

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI

ÇİFT MODLU ULAŞIM SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR
YAKLAŞIM OLARAK METROCAR

DOKTORA TEZİ

MEHMET BOZUYLA

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2019

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI**



**ÇİFT MODLU ULAŞIM SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR
YAKLAŞIM OLARAK METROCAR**

DOKTORA TEZİ

MEHMET BOZUYLA

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2019

KABUL VE ONAY SAYFASI

MEHMET BOZUYLA tarafından hazırlanan "ÇİFT MODLU ULAŞIM SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR YAKLAŞIM OLARAK METROCAR" adlı tez çalışmasının savunma sınavı 29.08.2019 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman
Prof. Dr. Abdullah T. TOLA



Üye
Prof. Dr. Yetiş Şazi MURAT



Üye
Prof. Dr. Sezai TOKAT



Üye
Doç. Dr. Abdullah BAŞÇI



Üye
Dr. Öğr. Üyesi M. Zübeyir ÜNLÜ



Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 02/10/2019.. tarih ve 39./23.22 sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Prof. Dr. Uğur YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

**Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler
Koordinasyon Birimi tarafından 2015FBE028 nolu proje ile desteklenmiştir.**

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.



MEHMET BOZUYLA

ÖZET

ÇİFT MODLU ULAŞIM SİSTEMLERİ İÇİN YENİ BİR YAKLAŞIM OLARAK METROCAR

DOKTORA TEZİ

MEHMET BOZUYLA

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. ABDULLAH T. TOLA)

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2019

Ulaşım hizmetlerinin en önemli kavramlarından biri olan araç teknolojisi, üretim maliyetinin düşmesi ve kişisel araçlara olan talebin artmasıyla hızlı bir gelişim ve değişim süreci kaydetmiştir. Rekabetçi piyasanın etkisiyle araç sayısında meydana gelen artış; trafik sıkışıklığı, gürültü ve çevre kirliliği gibi ulaşım problemlerinin oluşmasına sebep olmaktadır.

Bu tez çalışması ile şehir içi ulