda verilmiştir.

OS1 Hız: Gözlenen hızın Erlang dağılımı sonuçlarıyla daha uyumlu olduğu Çizelge 3.6'da görülmektedir. Ortalama hata $OH_N=4,61$ ve $OH_E=2,65$ olarak hesaplanmış, taraflı hatanın Erlang dağılımı için daha düşük olduğu görülmüştür. Diğer yandan taraflı hatanın işaretine bakıldığında, her iki dağılım için CORSIM'in gözlemlerden (ortalama) daha düşük hız değerleri ürettiği görülebilir. Tarafsız ortalama mutlak hataya bakıldığında (OMH) iki dağılımın da birbirlerine yakın değerlere sahip olduğu görülmüştür. Ortalama mutlak hata yüzdesi (OMHY) iki dağılım içinde benzer değerlere sahiptir. CORSIM'in zaman serisi olarak ürettiği hız değerlerinin gözlemleri yansıtmasındaki başarısını ölçen U1 ölçütü her iki dağılım için de sıfıra yakındır. Bunun anlamı CORSIM çalışma kesiminde gözlenmiş hızları başarıyla üretmiştir. Erlang dağılımının normal dağılımdan daha düşük olması ise bu dağılımın çalışma kesimini modellemek için daha uygun olduğunu göstermektedir.

OS1 Akım: Her iki dağılım için yapılan sınamalarda elde edilen ölçütlere ait değerler Çizelge 3.5'de görüldüğü gibi birbirine oldukça yakındır. Her iki dağılım için OH

ölçütünün işareti negatif çıkmıştır. Bu CORSIM'in akım değerlerini gözlemlerden daha yüksek bir ortalamayla tahmin ettiğini göstermektedir. Gözlemlerde buna neden olan akım grafiğindeki ani değişimler görülmektedir (Şekil 3.13). Ortalama Mutlak Hata Yüzdesi'ne bakıldığında (OMHY), CORSIM'in akım değerlerini oransal olarak hıza göre daha düşük hatayla tahmin ettiği görülebilir. Her iki dağılım için ise U1 istatistiği aynı değerlere sahiptir ve sıfıra yakın değer almıştır.

OS2 Hız: Genel olarak bu istasyona ait hata değerleri OS1 gözlem istasyonundaki hata değerlerinden daha düşüktür ve hız OS1'deki gibi Erlang dağılımı taraflı ve tarafsız hata değerleri açısından, normal dağılıma göre daha düşük hata değerlerine sahiptir.

OS2 Akım: Her iki dağılım için tüm sınama ölçütleri birbirine yakın değerlere sahiptir. U1 (0.08) istatistiği bu istasyona ait akım değerlerinin CORSIM tarafından her iki dağılım için başarılı bir şekilde temsil edilebildiğini göstermektedir.

Kalibrasyon sonucunda, seçilen kesimdeki trafik davranışı CORSIM tarafından sınama ölçütlerine göre başarılı bir şekilde temsil edilebilmektedir. Erlang dağılımının özellikle hızları modelleme konusunda daha başarılı olduğu görülmektedir. Bu nedenle bundan sonraki CORSIM benzetimlerinde Erlang dağılımı kullanılacaktır. Kalibre edilmiş CORSIM yardımıyla, çalışma kesimi üzerinde uygulanacak trafik kontrol yöntemlerine, trafiğin vereceği tepkiyi öngörmek mümkün olacaktır. Böylelikle düşünülen çalışmanın arazide uygulamadan önce labaratuvar ortamında geçerliğinin sınaması mümkün olacaktır.

4. METANET MODELİ VE KALİBRASYONU

MTÖK yönteminden yararlanarak otoyolda DHS ile dinamik kontrol uygulaması gerçekleştirmek için trafik tahmin modeline ihtiyaç duyulur. Bu çalışmada yüksek dereceden trafik akım modeli olan METANET kullanılacaktır. METANET modelinin kuramsal olarak anlatımı, modelin bilgisayar ortamında tanımlanması, verilerin yazılan betik ve programlar tarafından kullanılır hale getirilmesi bu bölümün kapsamındadır.

Trafik akım modelleri modelleme yaklaşımlarına göre makroskopik, mikroskopik ve mezoskopik olmak üzere sınıflandırılmıştır. Mikroskopik trafik akım modelleri tekil taşıtların dinamiğini ve biribiriyle olan etkileşimini tanımlamaktadır (örneğin taşıt takip modelleri ve hücresel özdevinir modeller (Cellular Automata). Mezoskopik trafik akım modelleri mikroskopik taşıt dinamiğini makroskopik alanı içinde bir fonksiyon olarak açıklamaktadır (örneğin gaz kinetik modeller) (Kim, 2002). Mezoskopik Modeller aynı karakteristik özellik taşıyan taşıtları toplulaştırarak makroskopik trafik akım dinamikleri ve yol seçim modeline göre ağın içinde hareket ettirmektedir (Kotsialos ve Papageorgiou, 2002). Makroskopik akım modelleri toplu taşıt dinamiğini yoğunluk (taşıt/km), akım (taşıt/saat) ve hız (km/saat) olmak üzere toplulaştırılmış değişken terimleri ile tanımlamaktadır (örneğin akışkan dinamik modeller)(Kim, 2002). Makroskopik modeller trafik akımını sürekli akışkan olarak ele almaktadır. Tekil taşıtların davranışı ihmal edilerek toplulaştırılmış taşıtlar dikkate alınmaktadır. Toplulaştırılmış davranışların gözlem ve ölçümleri kolaydır. Taşıt trafiği suyun akışına çok benzemesede yeterli benzerlikler hidrodinamik teoriyi taşıt dinamiğini açıklamakta faydalı hale getirmektedir (Kim, 2002). Makroskopik modeller kontrol stratejilerinin tasarımında etkilidir. Bunun nedeni trafik akım sürecini analitik olarak modellemesi ve daha az hesaplama süresi gerekmesidir (Kotsialos ve Papageorgiou, 2002).

Lighthill ve Whitham (Lighthill, 1955) ve bunlardan bağımsız olarak Richards (1956) trafik akımı ile akışkan dinamiği arasındaki benzerlikten hareketle ilk makroskopik trafik akım modelini ortaya koymuştur. Model Literatürde Lightill-

Whitham-Richards (LWR) olarak geçmektedir. Birinci derece LWR modeli literatürde kinematik dalga modeli veya hidrodinamik model olarak da anılmaktadır. LWR modeli aşağıda belirtilen üç eşitliğe dayanmaktadır.

$$\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x,t)}{\partial x} = 0 \qquad \textbf{(4.1)}$$

Eşitlik (4.1) trafik yoğunluğu ve trafik akımına ait durum değişkenlerini içeren süreklilik denklemidir. $\rho(x,t)$ x konumunda ve t anındaki yoğunluk, $q(x,t)$ x konumu ve t anındaki trafik akımıdır. Burada $q(x,t)$ ve $\rho(x,t)$ zaman ve konuma bağlı tanımlanmış sürekli fonksiyonlardır.

İkinci eşitlik 2. Bölümde adı geçen, trafik değişkenleri arasında temel ilişkiyi ifade eden Temel Diyagram Eşitliği yani Eşitlik (2.3)'dür. Aynı zamanda Eşitlik (4.1)'in bir sonucudur.

$$q(x,t) = Q_d[\rho] = V_d[\rho]\rho(x,t) \qquad \textbf{(4.2)}$$

Üçüncü Eşitlik (4.2) ise dengedeki hız $V_d(\rho)$ değerine bağlı olarak türetilen dengedeki akım $Q_d[\rho]$ eşitliğidir. $V_d(\rho)$, Eşitlik (2.3)'de yerine koyulur ve yoğunluk değişkenine bağlı olarak akım modeli elde edilir.

Trafik akımının türetilmiş değişkenleri (v, ρ, q) arasında ikili ilişkilerin modellenmesi trafik akım kuramında denge modelleri olarak anılır. Literatürde hız v ile yoğunluk ρ arasında çeşitli matematiksel formüller türetilmiştir. Bunlar arasında Greenshields (1935) Eşitlik (4.3)'de görülmekte olan ilk ve basit doğrusal dengedeki hız-yoğunluk modelini geliştirmiştir.

$$V_d[\rho] = v_f \left[1 - \left(\frac{\rho}{\rho_{jam}}\right)\right] \qquad \textbf{(4.3)}$$

Eşitlikte; v_f serbest hız, ρ yoğunluk, ρ_{jam} tıkanıklık anıdaki yoğunluk, V_d dengedeki hız değeridir.

Bunun ardından pek çok ampirik formül dengedeki hız-yoğunluk ilişkisi için önerilmiştir. Örneğin, May (1990) tarafından önerilen genelleştirilmiş hız-yoğunluk eşitliği aşağıda görülmektedir:

$$V_d[\rho] = v_f \left[1 - \left(\frac{\rho}{\rho_{jam}}\right)^l\right]^m \quad \textbf{(4.4)}$$

Bu eşitlikteki m ve l model parametreleridir.

Yukarıda bilgilere göre LWR modelinin zaman ve konuma bağlı sürekli bir model olduğu görülmektedir. Bu modelin otoyol ağı için analitik bir çözümü zordur. Pratikte model Δx yol kesimine ve Δt zamana ayrılmaktadır. Böylelikle farklara dayanan eşitlikler ile trafik akım simulasyonu yapılabilir. Buna göre LWR modelinin birinci eşitliği aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\partial x[\rho_i(k+1) - \rho_i(k)] = \partial t[q_i(k) - q_{i+1}(k)] \quad \textbf{(4.5)}$$

$$\rho_i(k+1) = \rho_i(k) + \frac{T}{L\lambda}(q_i(k) - q_{i+1}(k)) \quad \textbf{(4.6)}$$

Eşitlikte ρ_i i yol kesiminde k zaman adımındaki yoğunluk, q_i i yol kesiminden k zaman adımında çıkan akım, q_{i+1} akım aşağı kesimden k zaman adımında çıkan akım değeridir ve k zaman adımının süre olarak değeri T ye eşittir. L kesimin uzunluğu, λ ise kesimin şerit sayısını göstermektedir.

Lighthill ve Whitham (1955) ve Richards (1956) taşıtların ortalama denge durumundaki hız değerinin V_d, trafik yoğunluğunun bir fonksiyonu olduğunu gözlemlemiştir. Dengedeki hız değeri $V_d[\rho]$, Eşitlik (2.3)'e yerleştirildiğinde Eşitlik (4.2) elde edilir. Bu genel ifade literatürde V_d için önerilen ampirik bir eşitlikle yer değiştirebilmektedir (Bellemans vd., 2002).

LWR modeli öğretici ve kuramsal olarak açık bir modeldir. Bununla birlikte modelin eksik tarafları vardır. Bunlar;

1-LWR modelinde hız yoğunluğa bağlı olarak $V_d(\rho)$ ile bulunur. Bu durum yoğunluk değişimlerinin büyük olduğu yerlerde gerçek dışı sonuç vermektedir. Trafik tıkanıklığında ya da şok dalgalarında olduğu gibi (Hegyi, 2004).

2-LWR modeli şişeboyunlarında oluşabilecek trafik akımındaki kararsızlıkları tahmin etmemektedir (Hegyi, 2004).

3-LWR modelinde $Q_d(\rho)$ nasıl bir fonksiyon olduğu açıkça belirtilmemiştir. Araziden gözlenen verilere eğriler uydurularak çeşitli ampirik formüller türetilmiştir.

Payne (1971), LWR (1955) modelindeki zayıflığı ortadan kaldırmak için, LWR modeline trafik akımının ortalama hızının dinamiğini ifade eden ikinci bir eşitlik ilave etmiştir. Payne'nin modeli taşıt takip modelini temel alarak türetilmiş olup bu modelde sürücü reaksiyon süresi dikkate alınmıştır.

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\tau}[v - V_e(\rho)] - \frac{\eta}{\rho}\frac{d\rho}{dx} \qquad \textbf{(4.7)}$$

Bu eşitlikte η (öngörü terimine ait sabit[1]) ve τ (denge terimine ait zaman sabiti[2]) model parametreleridir. Payne modelinde sürücülerin akım aşağı trafik şartlarına olan tepkileri gözönünde bulundurulmuş olsa da otoyol katılım ve şerit iptal durumlarını dikkate almamaktadır. Geliştirilen trafik akım modelleme süreçlerinde Papageorgiou vd. (1990), Payne (1971) 'nin modelinin ikinci eşitliği olan ortalama hız eşitliğine ilave terimler eklemesiyle METANET modeli tanımlanmıştır. METANET modeli ikinci derece, deterministik makroskopik trafik akım modelidir.

Daganzo (1995) birinci derece CTM (Cell Transmission Model) modelini ortaya koymuştur. Bu model hesaplama zamanının fazla olduğu geniş ağlarda gerçek zamanlı uygulamalarda tercih edilmektedir (Bellemans, 2003).

1.ve 2. derece makroskopik trafik akım modellerin teorik yönü ve uygulanabilirliği pek çok çalışmada tartışılmştır (Daganzo, 1995; Papageorgiou, 1998; Zhang, 2003).

[1] Öngörü Terimi METANET modeli kısmında açıklanmıştır.
[2] Denge Terimi METANET modeli kısmında açıklanmıştır.

Daganzo (1995) ile Papageorgiou (1998) 'nun çalışmaları bu tartışmaların merkezindedir. Daganzo (1995) temel eleştirisi 2.derece modelde (Payne Modeli) negatif hız ve akımların oluşabileceği yönündedir. Papageorgiou (1998), geliştirmiş olduğu ikinci derece Model'in (METANET) yukarıda sayılan 1. derece modeldeki (LWR) eksiklikleri ortadan kaldırdığını, trafik akım modellerinin ampirik model olması ve negatif hız/akım oluşma durumunda, bu değerlerden maksimum değeri, yani sıfır değerinin alınmasını önermektedir.

METANET (Modele d'Ecoulement du Trafic Autoroutier: NETwork) modeli trafik akımında pek çok nedenden (otoyol girişi, şişeboynu kesimler, örülme durumu gibi) dolayı oluşabilecek kararsızlığı modelleyebilmekte ve hız kontrol uygulamalarının etkilerini yansıtabilmektedir. METANET modelinin ayrık, deterministik ve makroskopik olması bilgisayar uygulamalarını kolaylaştırmaktadır. Benzetim zaman aralıklarının kısalığı (~genellikle 10s alınmaktadır) hesaplama adımlarının artması ile (bununla birlikte hesaplamalar gelişmiş bilgisayarda hızlı olmakta) modelin doğruluğu (accuracy) arasında bir ödünleşme sağlaması model tabanlı kontrol çalışması için kullanımını uygun hale getirmektedir (Hegyi, 2004). Bu çalışmada trafik tahmin modeli olarak METANET modelinden yararlanılacaktır (orijinal METANET modeli için Papageorgiou vd. (1990), METANET modelinin genişletilmiş hali için Hegyi (2004) bakınız).

METANET modeli uygulamasında trafik durum değişkenleri, zaman adımı (k) ve yol kesimleri (i) için tanımlanır. METANET ayrık yol ve zaman vektörlerine karşılık gelen üç adet trafik durum değişkeni matrisi hesaplar. Bunlar ortalama hız (v), yoğunluk (ρ) ve bu iki değişkenden türetilmiş akım (q) matrisidir.

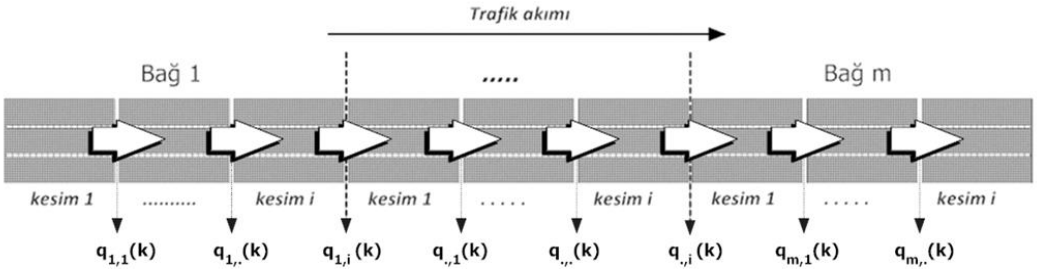
METANET modelinde çalışma kesimi bağlardan ve bunların bağlandığı düğüm noktalarından oluşur. Bağlar (m), bağları oluşturan kesimler (i) olmak üzere daha küçük parçalara ayrılır. Aynı bağa ait kesimlerdeki durum değişkenleri hesaplanırken, bağa ait kalibre edilmiş parametreler kullanılır. Bu nedenle bağlar akıma ait karakteristik değişikliklerin olduğu yerlere göre belirlenirler. Şerit sayısındaki değişimler, katılımlar kesimin farklılaştığı noktalardır ve düğüm noktaları bunlardan birine yerleştirilir. METANET sürücülerin yol seçim davranışını dikkate alması durumunda varış tabanlı olarak bir yol kesimindeki trafik akımını modelleyebilir. Bu tip modellemede kesimden geçen trafik, kesimin bitiş noktasındaki düğümden farklı bağlara dağıtılır. Bu dağıtım, kesime giren trafiğin

farklı hedeflerdeki talebine bağlıdır. Bu çalışmada varış tabanlı METANET modeli kullanılmadığından bu ayrıntıya girilmeyecektir. Bununla ilgili ayrıntı bilgi için Heghi (2004)'e bakılabilir.

4.1 METANET Bağ Eşitlikleri

METANET modeliyle, seçilen çalışma bölgesindeki trafiği modellemeden önce, bölgenin bağlara (m) ayrılması gerekir (Şekil 4.1). Bağlar benzer geometrik özelliklere sahip yol parçalarıdır. Örnek vermek gerekirse bir bağ üzerinde katılım, ayrılma ya da şerit sayısı değişimi gibi ögeler ya da değişiklikler aynı anda bulunamaz. Bu tür öge ve değişikliklerin olduğu yerlere düğüm noktası yerleştirilir ve yeni bir bağ tanımlanır. Bağlar eğer çok uzun yol kesimlerine sahipse, kendi içinde kesimlere (i) ayrılır. Bunun nedeni çok uzun yol kesimlerinin modellemeyi olumsuz etkilemesidir. Buna göre METANET modeli her kesim için aşağıdaki üç trafik durum değişkenini hesaplamaya çalışır.

1) Yoğunluk, $\rho_{m,i}(k)$ (taş/km/şerit)
2) Ortalama hız, $v_{m,i}(k)$ (km/h)
3) Kesimden dışarı çıkan akım, $q_{m,i}(k)$ (taş/sa)



Şekil 4.1 : METANET modelinde bağ, kesim ve kesimlerdeki akımlar.

METANET modeli kullanarak çalışma bölgesindeki trafik akımını modellemeden önce, çalışma bölgesi için oluşturulan bağlar ve kesimlerin birtakım kurallara uygunluğu mutlaka kontrol edilmelidir. Bunlar;

1. Seçilen kesim uzunluğu benzetim zaman aralığına (T_{sim}) doğrudan bağlıdır. Kesim uzunluğu seçilen zaman aralığıyla (örneğin T_{sim}=10 saniye) bağa ait serbest hızın çarpımından küçük olmamalıdır. Bu kuralın amacı, seçilen zaman aralığı içinde kesime giren taşıtın hala kesimde olmasını sağlamaktır.

Taşıtlar kesimi bu zaman aralığından önce terk ediyorsa o kesime ait ortalama hız, yoğunluk ve akım hesapları da doğal olarak yanlış olacaktır.

2. Katılımların bulunduğu yerlere düğüm noktaları konularak bağlar oluşturulur.
3. Şerit sayısında azalma olan yerlerde yeni düğümler ilave edilerek yeni bağlar oluşturulur.

Oluşan bağ ya da kesimlerin 1. adımdaki ölçütü sağlayıp sağlamadığına bakılır ve böylelikle ağ oluşumu (çalışma kesimi) METANET geometrisi tamamlanır. Eğer kesimlerden birisi 1. ölçütü sağlamıyorsa zaman adımı küçültülür. Ancak zaman adımının küçültülmesi, benzetim süresi içinde yapılacak hesaplama adımını arttıracağından kalibrasyon süresi ve kontrol süreçlerindeki hesaplama sürelerini de arttıracaktır. Örneğin beş dakikalık benzetim süresi için T_{sim}, 10 saniye yerine 5 saniye seçildiğinde toplam hesaplama adımı 30'dan 60 adıma yükselerek iki katına çıkacaktır.

Bağ eşitlikleri, kesimlerdeki yukarıda belirtilen üç trafik durum değişkeninin hesabında kullanılır. Her bir zaman adımı (k) ve yol kesimi (i) için eşitlikler tekrar kullanılır. METANET modelinde hesaplama adımı daktilo yazı yazmaya benzetilebilir. Daktiloya koyulan kağıt genişliği yol kesimlerini, her bir satırda zaman adımı olarak tanımlanırsa soldan sağa doğru durum değişkenleri hesaplanır ve tekrar başa dönülür. Yeni bir satır için (zaman adımı) işlemler tekrarlanır. Model teknik olarak basit görünse de bazı kesimler için eşitliklerde birtakım düzenlemelerin yapılması gerekir. Her eşitlik mevcut durumdan bir sonraki zaman adımı için $(k+1)$ ilgili durum değişkenlerini hesaplar.

METANET modelinde ilk olarak ilgili yol kesimindeki yoğunluk hesaplanır. Bunun için aşağıdaki eşitlik kullanılır;

$$\rho_{m,i}(k+1) = \rho_{m,i}(k) + \frac{T_{sim}}{\lambda_m L_{m,i}}(q_{in}(k) - q_{out}(k) \qquad \textbf{(4.8)}$$

$$q_{in}(k) = q_{m,i-1}(k),$$
$$q_{out}(k) = q_{m,i}(k)$$

Eşitlikteki, $\rho_{m,i}(k+1)$, $(k+1)$ zaman adımındaki (m) bağı içindeki (i) kesimindeki yoğunluğu (taşıt/km/şerit) temsil eder. (T_{sim}) değeri (k) zaman adımına

karşılık gelen süreyi gösterir. Bu değerin birimi saniyedir, ancak eşitlikte hesaplamalar yapılırken değeri saate çevrilerek hesaplanır. (λ_m) bağın şerit sayısını, ($L_{m,i}$), (m) bağına ait (i) yol kesiminin uzunluğunu *(km)* temsil eder.

METANET modelinde ikinci eşitlik ilgili yol kesimindeki ortalama hız eşitliğidir;

$$\begin{aligned} \mathrm{v_{m,i}(k+1)} = \mathrm{v_{m,i}(k)} & \\ + \frac{\mathrm{T_{sim}}}{\tau_\mathrm{m}} \cdot \left(\mathrm{V_d}\left[\rho_\mathrm{m,i}(\mathrm{k})\right] - \mathrm{v_{m,i}(k)} \right) & \\ + \frac{\mathrm{T_{sim}}}{\mathrm{L_{m,i}}} \cdot \mathrm{v_{m,i}(k)} \cdot \left(\mathrm{v_{m,i-1}(k)} - \mathrm{v_{m,i}(k)} \right) & \\ - \frac{\eta_\mathrm{m} \cdot \mathrm{T_{sim}}}{\tau_\mathrm{m} \cdot \mathrm{L_{m,i}}} \cdot \frac{\rho_\mathrm{m,i+1}(\mathrm{k}) - \rho_\mathrm{m,i}(\mathrm{k})}{\rho_\mathrm{m,i}(\mathrm{k}) + \kappa_\mathrm{m}} & \end{aligned} \qquad \textbf{(4.9)}$$

Eşitlikteki terimler;

$v_{m,i}(k)$: k anındaki m bağındaki i kesimindeki hız (km/sa)

τ_m :Denge terimine ait zaman sabitidir (sa)

V_d :Dengedeki hız değeridir ve yoğunluğun bir fonksiyonudur (km/sa)

$L_{m,i}$:m bağına ait i kesiminin uzunluğu (km)

η_m :Öngörü terimine ait parametre (km^2/sa)

$v_{m,i-1}(k)$:k anındaki akım yukarı yöndeki kesime ait hız (km/sa)

$\rho_{m,i+1}(k)$:k anındaki akım aşağı yöndeki kesime ait yoğunluk (taşıt/km/şerit)

κ_m :Öngörü terimine ait parametre ($taş/km$)

$\tau_m, \eta_{m,} \kappa_m$ parametreleri her bağ için ayrı ayrı kestirilebileceği gibi tüm çalışma bölgesindeki bağlar için aynı kabul edilerek (τ, η, κ) kestirilebilir. Bu çalışma da (τ, η, κ) parametreleri tüm bağlar için eşit kabul edilmiştir.

Akım ise bu yoğunluk ve ortalama hız hesabından elde edilir. Buna göre akım (taşıt/saat);

$$q_{m,i}(k+1) = \lambda_m \cdot \rho_{m,i}(k+1) \cdot v_{m,i}(k+1) \qquad \textbf{(4.10)}$$

olarak tanımlanır.

Ampirik dinamik ortalama hız eşitliği (4.9) METANET'in en uzun ve karmaşık eşitliğidir. Bunun nedeni, METANET'in ilgili yol kesimlerine ait ortalama hızları aşağıda belirtilen pek çok etkeni dikkate alarak hesaplamasıdır.

Bu etkiler ortalama hız eşitliği içindeki terimler aracılığıyla tanımlanır. Eşitlik (4.9) daki ikinci terim olan denge (relaxation) terimi kesimdeki taşıt hızının, denge hızına doğru evrimleşmesini temsil eder. METANET modelinde dengedeki ortalama hız ile yoğunluk arasında ilişki için Kotsialos ve Papageorgiou (2002) ve Hegyi (2004)'nin kullandığı ve bu çalışmada *dengedeki hız eşitliği* olarak anılan aşağıdaki ampirik statik hız eşitliği kullanılır.

$$V_d\left[\rho_{m,i}(k)\right] = v_{f,m} \cdot e^{-\frac{1}{a}\left(\frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{cr,m}}\right)^a} \qquad \textbf{(4.11)}$$

(a); model parametresi,$(v_{f,m})$ (m) bağındaki serbest hız, $\rho_{cr,m}$; (m) bağına ait kritik yoğunluk (taşıt/km/şerit) değeridir.

METANET genelleştirilmiş bir model değildir. Bir çalışma kesimine uygulanması için öncelikle kalibre edilmesi gerekir (parametrelerinin tahmini). Eğer kalibre edilmiş METANET modeli, kontrol problemlerinde kullanılacaksa Eşitlik (4.11) yerine aşağıda hız sınırlarını içeren fonksiyonu kullanılır (Hegyi, 2004).

$$V_d\left[\rho_{m,i}(k)\right] = min\left\{(1+\propto) \cdot v_{ctr,m,i}(k)\,, v_{f,m} \cdot e^{-\frac{1}{a}\left(\frac{\rho_{m,i}(k)}{\rho_{cr,m}}\right)^a}\right\}, \propto \epsilon[-1,1] \qquad \textbf{(4.12)}$$

Bu eşitlikte yer alan $v_{ctr,m,i}\,(k)$ anında uygulanan hız (km/sa) sınırlamasıdır. $\propto$ sürücülerin hız sınırına uymalarını temsil eden bir değeridir. Başka bir deyişle yaptırımın gücünü ifade etmektedir. Eğer sürücülerin ortalama hızı, hız sınırlamasından yüksekse $\propto$ değeri pozitif, düşükse negatif değer alacaktır.

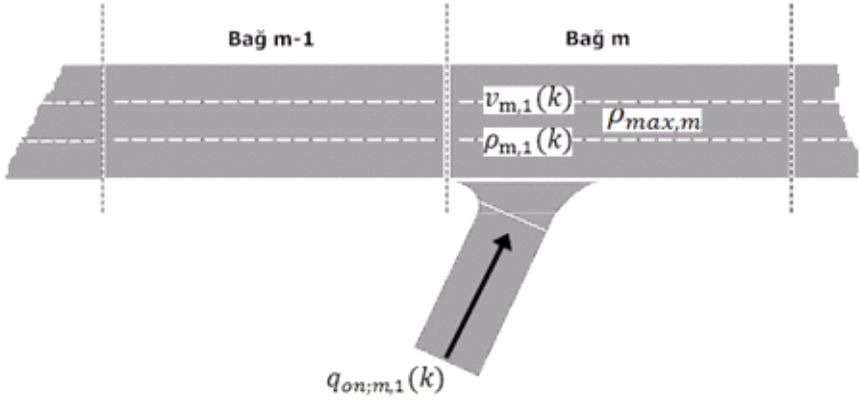
Sürücü bir yol kesiminden diğerine geçtiğinde hızı farklıysa mevcut hızını girdiği yol kesimdeki hıza göre ayarlar. Ancak bu durum hemen oluşmayacağından, mevcut kesimin ortalama hızı bundan etkilenecektir. Bir önceki kesimdeki hızın bir sonraki

kesime olan etkisi ortalama hız eşitliğinde (4.9) üçüncü terim olan uyarlama (convection) terimi ile yansıtılmaktadır.

Sürücü bulunduğu yol kesimini terk etmek üzereyken bir sonraki kesimdeki yoğunluğu fark ederek kesimi terk etmeden hızını bir sonraki duruma uydurmak ister. Bu istek hesap yapılan kesimdeki ortalama hızda değişime neden olur ve bu değişimde öngörü (anticipation) terimi ile ortalama hıza yansıtılır. Ancak eşitlik (4.9)'daki öngörü terimine ait değerin hesaplanmasında kullanılan model parametresi $\eta_{,m}$ koşullu parametredir. Şok dalgası nedeniyle kuyruklanma oluştuğunda, kesimler arası yoğunluk farkına göre sürücü davranışı farklılık gösterir. Bu durumda parametre seçimi aşağıdaki şarta göre belirlenir.

$$\eta_m = \begin{cases} \eta_{m,high}, & \rho_{m,i+1}(k) \geq \rho_{m,i} \\ \eta_{m,low}, & \rho_{m,i+1}(k) < \rho_{m,i} \end{cases} \qquad \textbf{(4.13)}$$

Yol geometrisindeki değişimler ortalama hıza, katılım (merge) ve şerit daralma parametreleri ile eklenir. Katılım nedeniyle ana akım üzerindeki hızlar olumsuz etkilenecektir. Diğer yandan katılım akımlarının ana yol akımına örülmesi de, anaakımda katılımın olduğu kesimdeki yoğunluğa doğrudan bağlıdır. Şekil 4.2'de katılımın METANET geometrisindeki gösterimi ve katılım teriminin hesabında kullanılan değişkenlerin yerleri görülmektedir.



Şekil 4.2 : Katılımın anaakım ortalama hızı üzerindeki etkisi.

Katılım terimi (4.14) eşitliği ile hesaplanır.

$$\Delta v_{\text{katılım},m_{o,i}}(k) = -\left(\frac{\delta_{\text{m}} \cdot T_{sim}}{\text{L}_{\text{m,i}} \cdot \lambda_{\text{m}}}\right) \frac{q_{on,m,1}(k) \cdot v_{\text{m},1}(k)}{\rho_{\text{m},1}(k) + \kappa_{\text{m}}} \tag{4.14}$$

Eşitlikteki δ_{m} ve κ_{m} model parametreleri, $q_{on;m,1}(k)$; (k) anında katılım hacmi $v_{m,1}(k)$ ve $\rho_{\text{m},1}(\text{k})$ ise sırasıyla, katılımın olduğu bağdaki kesimin ortalama hız ve yoğunluğudur. $L_{m,i}$ katılımın olduğu kesimin uzunluğu, λ_{m} katılım saplandığı bağın şerit sayısıdır. $q_{on;m,1}(k)$ hesabı takip eden bölümde ayrıca anlatılacaktır.



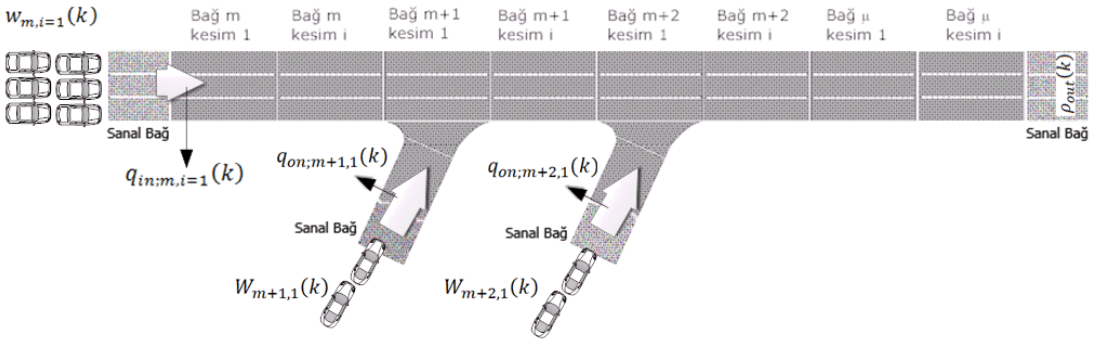
Şekil 4.3 : METANET geometrisinde şerit iptali durumu.

$$\Delta v_{\text{iptal},m,N_m}(k) = -\frac{\phi_m \cdot T_{sim}}{\text{L}_{\text{m}} \cdot \lambda_m} \left(\frac{(\lambda_{m,i} - \lambda_{m+1,1}) \cdot \rho_{m,i}(k)}{\rho_{crit,m}}\right) \cdot v_{m,i}^2(k) \tag{4.15}$$

(4.15) numaralı eşitlik şerit iptalinin (Şekil 4.3) ortalama hıza olan etkisini hesaplar. $\lambda_{\text{m,i}}$ bağ m, kesim i'de şerit sayısı, $\lambda_{\text{m+1,1}}$ bağ m+1, kesim 1'de şerit sayısı, $L_{m,i}$ m bağı, i yol kesiminin uzunluğu, ϕ_m şerit iptali terimine ait model parametresidir. Eşitlik (4.14) ve (4.15)'deki her iki terimin de işaretinin eksi olması bu iki durumun ortalama hız üzerindeki olumsuz etkisini gösterir.

Ancak METANET hesaplaması için yukarıdaki eşitlikler yeterli değildir. METANET, yoğunluk ve ortalama hız hesabı için ardışık bağ ve kesimlerdeki değerleri kullanarak hesabı yürütmektedir (daktilo örneği). Buna göre ilk bağın ilk kesimindeki yoğunluk hesabı (Eşitlik 4.8) için bir önceki kesime $(i-1)$ ait akım değerlerine ihtiyaç duyulurken son bağın son kesiminde ortalama hız hesabında (Eşitlik 4.9) bir sonraki kesime ait yoğunluk değerine gereksinim duyulur. Ancak bu kesimler gerçekte mevcut olmadığından, ilk ve son kesimlerdeki yoğunluk ve ortalama hızı hesaplamaları için METANET sınır şartları adı altında eşitlikler

kullanır. Bu eşitlikler aşağıda alt başlıklarda anlatılmakta olup, eşitliklerle ilgili ayrıntılı bilgiye Burger vd. (2008) bakılabilir.



Şekil 4.4 : METANET ağına eklenen sanal bağlar.

4.1.1 İlk bağ ilk kesimdeki (m,i=1) yoğunluk ve ortalama hız hesabı

İlk bağ ilk kesimde yoğunluğun hesabı için gerekli olan Eşitlik 4.8'deki $q_{in,m,i}(k)$ terimi, bir bağa giren akım değerini (taşıt/sa) temsil etmektedir. Çalışma bölgesinin ilk bağın ilk kesiti için böyle bir bağın varlığı söz konusu olmadığından, çalışma bölgesinin başına sanal bir bağ eklenir (Şekil 4.4). Bu bağ aynı zamanda trafik yüklemesinin ilk gerçekleştiği bağlardan birisidir. Trafik sadece bu sanal bağdan değil, aynı zamanda katılım bağlarına eklenen sanal bağlardan yüklenir (Şekil 4.4). Trafik talep matrisi (D) kullanılarak ilgili zaman adımlarında sanal bağlara taşıtlar bırakılır. Çalışma bölgesindeki ilk bağ ilk kesim (m,i=1) için $q_{in;m,i=1}(k)$ değeri;

$$q_{in;m,i=1}(k) = min\left\{D_{m,i=1}(k) + \frac{w_{m,i=1}(k)}{T_{sim}}, q_{lim}(k)\right\} \qquad \textbf{(4.16)}$$

ile hesaplanır. $w_{m,i=1}(k)$; k anında sanal bağdan ilk bağın ilk kesimine girmek için kuyrukta bekleyen taşıt sayısıdır. $D_{m,i=1}$ ilk bağın ilk kesimine girmeye çalışan ana akıma ait talep değeridir (taşıt/sa).

$q_{lim}(k)$ ilk bağdaki hıza bağlı olarak bağa girebilen akımı tanımlar. Buna göre bu akımın hesabı için aşağıdaki parçalı fonksiyon kullanılır.

$$q_{\lim}(k) = \begin{cases} \gamma \cdot q_{spd;m,i=1}(k), & v_{lim;m,i=1}(k) < V_d(\rho_{cri;m=1}) \\ \gamma \cdot q_{cap;m,i=1}, & v_{lim;m,i=1}(k) \geq V_d(\rho_{cri;m=1}) \end{cases} \quad \textbf{(4.17)}$$

$q_{cap,1}$ ilk bağın taş/sa cinsinden kapasitesidir. $q_{spd;m,i=1}(k)$ bağ 1, kesim 1'de mevcut yoğunluk ve hız sınırına (uygulanan) göre hesaplanan akımdır. (γ) parametresinin amacı teorik olarak yazılmış yukarıdaki fonksiyonun, gerçek uygulamada sapmalardan kaynaklanan hatalarını gidermektir.

($q_{cap;m,i=1}$) hesabı için ise dengedeki hız ve kritik yoğunluk değeri kullanılır. ($q_{spd;m,i=1}$) değeri, $\rho_{m,i=1}$ değerinin ($\rho_{m,i}$ değeri Eşitlik (4.8)'den yararlanılarak bulunur), mevcut hız $v_{lim;m,i=1}(k)$ ile çarpımına eşittir.

$$q_{cap;m,i=1} = \lambda_{m=1} \cdot \mathrm{V}_D[\rho_{cri;m=1}] \cdot \rho_{cri;m=1} \quad \textbf{(4.18)}$$

$$q_{spd;m,i=1}(k) = \lambda_m \cdot v_{lim,1,1} \cdot \rho_{cri;m=1} \cdot \left(-a \cdot \ln \left(\frac{v_{lim;m,i=1}(k)}{v_{f;m=1}} \right) \right)^{1/a} \quad \textbf{(4.19)}$$

$$v_{lim;m,i=1}(k) = min\{v_{ctr;m,i=1}(k), v_{m,i=1}(k)\} \quad \textbf{(4.20)}$$

$v_{ctr;m,i=1}(k)$, bağ 1 kesim1'de k zaman adımında uygulanan hız sınırıdır (*km/sa*). Hız sınırı uygulanmıyorsa Eşitlik (4.20)'den bu terim çıkartılır.

Eşitlik (4.20) hız kontrolü uygulanacağında kullanılan eşitliktir. Eğer çalışma bölgesinde hız sınırlaması yoksa $v_{lim,1,1}(k) = v_{1,1}(k)$ olur. $v_{1,1}(k)$, *bağ 1, kesim 1*'de k zaman adımındaki mevcut hızdır.

Sanal bağdan $(m, i = 1)$ kesimine girmek için bekleyen taşıt sayısı (kuyruklanma), aşağıda görülen eşitlik ile hesaplanır:

$$w_{m,i=1}(k+1) = w_{m,i=1}(k) + T_{sim}(D_{m,i=1}(k) - q_{in;m,i=1}(k)) \quad \textbf{(4.21)}$$

İlk bağın ilk kesimindeki ortalama hız eşitliği için gereken $v_{m,i-1}$ değeri sanal bağa ait ortalama hız değeridir ve değer ilk bağın ilk kesimindeki hıza eşittir.

4.1.2 Katılım akımı ($q_{on;m,1}$) ve katılım kuyruklanma ($W_{m,1}$) hesabı

Eşitlik (4.14) deki katılım teriminin hesaplanması için katılımdan anayola giren akımın (katılım hacminin) ($q_{on;m,i}$) belirlenmesi gerekmektedir. Bu değer aynı zamanda kuyruklanma matrisi w hesabında da kullanılır.

$$q_{on;m,i}(k) = min\left\{\mathrm{D}_{m,i}(k) + \frac{W_{m,i}(k)}{T_{sim}}, q_{\mathrm{cap;m,i}}, q_{\mathrm{cap;m,i}}\left(\frac{\rho_{max;m} - \rho_{\mathrm{m,i}}(k)}{\rho_{max;m} - \rho_{cr;m}}\right)\right\} \qquad \textbf{(4.22)}$$

$q_{\mathrm{cap;m,i}}$ m bağına ait i kesimindeki katılımın bağına ait taşıt/sa cinsinden kapasite değeri, $\rho_{max,m}$ katılımın saplandığı bağın taşıt/sa cinsinden tıkanma yoğunluğudur (Şekil 4.2). $D_{m,i}$ katılım talebi, $W_{m,i}$ katılıma ait kuyruklanma değeridir. Eşitlik (4.22) katılımdan gelen trafiğin (talebin) yanısıra katılım bağındaki yoğunluk-kapasite ilişkisini göstermektedir. Buna göre talep ne olursa olsun, katılımdan otoyol kesimine giren taşıt sayısı, katılımın kapasitesini geçemez. Talebin kapasiteyi aştığı durumda katılımlarda kuyruklanma gelişir. Otoyol katılımlarında kuyruklanma ana akıma benzer şekilde aşağıda görülen eşitlikle hesaplanır.

$$W_{m,1}(k+1) = W_{m,1}(k) + T_{sim}(D_{m,1}(k) - q_{on;m,1}(k)) \qquad \textbf{(4.23)}$$

Eğer katılımlarda otoyol giriş denetimi yapılıyorsa, kontrol eylemi için eşitlik (4.22) aşağıdaki gibi yazılır:

$$q_{on,m1}(k) = min\left\{\mathrm{D}_{m,1}(k) + \frac{w_{m,1}(k)}{T_{sim}}, r_{m,1}(k)q_{\mathrm{cap;m,1}}, q_{\mathrm{cap;m,1}}\left(\frac{\rho_{max,m} - \rho_{\mathrm{m,1}}(k)}{\rho_{max,m} - \rho_{crit,m}}\right)\right\} \qquad \textbf{(4.24)}$$
$$, \; r_{m,1}\epsilon[0,1]$$

$r_{m,1}$; k anında uygulanan otoyol giriş denetimine ait parametre, $q_{\mathrm{cap;m,1}}$ katılımın uygun şartlarda ana akıma bırakabileceği enbüyük trafik hacmi yani kapasitedir.

4.1.3 En son bağdaki ortalama hız için $\rho(k+1)$ hesabı

METANET ortalama hız eşitliğindeki öngörü teriminin hesabında, bir sonraki kesimin yoğunluk değeri kullanılır. Ara bağlar ya da kesimler için bir sonraki bağ yoğunluğu METANET tarafından zaten hesaplanmakta ancak son bağ için böyle bir hesap yapılmamaktadır. Bu nedenle eklenen sanal bağa ait yoğunluk vektörü ρ_{out} oluşturulur. Sanal bağın yoğunluğu için, eğer son bağ yoğunluğu son bağın kritik

yoğunluğundan küçükse, son bağın yoğunluğu, büyükse kritik yoğunluk olarak alınır.

$$\rho_{out}(k+1) = min\{\rho_{\mu,i}(k+1), \rho_{cr;\mu}\} \quad \textbf{(4.25)}$$

($\rho_{cr;\mu}$) çalışma bölgesindeki en son bağın kritik yoğunluğu ve ($\rho_{\mu,i}$) bu bağa ait en son kesimdeki yoğunluğu göstermektedir. ρ_{out} vektörü, aynı zaman adımı içinde soldan sağa doğru tüm kesimlere ait yoğunluk ve ortalama hız değerleri hesaplandıktan sonra belirlenir. Eşitlik (4.25)'in amacı, sanal bağdaki yoğunluğu en son bağın yoğunluğu düzeyinde tutarak, taşıtların son bağdan sanal bağa kolayca geçerek çalışma bölgesini hızla terk etmelerini engellemektir.

METANET modelinde kalibre edilecek parametreler özet olarak Çizelge 4.1'de görülmektedir.

Çizelge 4.1 : METANET modelinde kalibre edilecek parametreler.

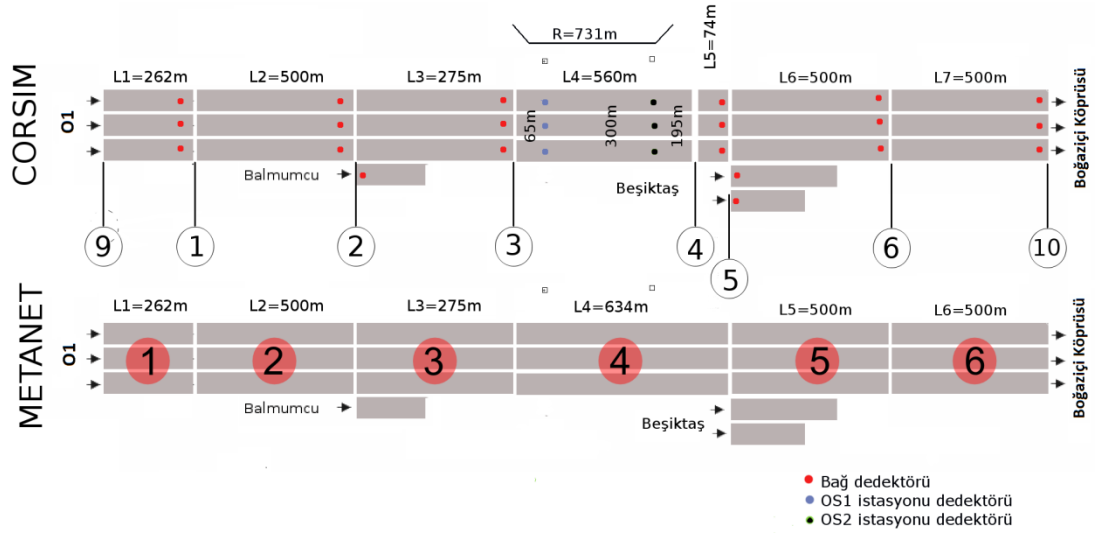
Hız Eşitliği	τ	zaman sabiti
	κ	pozitif sabit
	δ	otoyol giriş/çıkışının hıza etkisini belirten faktör
	η_{high}, η_{low}	yoğunluk değişiminde hassaslık faktörü
	ρ_{max}	tıkanma yoğunluğu
	ϕ	şerit iptal parametresi
	γ	ilk bağ akım parametresi
Temel Diyagram	v_f	serbest hız
	ρ_{cri}	kritik yoğunluk
	a	katsayı

4.2 METANET Modelinin Kalibrasyonu

Şekil 4.5'de çalışma bölgesinin METANET için uyarlanmış biçimi görülmektedir. 4 ve 5 nolu CORSIM düğümlerinin arasında kalan küçük kesim yukarıda bahsedilen kesimlere ait uzunlukların belirlenmesindeki kural gereği bir önceki kesimle birleştirilmiştir. Ayrıca şekilde her kesim sonuna kesimle ilgili durum değişkenlerini ölçen dedektörlerin yerleşimi de görülmektedir.

METANET modelinin kalibrasyonundan amaçlanan, seçilen çalışma bölgesindeki, kesimlerdeki trafiğin davranışını bulunulan andan (k=1) seçilen zaman ufkuna (k=N)

makroskopik düzeyde modellemektir. Kalibre edilmiş METANET modeli ile çalışma kesimi üzerinde aşağıdaki bilgiler elde edilebilecektir:



Şekil 4.5 : Çalışma bölgesinin CORSIM ve METANET ağ modelleri.

1) Yol kesimlerindeki katılımların ve otoyol şerit iptali durumunun trafik akımı üzerinde yarattığı etkilerin tahmini
2) Katılım kontrol ve hız sınırlamaları gibi kontrol eylemlerinin trafik akımında yarattığı etkilerin tahmini
3) Şişeboyunlarda, yoğunluk değişimlerinin büyük olduğu durumlarda şok dalgasının etkisi
4) Taleplerdeki değişimlerin çalışma bölgesindeki trafik değişkenlerine olan etkileri ve kuyruklanma tahmini

METANET'in kalibrasyonu, başarımı yüksek bir kontrol uygulaması için oldukça önemlidir. Çünkü hız sınırlamalarının kestirilmesi ve durum değişkenlerinin doğru tahmini METANET'in kalibrasyonuna bağlıdır.

4.2.1 METANET kalibrasyonu

METANET modeli her bağa ait k zaman adımında trafik akımının durum değişkenlerini hesaplamaktadır. Kalibre edilmiş METANET modelinden beklenen, yol kesimine ait trafik akım durum değişkenlerini gözlenen değerlere (CORSIM) yakın tahmin eden METANET parametrelerinin kestirilmesidir.

Bunun için MATLAB optimizasyon fonksiyonundan yararlanılarak, doğrusal olmayan programlama problemi çözülür.

Her iterasyonda optimum olana kadar yeni parametreler bulunur ve amaç fonksiyonu minimize edilir. Kalibrasyon için kullanılan amaç fonksiyonu aşağıda görülmektedir:

$$J = \min_{x} \quad \sum_{m=1}^{M} \sum_{i=1}^{I} \sum_{k=1}^{N} \left[\left((\rho_{m,i}(k) - \hat{\rho}_{m,i}(\bar{x}, k) \right)^2 + \xi \left(v_{m,i}(k) - \hat{v}_{m,i}(\bar{x}, k) \right)^2 \right] \qquad \textbf{(4.26)}$$

Eşitlikte; M bağ, I yol kesim sayısı, N ise METANET'in tahmin yapacağı toplam zaman adımını göstermektedir. Çalışma bölgesinde gözlenen yoğunluk $\rho_i(k)$ ve gözlenen hız $v_i(k)$'dır (CORSIM'den alınan değerler). $\hat{\rho}_i(\bar{x}, k)$ ve $\hat{v}_i(\bar{x}, k)$ ise METANET'in $\bar{x}$ parametre vektörüne göre tahmin ettiği yoğunluk ve hız değerleridir. $\bar{x}$ parametre vektörü Çizelge 4.1'de verilen METANET parametrelerini içerir. Model kalibre edilirken $\bar{x}$ parametre vektörü için sınır değerler belirlenir. Bu nedenle kalibrasyon problemi doğrusal olmayan sınır değerli eniyileme problemine dönüşür. ξ ceza terimi kalibrasyonun yoğunluk ya da hız arasında eniyilemenin dengeli olarak yapılması için kullanılır METANET'in kalibrasyonu için ξ =0.01 seçilmiştir.

Ayrıca kuyruklanma değerleri de kalibrasyon sürecine katılmak istenirse Eşitlik (4.26) aşağıdaki şekilde düzenlenir:

$$J = \min_{x} \quad \sum_{m=1}^{M} \sum_{i=1}^{I} \sum_{k=1}^{N} \left[\left((\rho_{m,i}(k) - \hat{\rho}_{m,i}(\bar{x}, k) \right)^2 + \xi \left(v_{m,i}(k) - \hat{v}_{m,i}(\bar{x}, k) \right)^2 + \left(w_{m,i}(k) - \hat{w}_{m,i}(\bar{x}, k) \right)^2 \right] \qquad \textbf{(4.27)}$$

Bu çalışmada M=6 ve I=1 olduğundan Eşitlik (4.26) ve Eşitlik (4.27)'deki matrislerin sütun sayısı altıdır.

w_i CORSIM benzetim sonucu ana akım ve katılımlardaki kuyruklanma değerlerini içeren matristir. $\hat{w}_i$ METANET tarafından tahmin edilen kuyruklanma matrisidir. Kuyruklanma değerleri taşıt cinsinden hesaplanır. Kuyruklanma sadece ilk kesimden önce ve katılımlarda olacağından kuyruklanma matrisleri bu kesimler için hesaplanır. Buna göre,

$$\text{eğer i} = \{2,4,6\} \text{ ise } w_i(k) = \hat{w}_i(k) = 0 \quad \textbf{(4.28)}$$

Eşitlik (4.27)' deki yoğunluk (ρ), hız (v) değerleri kalibre edilmiş CORSIM ağındaki (Bölüm 3'de anlatılmıştı) kesimlerin sonuna yerleştirilen dedektörlerden (Şekil 4.2) alınır. $\hat{\rho}_i$ ve $\hat{v}_i$ değerlerinin MATLAB ortamında hesaplanması için METANET modeline ait eşitlikler MATLAB ortamına aktarılmıştır.

Çalışmada DHS ile kontrol yapılacağından, METANET, MATLAB içinde iki ayrı fonksiyon olarak yazılmıştır. Bunlardan ilki bu bölümde kalibrasyon için kullanılan metanet1 modelidir (EK B.1). Bu model (metanet1) hız sınırlarını içeren $v_{ctr;m,i}$ değişkenlerini içermez. Diğer model ise kontrol eyleminde kullanılacak metanet2 modelidir (EK B.2). metanet1 modeli MATLAB ortamında Şekil 4.6'daki gibi çağrılır.

```
>>x=(tau,kappa,delta,nhigh,nlow,rho_max,...fi,gamma,vf,rho_cri,a)
>>[RHO V Q W]=metanet1(x,D,rho_k1,v_k1,q_k1,w_k1)
```

Şekil 4.6 : Matlab komut satırından metanet1 modelinin çalıştırılması.

İşlev, girdi olarak daha önce Çizelge 4.1'de verilmiş olan kalibre edilecek parametreler içermektedir. Çizelge 4.1'deki parametrelere karşılık gelen MATLAB gösterimleri Çizelge 4.2'de görülmektedir.

Çizelge 4.2 : metanet1 model girdileri ve vektörel boyutları

METANET	metanet1	Boyut	Birim
τ	tau	1x1	s
K	kappa	1x1	taş/km/şerit
δ	delta	1x6	
η_{high}, η_{low}	nhigh,nlow	1x1,1x1	km^2/sa
ρ_{max}	rho_max	1x6	taş/km
Φ	fi	1x6	
γ	gamma	1x1	
v_f	vfree	1x6	km/sa
ρ_{cri}	rho_cri	1x6	taş/km/şerit
a	a	1x6	

rho_max parametresi sadece katılımlarda kalibre edileceğinden, bu değişken vektörüne ait 3. ve 5. elemanlar hariç tüm elemanlar sıfır değerine eşittir. Aynı şekilde *fi* parametresi katılımların olduğu kesimlerdeki hızlanma şeritlerinin sonunda

şerit azalmasını modele yansıtmak için koyulduğundan, sadece katılım kesimlerinde sıfırdan farklı değerler almaktadır. *vfree*, rho_cri ve *a* değişkenlerine ait vektörler ise ilgili kesimlere ait akım karakteristiklerini içermektedir. *D* talep matrisini, *rho_k1*,*v_k1*,*q_k1*,*w_k1* değerleri ise $k = 1$ anındaki yoğunluk, ortalama hız, akım ve kuyruklanma değerleridir. *D* talep matrisi CORSIM kalibrasyonunda kullanılan talep değerlerden türetilir. Ana akım ve katılımlara girilen 5'er dakikalık talep değerleri T_{sim} zaman adımına uyumlu hale getirilir. Buna göre 75 dakikalık benzetim süresi için *D* matrisinin boyutu 450x6 olur.

Şekil 4.6'daki fonksiyon çağrısı sonrası `metanet1` tarafından dört adet matris üretilir. Bunlar sırayla yoğunluk (`RHO`), hız (`V`), akım (`Q`) ve kuyruklanma (`W`) matrisleridir. Bu matrislerin boyutu `D` talep matrisine eşittir ve 10 saniyelik zaman adımlarında çalışma kesimlerine ait ilgili durum değişkenlerini içermektedir. Buna göre her girdi parametresi değiştiğinde *metanet1* farklı değerde matrisler üretecektir.

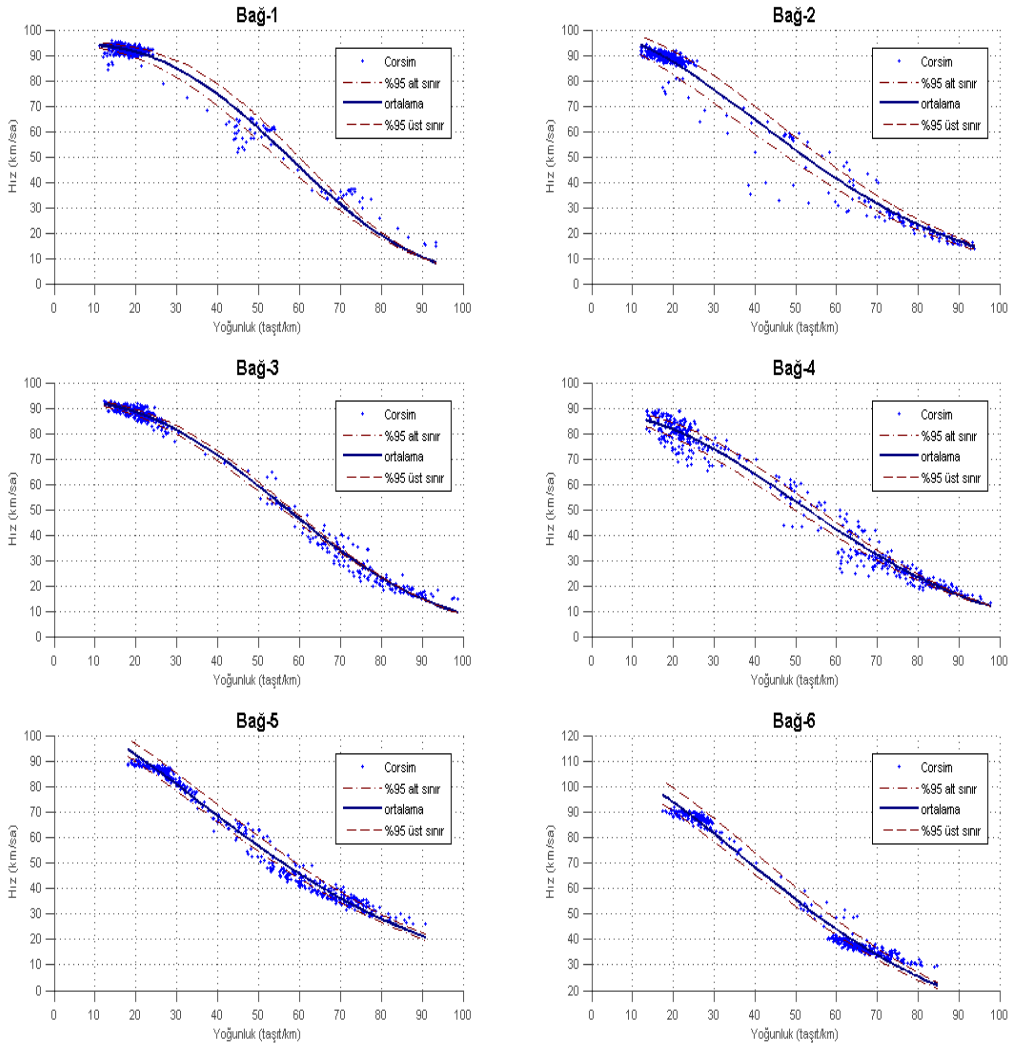
Kalibrasyon 450x6 boyutundaki CORSIM'den RTE yardımıyla alınan hız (v) ve yoğunluk (ρ) matrisleriyle gerçekleştirilir. Matrisler RTE arabirimi yardımıyla, kalibrasyonu bitmiş CORSIM modelinden edilmiştir. Gözlem süresi 65 dakika yerine 75 dakika seçilmiş, böylelikle daha fazla veri elde edilerek kalibrasyon için serbestlik derecesi yükseltilmiştir.

Kalibrasyon süresini kısaltmak için öncelikle dengedeki hız eşitliği (4.11) içinde bulunan v_f, ρ_{cri}, ve a değerleri, CORSIM (hız (v) ve yoğunluk (ρ)) verileri kullanılarak seçilen %95 güven aralığında Eşitlik (4.11) için eğri uydurma yöntemi ile kestirilmiştir. Çizelge 4.3'te %95 güven aralığında kestirilen v*free*, *ρcritic*, ve *a* değerleri, Şekil (4.7)'de her bağ için kestirilmiş olan eğriler görülmektedir. Bu eğriler için kullanılan matematiksel model (4.11) aynı zamanda METANET ortalama hız eşitliği (4.9) içinde kullanıldığından, eniyileme sürecini hızlandırmak için dengedeki hız eşitliği kalibrasyonundan elde edilen v_f, ρ_{cri}, ve a değerleri, başlangıç değerleri olarak eniyilemeye girilmiştir. %95 olarak seçilen güven aralığında kestirilen *vfree*, ρ*critic* ve *am* değerleri METANET kalibrasyonu sırasında alt ve üst sınır değerleri olarak belirlenmiştir. Böylelikle eniyileme algoritmasının bu değerler kestirmesi için belirlenen aralıkta deneme yapması sağlanarak eniyileme sürecinin kısaltılması amaçlanmıştır.

Çizelge 4.3 : %95 Güven aralığında kestirilen v*free*, *ρcritic*, ve *a* değerleri.

	v*free*			*ρcritic*			*a*		
Bağ No	**Alt Sın.**	**Ort.**	**Üst Sın.**	**Alt Sın.**	**Ort.**	**Üst Sın.**	**Alt Sın.**	**Ort.**	**Üst Sın.**
1	93,72	94,45	95,19	45,32	46,64	47,95	2,50	2,76	3,03
2	96,77	98,95	101,10	45,81	46,95	48,10	1,62	1,76	1,91
3	92,28	92,94	93,60	48,07	48,38	48,69	2,29	2,38	2,47
4	86,42	88,03	89,63	48,45	49,04	49,64	1,91	2,05	2,19
5	104,80	107,50	110,20	49,17	49,69	50,20	1,48	1,57	1,66
6	105,10	108,80	112,40	46,67	47,09	47,50	1,51	1,64	1,77

Ort.:Ortalama



Şekil 4.7 : Yoğunluk hız verilerinden türetilen dengedeki hız eğrisi (V_d).

4.3 MATLAB Yerleşik İşlevleriyle METANET'in Kalibrasyonu

Bu çalışmada MATLAB içinde yerleşik bulunan *fmincon* fonksiyonu kullanılmış olup bu fonksiyon ardışık kuadratik programlama yöntemi kullanmaktadır. *fmincon*

MATLAB programı içinde sınır değerli eniyileme algoritmalarının kullanıldığı bir MATLAB fonksiyonudur. *fmincon* ile eniyileme yaparken hangi algoritmanın kullanılacağı seçimi kullanıcıya bırakılır (The Mathworks, 2009). Bu çalışmada METANET kalibrasyonu için sıralı kuadratik programlama algoritması seçilmiştir. Bunun nedeni, bu algoritmanın doğrusal olmayan kısıtlar ve sürekli amaç fonksiyonlarında başarılı sonuçlar vermesidir (Hegyi vd., 2003). *fmincon* kullanılarak çözülen sıralı kuadratik problem aşağıdaki biçimde ifade edilir.

MATLAB'da *fmincon* ile eniyileme yapmak için problem genel olarak aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\min_x(z) = f(x)$$

Doğrusal ve doğrusal olmayan kısıtlar;

$$Ax \ll b$$

$$A_{eq} = b_{eq}$$

$$C(x) \ll 0$$

$$C_{eq} = 0$$

$$l_b \ll x \ll u_b$$

Kısıtların tamamının yazılması mecburiyeti yoktur. Bu çalışmada, A, A_{eq}, C(x), C_{eq} tanımlanmamıştır. Sadece x vektörü için Çizelge 4.4'de belirtilen alt ve üst sınırlar tanımlanmıştır.

Çizelge 4.4 : Eniyileme için seçilen ilkdeğer ve sınır vektörlerine ait değerler.

	i	**Tüm Bağlar**																	
		xL						*x0*						*xU*					
κ	1	10						50						100					
η_{low}	2	10						50						100					
η_{high}	3	100						150						200					
τ	4	1						18						30					
ϕ	5	0						5						10					
γ	28	1						2						5					
		Bağ-1			**Bağ-2**			**Bağ-3**			**Bağ-4**			**Bağ-5**			**Bağ-6**		
		xL	*x0*	*xU*	*xL*	*x0*	*xU*	*xL*	*x0*	*xU*	*xL*	*x0*	*xU*	*xL*	*x0*	*xU*	*xL*	*x0*	*xU*
δ	6,7							0	0,012	2				0	0,012	2			
v_f	8..13	93	94	96	96	98	102	92	93	94	86	88	90	104	107	110	105	108	112
p_{cri}	14..19	45	46	48	45	46	49	45	48	49	45	49	50	45	49	50	45	47	48
a	20..25	2	3	4	1	2	4	2	2	3	1	2	4	1	2	4	1	2	4
ρmax	26,27							100	120	220				100	120	220			

MATLAB'de METANET modelinin *fmincon* ile kalibrasyonu için aşağıdaki aşamalar gerçekleştirilir.

1-Kısıtlar için başlangıç (x0) ve sınır vektörleri (xL, xU) oluşturulması;

fmincon için gereken başlangıç vektörü *x0*, alt ve üst sınır değerleri vektörleri *xL* ve *xU* MATLAB komut dosyasına Çizelge 4.4'deki değerlere göre Şekil 4.8'de görüldüğü biçimde yazılır.

```
xL=[10 10 100 1 0  0 0 93 91 93 86 104 105 45 45 45 45 45 45 2 1 2 1
1 1 100 100 1];
x0=[50 50 150 18 5 0.012 0.012 94 98 93 88 107 108 46 46 48 49 49 47
3 2 2 2 2 120 120 2];
xU=[100 100 200 30 10 2 2 96 102 94 90 110 112 48 49 49 50 50 48 4 4
3 4 4 4 220 220 5];
```

Şekil 4.8 : Eniyileme için alt,üst ve başlangıç vektörlerinin tanımlanması.

xL ve *xU* vektörleride Çizelge 4.4'deki değerlere göre aynı şekilde MATLAB değişken uzayına (workspace) yüklenir. Sınır değerler belirlenirken literatürden faydalanılmıştır. Aralıkların belirlenmesindeki diğer önemli ayrıntı, eniyileme sırasında parametreler arasındaki ödünleşmeyi dengeli tutmaktır. Eniyileme algoritmaları sürekli amaç fonksiyonunu enküçüklemeye çalıştığından, bir parametreye gereğinden fazla alt ya da üst sınır belirlendiğinde, diğer parametrelerin önem dereceleri düşebilmekte, kalibrasyon iyi tahmin sonuçları vermesine rağmen gerçekçi olmayabilmektedir. Bu durum MTÖK'ün ilerde yapılacak kontrol eyleminde hatalı kontrol değerleri hesaplamasına neden olacaktır.

2-Amaç fonksiyonu için "m" uzantılı betik dosyası oluşturulması;

Eşitlik (4.26) daki amaç fonksiyonu için Şekil 4.9'da görülen MATLAB betiği yazılır.

```
function [S]=metanetcalibration(x)
global PCAL;
global VCAL;
global QCAL;
global WCAL;
% metanet matrisleri için vektörlerin gönderilmesi
[P V Q W]=metanet1(x);
%metanet1 çalişması bittikten sonra burası devam eder
TP=(P-PCAL).^2;
TV=(V-VCAL).^2;
OP=sum(sum(TP));
OV=sum(sum(TV));
S=OP+0.01*OV;
```

Şekil 4.9 : Amaç fonksiyonu için oluşturulan metanetcalibration.m betiği.

Bu betik *x* parametre vektörü girildiğinde *metanet1* fonksiyonunu çağırmakta ve bu çağrı sonucu METANET modelinin ürettiği `RHO` yoğunluk ve `V` hız matrislerini Eşitlik (4.26) amaç fonksiyonuna göre hesaplayarak skaler bir değer elde etmektedir. Bu skaler değer ne kadar sıfıra yakınsa `x` parametre vektörü o kadar başarılıdır.

METANET modeli ile ilgili diğer değişkenler (kesim uzunlukları, şerit sayıları gibi) kalibrasyon öncesi MATLAB değişken uzayı (workspace) yüklendiğinden buradan okunmaktadır.

3-Eniyileme komutları için m betik dosyası oluşturulması;

MATLAB yerleşik eniyileme araçları kullanarak *metanetcalibration* fonksiyonu çağrısıyla `S` değerini en küçükleyecek `x` vektörü araştırılması için `basla_kalibrasyon.m` betik dosyası oluşturularak, "basla_kalibrasyon" MATLAB komut satırına girilir (Şekil 4.10). Dosya kesime ait geometrik parametrelerin yanında eniyileme için gerekli olan bazı değişkenlerinde belirlenmesinden de sorumludur.

```
Clear
xL= [10  10 100 1   0     0     0  93  91 93 86 104 105 45 45 45 45 45 45 2
1 2 1 1 1 100 100 1];
x0=[ 50  50 150 18  5 0.012 0.012  94  98 93 88 107 108 46 46 48 49 49 47 3
2 2 2 2 2 120 120 2];
xU=[100 100 200 30 10     2     2  96 102 94 90 110 112 48 49 49 50 50 48 4
4 3 4 4 4 220 220 5];
 % This is an auto generated M-file from Optimization Tool.
global D;
global PCAL;
global VCAL;
global QCAL;
global WCAL;
global Lm;
global qcap;
global lem;
global dlambda;
load D.mtx;
PCAL=dlmread('PRAW.mtx');
VCAL=dlmread('VRAW.mtx');
QCAL=dlmread('QRAW.mtx');
WCAL=dlmread('WRAW.mtx');
Lm=[3 3 3.2 3 3.5 3]; %ba? ?erit say?lar?
qcap=[6000 0 2000 0 4000 7500]; %kapasite vektörü
lem=[262 500 275 634 500 500]; %Ba? uzunluklar?, m cinsinden hesaplan?rken
km'ye çevrilir
dlambda=[0 0 0 0 0 0];
% Start with the default options
options = optimset;
% Modify options setting
options = optimset(options,'Display', 'off');
options = optimset(options,'PlotFcns', {  @optimplotx @optimplotfunccount
@optimplotfval });
[x,fval,exitflag,output,lambda,grad,hessian] = ...
fmincon(@metanetcalibration,x0,[],[],[],[],xL,xU,[],options);
```

Şekil 4.10 : Eniyileme için oluşturulan baslakalibrasyon.m betiği.

Çizelge 4.5 : Kalibre edilmiş METANET parametreleri.

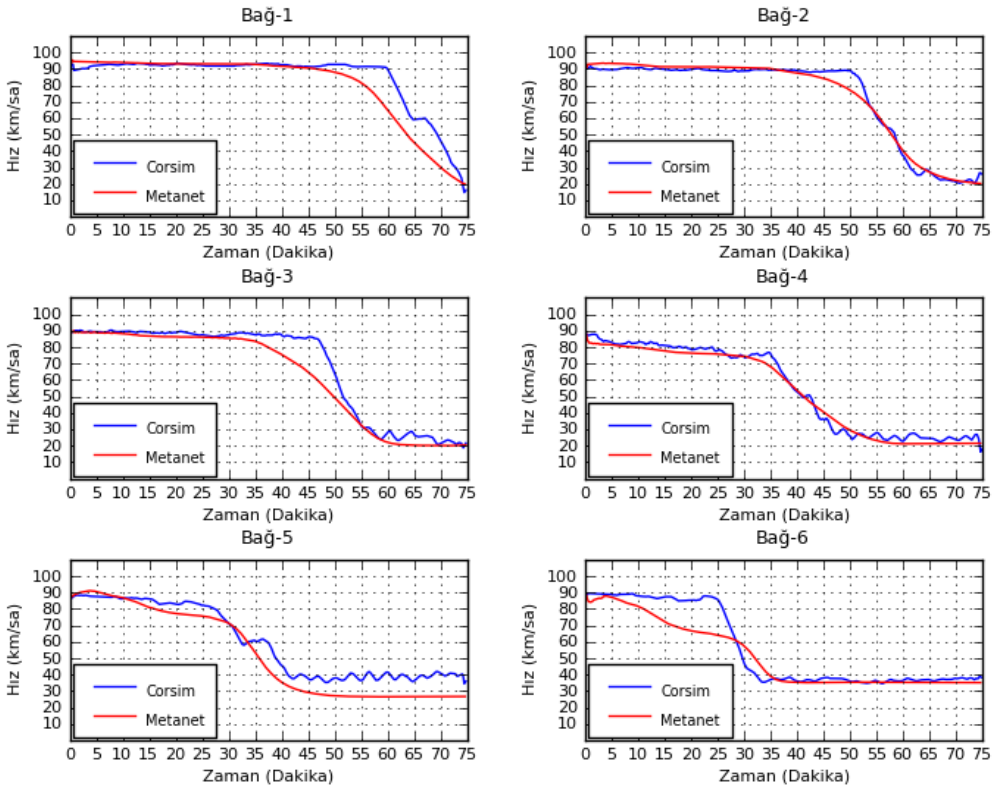
	Tüm Bağlar	Bağ-1	Bağ-2	Bağ-3	Bağ-4	Bağ-5	Bağ-6
κ	90						
η_{low}	52,491						
η_{high}	68,491						
τ	7,582						
ϕ	0						
δ				0,012		0,012	
v_f		95,19	101,1	93,6	86,42	110,34	105,23
p_{cri}		47,95	45,81	48,07	48,45	42,778	30
a		3,03	1,7952	2,47	1,91	1,5385	3
$pmax$				93,076		143,21	
γ	2,889						

Çizelge 4.5'de kalibrasyon işlemi sonucunda elde edilmiş METANET parametreleri görülmektedir. Bu parametreler kullanılarak bağlara ait tahmin edilen hız, yoğunluk, akım ve katılımlardaki kuyruklanma vektörlerinin CORSIM vektörleri ile karşılaştırılması Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de görülmektedir. Tahminlerin başarımını ölçmek için yapılan Theil's U1 sınamalarının sonuçları Çizelge 4.6'da verilmiştir. Daha önceki bölümde bahsedildiği gibi sıfıra yakın değerler modelin iyi tahmin yapabildiğini göstermektedir. Buna göre METANET modelinin tüm bağlarda başarılı tahminlerde bulunduğu görülmektedir.

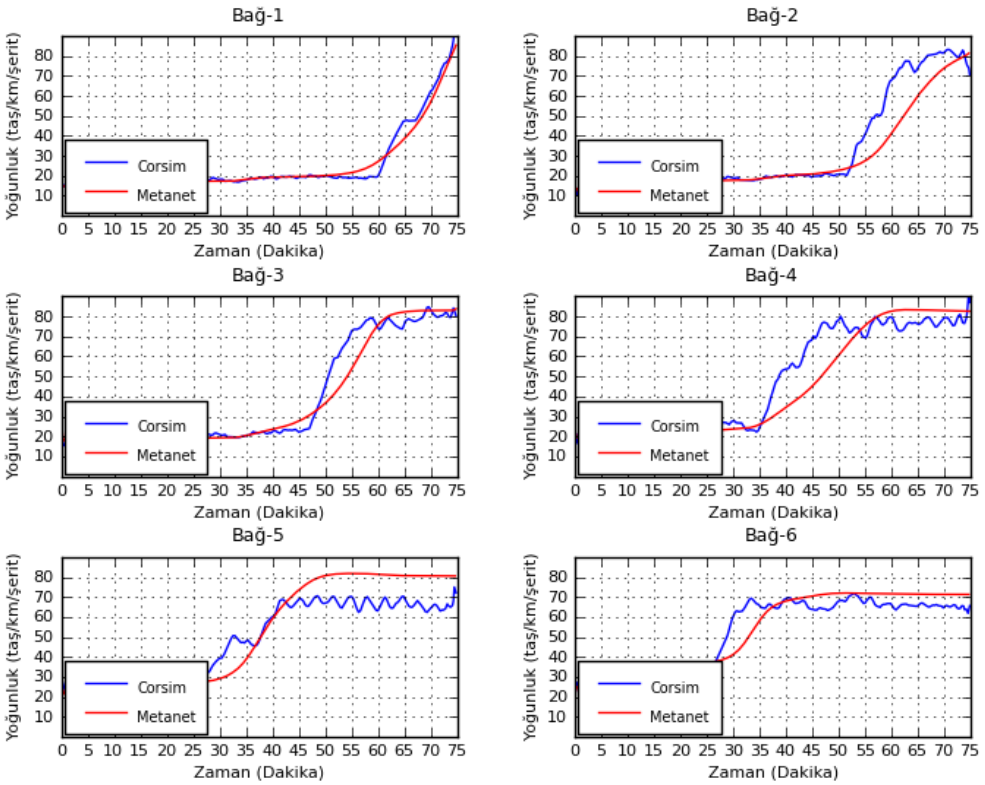
Çizelge 4.6 : CORSIM ve METANET çıktılarının Teil's U1 istatistikleri.

	Bağ-1	Bağ-2	Bağ-3	Bağ-4	Bağ-5	Bağ-6
Ortalama Hız	0,0533	0,0229	0,0609	0,0442	0,0717	0,0742
Yoğunluk	0,0465	0,1102	0,0597	0,0864	0,0827	0,0605
Akım	0,0319	0,0313	0,0484	0,0457	0,0250	0,0218

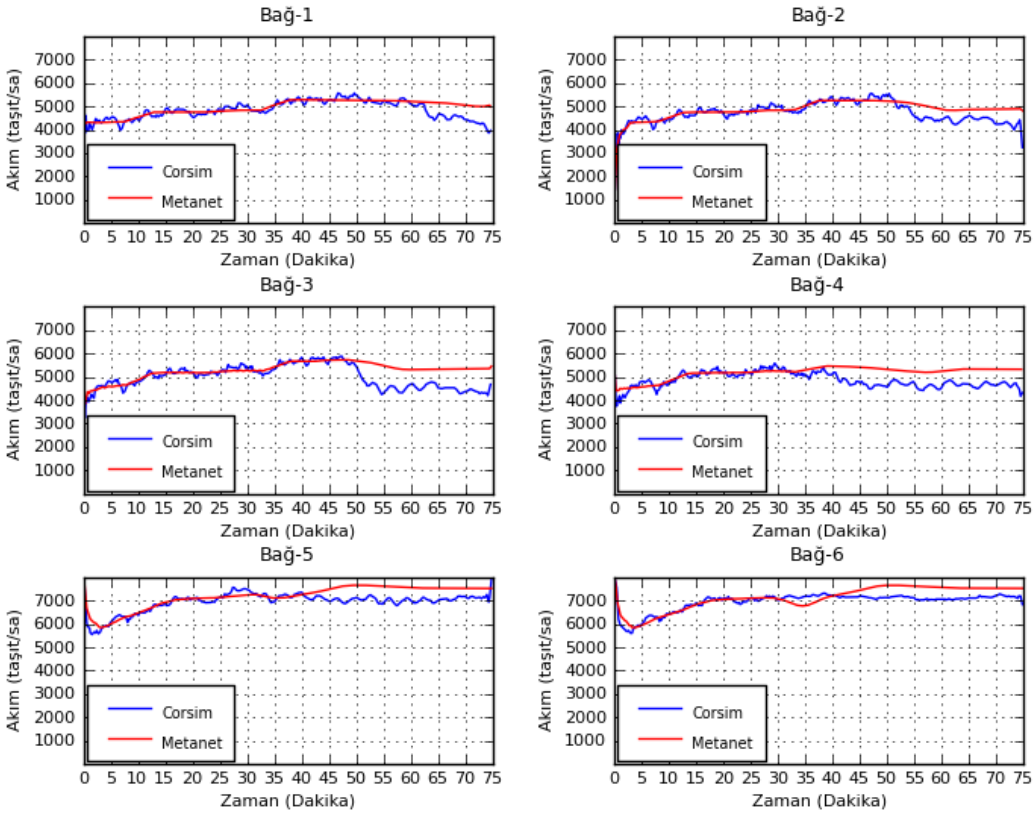
METANET kalibrasyonun tamamlanmasıyla elimizde çalışma kesimindeki durum değişkenlerinin matematiksel modeli elde edilmiştir. Bu trafik kontrol çalışması için oldukça önemlidir. Matematiksel model ile kesimdeki trafiği amaç fonksiyonuna göre eniyileyecek hız sınırlarını bulmak mümkün olacaktır. Bir sonraki bölümde açıklanacak MTÖK uygulaması matematiksel bir modele ihtiyaç duyduğundan, kalibre edilmiş METANET modeli çalışmanın iskeletini oluşturmaktadır.



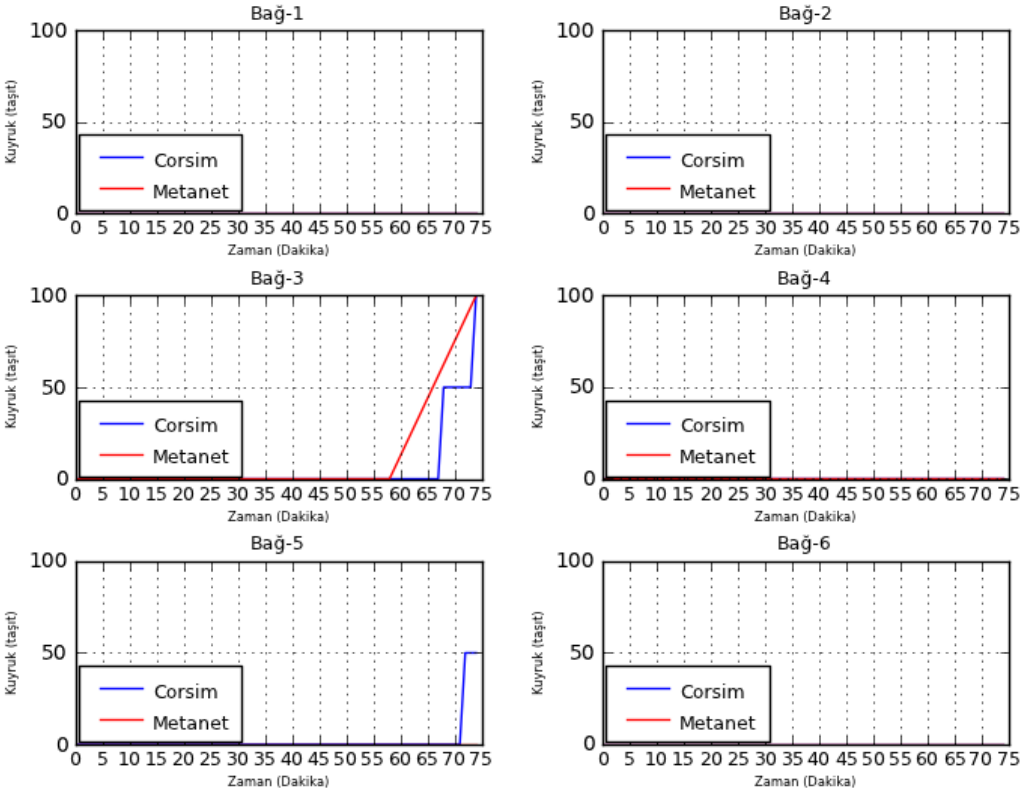
Şekil 4.11 : Kalibre edilmiş METANET'in bağlardaki ortalama hız tahmini.



Şekil 4.12 : Kalibre edilmiş METANET'in bağlardaki yoğunluk tahmini.



Şekil 4.13 : Kalibre edilmiş METANET'in bağlardaki akım tahmini.



Şekil 4.14 : Kalibre edilmiş METANET'in bağlardaki kuyruklanma tahmini.

5. MODEL TABANLI ÖNGÖRÜLÜ KONROL

Çalışmanın amacı daha önce de belirtildiği gibi O-1 otoyolunun kentiçi 2,5 km'lik kesiminde oluşan şok dalgalarını sönümlemek, kuyruklanmayı ve tıkanıklığı önlemek ya da geciktirmektir. Çalışma bölgesi üzerinde trafik akım değişkenlerine (durum değişkenleri) müdahale etmek için DHS ile kontrol uygulaması yapılacaktır. DHS değerlerini bir amaç çerçevesinde hesaplama, trafik çalışmasını optimal kontrol problemine dönüştürmektedir. Çalışmada bu amaçla DHS kontrol çalışması yapmak için optimal kontrol yaklaşımı olan Model Tabanlı Öngörülü Kontrol (MTÖK) yönteminden yararlanılacaktır. Şunu vurgulamak gerekir ki MTÖK başlı başına bir eniyileme işlemi değil, eniyileme ve kontrol işlemlerine ait akışı belirleyen yöntemdir.

MTÖK yönteminin trafik uygulamasında kullanılmasının nedeni, endüstri süreçlerinde bugüne kadar uygulanmış en başarılı optimal kontrol yöntemlerinden biri olmasıdır (Bequette, 2007). MTÖK yönteminin dışsal etkilere ve talepte değişimlere karşı uyarımlı yapısı sayesinde otoyol trafik kontrol uygulamalarında tercih edilmesi diğer bir önemli nedendir (Hegyi, 2004; Belleman, 2003).

Kontrol denince akla süreç gelir. Süreç aslında kontrol edilmek istenen ve hedeflenen sınırlar içinde tutulmaya çalışılan olaylardır. Bu kimi zaman petrol tesisindeki bir ısı tankı, kimi zaman kimyasal bir süreç, kimi zamansa bu çalışmada olduğu gibi trafik akımının kontrolü olur. Bu bölümde trafik akımının DHS ile kontrolünde yararlanılan MTÖK yönteminden söz edilecektir. MTÖK yönteminin uygulamasında kullanılan araçlara ve çalışma bölgesine yönelik uygulamasına yer verilecektir.

5.1 DHS değerlerinin hesaplanmasında kontrol yönteminin seçimi

Bazı anakentlerde trafik akımıyla ilgili kontroller, insan destekli yürütülmektedir. Anayolları kameralar yardımıyla gözleyen, trafik yönetim merkezindeki sorumlular, trafiğin o anki durumuna göre trafiği etkileyebilecek eylemlerde bulunmaktadırlar. Örneğin, DBL'na daha önceden belirlenmiş mesajları göndermektedirler. Ancak

sapma oluştuktan sonra kontrol eylemi gerçekleştiği için ve süreçteki dalgalanmalar nedeniyle kontrolden alınan fayda her zaman verimli olmamaktadır.

Kontrol eylemini otomatik hale getirmek için öncelikle ne tür kontrol stratejisinin uygulanması gerektiğine karar verilmelidir. Geri beslemeli stratejide sapmadan sonra kontrol eylemi oluştuğundan, trafik akımında istenmeyen durumlar oluştuktan sonra kontrol uygulanır. Bölüm 2'de özellikle kritik yoğunluk değeri aşıldıktan sonra, kontrol uygulamasının başarısız olduğuna değinilmişti. Bu nedenle kontrol yönteminin sapma oluşmadan kontrol eylemini gerçekleştirmesi, trafik kontrol uygulamasının başarısı için önemli olmaktadır.

DHS ile trafik kontrol uygulamasında, kontrolle ilgili ögelerin belirlenmesi amacıyla aşağıdaki başlıkların açıklanması gerekir.

Trafik süreci için durum değişkenleri ve hedef durumu; Trafik akımını tanımlamak için kullanılan durum değişkenleri çalışma bölgesindeki bağlardan alınan yoğunluk, hız ve akım değerleridir. Çalışma bölgesi üzerinde amaç fonksiyonlarıyla hedef durumlar tanımlanmıştır.

Trafik sürecini etkileyen kontrol değişkenleri; Trafik akımını kontrol eden değişken DHS'dır. Hedef durumu tanımlayan amaç fonksiyonu, kontrol değişkeni olarak hız sınırları kullanılarak enküçüklenmeye çalışılır.

Kontrol eylemlerini gerçekleştiren araçlar; Hız sınırları araziye yerleştirilen DHS levhaları kullanılarak sürücülere bildirilecek ve akım kontrol edilmeye çalışılacaktır.

Hedeflenen durum; Süreç için hedeflenen durum, şok dalgalarının sönümlenmesi, çalışma bölgesinde hızdaki varyansların düşürülmesi ve tıkanıklığın giderilmesi/geciktirilmesidir.

Süreci hedeflenen durumdan uzaklaştıran bozucular; Süreç mevcut taleplere göre çalışma bölgesini amaç fonksiyonuyla belirlenmiş hedef durumda tutmaya çalışmaktadır.

Modele dayalı bir kontrol yönteminde süreçte olabilecek sapmalar, sürece ait sistem modeliyle tahmin edilerek kontrol eylemi gerçekleştirilir. Bu kontrol yöntemi zamana bağlı tahmin ve kontrol yapar. Optimal kontrol bir amaç fonksiyonuna (performans fonksiyonu) dayanarak kontrol problemini formüle eder ve belirli süre için optimal performansı veren kontrol sinyalleri bulmaya çalışır. MTÖK ise optimal

kontrol yönteminin geri besleme ile geliştirilmiş şeklidir (Hegyi vd., 2009). Trafik gibi dinamik süreçlerin zamana bağlı olarak bozucu etkiler vb. nedenlerden dolayı, trafik durum değişkenlerinde değişiklikler oluşabilir. Bu nedenle kontrol değişkeninin sürecin sapması dikkate alınarak güncellenmesi gerekir. Bu durum ancak süreçte yapılan ölçümlerden alınan geri besleme ile gerçekleşir.

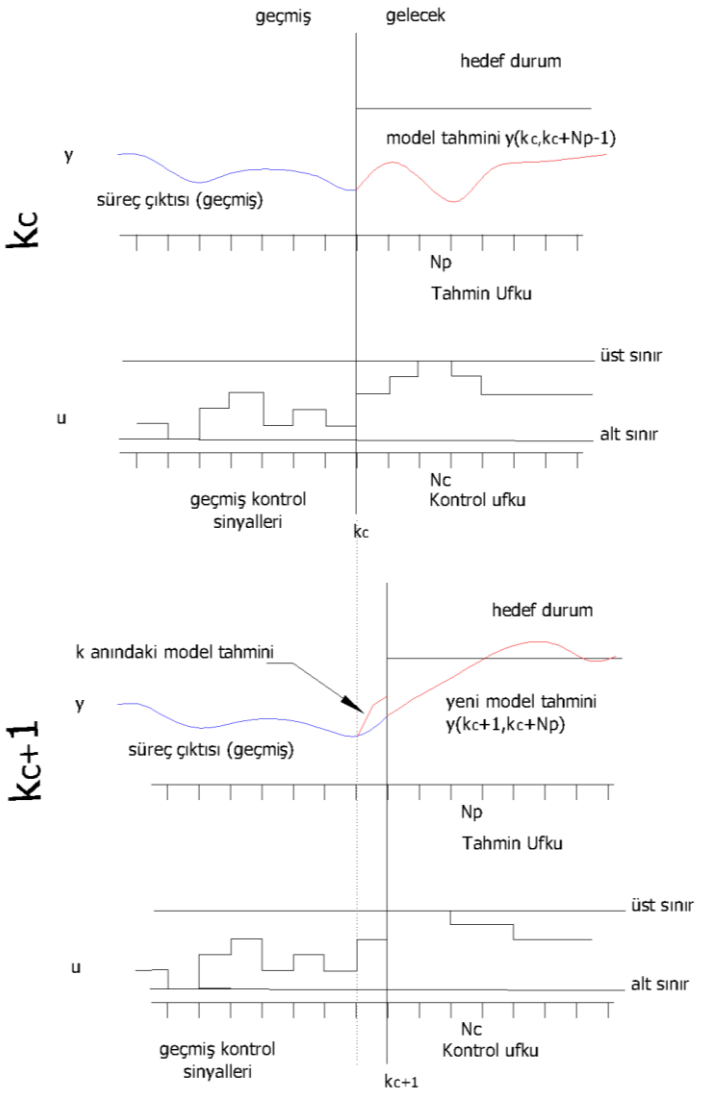
5.2 Model Tabanlı Öngörülü Kontrol

Şekil 5.1'de Model Tabanlı Öngörülü Kontrol yönteminin işleyişi görülmektedir. MTÖK'de, kontrol edilecek süreç örnekleme zamanı olarak anılan sabit bir zaman aralığında, $T_{ö}$, sürekli izlenmektedir. Bu zaman aralığı küçüldükçe, süreç de daha sık aralıklarla kontrol edilir. Kontrol için, k_c zaman adımından N_p kadar uzaklıkta (tahmin ufkunda) sürecin davranışı $y(k_c, \dots, k_c + N_p - 1)$ tahmin edilir. Bu nedenle de süreç için bir tahmin modeline ihtiyaç duyulur. Model ile N_c kontrol ufkuna kadar her örnekleme zaman aralığı ($T_{ö}$) için kontrol eylemleri $u(k_c, \dots k_c + N_p - 1)$ hesaplanır. Bu hesaplama için eniyileme algoritması kullanılır. N_c kontrol ufku boyunca hesaplanan kontrol eylemlerinden (u) sadece u(k_c) uygulanır. *(k_c+1)* adımında süreçten yeni durum değişkenleri *x(k_c)* ölçülür ve model tahminleri y($k_c + 1, \dots, k_c + N_p$) ile kontrol eylemleri (u) tekrar hesaplanır. Her kontrol adımında kontrol vektörü hesaplandığı için bu yöntem yuvarlanan/kayan ufuk kontrolü olarak da anılır.

MTÖK yöntemi tahmin modeli kullanılmasından dolayı, çok girdili (birden fazla durum değişkeni) çok çıktılı (birden fazla kontrol değişkeni) süreçler kontrol edilebilir.

MTÖK yöntemi sürece uygulanmadan önce, aşağıdaki sorulara cevap vermelidir:

- Süreç çıktılarını etkileyen kontrol eylemlerini tahmin edecek model nedir?
- Amaç fonksiyonu (hedef durumu belirleyen) nedir?
- Hangi eniyileme algoritması ile kontrol değişkenleri hesaplanmalıdır?
- Kontrol eylemleri için herhangi bir kısıt getirilmeli midir?
- Yeni tahminlerin yapılacağı zaman adımında (kc+1), model tahminleri için durum değişkenlerinin başlangıç değeri ne alınmalıdır?



Şekil 5.1 : MTÖK yönteminin işleyişi.

MTÖK yönteminde hedef durumu belirleyen genelleştirilmiş amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\min_{u} J(u) = \sum_{j=k_c}^{j=k_c+N_p-1} \mathcal{F}\left[x(j), u(j); N_c, N_p\right] \qquad \textbf{(5.1)}$$

MTÖK yönteminde her örnekleme adımında yukarıdaki fonksiyonu enküçükleyen kontrol değişken vektörü *(u)* bulunur. Bulunan (*u*)kontrol vektörü süreci tahmin ufku içinde, N_p, hedef duruma yaklaştıracak ya da bu hedef durumdaki konumunu sabit tutacak kontrol değişkenlerini içerir (Şekil 5.1). Kontrol değişken vektörü (*u)* boyutu kontrol ufkuna (*Nc)* 'ye eşittir.

Eşitlik (5.1)'deki amaç fonksiyonu aşağıdaki kısıtlar altında enküçüklenir.

$$U_{min} \leq u(j) \leq U_{mak} \quad \forall j \epsilon [k_c, k_c + N_c - 1] \tag{5.2}$$

$$\mathrm{u}(j) = \mathrm{u}(k_c + N_c - 1) \quad \forall j \epsilon [k_c + N_c - 1, \mathrm{k_c} + N_p - 1] \tag{5.3}$$

U_{min} ve U_{mak} kontrol değişkenleri için alt ve üst sınır değerleri göstermektedir (Şekil 5.1). MTÖK yönteminde yukarıdaki doğrusal/doğrusal olmayan programlama problemi her örnekleme aralığı için ($T_{\ddot{o}}$) çözülür ve bulunan (*u)* kontrol değişken vektörünün sadece ilk elemanın değeri u($\mathrm{k_c}$) kontrol eylemine dönüştürülür. Eşitlik (5.1)'deki amaç fonksiyonu ile kontrol ufkundaki her örnekleme adımı ($T_{\ddot{o}}$) için kontrol değişkenleri hesaplanır. Böylelikle takip eden zaman adımlarında sürecin hedef değerinden aşırı sapması engellenir . Bu nedenle hesaplanan kontrol değişken vektörü (u) içindeki kontrol elemanı diğerlerinden bağımsız değildir.

5.3 MTÖK Yöntemi ile DHS Uygulaması

MTÖK yöntemi ile dinamik DHS uygulaması için aşağıda ögeler gereklidir:

5.3.1 Tahmin modeli

DHS uygulaması için tercih edilen tahmin modeli Bölüm 4'de kalibrasyonu yapılmış METANET modelidir. Ancak MTÖK için kullanılan METANET modeli kalibre edilmiş modelden farklıdır. MTÖK'de kullanılan METANET modeli hız sınırları parametrelerinin (v_{ctrl}) eklenmesiyle elde edilir. Eşitlik (4.12) ortalama hız eşitliğine (4.9) yerleştirildiğinde METANET kontrol değişkenlerine (DHS-v_{ctrl}) göre trafik akımının (sürecin) verdiği tepki modellenmektedir.

5.3.2 Amaç fonksiyonu (hedef durumu)

MTÖK uygulaması iki farklı amaç fonksiyonu ile gerçekleştirilecektir. Bunlardan ilki, tahmin ufku boyunca yolculuk süresini enküçükleyen, şok dalgalarını azaltan amaç fonksiyonudur. Bu fonksiyondaki değişkenler, DHS kontrol değişkenlerini içeren *metanet2* modeli (EK B.2) ile hesaplanır.

$$J_{TYS}(k_c) = T_{\ddot{o}} \sum_{j=\mathrm{k_c}}^{\mathrm{k_c}+N_p-1} \left\{ \sum_{(m,i)\varepsilon\mathcal{M}} \rho_{m,i}(j) \lambda_m L_{m,i} + \sum_{m\varepsilon\mathcal{O}} w_{m,1}(j) \right\} \tag{5.4}$$

$\mathcal{M}$, çalışma bölgesindeki bağ ve kesimleri içeren kümeyi temsil etmektedir. Bu çalışmada her bağ bir kesim içerdiğinden *{m,i=1}* olur. $\mathcal{O}$ kümesi ilk bağ ve katılımların olduğu bağları kapsar.

Eşitlik (5.4)'deki amaç fonksiyonu MTÖK kontrol biriminde eniyilemeye girdiğinde, içinde bulunulan k_c adımından tahmin ufkuna (N_p) kadar olan zamanda tüm bağlarda harcanan yolculuk süresini, anaakım ve katılımlarda taşıtların bekleme süresini enküçükleyecek hız sınırlarının bulunmasını hedefler. Ancak bunu yaparken bağlar arasındaki hız farkları da dikkate alınmalıdır. Hız farklarının yüksek olması trafik güvenliği ve işletimi açısından istenmeyen bir durumdur ve Eşitlik (5.5) bu durumu ifade etmektedir

$$J_{HF}(k_c) = \sum_{j=\mathrm{k_c}}^{\mathrm{k_c}+N_c-1} \sum_{(m,i)\varepsilon\mathcal{M}} \left(v_{kont,m,i+1}(j) - v_{kont,m,i}(j)\right)^2 \qquad \textbf{(5.5)}$$

Eşitlik (5.5)'de N_c kontrol ufkunu temsil etmektedir. $v_{kont,m,i}(j)$ ise j kontrol adımında, m bağı üzerindeki i kesimine uygulanan hız sınırını göstermektedir. Bu iki amaç fonksiyonu Eşitlik (5.6)'da görüldüğü gibi tek bir amaç fonksiyonu haline gelir.

$$J(k_c) = J_{TYS}(k_c) + \xi J_{HF}(k_c) \qquad \textbf{(5.6)}$$

Eşitlik (5.6)'da ξ değeri, kontrol biriminin eniyileme yaparken gereğinden fazla biçimde hız farklarına odaklanmasını önleyerek, iki fonksiyon arasında denge sağlamak için kullanılan ceza katsayısıdır. Bu çalışmada $\xi = 0{,}01$ alınmıştır.

Çalışma bölgesinde bağ yoğunlukları yüksek talepler nedeniyle çok kısa sürede yükselmektedir. Bölgeye özgü bu durum nedeniyle akımı homojenleştirmenin hedef durum olarak seçilmesi düşüncesi geliştirilmiş, böylece şok dalgasının önlenmesi ya da geciktirilmesi istenmiştir. Bu nedenle de ikinci amaç fonksiyonu olarak bağlar arasındaki yoğunluk farkını enküçükleyen yeni bir fonksiyon tanımlanmıştır.

$$J_{BAF}(k_c) = \sum_{j=k_c}^{k_c+N_p-1} \sum_{(m,i)\varepsilon\mathcal{M}} \left(\rho_{m,i}(j) - \rho_{m,i+1}(j)\right)^2 \quad \textbf{(5.7)}$$

Çalışma bölgesine uygulanan DHS hızları arasındaki farkı en küçükleyen terim de bu amaç fonksiyonuna eklenir.

$$J(k_c) = J_{BAF}(k_c) + \xi J_{HF}(k_c) \quad \textbf{(5.8)}$$

Çalışmada ξ = 0.1 olarak alınmıştır.

5.3.3 Kontrol değişkenlerini hesaplayacak eniyileme algoritması

MTÖK için sistem girdilerini oluşturan DHS değerlerini hesaplayan kontrol birimini *MATLAB* içindeki *pattersearch* üstlenmektedir. 4.Bölümde, METANET kalibrasyonunda kullanılan amaç fonksiyonlarında (Eşitlik (4.27)) hız, yoğunluk ve kuyruklanma değerlerinin farklarının karesini sıfıra en fazla yaklaştıran parametreler kestirilmiştir. DHS değerlerini bulmak içinse, her kontrol adımında, METANET'in tahmin ettiği trafik durum değişkenlerine göre, tahmin ufku *(Np)* içinde, amaç fonksiyonları Eşitlik (5.6) ve Eşitlik (5.8)'i enküçükleyen hız sınırlarının kestirilmesi gerekmektedir. Kontrol ufku (N_c) ve bağların sayısı (6) gözetildiğinde, her kontrol eylemi öncesi, eniyileme sürecinde ($N_c X6$) boyutunda kontrol matrisi hesaplanmalıdır. Amaç fonksiyonunda kullanılan değişkenler METANET'in tahminlerinden elde edilir.

MTÖK'e dayalı trafik kontrollerinden oluşan optimizasyon problemleri genellikle doğrusal ve konveks yapıda değildir. Bu tip problemler için SQP (Sıralı kuadratik programlama), pattern search, genetik algoritmalar gibi çözüm algoritmaları kullanılmaktadır (Pardalos ve Resende, 2002).

Eniyileme algoritması, tahmin ufku içinde amaç fonksiyonunu enküçük yapan kontrol matrisini araştırırken, çözüm uzayı üzerinde birçok yerel noktadan geçer. Sıralı kuadratik programlama, kullandığı algoritma gereği, çözüm uzayında girilen başlangıç kontrol matrisinin bulunduğu noktadan, amaç fonksiyonunu enküçükleyen kontrol matrisini araştırmaya başlar. Bazen algoritma yerel enküçük noktalara takılarak başlangıç değerlerine göre farklı çözümler üretebilir. Bu problemi aşmak

için literatürde birden fazla farklı başlangıç değerleriyle eniyileme yapılmaktadır. *fmincon* yerleşik fonksiyonu içindeki algoritmalar hız sınırı hesaplamalarında daha yavaş olması ve yerel enküçük noktalar problemi nedeniyle bu çalışmada *pattersearch* fonksiyonu eniyileme algoritması olarak seçilmiştir. Bu fonksiyonda kullanılan algoritma desen (pattern) adı verilen farklı deneme kümeleri üzerinde ardışık denemeler yapar. Desenin herhangi bir noktasında eğer amaç fonksiyonu bir önceki denemeden daha küçük değer alıyorsa, desen bir katsayı ile çarpılarak büyütülür, aksi durumda küçültülerek ardışık denemeye devam edilir. Algoritma seçilen desen büyüklüğüne göre ardışık deneme sayısına eriştiğinde durur. Algoritma ardışık deneme sayısından önce aşağıdaki nedenlerden dolayı da durabilir. Bunlar;

1-) Eğer amaç fonksiyonu değeri ardışık denemeler sonucunda (0,01)'den fazla değişmiyorsa

2-) Hız sınırları matrisindeki ardışık deneme adımlarındaki değişimler (0,1)'den küçük olmaya başladığında

3-) Amaç fonksiyonunun hesaplama sayısını tutan sayaç, belirlenen sayıya ulaştığında (6000)

5.3.4 Kontrol eylemleri için kısıtlar

Kontrol değerleri kontrol ufku N_c için hesaplanmaktadır. Kontrol ufku N_c tahmin ufku N_p 'den küçük seçilir ve bir sonraki kontrol adımı $k_c + 1$ de bütün eniyileme süreci tekrarlanmaktadır. N_p ve N_c'nin seçimi MTÖK başarımını doğrudan etkiler. Ancak seçim için kesin bir kural da yoktur. Diğer yandan N_p nin büyük bir değer seçilmesi, eniyileme sürecini uzatırken hesaplanan kontrol değerini gereğinden fazla saptırabilir ve bir sonraki kontrol ile arasında istenmeyen bir sapmanın oluşmasına neden olabilir. Küçük olması ise, sistemin gelecek ufkundaki sapmalarını göz ardı edeceğinden, uygun kontrol değerlerinin bulunmasına engel olabilir. $N_c < N_p$ koşuluna göre N_c'nin büyük alınması da eniyileme zamanını olumsuz etkiler. Bu çalışmada $N_p = 10$ adım ve $N_c = 5$ adım olarak alınmıştır. Örnekleme zaman aralığı $T_{ö}=1$ dakika seçildiğinden, tahmin ufku 10 dakika, kontrol ufku ise 5 dakika olmaktadır. Eşitlik (5.2) ve (5.3)'deki kısıtlara bu değerler yerleştirilirse, çalışmada kullanılan kısıtlar aşağıdaki gibi olur.

$$50\ \text{km/sa} \leq vctrl(j) \leq 100\ \text{km/sa} \quad \forall j \epsilon [k_c,\ k_c + 5 - 1] \tag{5.9}$$

$$vctrl(j) = vctrl(k_c + 5 - 1) \quad \forall j \epsilon [\mathrm{k_c} + 5 - 1, \mathrm{k_c} + 10 - 1] \tag{5.10}$$

5.3.5 (k_c+1) anında, kontrol matrisi hesabı için alınacak durum değişkenleri

Trafik akımı süreci için kontrol yapılırken, uygulanan eylemlerin sürece etki etmesi için belirli bir zaman gerekmektedir. Bu nedenle, örnekleme zaman aralığı bir dakika seçilmesine karşın, tahmin ufku 5 dakika kaydırılmaktadır. Yani bir sonraki k_c adımı bir öncekinden 5 dakika sonra gerçekleşmektedir. Bu durumda yeni *(k_c+1)* adımındaki durum değişkenleri (yoğunluk, hız ve akım), kontrol eylemi uygulandıktan 5 dakika sonra çalışma bölgesinden alınmaktadır.

6. UYGULAMA

5.Bölümde MTÖK yöntemi açıklanmış ve MTÖK yöntemi ile DHS kontrol uygulamasının gerçekleştirilmesi anlatılmıştı. Şekil 6.1'de görülen çalışma bölgesinin trafik koşullarını dikkate alan, iki farklı amaç fonksiyonu belirlenmişti. Bu bölümde, 5.Bölümde anlatılan MTÖK yöntemi ile birlikte farklı kontrol stratejileri geliştirilmiş ve Şekil 6.1'de görülen çalışma bölgesine uygulanmıştır. Kontrol uygulamalarının etkileri simülasyon ortamında sınanmış ve mevcut durumla karşılaştırılmıştır.



Şekil 6.1 : Çalışma bölgesi.

6.1 Geliştirilen Kontrol Uygulamaları

Geliştirilen ve uygulanan kontrol uygulamaları Çizelge 6.1'de listelenmiştir. Çizelge 6.1'de, R otoyol katılımlarını, M MTÖK yöntemini ifade etmektedir. R00M00, katılımlara ve anayola DHS uygulanmamış mevcut durumu temsil etmektedir. R22M00 otoyol katılımlarına (Beşiktaş, Balmumcu) 20km/sa sabit hız sınırı uygulandığını, R02M00 Beşiktaş katılımına 20 km/sa sabit hız sınırı uygulandığını belirtmektedir. A01M00, Beşiktaş katılımına ALINEA katılım kontrolü uygulandığını, R00M11, MTÖK kontrol uygulamasının Eşitlik (5.6)'da belirtilen amaç fonksiyonuna göre anayola gerçekleştirildiğini belirtmektedir. R00M21, Eşitlik (5.8)'de belirtilen amaç fonksiyonuna göre anayola MTÖK uygulaması yapıldığını göstermektedir. R00M21 uygulamasında katılımlara hız kontrolü yapılmamıştır. RXXM11 anayola Eşitlik (5.6)'da tanımlanan amaç fonksiyonuna göre MTÖK yöntemi ile DHS uygulandığını ve katılımlara hız kontrolü yapıldığını gösterirken, RXXM21 anayola Eşitlik (5.8)'de belirtilen amaç fonksiyonuna göre MTÖK

yöntemi ile DHS uygulandığını, ek olarak katılımlara da hız kontrolü yapıldığını ifade etmektedir.

Çizelge 6.1 : Kontrol uygulamaları.

Uygulama Adı	Katılım Hız Sınırlaması	MTÖK
R00M00 Mevcut Durum	Hayır	Hayır
R22M00 Uygulama 1	Evet,Sabit Balmumcu=20 km/sa Beşiktaş=20 km/sa	Hayır
R02M00 Uygulama 2	Evet,Sabit Balmumcu=Hayır Beşiktaş=20 km/sa	Hayır
A01M00 Uygulama 3	Katılım kontrolü=ALINEA Balmumcu=Hayır Beşiktaş=ALINEA	Hayır
R00M11 Uygulama 4	Hayır	Evet, Eşitlik (5.6)
R00M21 Uygulama 5	Hayır	Evet, Eşitlik (5.8)
RXXM11 Uygulama 6	Evet, Değişken	Evet, Eşitlik (5.6)
RXXM21 Uygulama 7	Evet, Değişken	Evet, Eşitlik (5.8)

R22M00 katılımlara sabit hız sınırı uygulanmaktadır. Bu kontrolde, anaakıma herhangi bir kontrol uygulanmamış, ancak katılımlara 10-70 km/sa arasında sabit hız sınırları uygulanmıştır. Örneğin simülasyon boyunca Balmumcu katılımına 10 km/sa hız sınırı uygulanırken, Beşiktaş katılımına 20 km/sa sabit hız sınırı uygulanmıştır. Bu şekilde katılımlara ait 49 adet hız sınırı senaryosu çalıştırılmıştır. Simülasyon sonunda Beşiktaş ve Balmumcu katılımları için uygulanan 20 km/sa sabit hız sınırında anaakım ve katılımlarda en az kuyruklanma görülmüştür. Katılımlara hız sınırının uygulanması düşüncesi taşıtların katılımdan anayola daha düşük hızla girmeleri amaçlamaktadır. Bu şekilde katılımlardan anaakıma giren taşıtlar sınırlanarak, anayola girişte yığılmaların azalması beklenmektedir. Yığılmaların azalması beraber olası tıkanma, şok dalgası oluşumu ve kuyruklanmaların önlenmesi ya da geciktirilmesi beklenmektedir. Bu kontrol ile anaakımdaki değişimi gözlemek ve MTÖK'ün başarımı daha açık sınamak mümkün olacaktır.

R02M00 ile Beşiktaş katılımına 20 km/sa sabit hız sınırı uygulanırken, Balmumcu katılımına herhangi bir hız sınırı uygulanmamaktadır. Balmumcu katılımının uzunluğu kısadır ve talep Beşiktaş katılımına göre daha azdır. Bu uygulamayla, hız sınırlaması uygulanmamış Balmumcu katılımının çalışma bölgesinde trafik akım değişkenlerine olan etkisi sınanmış olacaktır.

A01M00 ile Beşiktaş katılımına ALINEA kontrol algoritması uygulanmaktadır. ALINEA algoritmasında düzeltme katsayısı (K_r) 70 taşıt/sa seçilmiştir. Hedeflenen işgal (O) %20 seçilmiş ve işgal değerleri Bağ-5 ile katılımın birleştiği noktadan 40 m akım aşağı kesime CORSIM'de yerleştirilen dedektörlerden alınmıştır. Bu uygulama ile katılımlara sabit hız sınırı uygulanan R22M00 ve R02M00 uygulamalarının etkileri karşılaştırılmıştır.

R00M11 kontrol uygulamasında 5.Bölümde yer verilen MTÖK yönteminden yararlanılmıştır. Bu uygulamada, bağlarda ve kuyrukta bekleyen taşıtların yolculuk sürelerini enküçükleyen amaç fonksiyonu olarak Eşitlik (5.6) kullanılmıştır. Uygulama katılımlardan gelen akımlara herhangi bir kısıtlama getirmemektedir.

R00M21 kontrol uygulamasının R00M11'den farkı, kullandığı amaç fonksiyonudur. Bağlar ve kuyruktaki toplam yolculuk süresini enküçüklemek yerine, bağlar arasındaki yoğunluk farkını en küçükleyen amaç fonksiyonu (Eşitlik (5.8)) kullanılmıştır.

RXXM11 kontrol uygulamasında MTÖK yöntemi kullanılarak kestirilen DHS değerleri anaakıma ve katılımlara uygulanmaktadır. Literatürdeki birçok çalışmada (Hegyi, 2004; Zhang, 2005) anayol üzerinde sanal talepler yaratılarak DHS uygulaması gerçekleştirilmiştir. Katılımın yoğun olduğu kesimlerde katılım kontrolü MTÖK algoritmasının içine yerleştirilmiş ve eniyileme sürecine dahil edilmiştir. Bu çalışmada literatürden farklı olarak yüksek yoğunluklu Balmumcu ve Beşiktaş katılımları için trafiğin zirve saatinde hız sınırları uygulanmıştır. MTÖK uygulamasında kullanılan tahmin modeli METANET içinde eniyileme süreci sonunda Eşitlik (4.22)'den elde edilen akım değeri (q_{on}) ile, katılımlara yerleştirilen dedektörlerden elde edilen yoğunluk değerleri (ρ_r) kullanılarak, katılımlar için hız sınırlarına dönüştürülür ($v_{kont,r}$). Buna göre aşağıdaki katılım hızları her (k_c) adımında aşağıdaki eşitlikle hesaplanır ve anayola uygulanan DHS değerleri ile aynı anda katılımlara uygulanır.

$$v_{kont,\mathrm{r,m,i}}(k_c) = \begin{cases} 10\ \mathrm{kmsa}^{-1}, & \dfrac{q_{on,m,i}(\mathrm{k_c})}{\lambda_{\mathrm{m,r}}\,\rho(\mathrm{k_c})} \le 10\ \mathrm{kmsa}^{-1} \\ 20\ \mathrm{kmsa}^{-1}, & \mathrm{w_{m,r}} \ge 250\ \text{taşıt}, \quad \dfrac{\mathrm{q_{on,m,i}(k_c)}}{\lambda_{\mathrm{m,r}}\rho(\mathrm{k_c})} \le 10\mathrm{kmsa}^{-1} \\ \dfrac{q_{on,m,i}(\mathrm{k_c})}{\lambda_{\mathrm{m,r}}\,\rho(\mathrm{k_c})}, & \dfrac{q_{on,m,i}(\mathrm{k_c})}{\lambda_{\mathrm{m,r}}\,\rho(\mathrm{k_c})} > 10\ kmsa^{-1} \end{cases} \quad \textbf{(6.1)}$$

Eşitlik (6.1)'deki $(\lambda_{m,r})$ katılımın şerit sayısı, $\rho_{\mathrm{r}}(\mathrm{k})$ kontrolün uygulanacağı $(\mathrm{k_c})$ adımında dedektörden elde edilen yoğunluk verisi, $\mathrm{w_{m,r}}$ katılımlardaki kuyruk uzunluğudur.

RXXM21 kontrol uygulamasının RXXM11'den farkı, bağlarda ve kuyrukta yolculuk süresini enküçükleyen amaç fonksiyonu Eşitlik (5.6) yerine bağlar arasındaki yoğunluk farkını enküçükleyen amaç fonksiyonu Eşitlik (5.8) 'in yer almış olmasıdır.

6.1 DHS Uygulaması

Geliştirilen kontrol senaryoları içinde yer alan MTÖK yöntemi ile DHS'nın belirlenmesinde birçok araç ve yöntem kullanılmıştır. Bu araç ve yöntemlerin işleyiş sırası aşağıda sırayla açıklanmıştır.

6.1.1 Süreç modeli olarak CORSIM

Kontrol eylemlerini uygulamak ve sonuçlarını sınamak için CORSIM simülasyon yazılımından yararlanılmıştır. Bunun için CORSIM içinde bulunan kontrol araçlarına erişim sağlanmıştır. Kontrol araçlarına erişim RTE arabirimi yardımıyla gerçekleştirilmiş bu amaçla kontrol uygulaması için VC++ dilinde CORSIM için arabirim yazılmıştır. CORSIM çalıştırıldığında, 5.dakikada RTE arabirimi, bağların sonundaki dedektörlerden aldığı son bir dakikaya ait ortalama yoğunluk, hız ve akım verilerini MATLAB'a göndermektedir. CORSIM, MATLAB'in kontrol hızlarını (*vctr*) hesaplamasını beklemektedir. Aynı anda RTE arabirim içinde başka bir işlev CORSIM'in ürettiği tüm dedektör ve bağ verilerini veritabanına yazmaktadır.

6.1.2 Tahmin modeli METANET ve enuygun DHS değerlerinin hesabı

RTE, MATLAB'e trafik akım durum değişkenlerini gönderdikten sonra daha önce MATLAB ortamında yazılmış olan 'mpc_init.m' betiği (Ek.D) RTE içinden çalıştırır.

Betiğin görevi, kontrol için MATLAB ortamında kodlanmış olan *metanet2* modelini kullanarak en uygun DHS değerlerini hesaplamaktır. Betik bu işlemi *patternsearch* fonksiyonunu kullanarak yapar. Betik enuygun (amaç fonksiyonu enküçükleyen) kontrol matrisini (*vctrl*) bulmak için her k_c adımında başlangıç değerlerini rastgele üreterek eniyileme sürecini başlatır.

6.1.3 Kontrol eyleminin uygulanması

Betik ('mpc_init.m) çalışmasını bitirmeden önce MTÖK yöntemi gereği kontrol matrisinin (64.satırda *xx* matrisi) sadece ilk satırı (1x6) alarak *csv* dosyası olarak yazılır. Aynı zamanda hesaplanan Balmumcu ve Beşiktaş katılımlarına ait akım vektörleri de (q_{on}) *csv* dosyası olarak yazılır ve betik sonlanır.

Betik sonlandığında RTE modülü, hesaplanmış olan kontrol değişkenleri vektörlerini dosyadan okur ve bunları Çizelge 6.2'deki hız aralıklarına göre tamsayı hız sınırlarına çevirerek DHS sinyali olarak CORSIM'de ilgili bağlara uygular. Bir sonraki kontrol eylemi 5 dakika sonra gerçekleşecektir ve bu beş dakika boyunca kontrol hızları değişmeden kalacaktır. Eğer katılımlara hız sınırı uygulanacaksa, q_{on} vektöründeki akım değerleri, katılımlara yerleştirilen dedektörlerden alınan yoğunluk verileri kullanılarak katılımlar için hız sınırları Eşitlik (6.1)'e göre türetilir (*mpc_init.m* ,satır 62 ve 63) ve katılımlara uygulanır.

Çizelge 6.2 : DHS değerleri.

Hesaplanan Kontrol Değişkeni (km/sa)	50-55	55-65	65-75	75-85	85-95	95-
Atanan DHS (km/sa)	50	60	70	80	90	100

Eniyileme işlemi sırasıda kontrol hızları için aşağıdaki kısıt kullanılmıştır.

$$50 \text{ km/sa} \leq v_{kont,\text{m,i}} \leq 100 \text{ km/sa} \qquad \textbf{(6.2)}$$

6.2 Uygulama Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Kontrollerin çalışma bölgesinde yarattığı etkilerin değerlendirilmesi için çizelge ve grafikler oluşturulmuştur. Değerlendirmede dikkate alınan başlıca başarım ölçütleri ortalama hız, ortalama yolculuk süreleri, kuyruklanma ve çalışma bölgesinin arzıdır. Grafiklerde karşılaştırma için mevcut durum da çizilmiştir. Çizelge ve grafiklerin oluşturulması için gereken veriler CORSIM'den alınmıştır. Kullanılan CORSIM RTE arabiriminin içinde bulunan bir fonksiyon ile çalışma bölgesindeki bağlardan dedektör ve bağ verileri her on saniyede bir veritabanına kayıt edilmektedir. Simülasyon süresi 120 dakika seçilmiştir. Talep değerleri için Çizelge 3.4'de yer alan düzeltilmiş akım değerleri kullanılmıştır. En son 13.periyottan sonra akım değerleri aynı alınmıştır. Simülasyon sonunda elde edilen veriler çizelge ve grafiklere dönüştürülmüştür. Kullanılan grafik ve çizelgeler aşağıda açıklanmıştır.

-Hız deseni grafiği: Bağlardaki hızın zamana göre değişimini göstermektedir. Şok dalgaları bu grafikten kolaylıkla gözlenebilmektedir. Hız değerleri gri renk ölçeğinde gösterilmiştir. Koyu değerler düşük hızları, açık renkler ise yüksek hızları temsil etmektedir.

-Yoğunluk deseni grafiği: Bağlardaki yoğunluk değerlerinin zamana göre değişimini göstermektedir. Yoğunluk değerleri bağ verilerinden türetilmiştir. Bu grafikte, açık renkler düşük yoğunlukları, koyu renkler ise yüksek yoğunlukları temsil etmektedir.

-DHS deseni grafiği: Bağlar için MTÖK yöntemi ile hesaplanan hız sınırlarını (DHS) göstermektedir. Renk skalasının koyulaşması ilgili bağa düşük hız sınır değerinin uygulandığını göstermektedir.

-Arz-talep grafiği: Çalışma bölgesinden geçmek isteyen toplam trafik (katılımlar dahil) talebine karşılık, Bağ-6 dan geçen akımları göstermektedir.

-Ortalama hız Çizelgesi: Şok dalgası oluşmadan önce ve oluştuktan sonra bağlardaki ortalama hız değişimlerini ve standart sapmaları göstermektedir. Ayrıca çizelgenin son kolonunda anakım ortalama hız ve standart sapmanın mevcut duruma göre değişimi yüzde (%) olarak gösterilmiştir.

-Ortalama yolculuk süresi çizelgesi: Şok dalgası ya da tıkanıklık oluştuktan sonra ve önceki zaman dilimlerinde, her bir bağ için bağdaki taşıt başına düşen ortalama yolculuk süresini göstermektedir. Çizelgenin oluşturulması için 10 saniye aralıkla

ilgili bağdan çıkan taşıtların harcadığı toplam yolculuk süresi, her 10 saniye aralıkla bağlardan çıkan taşıt sayıları vektörüne bölünmektedir. Çizelgenin en son kolonunda, anakım ortalamasının mevcut duruma göre değişimi yüzde (%) olarak gösterilmiştir.

-Kuyruklanma grafiği: Anaakım ve katılımlardaki sanal bağlar üzerinde çalışma bölgesine girmek için bekleyen taşıt sayılarını gösteren grafiktir.

6.2.1 Mevcut durum (R00M00)

R00M00 mevcut ağın durumunu göstermektedir. Mevcut durum incelendiğinde, Şekil 6.2'de çalışma bölgesi üzerinde 35. dakikada Bağ-6'da başlayan ve akım yukarı doğru yayılan şok dalgası görülmektedir. Şekil 6.2'deki hız değişimine göre Çizelge 6.3 oluşturulmuştur. Çizelgede bağlardaki ortalama hız ve standart sapmalar, şok dalgasından önce, sonra ve toplam simülasyon süresi için gösterilmiştir. Şok dalgası oluştuktan sonra Bağ-1, Bağ-2, Bağ-3 ve Bağ-4'deki ortalama hızların standart sapması yükselmiştir. Bağ-5 ve Bağ-6'da ortalama hızların standart sapması ise düşmüştür. Tüm çalışma bölgesi dikkate alındığında, şok dalgasından sonra standart sapmanın yükseldiği gözlenmektedir.

Çizelge 6.4'de şok dalgası öncesi ve sonrası bağlarda ortalama yolculuk süreleri görülmektedir. Buna göre şok dalgası oluşmadan önce ortalama olarak bir taşıtın çalışma bölgesinde yolculuk süresi 102,41 saniye iken şok dalgası oluştuktan sonra 365,55 saniyeye yükselmiştir. Yolculuk süresindeki en fazla artış Bağ-3 ve Bağ-4'de olmuştur. Beşiktaş katılımı nedeniyle Bağ-5'te artan yoğunluk, taşıtların Bağ-4'ten Bağ-5'e girişlerini zorlamakta (şişeboynu etkisi), bu nedenle de taşıtların Bağ-4 üzerinde daha fazla beklemesine neden olmaktadır.

Çizelge 6.3 : R00M00, şok dalgası önce ve sonrası ortalama hızlar.

S.S. (dak)	(km/sa)	Bağ-1	Bağ-2	Bağ-3	Bağ-4	Bağ-5	Bağ-6	Toplam	D(%)
0-35	Ortalama	101,54	100,54	98,67	97,04	77,23	89,48	94,08	0,00
	St.Sapma	2,21	2,18	3,45	2,90	10,01	15,28	11,52	0,00
35-120	Ortalama	49,44	38,30	32,48	25,09	35,29	39,90	36,75	0,00
	St.Sapma	38,72	35,06	30,54	18,38	6,98	4,45	27,07	0,00
0-120	Ortalama	64,68	56,51	51,84	46,13	47,56	54,40	53,52	0,00
	St.Sapma	40,30	40,90	39,63	36,23	20,68	24,31	35,18	0,00

A.O.:Anaakım Ortalaması **S.S. :**Simulasyon Süresi **D**:Mevcut Duruma Göre Değişim

Çizelge 6.4 : R00M00, şok dalgası öncesi ve sonrası ortalama yolculuk süreleri.

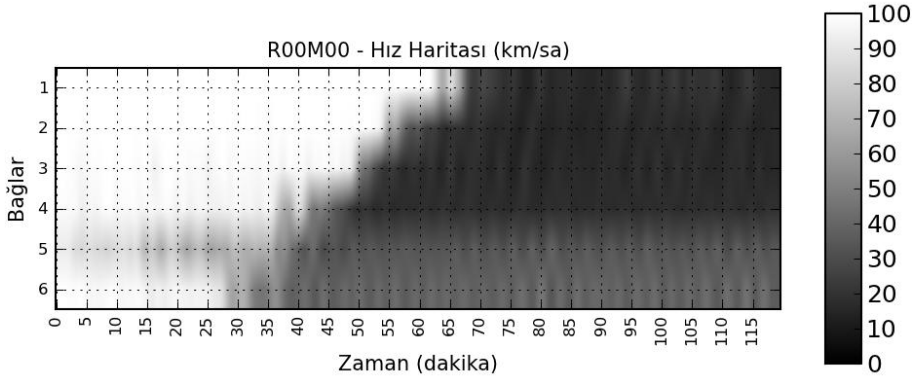
S.S. (dak)	(Saniye)	Bağ-1	Bağ-2	Bağ-3	Bağ-4	Bağ-5	Bağ-6	Toplam	D(%)
0-35	Ortalama	9,78	19,24	10,49	25,70	24,27	12,92	102,41	0,00
	St.Sapma	1,95	6,17	2,63	9,83	5,08	3,80	12,47	0,00
35-120	Ortalama	36,11	84,92	49,03	115,43	52,62	27,44	365,55	0,00
	St.Sapma	22,11	43,09	20,95	34,15	7,26	2,80	108,21	0,00
0-120	Ortalama	28,41	65,71	37,76	89,18	44,33	23,19	288,59	0,00
	St.Sapma	22,14	47,09	24,90	50,20	14,53	7,30	150,53	0,00

A.O.:Anaakım Ortalaması **S.S. :**Simulasyon Süresi **D**:Mevcut Duruma Göre Değişim

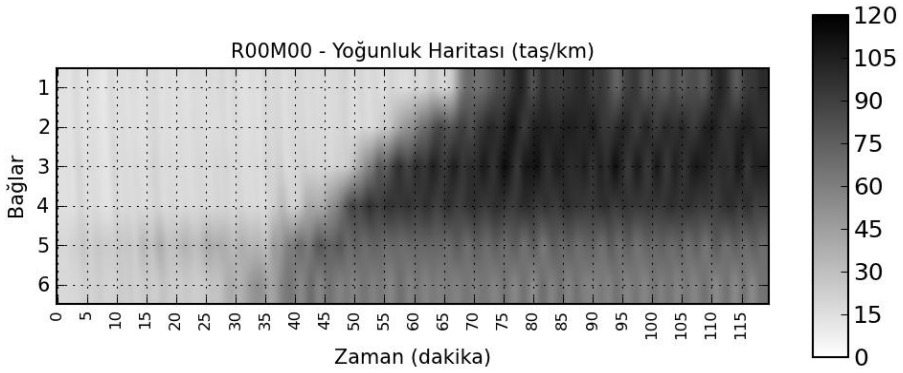
Yoğunluk deseni grafiğinde (Şekil 6.3) şok dalgası oluşumu görülmektedir. Şekil 6.3'de, Beşiktaş katılımının bulunduğu Bağ-4 ve Bağ- 5 de tüm simülasyon süresi (0-120 dak) boyunca görülen yoğunluk değişimi dikkat çekmektedir. 50.dakika'da Bağ-4'ten başlayan ve akım yukarı doğru yayılan koyu alan görülmektedir. Beşiktaş katılımı iki şeritlidir ve yüksek taleplere sahiptir. Bu durum Bağ-4 ve Bağ-5'de yoğunlukların yükselmesine neden olmaktadır.

Şekil 6.4'de toplam talebe karşılık Bağ-6'dan çıkan akım görülmektedir. 30.dakikada talep ile Bağ-6'dan çıkan akım ayrılmaya başlamıştır. Talep değeri 120.dakikada 8362 iken Bağ-6'dan çıkan akım 7560'dır. Simülasyon sonunda Bağ-6'dan çıkan toplam taşıt sayısı 14.076 dır.

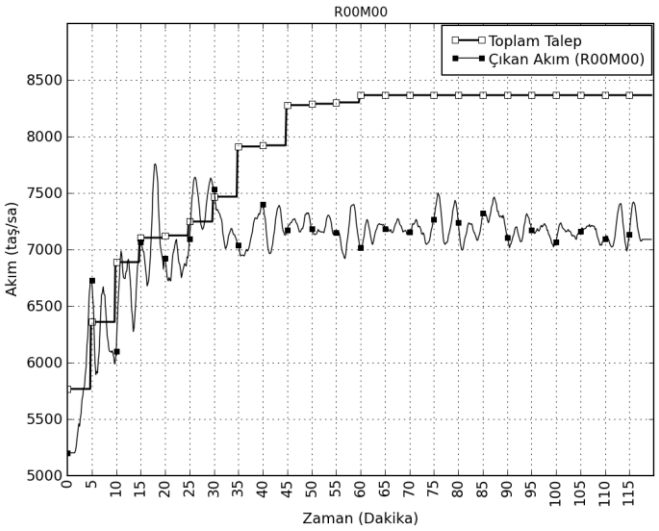
Şekil 6.5 mevcut durumda kuyruklanma grafiği görülmektedir. Buna göre 120 dak.'da görülen kuyruk değerleri O1 otoyolunda 400 taşıt, Balmumcu katılımında 500 taşıt ve Beşiktaş katılımında 150 taşıt olmak üzere toplamda 1050 taşıttır.



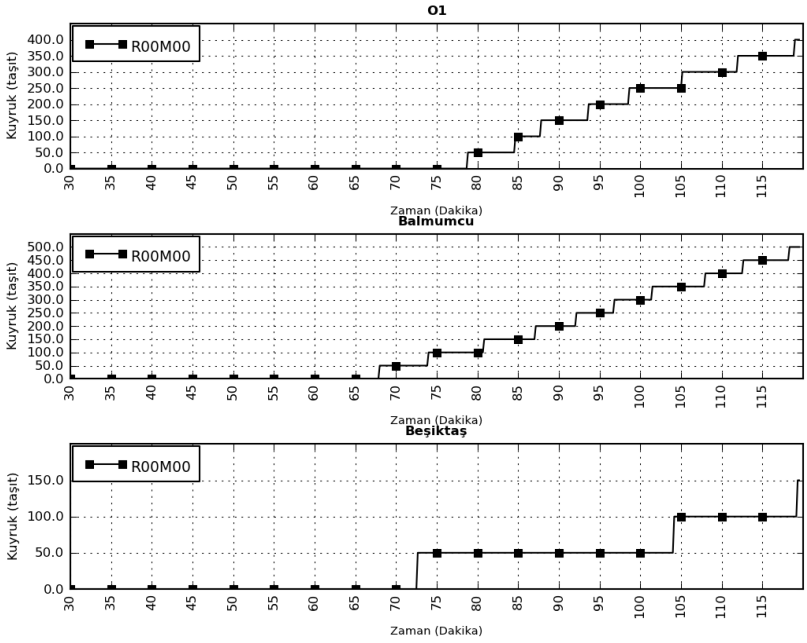
Şekil 6.2 : R00M00 hız deseni grafiği.



Şekil 6.3 : R00M00 yoğunluk deseni grafiği.



Şekil 6.4 : R00M00 arz-talep grafiği.



Şekil 6.5 : R00M00 kuyruklanma grafiği.

6.2.2 Uygulama 1 (R22M00)

Yukarıda, Beşiktaş katılımının akım üzerindeki bozucu etkisinden bahsedilmişti. Buna göre Balmumcu ve Beşiktaş katılımlarına uygulanan 20 km/sa sabit hız sınırı (R22M00) sonucu çalışma kesiminde oluşan hız deseni grafiği Şekil 6.6'da görülmektedir. Buradan R22M00 kontrol uygulamasının şok dalgası gelişimini engelleyemediği ancak 40.dakika'ya ötelediği görülmektedir. Çizelge 6.5'de şok dalgası öncesi mevcut duruma göre ortalama hızlarda değişiklik olmadığı, ancak standart sapmanın %10,24 oranında azaldığı görülmektedir. Şok dalgası sonrası ise anaakım ortalama hızı %3,81 oranında artmış, standart sapmada bir değişiklik olmamıştır. Tüm simülasyon süresi dikkate alındığında mevcut duruma göre ortalama hızın %1,5 arttığı, buna karşılık standart sapmanın %2,13 oranında düştüğü gözlenmektedir. Şok dalgası öncesi ortalama yolculuk süresinde %1,62 lik artış, bu süreye karşılık gelen ortalama yolculuk süresi standart sapmasında da %20,29 luk artış olmuştur. Şok dalgası sonrası mevcut duruma göre yolculuk süresi %4,52 azalmış, aynı zamanda standart sapması da %1,20 oranında azalmıştır. Tüm simulasyon süresi için ortalama yolculuk süresi %3,88, standart sapma ise %4,72 oranında azalmıştır.

Kuyruklanma grafiği'nde (Şekil 6.9) O1 otoyolu ve Balmumcu'da kuyruklanma geç başlamış, O1 kuyruklanması 400 taşıttan 350 taşıta düşmüş ve Balmumcu kuyruklanması ise 500 taşıttan 400 taşıta düşmüştür. Buna karşılık Beşiktaş katılımında kuyruklanma 150 taşıttan 300 taşıta çıkmıştır. Uygulama sonunda, anaakım ve katılımlarda toplam kuyruklanma 1050 taşıt olmuştur. Uygulama 120 dakika sonunda kesitten toplam 13.991 taşıt geçirmiştir.

Çizelge 6.5 : R22M00, şok dalgası önce ve sonrası ortalama hızlar.

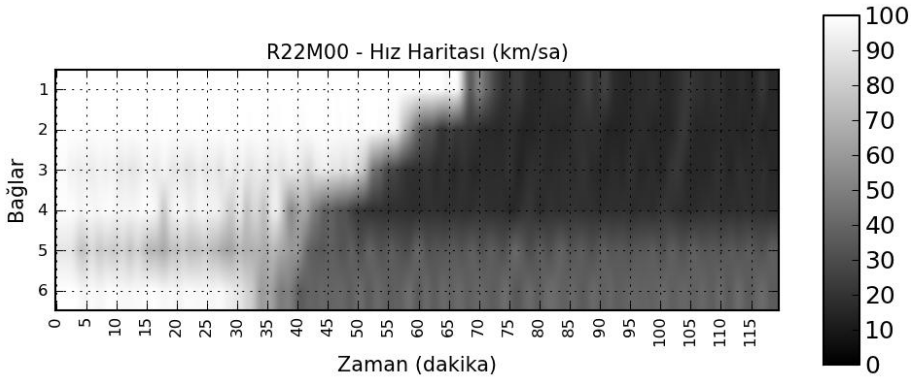
S.S. (dak)	(km/sa)	Bağ-1	Bağ-2	Bağ-3	Bağ-4	Bağ-5	Bağ-6	Toplam	D(%)
0-35	Ortalama	101,7	100,46	92,99	93,78	76,34	95,12	93,4	-0,72
	St.Sapma	2,26	2,28	4,67	7,85	8,25	8,2	10,34	-10,24
35-120	Ortalama	51,99	40,99	33,3	25,29	37,31	40,02	38,15	3,81
	St.Sapma	39,25	36,14	28,7	16,58	8,41	4,83	27,18	0,41
0-120	Ortalama	66,53	58,38	50,75	45,32	48,73	56,14	54,31	1,48
	St.Sapma	40,03	40,71	36,42	34,4	19,63	25,77	34,43	-2,13

A.O.:Anaakım Ortalaması **S.S. :**Simulasyon Süresi **D**:Mevcut Duruma Göre Değişim

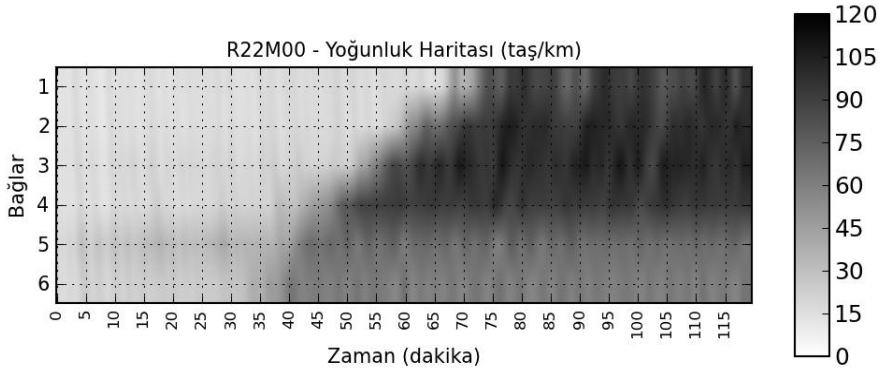
Çizelge 6.6 : R22M00, şok dalgası öncesi ve sonrası ortalama yolculuk süreleri.

S.S. (dak)	(Saniye)	Bağ-1	Bağ-2	Bağ-3	Bağ-4	Bağ-5	Bağ-6	Toplam	D(%)
0-35	Ortalama	9,74	19,62	11,25	27,22	24,41	11,83	104,07	1,62
	St.Sapma	1,89	8,48	3,62	12,15	4,81	2,84	15,00	20,29
35-120	Ortalama	34,50	80,70	46,22	110,11	50,13	27,38	349,04	-4,52
	St.Sapma	21,86	42,93	19,88	31,20	7,73	2,85	106,91	-1,20
0-120	Ortalama	27,26	62,84	35,99	85,87	42,61	22,83	277,39	-3,88
	St.Sapma	21,58	45,79	23,16	46,40	13,63	7,63	143,42	-4,72

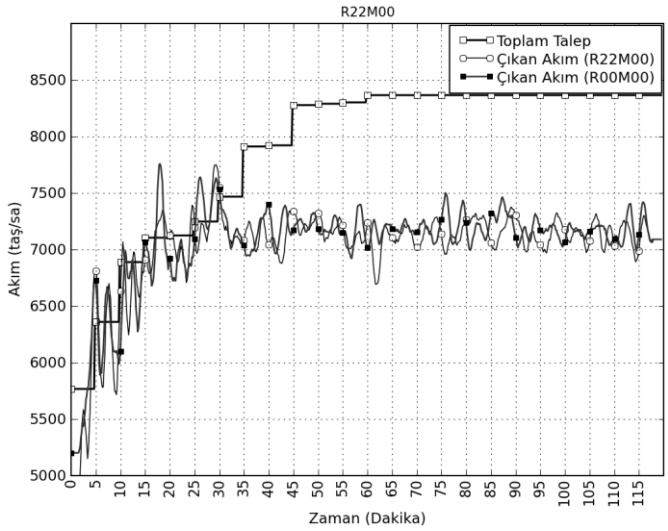
A.O.:Anaakım Ortalaması **S.S. :**Simulasyon Süresi **D**:Mevcut Duruma Göre Değişim



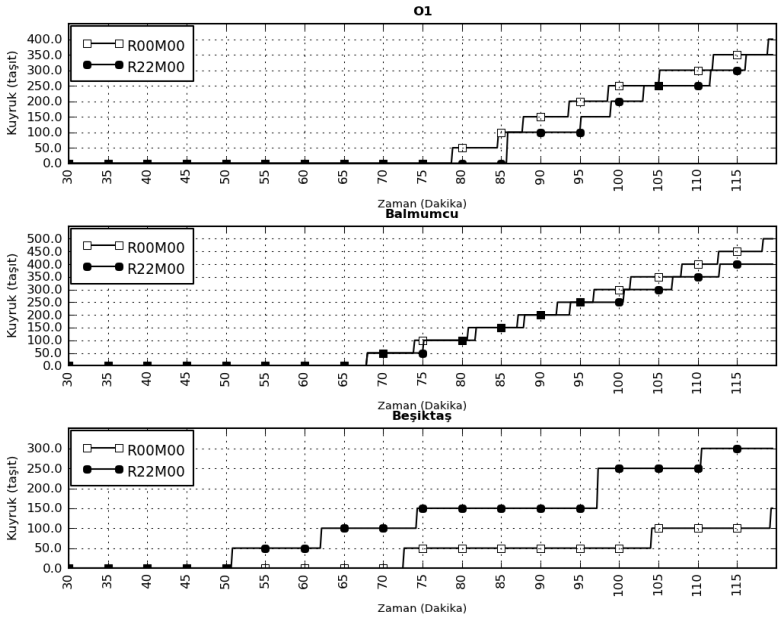
Şekil 6.6 : R22M00 hız deseni grafiği.



Şekil 6.7 : R22M00 yoğunluk deseni grafiği.



Şekil 6.8 : R22M00 arz-talep grafiği.



Şekil 6.9 : R22M00 kuyruklanmaları.

6.2.3 Uygulama 2 (R02M00)

R02M00 ile sadece Beşiktaş katılımına sabit 20 km/sa hız sınırı uygulanmıştır. Mevcut duruma göre ortalama hızlarda şok dalgası sonrası %7 artış, toplam simülasyon süresinde ise %3,18 artış gerçekleşmiştir (Çizelge 6.7). Ortalama hızın standart sapması şok dalgası öncesi %6,5 azalmış, şok dalgası sonrası ise %4 artmış, toplam simülasyon süresi sonunda %1,22 azalmıştır**.** Mevcut duruma göre ortalama yolculuk süreleri de şok dalgası sonrası %5,72 ve tüm simülasyon süresi boyunca da %5,06 oranında azalmıştır (Çizelge 6.8). Hız deseni grafiğinde (Şekil 6.10)

görüldüğü üzere şok dalgası Bağ-6'üzerinde 40.dakikaya ötelenmiştir. Şekil 6.12'de Arz-Talep grafiğinde mevcut durumla arasında çarpıcı bir değişim gözlenmemiştir. Şekil 6.13'de mevcut duruma göre anayolda (O1) ve Balmumcu katılımında kuyruklanmaların azaldığı görülmektedir. Uygulama 120 dakikanın sonunda toplam 1000 taşıtı kuyruk olarak anakım ve katılımlarda bekletmektedir. 50.dakikada Bağ-4'ten başlayan ve Bağ-3, Bağ-2 ve Bağ-1'e doğru yayılan koyu bölge görülmektedir. Uygulama 120 dak. simulasyon süresi sonunda toplam 14.070 taşıtı çalışma bölgesinden geçirmiştir. Bu uygulamada yolculuk süresinde azalma ve ortalama hızda artış R22M00'a göre daha fazladır. Ayrıca katılımlarda kuyruklanmalar R22M00'a göre daha geç başlamıştır.

Çizelge 6.7 : R02M00, şok dalgası önce ve sonrası ortalama hızlar.

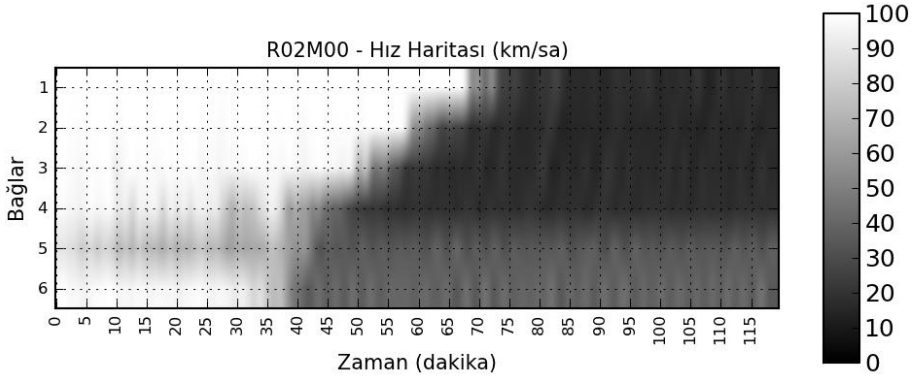
S.S. (dak)	(km/sa)	Bağ-1	Bağ-2	Bağ-3	Bağ-4	Bağ-5	Bağ-6	Toplam	D(%)
0-35	Ortalama	101,51	100,36	98,52	91,03	74,71	96,23	93,73	-0,37
	St.Sapma	2,22	2,21	3,24	8,94	8,69	4,09	10,77	-6,51
35-120	Ortalama	53,39	42,42	35,11	26,03	37,62	41,22	39,30	6,94
	St.Sapma	39,65	36,75	31,05	17,60	9,23	8,18	28,16	4,03
0-120	Ortalama	67,46	59,37	53,65	45,04	48,47	57,31	55,22	3,18
	St.Sapma	39,91	40,64	38,95	33,42	19,16	26,05	34,76	-1,19

A.O.:Anaakım Ortalaması **S.S. :**Simulasyon Süresi **D**:Mevcut Duruma Göre Değişim

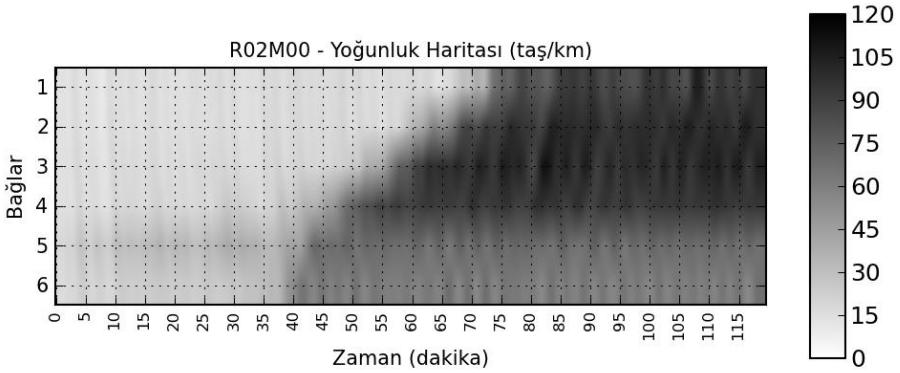
Çizelge 6.8 : R02M00, şok dalgası önce ve sonrası ortalama yolculuk süreleri.

S.S. (dak)	(Saniye)	Bağ-1	Bağ-2	Bağ-3	Bağ-4	Bağ-5	Bağ-6	Toplam	D(%)
0-35	Ortalama	9,75	19,31	10,50	27,19	24,86	11,48	103,10	0,67
	St.Sapma	1,87	6,53	2,70	10,27	4,65	1,82	11,85	-4,97
35-120	Ortalama	33,96	79,13	45,42	109,13	50,04	26,96	344,63	-5,72
	St.Sapma	22,10	43,61	20,43	32,89	8,00	3,65	111,05	2,62
0-120	Ortalama	26,88	61,64	35,20	85,16	42,67	22,43	273,99	-5,06
	St.Sapma	21,63	45,81	23,45	46,75	13,52	7,75	144,36	-4,10

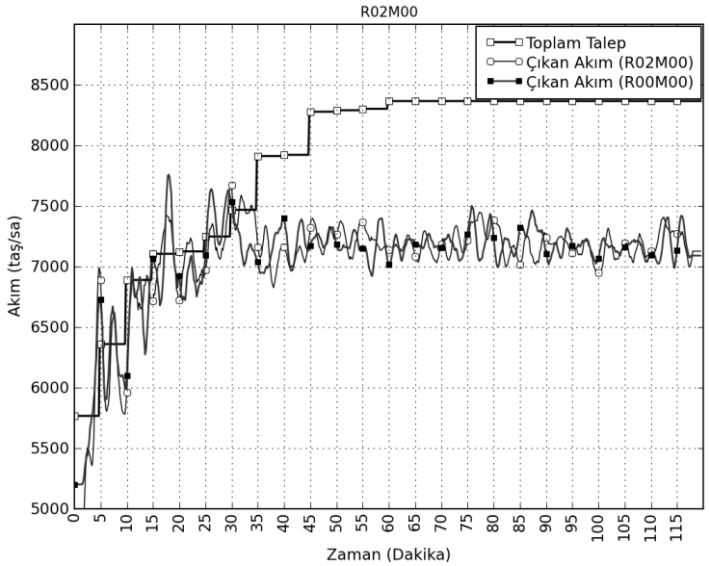
A.O.:Anaakım Ortalaması **S.S. :**Simulasyon Süresi **D**:Mevcut Duruma Göre Değişim



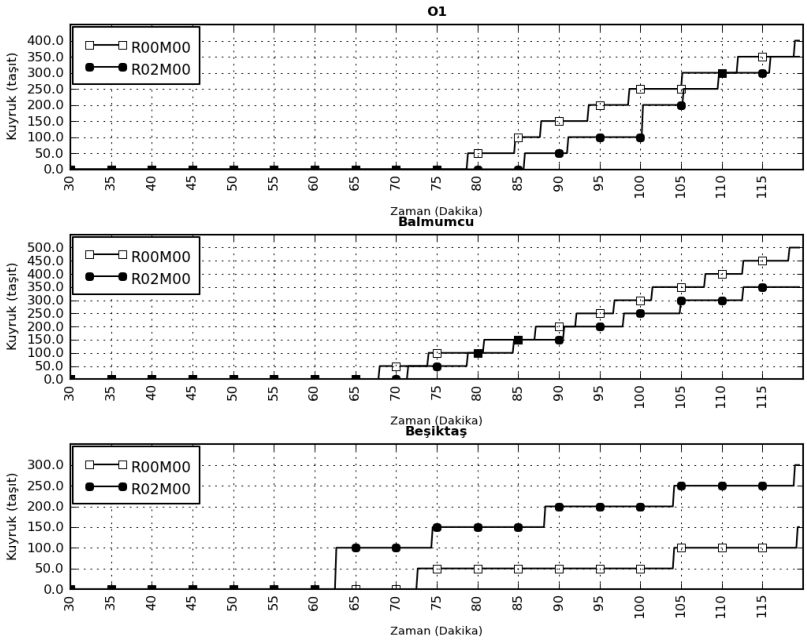
Şekil 6.10 : R02M00 hız deseni grafiği.



Şekil 6.11 : R02M00 yoğunluk deseni grafiği.



Şekil 6.12 : R02M00 arz-talep grafiği.



Şekil 6.13 : R02M00 kuyruklanması

6.2.4 Uygulama 3 (A01M00)

ALINEA kontrol algoritmasının Beşiktaş katılımına uygulanması sonucu, anaakımda tıkanıklık kalmamış, hızlar serbest hız düzeyinde seyretmiştir. Hız deseni (Şekil 6.14) ve yoğunluk deseni (Şekil 6.15) grafiklerinden bu durum açıkca görülmektedir. Bu durum hız ve yolculuk süreleri tablolarına da yansımıştır. Mevcut duruma göre şok dalgası öncesi, sonrası ve tüm simülasyon süresi için ortalama hızlar yükseldiği gibi standart sapmalarda düşmüştür. Buna bağlı olarak yolculuk süreleri tüm simülasyon boyunca ortalama 288 saniyeden 96 saniye düşmüştür. Talep ve arz arasında büyük fark, Beşiktaş katılımında kuyruk olarak belirmiştir. Şekil 6.17'de kuyruklanmalara bakıldığında tüm uygulamalar içinde en yüksek kuyruk değerinin 3.950 taşıt olarak Beşiktaş katılımında oluştuğu görülmektedir. A01M00 uygulamasının sonuçlarından, Beşiktaş katılımının anaakım üzerindeki tıkanmalara neden olduğu görülmektedir. Beşiktaş katılımı için katılım kontrolü uygulamasının arzulanan sonuçları vermediği görülmektedir. Uygulama ile 120 dakikanın sonunda Bağ-6'dan 11.671 taşıt çıkmıştır. Bu tüm uygulamalar içinde en düşük değerdir.

Çizelge 6.9 : A01M00, şok dalgası önce ve sonrası ortalama hızlar.

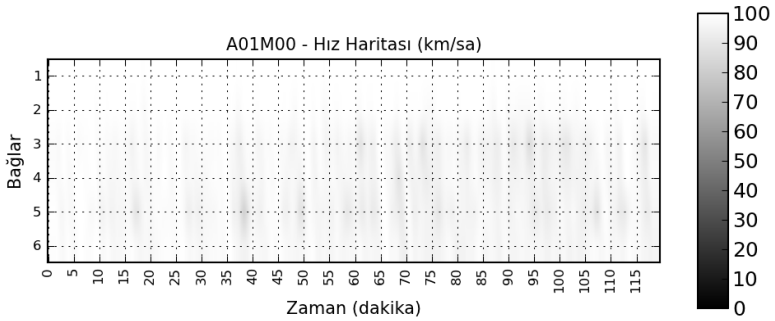
S.S. (dak)	(km/sa)	Bağ-1	Bağ-2	Bağ-3	Bağ-4	Bağ-5	Bağ-6	Toplam	D(%)
0-35	Ortalama	101,66	100,57	98,48	98,29	97,16	98,17	99,06	5,29
	St.Sapma	2,02	2,21	3,15	2,23	3,60	2,55	3,10	-73,09
35-120	Ortalama	101,21	99,85	95,75	96,37	95,14	96,94	97,54	165,41
	St.Sapma	2,20	2,37	4,48	2,90	4,29	2,57	3,95	-85,41
0-120	Ortalama	101,34	100,06	96,55	96,93	95,73	97,30	97,99	83,09
	St.Sapma	2,16	2,35	4,32	2,86	4,20	2,62	3,78	-89,26

A.O.:Anaakım Ortalaması **S.S. :**Simulasyon Süresi **D**:Mevcut Duruma Göre Değişim

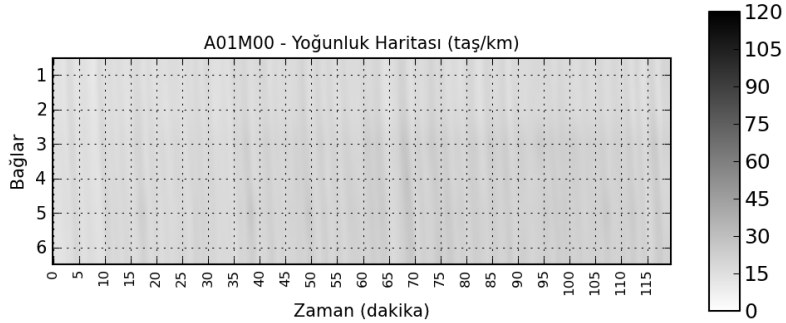
Çizelge 6.10 : A01M00, şok dalgası önce ve sonrası ortalama yolculuk süreleri.

S.S. (dak)	(Saniye)	Bağ-1	Bağ-2	Bağ-3	Bağ-4	Bağ-5	Bağ-6	Toplam	D(%)
0-35	Ortalama	9,73	19,12	10,50	25,46	20,51	12,31	97,63	-4,67
	St.Sapma	1,83	6,03	2,63	9,91	8,56	6,82	12,89	3,37
35-120	Ortalama	9,71	18,74	10,61	24,97	19,98	11,69	95,69	-73,82
	St.Sapma	1,58	4,18	2,05	6,69	5,56	3,41	8,54	-92,11
0-120	Ortalama	9,71	18,85	10,58	25,11	20,14	11,87	96,26	-66,64
	St.Sapma	1,66	4,80	2,24	7,78	6,58	4,68	10,04	-93,33

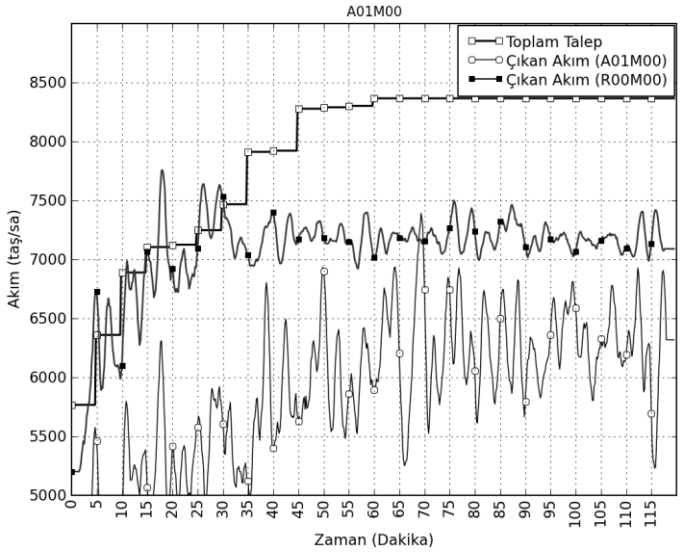
A.O.:Anaakım Ortalaması **S.S. :**Simulasyon Süresi **D**:Mevcut Duruma Göre Değişim



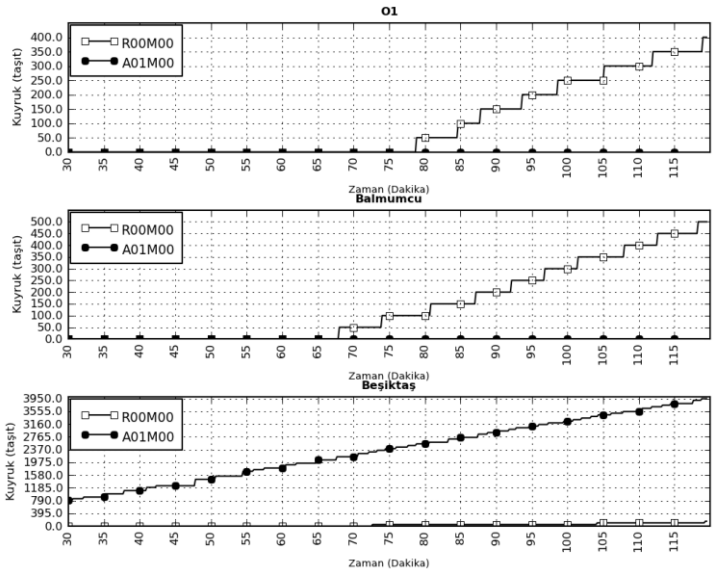
Şekil 6.14 : A01M00 hız deseni grafiği.



Şekil 6.15 : A01M00 yoğunluk deseni grafiği.



Şekil 6.16 : A01M00 arz-talep grafiği.



Şekil 6.17 : A01M00 kuyruklanmaları.

6.2.5 Uygulama 4 (R00M11)

MTÖK yönteminin amaç fonksiyonu (5.6)'ya göre anaakıma uyguladığı hız sınırları (DHS değerleri) Şekil 6.18'de görülmektedir**.** Çizelge 6.11 ve Çizelge 6.12'deki değerlere bakıldığında R00M11 uygulaması ile tüm zaman aralıklarında ortalama hızlar mevcut duruma göre azalmıştır. Ortalama hız, şok dalgası sonrası %33,28, tüm simülasyon süresi için %33,11 oranında azalmıştır. Ancak buna karşılık şok dalgası sonrası ve toplam simülasyon süresinde ortalama hızın standart sapmaları düşmüştür. Şok dalgası öncesi standart sapmanın yüksek olduğu gözlenmektedir. Bu durum

diğer MTÖK uygulamalarında da görülmektedir. R00M11 uygulaması yolculuk süresinin standart sapmasını şok dalgası sonrası (%8) azaltmıştır.

Şekil 6.19'da hız deseni grafiğinde, mevcut durumda 35.dakikada Bağ-6'da başlayan şok dalgasının başlangıcının 40-45 dakikalar arasında Bağ-4'e ötelendiği görülmektedir. Bu durum, akım yukarı bağlarda mevcut duruma göre daha önce gelişen hız düşüşleri sayesinde gerçekleşmiştir. Benzer şekilde yoğunluk deseni grafiğine (Şekil 6.20) bakıldığında akım yukarı bağlarda yoğunluk artışının mevcut duruma göre daha önce başladığı görülmektedir.

Arz-Talep grafiğinde (Şekil 6.21) mevcut duruma göre kesitten geçen taşıt sayısında artışlar gözlenmemiş ve 40. dakikada Bağ-6'dan çıkan taşıt sayısında kısa süreli düşüş yaşanmıştır. Hız ve yoğunluk deseni grafiklerinde bu zaman aralığına karşılık gelen yerlerde hız azalmaları ve yoğunlukta artışlar görülmektedir. Simülasyon süresi sonunda Bağ-6'dan toplam 13.780 taşıt çıkmıştır.

Anaakım kuyruklanması (Şekil 6.22) 1250 taşıta yükselmiştir ve katılımlarda kuyruklanmalar kaybolmuştur. Buna, akım yukarı kesimden gelen taşıt sayısının sınırlanması ile katılımlardaki akımların anakıma katılmasının kolaylaşmasının neden olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 6.11 : R00M11, şok dalgası önce ve sonrası ortalama hızlar.

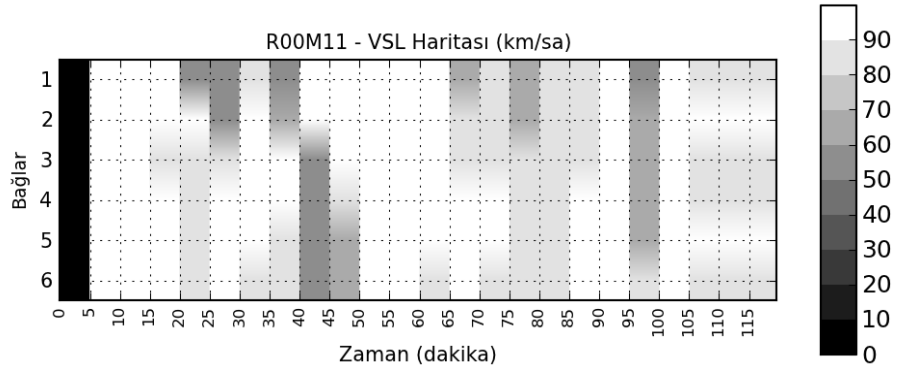
S.S. (dak)	(km/sa)	Bağ-1	Bağ-2	Bağ-3	Bağ-4	Bağ-5	Bağ-6	Toplam	D(%)
0-35	Ortalama	62.09	63.10	64.45	66.77	60.44	61.65	63.08	-32,95
	St.Sapma	20.77	18.91	14.97	14.35	14.80	17.97	17.25	49,74
35-120	Ortalama	21.06	18.25	18.09	18.19	31.94	39.63	24.52	-33,28
	St.Sapma	18.80	15.50	11.59	8.68	4.10	3.78	14.44	-46,66
0-120	Ortalama	33.06	31.36	31.65	32.40	40.28	46.07	35.80	-33,11
	St.Sapma	26.92	26.29	24.60	24.53	15.63	14.32	23.29	-33,80

A.O.:Anaakım Ortalaması **S.S. :**Simulasyon Süresi **D**:Mevcut Duruma Göre Değişim

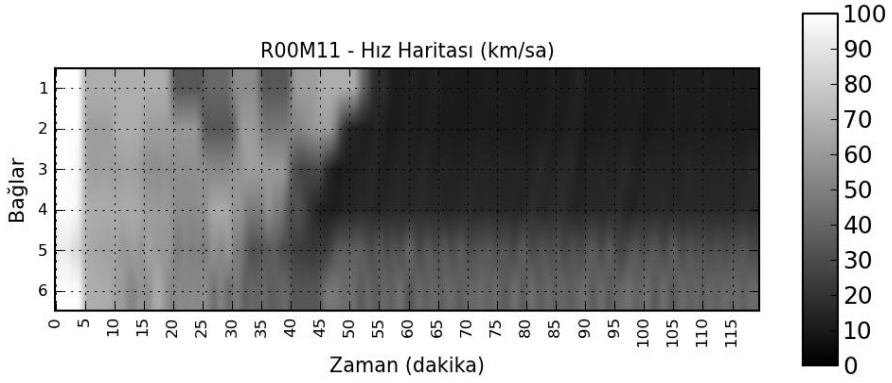
Çizelge 6.12 : R00M11, şok dalgası önce ve sonrası ortalama yolculuk süreleri.

S.S. (dak)	(Saniye)	Bağ-1	Bağ-2	Bağ-3	Bağ-4	Bağ-5	Bağ-6	Toplam	D(%)
0-35	Ortalama	18,56	38,93	17,82	39,16	32,55	19,18	166,19	62,28
	St.Sapma	10,99	57,66	13,38	21,12	9,74	5,27	68,66	450,60
35-120	Ortalama	70,14	141,08	65,32	142,69	57,48	27,60	504,31	37,96
	St.Sapma	31,78	50,20	17,48	37,81	7,99	2,98	99,03	-8,48
0-120	Ortalama	55,06	111,20	51,42	112,41	50,19	25,14	405,41	40,48
	St.Sapma	36,06	70,10	27,12	57,96	14,20	5,39	178,81	18,79

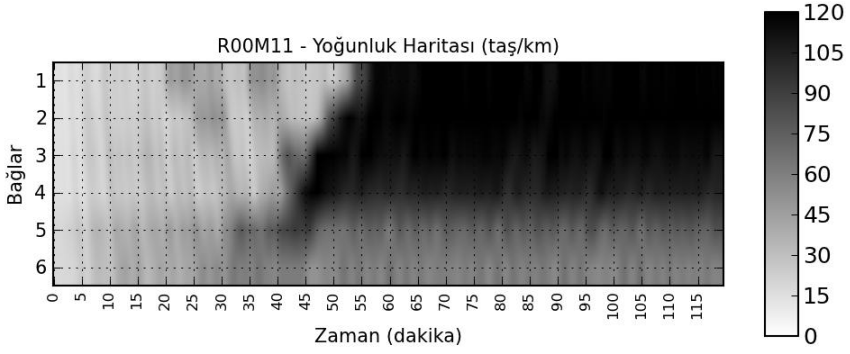
A.O.:Anaakım Ortalaması **S.S. :**Simulasyon Süresi **D**:Mevcut Duruma Göre Değişim



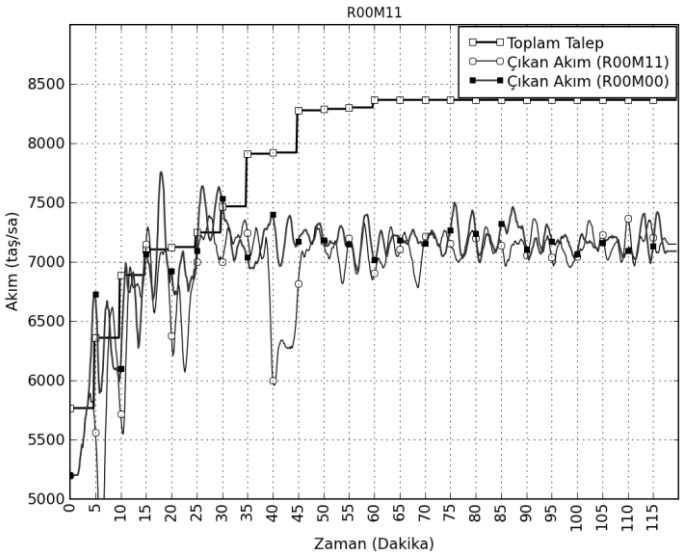
Şekil 6.18 : R00M11 DHS deseni grafiği.



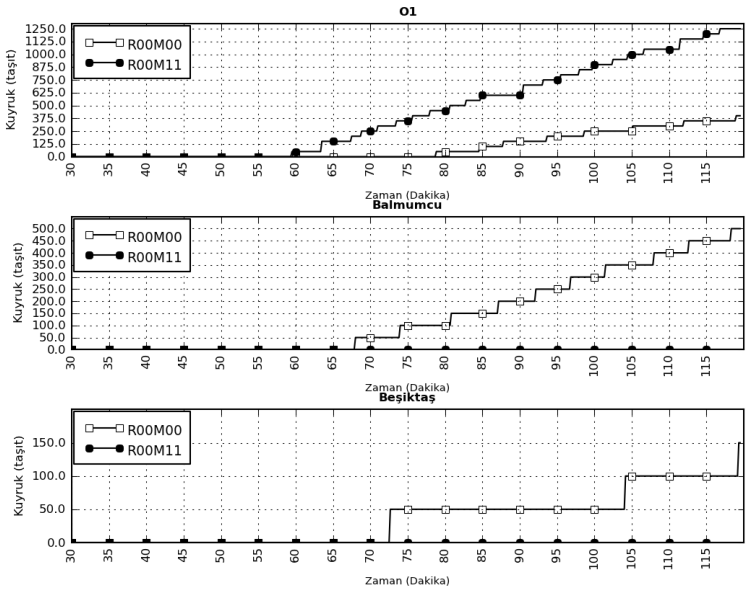
Şekil 6.19 : R00M11 hız deseni grafiği.



Şekil 6.20 : R00M11 yoğunluk deseni grafiği.



Şekil 6.21 : R00M11 arz-talep grafiği.



Şekil 6.22 : R00M11 kuyruklanmaları.

6.2.6 Uygulama 5 (R00M21)

MTÖK yöntemini ile amaç fonksiyonu (5.8)'e göre anaakıma uygulanan hız sınırları (DHS değerleri) Şekil 6.23'de görülmektedir**.** Çizelge 6.13'e göre ortalama hızlar tüm zaman aralıklarında azalmıştır. En fazla düşüş %33,12 ile şok dalgası sonrası olmuştur**.** Ancak buna karşılık şok dalgası sonrasında standart sapma %51 oranında azalmıştır. Tüm simülasyon süresi boyunca ortalama hız %31,97 oranında azalmasına karşılık bu zaman aralığında standart sapma %34,14 oranında azalmıştır**.** Ortalama yolculuk süreleri artmıştır. En yüksek artış şok dalgası öncesi zaman

aralığında %48,57 olarak görülmüştür. Bu artışlar R00M11 uygulamasına göre daha düşük olmuştur.

Arz-talep grafiğinde (Şekil 6.26), arz 35-55 dakikalar arasında düşmüştür. Kontrol 55. dakikadan sonra hız sınırını kaldırmış ve arzı tekrar eski durumuna döndürmüştür. Bu da algoritmanın trafik şartlarına tepki verebildiğini göstermektedir. Kuyruklanma (Şekil 6.27) mevcut duruma göre yüksek, R00M11'e göre düşük olup, anaakımda 1150 taşıttır. Kuyruklanmalar katılımlarda gözlenmemiştir. Tüm simülasyon süresi sonunda Bağ-6'dan toplam 13.829 taşıt çıkmıştır.

Çizelge 6.13 : R00M21, şok dalgası önce ve sonrası ortalama hızlar.

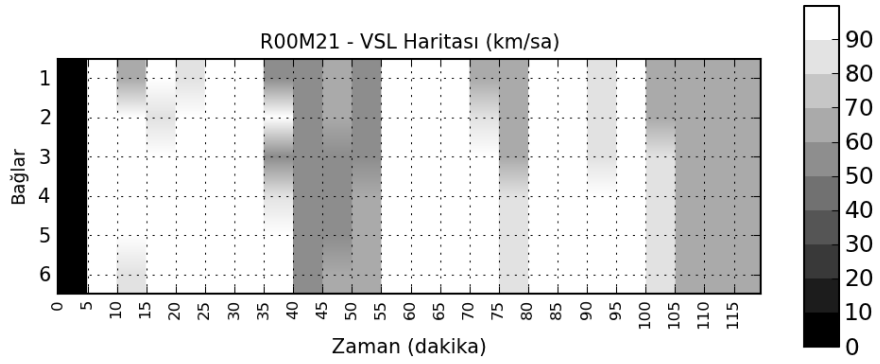
S.S. (dak)	(km/sa)	Bağ-1	Bağ-2	Bağ-3	Bağ-4	Bağ-5	Bağ-6	Toplam	D(%)
0-35	Ortalama	66,96	68,03	71,64	68,05	57,62	57,81	65,02	-30,89
	St.Sapma	15,96	14,23	11,82	13,06	15,98	19,76	16,26	41,15
35-120	Ortalama	18,78	18,13	18,48	19,54	31,62	40,95	24,58	-33,12
	St.Sapma	12,21	13,95	9,99	10,15	3,62	3,48	13,08	-51,68
0-120	Ortalama	32,87	32,72	34,03	33,73	39,23	45,88	36,41	-31,97
	St.Sapma	25,70	26,68	26,39	24,69	14,96	13,48	23,17	-34,14

A.O.:Anaakım Ortalaması **S.S. :**Simulasyon Süresi **D**:Mevcut Duruma Göre Değişim

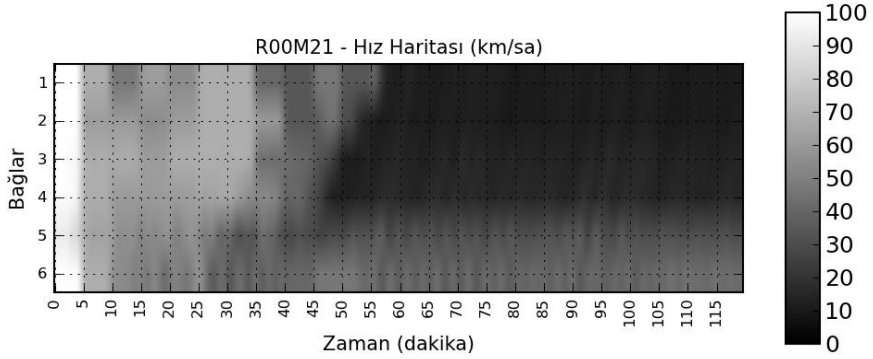
Çizelge 6.14 : R00M21, şok dalgası önce ve sonrası ortalama yolculuk süreleri.

S.S. (dak)	(Saniye)	Bağ-1	Bağ-2	Bağ-3	Bağ-4	Bağ-5	Bağ-6	Toplam	D(%)
0-35	Ortalama	15,70	29,18	14,65	37,06	34,65	20,91	152,15	48,57
	St.Sapma	4,98	9,94	4,20	14,01	10,95	6,11	28,32	127,11
35-120	Ortalama	68,28	136,26	64,22	137,91	57,68	26,64	490,99	34,32
	St.Sapma	26,74	50,16	19,94	39,05	6,34	2,49	111,71	3,23
0-120	Ortalama	52,90	104,94	49,72	108,41	50,94	24,97	391,88	35,79
	St.Sapma	32,94	64,66	28,19	56,93	13,16	4,70	181,17	20,35

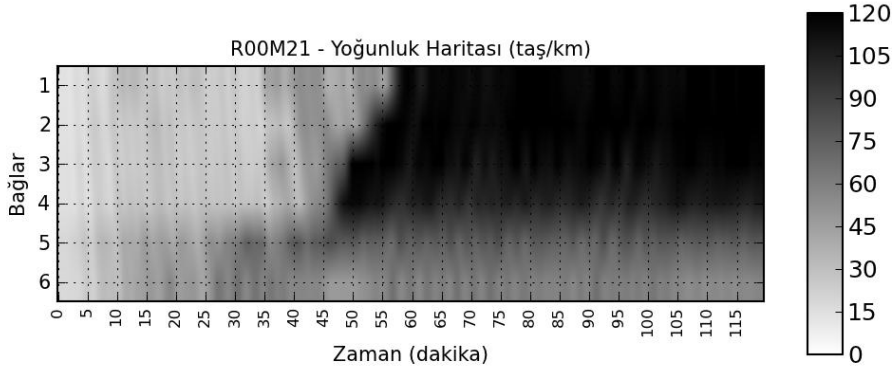
A.O.:Anaakım Ortalaması **S.S. :**Simulasyon Süresi **D**:Mevcut Duruma Göre Değişim



Şekil 6.23 : R00M21 DHS deseni grafiği.



Şekil 6.24 : R00M21 hız deseni grafiği.

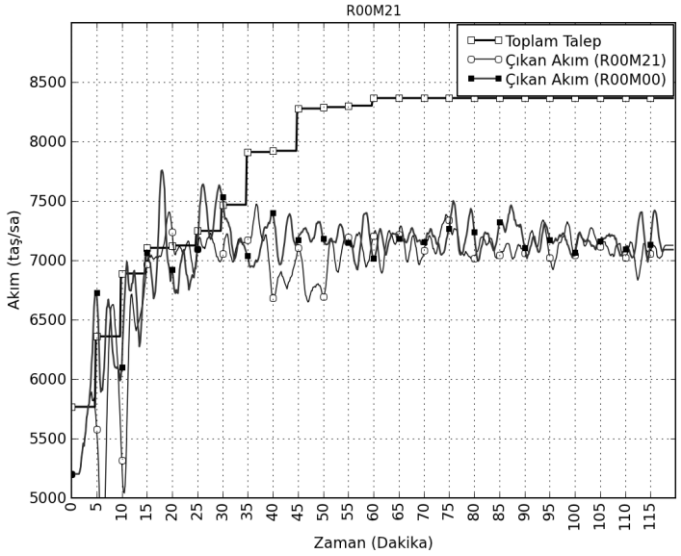


Şekil 6.25 : R00M21 yoğunluk deseni grafiği.

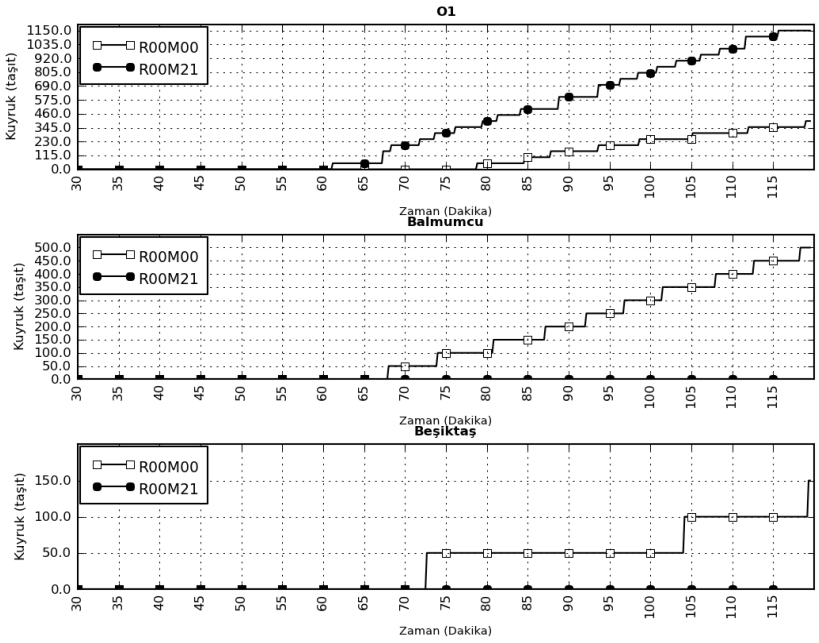
6.2.7 Uygulama 6 (RXXM11)

RXXM11 kontrol uygulaması ile anaakıma ek olarak katılımlara hız sınırı uygulanmıştır. Katılımlara hız sınırlaması Eşitlik (6.1)'e göre yapılmıştır. RXXM11 kontrol uygulaması ile şok dalgası öncesi ortalama hızlar %40,50 azalmıştır. Şok dalgası sonrası ortalama hızlar %3,21 azalmıştır. Şok dalgası sonrası ortalama hızdaki bu düşüş diğer MTÖK uygulamaları içindeki en düşük orandır. Bu zaman

aralığında standart sapmalar mevcut duruma göre %53,23 azalmıştır. Şok dalgası öncesi %96,84 artışla en yüksek yolculuk süresi ve en yüksek standart sapmaya sahip uygulamadır. Şok dalgası sonrası ortalama yolculuk süresi 303,01 saniye'dir (Çizelge 6.16) ve mevcut duruma göre %17 azalmıştır. Bu zaman aralığına ait standart sapma mevcut duruma göre 108,21 saniye'den 62,42 saniye'ye düşmüştür. Tüm simülasyon süresi sonunda ise ortalama yolculuk süreleri %5,28 azalmış ve ortalama yolculuk süresinin standart sapması %45,39 oranında azalmıştır.



Şekil 6.26 : R00M21 arz-talep grafiği.



Şekil 6.27 : R00M21 kuyruklanmaları.

Hız deseni grafiğinde (Şekil 6.29) hızlar genel olarak düşük, tıkanma hızlarının oluşturduğu koyu bölgeler mevcut duruma göre daha azdır. Hızlar yol kesimleri boyunca homojenlik göstermektedir. Şok dalgası oluşumu kaybolmuştur. Yoğunluk deseni grafiğinde (Şekil 6.30) koyu bölgeler azalmıştır.

Çalışma kesiminde anakımdaki iyileşmeyle, kuyruklanma artışı arasında bir ödünleşme olduğu açıktır. Bu iyileşmelerin bu ödünleşmeyi dengede tutarak yapılması gerekmektedir. Bu açıdan RXXM11'in kuyruklanma grafiklerine bakıldığında, toplam kuyruklanmanın mevcut duruma göre 450 taşıtlık artışla 1500 taşıta çıkmıştır. Buna karşılık anayolda kuyruklanmalar kaybolmuş, Balmumcu kuyruklanması 500 taşıttan 50 taşıta düşmüştür. Beşiktaş katılımının kuyruklanması 33.dakikadan başlamış ve simülasyon süresi sonunda 1450 taşıta çıkmıştır. Simülasyon süresi sonunda çalışma bölgesinden 13.649 taşıt geçmiştir.

Çizelge 6.15 : RXXM11, şok dalgası önce ve sonrası ortalama hızlar.

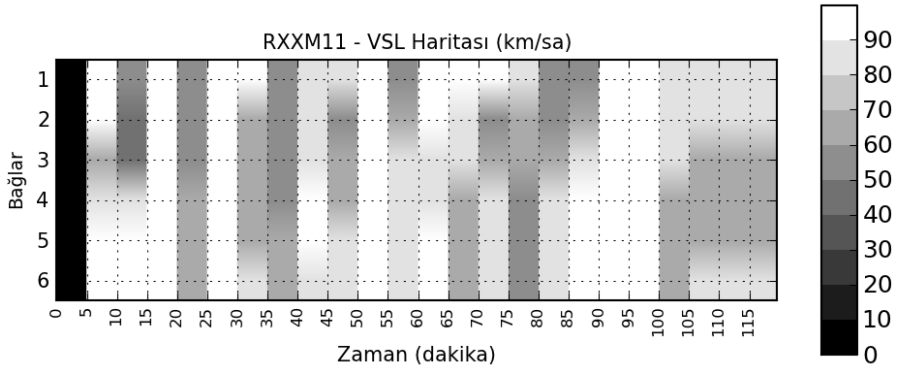
S.S. (dak)	(km/sa)	Bağ-1	Bağ-2	Bağ-3	Bağ-4	Bağ-5	Bağ-6	Toplam	D(%)
0-35	Ortalama	59,71	55,71	54,04	54,30	53,76	58,35	55,98	-40,50
	St.Sapma	21,51	23,22	21,26	20,05	17,44	20,19	20,81	80,64
35-120	Ortalama	41,97	33,62	32,26	27,16	37,94	40,48	35,57	-3,21
	St.Sapma	17,05	16,76	12,91	5,83	4,20	3,99	12,66	-53,23
0-120	Ortalama	47,16	40,08	38,63	35,10	42,57	45,70	41,54	-22,38
	St.Sapma	20,15	21,39	18,66	17,15	12,38	14,02	18,06	-48,66

A.O.:Anaakım Ortalaması **S.S. :**Simulasyon Süresi **D**:Mevcut Duruma Göre Değişim

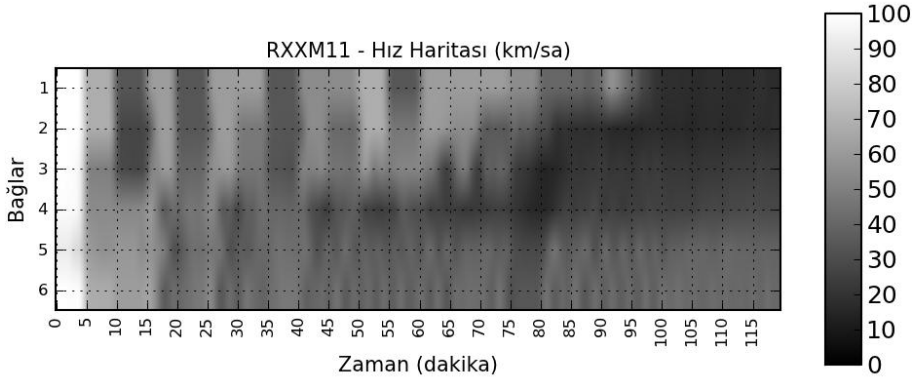
Çizelge 6.16 : RXXM11, şok dalgası önce ve sonrası ortalama yolculuk süreleri.

S.S. (dak)	(Saniye)	Bağ-1	Bağ-2	Bağ-3	Bağ-4	Bağ-5	Bağ-6	Toplam	D(%)
0-35	Ortalama	20,10	42,43	26,04	53,44	38,32	21,25	201,58	96,84
	St.Sapma	14,31	33,00	33,66	43,93	13,97	7,48	80,01	541,62
35-120	Ortalama	29,88	71,45	36,53	89,46	48,57	27,12	303,01	-17,11
	St.Sapma	22,03	36,18	15,79	21,79	9,08	3,74	62,42	-42,32
0-120	Ortalama	27,02	62,96	33,46	78,92	45,57	25,41	273,34	-5,28
	St.Sapma	20,57	37,67	23,03	34,19	11,71	5,78	82,21	-45,39

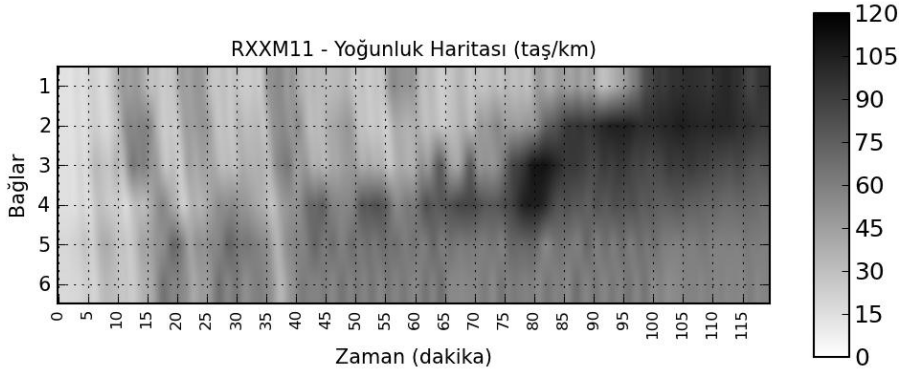
A.O.:Anaakım Ortalaması **S.S. :**Simulasyon Süresi **D**:Mevcut Duruma Göre Değişim



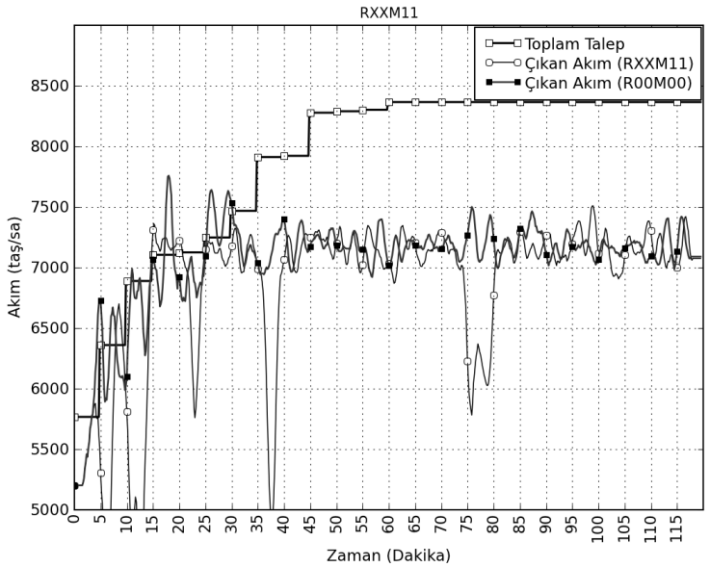
Şekil 6.28 : RXXM11 DHS deseni grafiği.



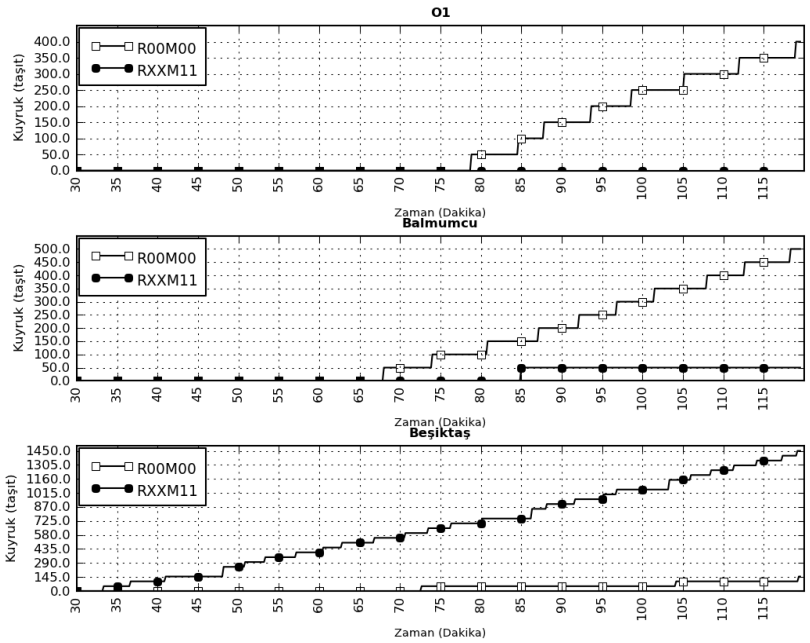
Şekil 6.29 : RXXM11 hız deseni grafiği.



Şekil 6.30 : RXXM11 yoğunluk deseni grafiği.



Şekil 6.31 : RXXM11 arz-talep eğrisi.



Şekil 6.32 : RXXM11 kuyruklanması.

6.2.8 Uygulama 7 (RXXM21)

Bu uygulama ile R00M21'den farklı olarak katılımlara da hız sınırı uygulanmıştır. Uygulamanın şok dalgası öncesi ortalama hız başarımına bakıldığında RXXM11 ile benzerlikler göstermektedir. Ortalama hızların standart sapması şok dalgası öncesi %73,61 artmış, şok dalgası sonrası %54,12 ve toplamda %49,77 azalmıştır (Çizelge 6.17). Yolculuk sürelerine bakıldığında şok dalgası sonrası ve tüm simulasyon süresi boyunca DHS uygulamaları içinde en iyi uygulama olduğu görülmektedir. Şok

dalgası öncesi RXXM11'den göreceli olarak daha iyi değerlere sahipken şok dalgası sonrası %19,06 oranında ortalama yolculuk süresi azalmış ve %48,01 oranında standart sapmada iyileşme olmuştur. Tüm simulasyon süresi boyunca taşıt başına ortalama yolculuk süresi mevcut duruma göre %8,31 oranında azalma ile 265s'dir. Standart sapma %50,83 oranında azalma ile 74 s'dir. Yolculuk süreleri açısından uygulama başarılı olmuştur. Şekil 6.34'de görülen hız deseni grafiğinde mevcut duruma göre koyu bölgede azalma olmuştur. Yoğunluk deseni grafiğinde ise mevcut duruma göre koyu bölgelerin griye dönüştüğü, koyu alanın azaldığı, Bağ-1 ve Bağ-2'deki yoğunluğun düştüğü görülmektedir

Kuyruklanma grafiklerinden (Şekil 6.37) Beşiktaş katılımında kuyruklanmanın 30.dakikadan itibaren başladığı ve simülasyon süresi sonunda 1.350 taşıta ulaştığı gözlenmiştir. Balmumcu kuyruklanması 80.dakikada başlamıştır ve 50 taşıt olarak simülasyon sonuna kadar sabit kalmıştır. Kuyruklanma toplam 1400 taşıt olup anakımda kuyruklanma gözlenmemiştir. Simülasyon sonunda kesitten 13.717 taşıt geçmiştir.

Çizelge 6.17 : RXXM21, şok dalgası önce ve sonrası ortalama hızlar.

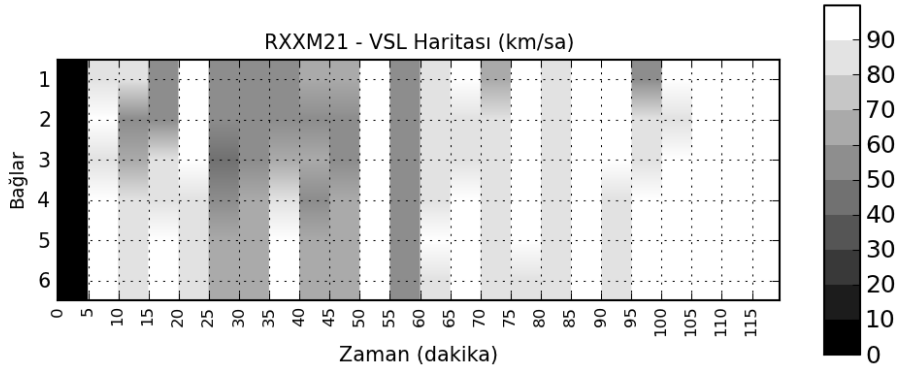
S.S. (dak)	(km/sa)	Bağ-1	Bağ-2	Bağ-3	Bağ-4	Bağ-5	Bağ-6	Toplam	D(%)
0-35	Ortalama	55,49	52,93	54,51	57,43	56,11	59,26	55,95	-40,53
	St.Sapma	20,91	23,39	21,46	18,47	15,53	18,65	20,00	73,61
35-120	Ortalama	45,67	30,25	28,95	29,17	38,76	40,57	35,56	-3,24
	St.Sapma	17,03	13,43	10,16	7,95	5,02	3,75	12,42	-54,12
0-120	Ortalama	48,54	36,88	36,43	37,44	43,83	46,03	41,53	-22,40
	St.Sapma	18,79	19,85	18,52	17,60	12,28	13,56	17,67	-49,77

A.O.:Anaakım Ortalaması **S.S.** :Simulasyon Süresi **D**:Mevcut Duruma Göre Değişim

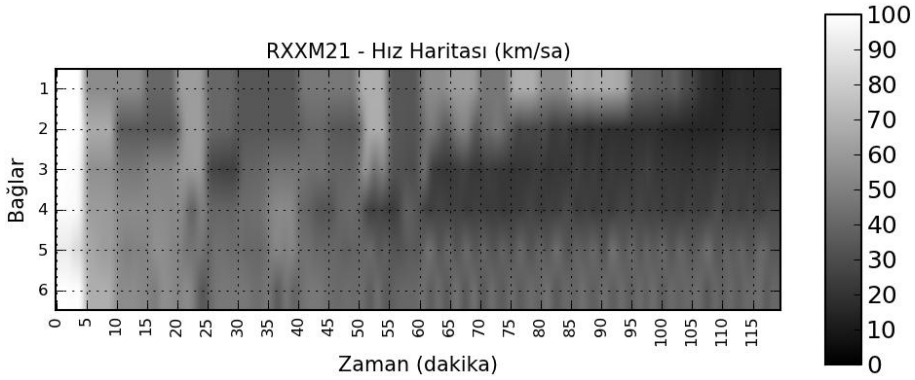
Çizelge 6.18 : RXXM21, şok dalgası önce ve sonrası ortalama yolculuk süreleri.

S.S. (dak)	(Saniye)	Bağ-1	Bağ-2	Bağ-3	Bağ-4	Bağ-5	Bağ-6	Toplam	D(%)
0-35	Ortalama	20,73	42,79	22,43	47,50	35,28	20,26	188,98	84,53
	St.Sapma	9,71	23,76	12,34	26,34	10,46	6,11	54,62	338,01
35-120	Ortalama	26,63	72,85	38,31	83,81	47,34	26,94	295,88	-19,06
	St.Sapma	15,03	30,47	11,93	17,99	5,91	2,60	56,26	-48,01
0-120	Ortalama	24,91	64,06	33,66	73,19	43,81	24,98	264,62	-8,31
	St.Sapma	13,95	31,77	14,05	26,55	9,32	4,99	74,01	-50,83

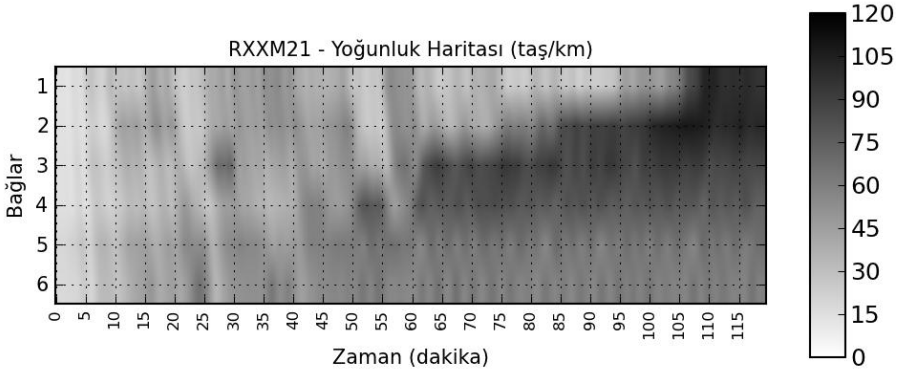
A.O.:Anaakım Ortalaması **S.S. :**Simulasyon Süresi **D**:Mevcut Duruma Göre Değişim



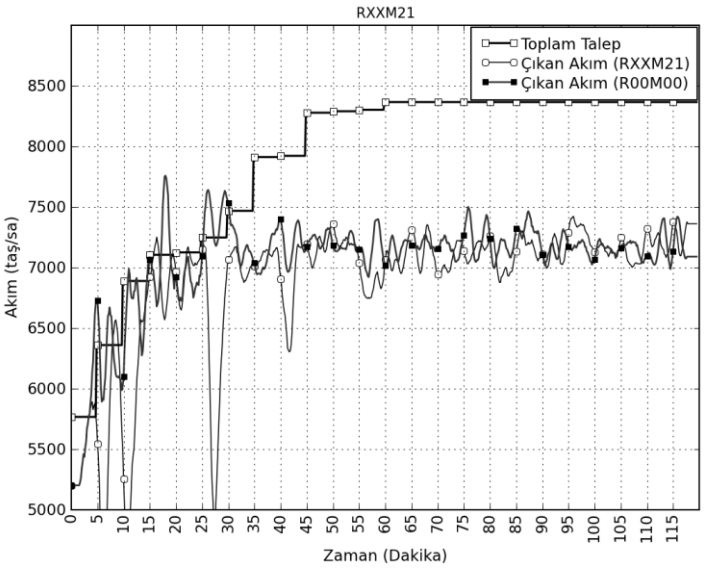
Şekil 6.33 : RXXM21 DHS deseni grafiği.



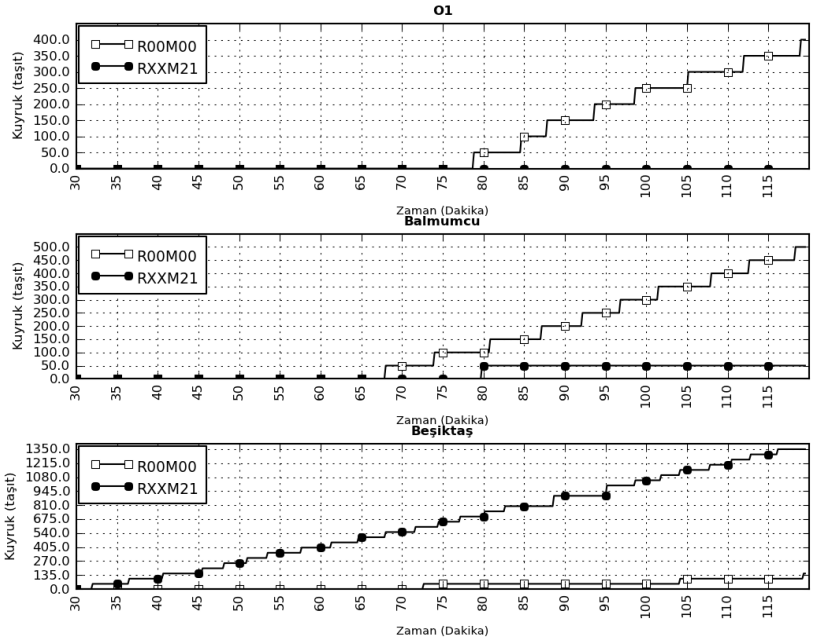
Şekil 6.34 : RXXM21 hız deseni grafiği.



Şekil 6.35 : RXXM21 yoğunluk deseni grafiği.



Şekil 6.36 : RXXM21 arz-talep grafiği.



Şekil 6.37 : RXXM21 kuyruklanması.

7. SONUÇLAR

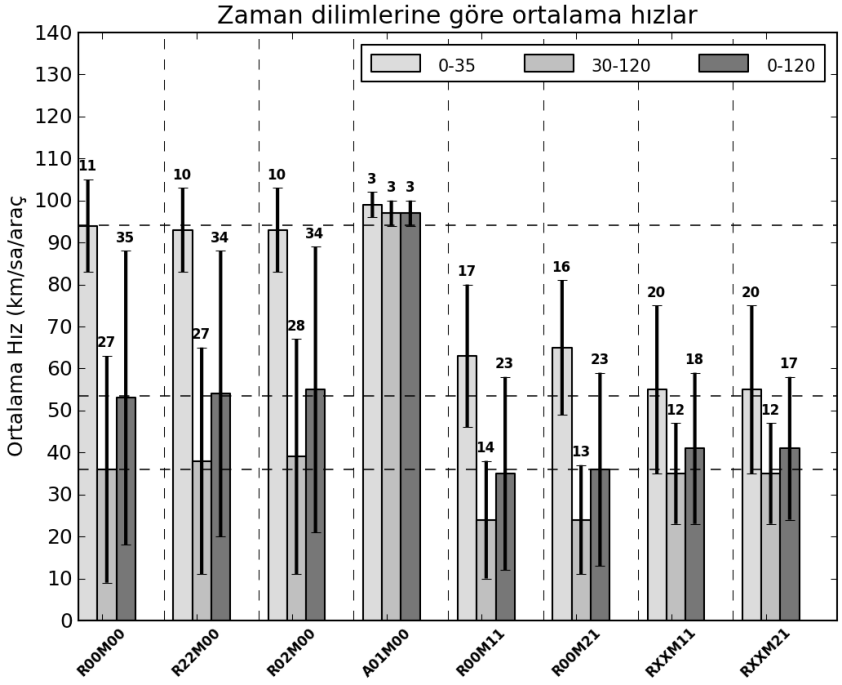
Bu çalışmada O1 kentiçi otoyolunun 2,5 km uzunluğundaki kısmına (Avrupa yakasında, Boğaziçi Köprüsü'ne yakın yol kesimine) DHS (Değişken Hız Sıınırlaması) uygulanmıştır. DHS uygulamalarında optimal kontrol esaslı MTÖK (Model Tabanlı Öngörülü Kontrol) yönteminden yararlanılmıştır. Bununla birlikte sadece katılımlara sabit hız sınırlama uygulaması ve ALINEA algoritması ile katılım kontrol uygulaması da yapılmıştır. Uygulamaya ait kontrol değerleri CORSIM yazılımıyla sınanmıştır. Bu bölümde kontrol uygulamasından elde edilen sonuçlara yer verilmiştir.

Çalışma bölgesinin simülasyon modeliyle incelenmesi sonucu, sorunun özellikle Beşiktaş katılımında yüksek talep nedeniyle oluşan şişeboynundan kaynaklandığı tespit edilmiştir. R02M00 ve R22M00 ile gerçekleştirilen 20 km/sa sabit hız sınırı uygulamalarında, Beşiktaş katılımında kuyruklanmaların arttığı görülmektedir. Anaakım ve katılımlardaki kuyruklanmalarda bir ödünleşmenin (trade off=birbirini karşılıklı olarak etkileyen ilişki) olduğu, bu nedenle kontrol problemin eniyileme süreci ile yönetilmesi gerektiği görülmüştür. Katılımlarda hız sınırlaması yapılmayan R00M11 ve R00M21 uygulamalarının sonuçlarından, çalışma bölgesi trafik akımının mevcut durumdan daha düşük hızlarda ve yüksek yolculuk sürelerinde hizmet verdiği görülmüştür.

Çalışma bölgesinin en dikkat çekici özelliği hızlarda, artan taleplerle beraber keskin düşüşlerin yaşanmasıdır. Bağlardaki hızlar 10 dakikalık bir zaman aralığında serbest hız durumundan tıkanıklık durumuna düşmektedir. Bu durum 'olay yönetimi' yöntemlerindeki kaza ya da şerit iptali gibi durumların akım üzerinde yarattığı etkilere benzemektedir. Ancak buna neden olan talebin ana akım ve katılımlarda sürekli artması ve katılımlardaki şişeboynu etkisi nedeniyle oluşan şok dalgaları ve tıkanmadır. Bu durum ana akım ile birlikte katılımlardan ana yola giren taşıtların kontrol edilmesi gerektiğini göstermektedir. Literatürde katılım kontrolü ve DHS'nın birlikte uygulandığı ve başarılı sonuçların elde edildiği çalışmalar (Hegyi, 2004;

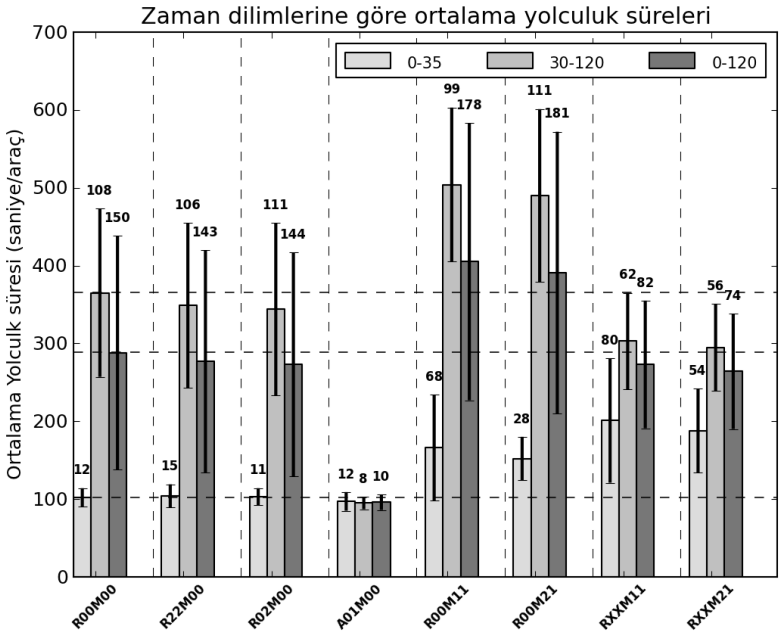
Carlson vd., 2010) mevcuttur. Bu çalışmada, öncekilerden farklı olarak katılımlara hız sınırı uygulanmıştır.

Beşiktaş katılımına ALINEA kontrol algoritmasının uygulandığı A01M00 uygulaması şok dalgası öncesi, sonrası ve tüm simülasyon süresinde ortalama hızları yükseltmiş (Şekil 7.1) aynı zamanda şok dalgası sonrası ve toplamda yolculuk süresini düşürmüştür (Şekil 7.2). Ancak, A01M00 uygulamasında Beşiktaş katılımında 50.dakikada kuyruklanma değerinin 1500 taşıt, simülasyon süresi sonunda 3950 taşıt olduğu görülmüştür (Şekil 7.1). Şok dalgası öncesi R22M00 ve R02M00 uygulamaları, şok dalgası öncesi mevcut durumla benzerlik göstermektedir. Şok dalgası sonrası mevcut duruma göre ortalama hızların arttığı görülmektedir. Toplam simülasyon süresinde ortalama hızların standart sapmalarında bir belirgin bir değişim görülmemiştir. R02M00 uygulaması mevcut duruma göre yolculuk süresini düşürmüş, şok dalgasını ötelemiş, O1 ve Balmumcu katılımında kuyruklanmayı azaltmış, ancak Beşiktaş katılımında kuyruklanmalara neden olmuştur (Şekil 7.3). R02M00 uygulaması ile şok dalgası sonrası ortalama hızlar artmış, ortalama hızın standart sapmasında belirgin bir değişim olmamıştır.



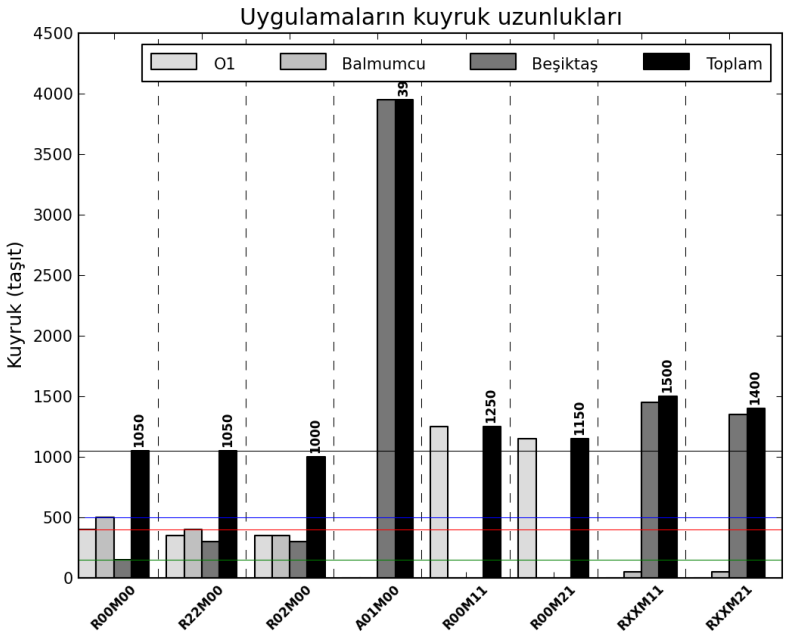
Şekil 7.1 : Uygulamaların ortalama hız başarımları.

MTÖK uygulamaları ile ortama hızlar düşmesine karşılık daha düşük standart sapma değerleri gözlenmiştir. R00M11 ve R00M21 yolculuk süreleri açısından diğer uygulamaların gerisinde kalmıştır. Buna karşılık, RXXM11 ve RXXM21 kontrol uygulamalarında şok dalgası sonrası ve toplamda en iyi yolculuk süreleri görülmüştür. Şok dalgaları sönümlenmiş ve çalışma bölgesi üzerinde yüksek yoğunluklu kesimler azalmıştır. Ortalama hızların standart sapmasında meydana gelen düşüşten, bölgenin bu anlamda mevcut durumdan daha iyi hizmet verdiği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte dalgasının oluşumu ile ortalama hızların varyansı arasındaki ilişki görülmüştür.



Şekil 7.2 : Uygulamaların ortalama yolculuk süresi başarımları.

RXXM21, şok dalgasını önlemiş ve mevcut durumda görülen yüksek tıkanma yoğunluklarını düşürmüştür**.** RXXM21 uygulamasında mevcut duruma göre şok dalgasının oluştuğu 35. dakikadan sonra ortalama hız %3,24 düşmüş, standart sapma ise %54,12 lik düşüşle 27,07 km/sa ’ten 12,42 km/sa olmuştur. Yolculuk sürelerine bakıldığında şok dalgası sonrası ortalama yolculuk süreleri taşıt başına %19,06 oranında (365 saniyeden 303 saniyeye düşmüştür) azalmıştır. RXXM21 uygulaması ile mevcut duruma göre toplam simülasyon süresi için, taşıt başına düşen yolculuk süresinde %8’lik bir iyileşme olmuştur. RXXM21 uygulaması şok dalgalarını sönümlendirmiş ve hız farklarını azaltmıştır.



Şekil 7.3 : Uygulamaların kuyruklanma başarımları.

Çalışmada tahmin ufku N_p 10 dakika, kontrol ufku N_c 5 dakika seçilmiştir. Seçilen bu zamanlar hesaplama süresi düşünüldüğünde en ideal zaman aralıklarıdır. DHS sinyallerindeki değişim, 5 dakika olarak seçilmiştir. Bu gerçekte çalışmanın araziye uygulanması sırasında, verilerin alınması, işlenmesi, eniyilemenin yapılması ve DHS aygıtlarına hız sınırlarının gönderilmesi için yeterli süre olarak düşünülmüştür. Her beş dakikada bir yapılan eniyileme, x86 mimarisinde 1.7 GHz işlemcili MS XP işletim sistemi üzerinde ortalama 2,5 dakika sürmektedir. Bu durum daha gelişmiş bilgisayarlarda hesaplama süresinin daha kısa sürebileceğini ve sonuçların kabul edilebilir gecikme (Örneğin kontrol zamanının beş dakikadan küçük) ile araziye gönderilebileceğini, dolayısıyla yöntemin uygulanabilir olduğunu göstermektedir.

R02M00 uygulaması şok dalgalarını ötelemede ve yolculuk süresini azaltmada etkili olmuştur ve katılım kontrolüne alternatif düşünülebilir. Bu uygulama ile taşıtların anayola 20 km/sa ile giriş yapmadıklarını, hızlanma şeridine geldiklerinde tıpkı katılım kontrolünde olduğu gibi (duran taşıtların hızlanarak anayola katılmaları) hızlandıklarını vurgulamak gerekir.

Çalışmada DHS uygulanması ile trafik akımda iyileştirmeler olması bekleniyordu. Bu iyileştirme homojen bir trafik akımının elde edilmesi, yolculuk süresinin enküçüklenmesi, şok dalgalarının sönümlenmesi, kuyruklanmanın giderilmesi ya da geciktirilmesiydi. Çalışmada bu amaçlar kısmen gerçekleştirilmiştir. Mevcut

durumda herhangi bir değişiklik yapmadan (talebi farklı mod, yolculuk zamanlarına kaydırmadan), talebi gözlem süresinden sonra sabit bırakıp simülasyon süresini uzatarak uygulanan kontrol stratejilerinin yarattığı etki açık ve net görülmüştür. Katılımlara uygulanan sabit hız sınırı uygulamalarının hızların standart sapmasında bir değişiklik yaratmamıştır. MTÖK uygulamalarının standart sapmada oluşturduğu etki güvenlik yönünden iyileştirici bir parametredir. Katılımlara uygulanan sabit hız kontrollerinin ise ortalama hızları düşürmeden, kuyruklanmayı azaltarak yolculuk süresini düşürmesi ise katılım kontrol uygulamalarına alternatif olarak sunulabilir. Fakat bu tür kontrol uygulaması için arazi üzerinde test çalışmalarının mutlaka yapılması gerektiği açıktır. Katılımlardaki taşıt hızlarının 10 km/sa düzeylerine düşürülmesi ve bu hızlarda taşıtların seyirlerinin, taşıt ve akıllı ulaştırma teknolojisiyle mümkün olabileceği düşünülmektedir. Bu hızların sağlanması ayrı bir araştırma konusudur. Ancak gelecekte elektrikli taşıtların yaygınlaşmasıyla daha hassas hız sınırlarının uygulanabileceği düşünülmektedir.

Çalışmanın sonuçlarına bakıldığında, çalışma bölgesinin yüksek talepli bir geçiş olmasının yanında, bir otoyol sistemi açısından çok kritik iki katılıma sahip olması ve bu iki katılım arasındaki mesafenin 909 m olması, geometrik tasarım problemine işaret etmektedir. Bu çalışmanın diğer MTÖK yöntemleri ile uygulanmış olan çalışmalardan farkı, uzun ve seyrek katılımlı otoyol bağlarının aksine kısa ve sık katılımlı bağlara uygulanmış olmasıdır.

Çalışma, birçok trafik aracının bir araya getirilmesinden ve bütünleştirilmesinden oluşmaktadır. Nümerik bir kontrol çalışması yapılması için trafikle ve matematikle ilgili yazılımlar bir araya getirilmiştir. Verilerin toplanması, çalışma bölgesinin CORSIM'de oluşturulması, trafik tahmin modelinin (METANET) kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. MTÖK yönteminin uygulanması ve optimizasyonun gerçekleştirilmesi, emek-yoğun bir çalışma gerektirmiştir.

Bununla birlikte gelecekte yapılması istenen pek çok çalışma vardır. Bunlar sıralanacak olursa:

- Çalışma bölgesinin daha geniş tutularak DHS uygulamasının trafik akımına etkisini daha açık görülebilmesi
- Verilerin dinamik elde edilmesi için gerekli altyapının hazırlanması

- Hesaplanma zamanının düşürülmesi için eniyileme algoritmalarının RTE modülü ile entegrasyonu
- Farklı simülasyon yazılımlarıyla DHS çalışmasının sınanması
- Farklı trafik akım modeli ile trafik akımının değişkenlerinin tahmin edilmesi ve sonuçların karşılaştırılması
- Çalışmanın araziye uygulanması için gereken alt yapının kurgulanması
- Eniyileme algoritmalarının seçimi ve karşılaştırılması
- Farklı tahmin ve kontrol ufuklarıyla çalışmanın başarımının artırılması
- DHS'nın farklı kontrol bileşenleri ile birlikte uygulanması
- DHS'nın özel olaylarda (tekrarlı olmayan tıkanıklık koşullarında) etkisinin incelenmesi (kaza ya da olay durumu, yol ve hava şartları gibi).
- DHS ve katılım kontrolünün birlikte koordineli olarak yapılması

Yukarıda söz edilen çalışmaların bireysel bir çalışmanın ötesinde, çalışmanın ayrıntısı, maliyet, çevresel faktörler vb. nedenlerden dolayı bir proje kapsamında gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Böylece hem trafik mühendisliği eğitimi açısından hem de pratik kazanımlar elde edilecektir.

Genel olarak DHS uygulamasının oldukça karmaşık ve özen gerektiren bir konu olduğunu söylemek mümkündür. DHS ile yapılmış çalışmalar ve uygulamalarla trafik işletimi ve güvenliğine dair olumlu sonuçlar elde edilmiş olsa da literatürde trafik kontrol alanında en az çalışılmış konulardan biridir. Otoyolda DHS ile dinamik optimum hız kontrol değerlerinin nümerik yolla bulunması ve uygulanması ile ilgili ülkemizde henüz bir çalışma bulunmamaktadır. Bu anlamda bu çalışmanın bir başlangıç olması umut edilmektedir.

KAYNAKLAR

Akbaş, A. (2001). Kentiçi Karayolu Trafiğinin Kontrolü, *TMMOB Makine Mühendisleri Odası Endüstri Mühendisliği Dergisi*, ISSN: 1300-3410, Cilt.**12**, Sayı.1, 25-36.

Algers, S., Bernauer, E., Boero, M., Breheret, L., Taranto, C.D ve diğ. (1997). Review of Micro-Simulation Models, SMARTEST Project Deliverable D3, Institute for Transport Studies, University of Leeds, Leeds.

Allaby, P. (2006). *An Evaluation of the Safety and Operational Impacts of a Candidate Variable Speed Limit Control Strategy on an Urban Freeway*, Master Thesis of Applied Science, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.

Allesandri, A., Febbraro, A, Ferrara, A. ve Punta, E. (1999). Nonlinear Optimization for Freeway Control Using Variable-Speed Signaling, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.48, No.6, pp.2042-2052, November.

Aral, E.A. (2007). Kent İçi Otoyollarda Yol Boyu Yan Mekanlar, *Arredamento* Mimarlık, 204, 8, s.82, İstanbul.

Archer, J., Fotheringham, N., Symmons, M. ve Corben, B. (2008). The Impact of Lowered Speed Limits In Urban And Metropolitan Areas, Monash University Accident Research Centre, Report No:276, January.

Arnold, E.D. (1998). Ramp Metering: A review of the Literature, VTRC Technical Assistance Port, Virginia.

Balta, C. (2002). *Otoyol Giriş Denetimi,* İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Banks, J. ve Carson, J.S. (1984). *Discrete-Event System Simulation*, Prentice Hall, New Jersey.

Baruya, A. (1998). Speed-Accident Relationships on Different Kinds of European Roads, Master Deliverable D7.

Bellemans, T., Schutter, B.D. ve Moor, B.D. (2002). Models for Traffic Control, *Journal A*, Vol. 43, no. 3-4, pp. 13-22.

Bellemans, T. Schutter, B.D ve Moor, B.D. (2003). Anticipative Model Predictive Control for Ramp Metering in Freeway Networks, *Proceedings of 2003 American Control Conference*, Denver, Colorado, pp.4077-4082, June.

Bellemans, T. (2003). *Traffic Control on Motorways*, Katholieke Universiteit Leuven, Ph.D Thesis.

Bequette, W. (2007). Non-linear Model Predictive Control:A Personal Retrospective, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol.85, pp 408-415, August.

Bhargava, A., Oware, A.E., Labi, S. ve Sinha, K.C. (2006). Ramp Metering and High Occupancy Vehicle Facilities: A Synthesis Study Publication FHWA/IN/JTRP-2006/02. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette.

Bloomberg, L. ve Dale, J. (2000). A Comparison of the VISSIM and CORSIM Traffic Simulation Models, *Institute of Transportation Engineers Annual Meeting*.

Bogenberger, K. ve May, A.D. (1999). Advanced coordinated traffic responsive ramp metering strategies, California PATH Working Paper, UCB-ITS-PWP-99-1, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.

Breton, P., **Hegyi, A., Schutter, B.D., Hellendorn, H.** (2002). Shock Wave Elimination/Reduction by Optimal Coordination of Variable Speed Limits, *IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, 3-6 September, Singapore.

Burger, M., Hegyi, A. ve Schutter, B.D. (2008). Suitability of different mean speeds for model-based traffic control, *Proceedings of the 87th Annual Meeting of Transportation Research Board*, Washington, DC, 18 pp., Jan. 2008. Paper08-2010

Caltrans, (2000). Ramp Meter Design Manual. California Department of Transportation.

Camacho, E.F. ve Bordons, C. (1995). *Model Predictive Control in the Process Industry*, Springer-Verlag, Berlin.

Cambridge Systematics. (2001).Twin Cities Ramp Meter Evaluation-Final Report, Minnesota Department of Transportation, February.

Carlson, R.C., Papamichail, I., Papageorgiou, M. ve Messmer, A. (2010). Optimal Mainstream Traffic Flow Control of Large Scale Motorway Networks, *Transportation Research Part C*, Vol.18, pp.193–212, April.

Carvell, J.D., Balke, K.J., Ullman, J., Fitzpatrick, K., Nowlin, L., ve Brehmer, C. (1997). *Freeway Management Handbook*, US Department of Transportation.

Cassidy, M.J. ve Bertini, R. L. (1999). Some traffic features at freeway bottlenecks, *Transportation Research Part B*, Vol.33, pp.25–42.

Chaudhary, A. ve Messer, J. (2000). Report on design criteria for ramp metering, FHWA Report 2121-3, Texas Transportation Institute, Texas.

Chu, L. ve Yang, X. (2003). Optimization of the ALINEA Ramp-metering Control using Genetic Algorithm with Micro-Simulation**,** *Transportation Research Board 82nd Annual Meeting*, Washington DC.

Cremer, M. ve Papageorgiou, M. (1981). Parameter Identification for a traffic flow model, *Automatica*, Vol.17, pp.837-843, November.

Cremer, M. ve May, A. (1985). Extended Traffic Model for Freeway Control, Research Report UCB-ITS-RR-85-7, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.

Çavdar, A., Uçar, M., ve Kılıçaslan, İ. (2008). Trafik Kazalarına Sebep Olan Yüksek Hız Kusurlarının Denetim ve Aktif Güvenlik Sistemler ile Kontrolü, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der*. Cilt 23, No 1, 187-198.

Daganzo, C.F. (1995). Requiem for Second-Order Fluid Approximations of Traffic Flow, *Transportation Research Part B* 29(4), 277-286.

Daigle, G., Thomas, M. ve Vasudevan, M. (1998), Field Applications of CORSIM: I-40 Freeway Design Evaluation, *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, Oklahoma City.

Demir, G.H. ve Demir, Y.K. (2008). Availability and Accuracy of Traffic Data: An Example for Real Time RTMS Data. *In International Workshop on Traffic Data Collection &its Standardization*, Barcelona, September8-9.

Figueiredo, L., Machado, J.A.T ve Ferreira, J.R. (2004). Dynamical Analysis of Freeway Traffic. *IEEE Transactions Intelligent Transportation Systems*, Volume 5, Issue 4. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Parma.

Finch, D.J, Kompfner, P., Lockwood, C.R., ve Maycock, G. (1994). Speed, Speed Limits and Accidents, Transport Research Laboratory, Project Report 58, Crowthorne.

Garber, N.J. ve Gadirau, R. (1988). Speed Variance and its Influence on Accidents, AAA Foundation for Traffic Safety**,** Washington, DC.

Gedizlioğlu, E. (2004). Kentlerimizde Trafik Yönetimi, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 434, 6.

Geroliminis, N., Srivastava, A. ve Michalopoulos, P. (2011). Development of the Next Generation Stratified Ramp Metering Algorithm Based on Freeway Design, Final Report, Department of Civil Engineering University of Minnesota.

Greenshields, B.D. (1935). A study of Traffic Capacity, Highway Research Board-National Research Council, Washington, DC, pp. 448-477.

Halati A., Lieu, H. ve Walker, S. (1997). CORSIM- Corridor Traffic Simulation Model, *Proceedings ASCE Conference on Traffic Congestion and Safety in the 21 st Century*, Chicago.

Hegyi, A., Schutter, B.D. ve Hellendoorn, J. (2003). MPC-Based Optimal Coordination of Variable Speed Limits To Shock Waves In Freeway Traffic Suppress, *Proceedings of the American Control Conference*, Denver, Colorado June 4-6.

Hegyi, A. (2004). *Model Predictive Control for Integrating Traffic Control Measures*, Ph.D Thesis, Delft University of Technology, TRAIL Thesis SeriesT 2004/2, February.

Hegyi, A. (2005). Optimal Coordination of Variable Speed Limits to Suppress Shock Waves, IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems, Vol. 6 (1), March.

Hegyi, A., Bellemans, T ve Schutter, B.D. **(**2009). Freeway Traffic Management and Control, *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, Editor Meyers, *R.A.*, Springer, pp. 3943-3964.

Holm, P., Tomich, D., Sloboden, J. ve Lowrance, C. (2007). Traffic Analysis Toolbox Volume IV: Guidelines for Applying CORSIM Microsimulation Modeling Software, Publication No. FHWA-HOP-07-079.

Hoogen, E. ve Smulders, S. (1996). Control by Variable Speed Signs: Result of the Dutch Experiment. *7th International Conference on Road Traffic Monitoring and Control.*

Ioannou, P., Wang, Y. ve Chang, H. (2008). Modelling Simulation and Control of Transportation System, Modeling and Control of Complex Systems, Edited by Ioannou, P. A. ve Pitsillides, A. CRC press.pp.407-437.

ITE. (1976). Institute of Transportation Engineers, *Transportation and Traffic Engineering Handbook*, J.E. Baerwald, Editor. Prentice-Hall.

ITE. (1992). Institute of Transportation Engineers, *Traffic Engineering Handbook*, 4th Edition, J.L. Pline, Editor Prentice-Hall.

ITT Industries. (2006). CORSIM USER GUIDE**,** Systems Division, Colorado Springs.

Jones, L. S., Sullivan, A.J., Cheekoti, N. ve Anderson, M.D. (2004). Traffic Simulation Software Comparison Study, University Transportation Center for Alabama, *UTCA Report* 02217.

Kerner, B.S. (1999). Theory of Congested Traffic Flow: Self-Organization without Bottlenecks. *Proceedings of the fourteenth International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Jerusalem, Israel, 147-171.

Kerner, B.S ve Rehborn, H. (1996). Experimental features and characteristics of traffic jams, *Physical Review E*, Vol. 53(2), pp.1297–1300, February.

Kim, Y. (2002). *Online Traffic Flow Model Applying Dynamic Flow-Density Relations,* Ph.D Thesis, Technische Universität München, Fachgebiet Verkehrstechnik und Verkehrsplanung.

Kotsialos, A. ve Papageorgiou, M. (2004). Motorway Network Traffic Control Systems, *European Journal of Operational Research* 152(2), pp. 321-333.

Kotsialos, A., Papageorgiou, M., Hayden, J., Higginson, R., McCabe K. ve Rayman, N. (2006). Discrete Release Rate Impact On Ramp Metering Performance, *IEE Proceedings Intelligent Transportation Syst*em, Vol. 153(1), March 2006

Kühne, R.D. (1991). Freeway Control Using a Dynamic Traffic Flow Model and Vehicle Re-identification Techniques. *Transportation Research Record*,1320, pp. 251-259, National Research Council, Washington, D.C.

Lee, C., Hellinga, B. ve Saccomanno, F. (2004). Assesing safety benefits of Variable Speed Limits, *Transportation Research Record 1897*, TRB, National Research Council, pp. 183-190. Washington, D.C.

Lenz, H., Sollacher, R. ve Lang, M. (2001). Standing waves and the influence of speed limits, *Proceedings of the European Control Conference* 2001, pp.1228–1232, Porto, Portugal.

Lieberman, E. ve Rathi, A.K. (2005). Revised Monograph on Traffic Flow Theory: A State-of-the-Art Report, *Traffic Simulation,* (Eds. Gartner, R.H. and et.al).

Lighthill, M.J., ve Whitham, G.B. (1955). On Kinematic Waves. II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads, *Proceedings of the Royal Society: A229*, pp.317-347, London.

Lin, P.W., Kang, K.P. ve Chang, G.L. (2004). Exploring the effect of variable speed limit controls on highway work-zone operations, *Journal of Intelligent Transportation Systems,* 8(3), pp. 155–168, July.

Ludvigsen, H. (2007). Differentiated speed limits - how to implement this safely?, *European Transport Conference* 2007.

Maciejowski, J.M. (2002). *Predictive Control with Constraints*, Prentice Hall, Harlow, ISBN0-201-39823-0, United Kingdom.

May, A.D. (1990). *Traffic Flow Fundamentals*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

McHale, G. (2002). An Assessment Methodology for Emergency Vehicle Traffic Signal Priority Systems, *Ph.Dissertation*, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State.

MEB, (2009). Endüstriyel Otomasyon Teknolojileri Kapalı Çevrim Kontrolü, MEGEP (Mesleki Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi), Ankara.

Owen, J.C. (1996). *A Dynamic Traffic Control Model for Real Time Freeway Operations*, Master Thesis, Massachhuttes Institute of Technology.

Owen, L.E., Zhang, Y., Rao, L. ve McHale, G. (2000). Traffıc Flow Simulation Using Corsim, *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference.*

Papageorgiou, M. (1983). *Applications of Automatic Control to Traffic Flow Modelling and Control*, Vol. 50, Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer Verlag, Berlin.

Papageorgiou, M., Blosseville, J.M. ve Hadj-Salem, H. (1990). Modelling and real time control of traffic flow on the southern part of boulevard periherique in Paris. PartI: Modelling *Transportaton Research Part A*, Vol.24(5), pp.345-359.

Papageorgiou, M., Hadj-Salem, H. ve Blosseville, J.M. (1991). ALINEA: A local Feedback Conrol Law for On-Ramp Metering, *Transportation Research Record*, 1320 pp. 58-64, TRB, National Research Council, Washington, D.C.

Papageorgiou, M. (1991). *Concise Encyclopedia of Traffic&Transportation Systems*, Pergamon Press.

Papageorgiou, M., Hadj-Salem, H. ve Middelham, F. (1997). ALINEA local ramp metering- summary of field results, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No.1603, pp. 90-98, TRB, National research Council, Washington, D.C.

Papageorgiou, M. (1998). Some Remarks On Macroscopic Flow Modeling, *Transportation research A*, Vol.32(5), pp. 323–329.

Papageorgiou, M., Diakaki, C., Dinopoulou, V., Kotsialos, A., ve Yibing, W. (2003). Review of Road Traffic Control Strategies, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 91, no. 12, pp.2043-2067

Papageorgiou, M., Kosmatopoulos, E., Papamichail, L. ve Yibing, W. (2007). ALINEA maximises motorway throughput: an answer to flawed criticism, *Traffic Engineering and Control*, vol 48, issue 6, pp. 271-276, Hemming Group, UK.

Pardalos, P.M. ve Resende, M.G.C. (2002). *Handbook of Applied Optimization*. Oxford University Press, Oxford.

Park, B. ve Yadlapati, **S.** (2004). Development and Testing of Variable Speed Limit Control Logics for Work Zones Using Simulation. *Technical Report* UVACTS-13-0-43, Centre for Transportation Studies, University of Virginia.

Parker, M.R., ve Tsuchiyama, K.H. (1985). Methods for Reducing Large Speed Differences in Traffic Streams,Volume 1-Inventory of Methods. FHWA/RD-85/103. Martin R.Parker & Associates, Inc., Canton, Mich., pp.124, August.

Payne, H.J. (1971). Models of Freeway Traffic Flow. *In Simulation Council Proc.*, Volume 1, pp. 51–61.

PIARC. (1999). Committee on Intelligent Transport, *ITS Handbook 2000: Recommendations from the World Road Association,* London.

Rakha, H. ve Crowther, B. (2002). Comparison Of Greenshields, Pipes, And Van Aerde Car-Following and Traffic Stream Model**,** *Transportation Research Record* No. 1802, Traffic Flow Theory and Highway Capacity 2002.

Rama, P. (1999). Effects of Weather-Controlled Variable Speed Limits and Warning Signs on Driver Behavior, *Transportation Research Record* No. 1689, pp.53-59, Washington, DC.

Richards, P.I. (1956). Shock Waves on the Highway, *Operations Research,* Vol.4, pp. 42-51, February.

Robinson, M. (2000). Examples of Variable Speed Limit Application, Speed Management Workshop, *TRB 79th Annual Meeting*, 9 January.

Sagerg, F. (2000). Automatic Enforcement Technologies and Systems, Working paper 7, RO-98-RS.3047 of the Escape Project. Technical Research Center of Finland.

Scabardonis, A. ve May, A. (1998). Simulation Models for Freeway Corridors: State of the Art and Research Needs, 77th *Annual Meeting Transportation Research Board*, Washington, D.C, January.

Scariza, J.F. (2003). *Evaluation of Coordinated and Local Ramp Metering Algorithms using Microscopic Traffic Simulation*, MIT Master Thesis.

Scarbardonis, A. (2002). Modelling the Santa Monica Freeway Corridor: Simulation Experiments, California PATH Research Report UCB-ITS-PRR-2002-1.

Sisiopiku, **V.P.** (2001). Variable Speed Control: Technologies and Practice *Proceedings of the 11th Annual Meeting of ITS America.*

Sisiopiku, V.P., Das, A. ve Sullivan, A. (2005). Applications of Freeway Ramp Metering in Alabama, UTCA Report 04203, Birmingham, Alabama.

Smulders, S. (1990). Control of Freeway Traffic Flow by Variable Speed Signs, *Transp.Res.PartB,* 24(2) pp.111–132.

Smulders, S. (1992). Control by Variable Speed Signs: Results of the Dutch Experiment. *6th International Conference on Road Traffic Monitoring and Control.*

Solomon, D. (1964). Accidents on Main Rural Highways Related to Speed, Driver and Vehicle. Washington: Bureau of Public Roads, Department of Commerce.

Şahin, İ, Akyıldız, G., Zorer, A. ve Gedizlioğlu, E. (2004). Uzun Otoyol Kuyruklarının İncelenmesi ve İyileştirme Stratejilerinin Araştırılması, Tübitak Araştırma Projesi Gelişme Raporu, İÇTAG-I920.

Taha, H.A. (2000). *Yöneylem Araştırması*, Çevirenler: Ş.A. Baray ve Ş. Esnaf, Literatür Yayıncılık, İstanbul.

The Mathworks. (2009). MATLAB Optimization Toolbox, User's Guide.

TRB. (1998). Managing Speed: Review of Current Practices for Setting and Enforcing Speed Limits, Special Report 254, Effect of Speed Limits on Speed Distributions and Highway Safety, Washington DC.

TRB. (2000). Highway Capacity Manual, National Research Council, Washington DC.

Turley, C. (2007). *Calibration Procedure for A Microscopic Traffic Simulation Model*, Thesis of Master, Brigham Young University.

Ulucan, A. (2007). *Yöneylem Araştırması*, Siyasal Kitabevi, Ankara.

USDOT. (1999). Innovative Traffic Control Technology and Practice in Europe, Washington DC.

USDOT. (2003). *Manual on Uniform Traffic Control Device*s, Federal Highway Administration, Washington DC.

Vukanovic, S. (2006). Intelligent Link Control Framework with Empirical Objective Function: INCA, Dissertation, Technischen Universität München.

Wardrop, J.G. (1952). Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, PartII, Volume I, pp.325-362.

Warren, D. (2000). Speed Management Workshop, March 6, Dallas, TX.

WDOT (Wisconsin Department of Transportation). (2000). ITS Systems Design Manual.

Wilkie, J.K. (1997). Using Variable Speed Limit Signs to Mitigate Speed Differentials Upstream of Reduced Flow Locations. Southwest Region University Transportation Center - *Compendium: Graduate Student Papers on Advanced Surface Transportation Systems*, TTI, College Station, TX.

Yayla, N. (2004). *Karayolu Mühendisliği*, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Yeroğlu, C. (2001). *Üretim ve Servis Sistemlerinde Pratik Simülasyon Teknikleri*, Atlas Yayın, İstanbul.

Zackor, H. (1979). Self Sufficient Control of Speed on Freeways, ITE Proceedings of the International Symposium on Traffic Control Systems, Vol. 2A, pp.226-247. Berkeley, California.

Zhang, M., Kim, T., Nie, X., Jin, W., Chu, L. ve Recker, W. (2001). Evaluation of On-ramp Control Algorithms. California Path program, Institute of Transportation studies, University of California, Berkeley. Final report for MOU 3013, ISSN 1055-1425

Zhang, H.M. (2003). On the Consistency of a class of traffic models, Transportation Research Part B: Methodological, 37(1), pp.101-105.

Zhang, J., Boitor, A. ve Ioannou, P. (2005). Design and Evaluation of a Roadway Controller for Freeway Traffic, *Proceedings of the 8th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Vienna, Austria, September 13-16.

Zorer, A. (2003). Katılım Kontrolü Simülasyonu: Boğaziçi Köprüsü ve Çevreyolunda Bir Uygulama, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul.

Cansever, G. (2007). Otomatik Kontrole Giriş, Ders Notları. Alındığı tarih: 05.06.2007, http://www.yildiz.edu.tr/~cansever/oto/D1.pdf

Google Earth. (2007). Alındığı tarih: 01.10.2007, http://www.Googleearth.com.

İBB, (2007). İstanbul Şehir Rehberi. Alındığı tarih: 08.10.2007, http://sehirrehberi.ibb.gov.tr

MDOT. (2008). Advanced CORSIM Training Manual. Alındığı tarih: 06.05.2008, www.dot.state.mn.us/trafficeng/modeling/resources/CORSIMcalibration.pdf.

Url-1 < *http://www.itsoverview.its.dot.gov*>, alındığı tarih, 27.02.2009.

Url-2 <*http://www2.napier.ac.uk/euramp/eu_sites.htm*>, alındığı tarih, 20.08.2011.

Url-3 <*http://www.fhwa.dot.gov/policy/otps/bottlenecks*> alındığı tarih, 10.06.2011.

Url-4 <*http://ops.fhwa.dot.gov/freewaymgmt/publications/frwy_mgmt_handbook*> alındığı tarih 11.11.2006.

Url-5 <*http://www.iwsafety.com*> alındığı tarih, 14.08.2010.

Url-6 <*http://www.coopers-ip.eu*> alındığı tarih, 01.05.2005.

Url-7<*http://www.dot.ca.gov/hq/tsip/microsim/whatis_modeling.html*> alındığı tarih, 01.04.2008.

EKLER

EK A: İstasyonlara ait 1 dakikalık türetilmiş değişkenler
EK B: metanet1 işlevi MATLAB kaynak kodu
EK C: metanet2 işlevi MATLAB kaynak kodu
EK D: metanet2 işlevi MATLAB kaynak kodu

EK A: İstasyonlara ait 1 dakikalık türetilmiş değişkenler

Çizelge A.1: İstasyonlara ait 1 dakikalık türetilmiş değişkenler

	OS1 İSTASYONU			OS2 İSTASYONU		
Zaman (Dakika)	Hız (km/sa)	Akım (taş/sa)	Yoğunluk (taş/km)	Hız (km/sa)	Akım (taş/sa)	Yoğunluk (taş/km)
1	50	6240	34	46	6360	46
2	50	6240	34	46	6360	46
3	85	3600	12	81	4740	20
4	94	5520	21	81	4980	20
5	99	4440	15	90	4560	17
6	97	4740	16	93	4860	18
7	97	4500	14	88	4500	17
8	92	4260	14	95	4440	16
9	99	4980	18	88	4860	19
10	97	4260	13	101	4740	16
11	99	5280	20	98	4680	16
12	87	5460	19	85	5640	22
13	102	4500	16	81	4920	20
14	99	4920	15	88	4680	18
15	90	5580	20	83	5580	22
16	111	5280	20	77	5160	22
17	90	5460	13	93	5460	20
18	85	5760	21	93	5040	18
19	94	5520	19	85	5280	21
20	92	4200	13	101	4440	15
21	97	4740	17	98	4920	17
22	97	4980	16	93	4320	16
23	99	4500	16	90	4800	18
24	111	4560	15	88	2880	11
25	97	4620	14	105	4380	14
26	97	5040	17	85	5100	20
27	97	5700	19	90	5520	20
28	87	5460	20	74	5520	25
29	94	4200	15	79	4500	19
30	99	4800	17	88	4920	19
31	94	5040	15	95	5400	19
32	90	4680	16	93	4740	17
33	97	5580	19	93	5700	21
34	97	5100	14	83	4620	19
35	102	4380	12	108	4740	15
36	99	4800	17	90	4200	16
37	97	4020	14	88	4740	18
38	92	4800	15	90	4980	18
39	99	5040	17	98	4320	15
40	90	4620	14	98	5400	18
41	87	5460	20	98	4860	17
42	69	5460	21	88	5760	22
43	99	5220	17	85	5160	20
44	90	5580	21	88	5340	20
45	82	5340	19	81	4920	20

Çizelge A.1 (devam) : İstasyonlara ait 1 dakikalık türetilmiş değişkenler

	OS1 İSTASYONU			OS2 İSTASYONU		
Zaman (Dakika)	Hız (km/sa)	Akım (taş/km)	Yoğunluk (taş/km)	Hız (km/sa)	Akım (taş/km)	Yoğunluk (taş/km)
46	90	5820	21	83	5340	21
47	87	5820	22	79	5760	24
48	80	6300	24	79	5880	25
49	97	5220	19	62	6000	32
50	87	5880	24	39	4860	42
51	77	5700	26	34	5460	53
52	64	4920	25	24	4680	65
53	57	5040	30	29	4920	57
54	49	5580	42	27	5220	64
55	39	4800	46	16	2520	54
56	15	2040	67	17	4500	89
57	17	5160	60	25	5160	68
58	29	5340	53	17	4800	95
59	25	4440	55	15	4920	108
60	13	3660	74	16	3960	82
61	10	3480	87	16	3780	77
62	12	3300	86	16	3120	63
63	10	3600	91	14	3540	87
64	11	2520	84	16	3780	81
65	11	2820	103	17	3120	61

EK B metanet1 işlevi MATLAB kaynak kodu

```
function [P V Q W]=metanet1(x)
global D;
global PCAL;
global VCAL;
global QCAL;
global WCAL;
global Lm;
global qcap;
global lem;
global dlambda;
%% X başlang?ç vektöründeki elemanlar isimleriyle de?işkenlere atan?yor.
delta=zeros(1,6); pmax=zeros(1,6);
kappa=x(1);       mu_low=x(2);      mu_high=x(3);
tau=x(4);         fi=x(5);          delta(3)=x(6);
delta(5)=x(7);    vfree=x(8:13);    pcritic=x(14:19);
am=x(20:25);      pmax(3)=x(26);    pmax(5)=x(27);
gama=x(28);

%% Metanet'in hesaplayacak bos matrisler yaratiliyor, Bu matrislerin
%% önceden belirlenmesi çalisma hizini arttiriyor.
[zaman bag]=size(D);
W=0*D;
P=0*D;
V=0*D;
Q=0*D;
V1=0*D;
relaxion=0*D;
convection=0*D;
anticipation=0*D;
merging=0*D;
weaving=0*D;
pout=zeros(zaman);
%baslangic degerleri hesaplanacak metanete matrislerine yükleniyor
%ilk deger vektörlerinin belirlenmesi
P(3,:)=PCAL(3,:);
V(3,:)=VCAL(3,:);
Q(3,:)=QCAL(3,:);
W(3,:)=WCAL(3,:);
pout(3)=PCAL(3,6);

%Dönüstürme islemi (saniyeler saate)
tau=(1/3600)*tau;
T=10/3600;

for k=3:zaman-1
    for i=1:bag


%% ilk bag ve ramplara ait qon degerlerinin hesabi

if (i==1)                                              %
    %V_ext=vfree(i)*exp((-1/am(i))*(P(k,i)/pcritic(i))^am(i)); %Control için
farkli alinyor
v_lim=min(V(k,i));
V_ext=min(vfree(i)*exp((-1/am(i)))); %Control için farkli alinyor
q_cap=Lm(i)*V_ext*pcritic(i);
q_spd=Lm(i)*v_lim*pcritic(i)*(-am(i)*log(v_lim/vfree(i)))^(1/am(i));
q_1  =D(k,i)+W(k,i)/T;

if v_lim<(vfree(i)*exp((-1/am(i))))
q_lim=gama*q_spd;
else
q_lim=gama*q_cap;
end
```

```
qink=min(q_1,q_lim);
vikm1=v_lim;
W(k+1,i)=W(k,i)+T*(D(k,i)-qink);
qramp=0;

else                                                    %

vikm1=V(k,i-1);
qink=Q(k,i-1);
% Ramp katılımları için gerekli olan qon değerinin hesabı
q1    =D(k,i)+W(k,i)/T;
q2    =qcap(i)*min(1,(pmax(i)-P(k,i))/(pmax(i)-pcritic(i)));
qramp =min([q1 q2]);
W(k+1,i)=W(k,i)+T*(D(k,i)-qramp);

end

if(W(k,i)<=0)
    W(k,i)=0;
end

%% ***************pik1%qout hesabı*****************************
if (i==bag)
    pik1=pout(k,i);
   else%
    pik1=P(k,i+1);
end                                                     %
% Sok dalgası ile ilgili olan parametrenin yoğunluklar kontrol edilerek
% seçilmesi
if (pik1>=P(k,i))
    fmu=mu_high;
else
    fmu=mu_low;
    end

%% fmetanet
P(k+1,i)=P(k,i)+(T/(lem(i)*Lm(i)))*(qink+qramp-Q(k,i));
if (P(k+1,i)<=0)
        P(k+1,i)=P(k,i);
end

V1(k+1,i)=vfree(i)*exp((-1/am(i))*(P(k,i)/pcritic(i))^am(i));
relaxion(k+1,i)     =(T/tau)*(V1(k+1,i)-V(k,i));
convection(k+1,i)   =(T/lem(i))*V(k,i)*(vikm1-V(k,i));
anticipation(k+1,i)=(fmu*T*(pik1-P(k,i)))/(tau*lem(i)*(P(k,i)+kappa));
merging(k+1,i)=(delta(i)*T*qramp*V(k,i))/(Lm(i)*lem(i)*(P(k,i)+kappa));
weaving(k+1,i)=(T*fi*dlambda(i)*P(k,i)*V(k,i)^2)/(lem(i)*Lm(i)*pcritic(i));
V(k+1,i)=V(k,i)+relaxion(k+1,i)+convection(k+1,i)-anticipation(k+1,i)-
merging(k+1,i)-weaving(k+1,i);

if V(k+1,i)<=0
        V(k+1,i)=V(k,i);
end

Q(k+1,i)=V(k+1,i)*P(k+1,i)*Lm(i);
    i=i+1;
    end %i ye ait end

pout(k+1)=min([P(k+1,bag) pcritic(bag)]);
k=k+1;
end %%k ya ait end
```

EK C: metanet2 işlevi MATLAB kaynak kodu

```
function [P V Q W DD qramp ]=metanet2(vcontrol)
%vcont 5x6 boyutunda kontrolmatrisidir. (1 dakikalık cinsten)
%Bu işlev çağrılmadan önce D (talep), pp,vv,qq,ww ile metanetin
kalibre edilmiş parametrelerini
%barındıran x vektörü ve kesiite ait geometrik parametreler global
olarak tanımlanmalıdır.
global D;
global pp;
global vv;
global qq;
global ww;
global Lm;
global qcap;
global lem;
global dlambda;
global x;
global NP
global NC
global tp
%% X başlang?ç vektöründeki elemanlar isimleriyle de?işkenlere
atan?yor.
delta=zeros(1,6); pmax=zeros(1,6);
kappa=x(1);       mu_low=x(2);     mu_high=x(3);
tau=x(4);         fi=x(5);         delta(3)=x(6);
delta(5)=x(7);    vfree=x(8:13);   pcritic=x(14:19);
am=x(20:25);      pmax(3)=x(26);   pmax(5)=x(27);
gama=x(28);
pmax(3)=120;
%% Metanet'in hesaplayacak bos matrisler yaratiliyor, Bu matrislerin
%% önceden belirlenmesi çalisma hizini arttiriyor.
[UFUK bag]=size(vcontrol);
W=zeros(NP*6,bag);
P=zeros(NP*6,bag);
V=zeros(NP*6,bag);
Q=zeros(NP*6,bag);
V1=zeros(NP*6,bag);
TTS1=zeros(NP*6,bag);
relaxion=zeros(NP*6,bag);
convection=zeros(NP*6,bag);
anticipation=zeros(NP*6,bag);
merging=zeros(NP*6,bag);
weaving=zeros(NP*6,bag);
qramp=zeros(NP*6,bag);
pout=zeros(NP*6,1);
DD=D(tp:tp-1+NP*6,:);

%baslangic degerleri hesaplanacak metanete matrislerine yükleniyor
%ilk deger vektörlerinin belirlenmesi
P(1,:)=pp;
V(1,:)=vv;
Q(1,:)=qq;
W(1,:)=ww;
pout(1)=pp(1,6);

%Dönüstürme islemi (saniyeler saate)
tau=(1/3600)*tau;
T=10/3600;
```

```
for k=1:UFUK-1

       for i=1:bag

         if (k>=6&i==3)
             k
         end

if(k<=NC*6)
vc=vcontrol(k,i);
else
vc=vcontrol(NC*6,i);
        end

        %% ilk bag ve ramplara ait qon degerlerinin hesabi
    if (i==1)
            v_lim=min(V(k,i),vc)
            greenS_V=vfree(i)*exp((-
1/am(i))*(pcritic(i)/pcritic(i))^am(i));
            V_ext= min(vc,greenS_V); %Control için farkli alinyor
%Control için farkli alinyor
            q_cap=Lm(i)*V_ext*pcritic(i);
            q_spd=Lm(i)*v_lim*P(k,i)
            q_1  =DD(k,i)+W(k,i)/T;

            if v_lim<greenS_V
                q_lim=gama*q_spd;
            else
                    q_lim=gama*q_cap;
            end

            qink=min(q_1,q_lim);
            vikm1=V(k,i);
            W(k+1,i)=W(k,i)+T*(DD(k,i)-qink);
            qramp(k,i)=0;

        else                                                    %

            vikm1=V(k,i-1);
            qink=Q(k,i-1);
            % Ramp katılımları için gerekli olan qon değerinin
hesabı
            q1 =DD(k,i)+W(k,i)/T;
            t2 =(pmax(i)-P(k,i))/(pmax(i)-pcritic(i));
            if (t2<0) t2=0; end
            q2    =qcap(i)*min(1,t2);
            qramp(k,i) =min([q1 q2]);
            W(k+1,i)=W(k,i)+T*(DD(k,i)-qramp(k,i));
        end

        if(W(k,i)<=0)
            W(k,i)=0;

        end

        %% ***************pik1%qout
hesabı*****************************
        if (i==bag)
            pik1=pout(k);
        else
```

```
            pik1=P(k,i+1);

        end                                                    %

        % Sok dalgası ile ilgili olan parametrenin yoğunluklar
kontrol edilerek
        % seçilmesi
        if (pik1>=P(k,i))
            fmu=mu_high;
        else
            fmu=mu_low;
        end

        %% fmetanet
        P(k+1,i)=P(k,i)+(T/(lem(i)*Lm(i)))*(qink+qramp(k,i)-Q(k,i));
        if (P(k+1,i)<=0)
            P(k+1,i)=P(k,i);
        end
        green_S=vfree(i)*exp((-1/am(i))*(P(k,i)/pcritic(i))^am(i));
        V1(k+1,i)=min(vc,green_S);
        relaxion(k+1,i)     =(T/tau)*(V1(k+1,i)-V(k,i));
        convection(k+1,i)   =(T/lem(i))*V(k,i)*(vikm1-V(k,i));
        anticipation(k+1,i)=(fmu*T*(pik1-
P(k,i)))/(tau*lem(i)*(P(k,i)+kappa));

merging(k+1,i)=(delta(i)*T*qramp(k,i)*V(k,i))/(Lm(i)*lem(i)*(P(k,i)+
kappa));

weaving(k+1,i)=(T*fi*dlambda(i)*P(k,i)*V(k,i)^2)/(lem(i)*Lm(i)*pcrit
ic(i));
        V(k+1,i)=V(k,i)+relaxion(k+1,i)+convection(k+1,i)-
anticipation(k+1,i)-merging(k+1,i)-weaving(k+1,i);

if V(k+1,i)<=0
            V(k+1,i)=V(k,i);
        end

        if i==1
            Q(k+1,i)=min(qcap(i),V(k+1,i)*P(k+1,i)*Lm(i));
        else
            Q(k+1,i)=V(k+1,i)*P(k+1,i)*Lm(i) ;
        i=i+1;
        end

    end %i ye ait end

pout(k+1)=min([P(k+1,bag) pcritic(bag)]);
k=k+1;

end %%k ya ait end
```

EK D metanet2 işlevi MATLAB kaynak kodu

mpc_init.m

```
Clear
clear global
global NP
global NC
global tp
global vv
global pp
global qq
global ww
global lem;
global Lm;
global D;
global qcap;
global dlambda;
global lem;
global Lm;
global x;
global katakim
global sayac
sayac=1;

NP=10;
NC=5;
D=dlmread('c:\\outputs\\D2.mtx');
dlambda=[0 0 0.2 0 0.5 0];
Lm=[3 3 3.2 3 3.5 3]; %Bağ şerit sayısı vektörü
qcap=[6000 0 2000 0 4000 0]; %kapasite vektörü
lem=0.001*[262 500 275 634 500 500]; %Bağ uzunlukları,
dlambda=[0 0 0 0 0 0];
x=dlmread('c:\outputs\xF7'); %metanet parametreleri yüklemesi
tp=dlmread('c:\\outputs\\lastminute_tp'); %sim. zamanını oku
pp=dlmread('c:\\outputs\\lastminute_P');  %son 1 da. yoğunluk oku
qq=dlmread('c:\\outputs\\lastminute_Q');  %son 1 da. akım oku
vv=dlmread('c:\\outputs\\lastminute_V');  %son 1 da. hız oku
rp=dlmread('c:\\outputs\\lastminute_rP'); %son 1 da. kat. yoğ.oku
ww=dlmread('c:\\outputs\\lastminute_W');  %son 1 da. kuyruk oku
hig=100;
low=50;

trial=1;
xx=zeros(trial,NC*6);

for i=1:trial
v0=(low+(hig-low)*abs(rand(1,NC*6)));   %ones(1,NC)*75;
vL=ones(1,NC*6)*50;
vU=ones(1,NC*6)*100;
%Pattersearch seçeneklerinin belirlenmesi
options = psoptimset;
options = psoptimset(options,'TolX', 0.1);
options = psoptimset(options,'TolFun', 0.01);
options = psoptimset(options,'MaxIter', 2000);
options = psoptimset(options,'MaxFunEvals',6000);
options = psoptimset(options,'Display', 'off');
options = psoptimset(options,'OutputFcns', { [] });
options = psoptimset(options,'PlotFcns', {  @psplotbestf
[xx(i,:),fval(i),exitflag,output] = ...
patternsearch(@mpc_objective,v0,[],[],[],[],vL,vU,[],options);
sayac=sayac+1;
```

```
End
qon=katakim{1};
mqon=mean(qon);
ramp1=mqon(3)/rp(1,3);
ramp2=mqon(5)/(2*rp(1,5));
C=[xx(1,1:6) ramp1 ramp2];
dlmwrite('c:\outputs\vcontrolMPH',int16(0.6213712*C),'\t');
```

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Hatice Göçmen Demir

Doğum Yeri ve Tarihi: Wetzlar, 1972

Lisans Üniversite: Selçuk Üniversitesi

Yayın Listesi:

-Göçmen (Demir), H., Demir, Y.K.. (1999). Yoğun Kent Merkezlerinde Trafik Tıkanıklıklarının Giderilmesi İçin Taşıt Hareketlerinin Sınırlandırılması, Kent Yönetimi İnsan ve Çevre Sorunları Sempozyumu '99, Istanbul. (Ulusal Bildiri)

-Kılınçaslan, T., **Göçmen (Demir), H.** ve diğ. (1999). Short Actions for Restructring the Transport System in Istanbul After A Major Earthquake, ITU-IAHS International Conference on The Kocaeli Earthquake 17 August 1999, Istanbul. (Uluslararası Poster Bildiri)

-**Demir, H.G**., Demir, Y.K. (2000). "Sürücü Belgelerinin Verilmesindeki Yetersizlikler ve Sürücü Kursları", 4th International Congress on Advances in Civil Engineering, 1-3 Kasım 2000, Gazi Magosa.

-**Demir, H.G.** (2001). Trafikte Tıkanıklık: Talep ve Arz Yönetimi, Yükseklisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Istanbul.

-Demir, H.G., Yayla, N. (2004). Evaluation of Telecommuting from the Point of View of Employer and Employees, WCTR, 10.th World Conference on Transportation Research, Istanbul (04-08 Temmuz 2004). (Uluslararası Bildiri Özeti)

-**Demir, G.H.,** Gedizlioğlu, E. (2004). Variable Message Signs: How Can Be Used In Istanbul? 10th World Conference 2004 on Transport Research, July 4-8, Istanbul (Abstract Paper)

-Demir, G.H. and Demir, Y.K. (2008). Availability and Accuracy of Traffic Data: An Example for Real Time RTMS Data, International Workshop on Traffic Data Collection &its Standardization, September8-9, Barcelona.

-Demir, Y.K and **Demir, G.H.,** (2010). The Use of Variable Speed Limits for Traffic Control, 17th ITS World Congress, October 25-29, Busan.

-**Demir, G.H** and Demir, Y.K., 2010, Variable Message Signs: The State of Practice, ITS World Congress, October 25-29, Busan.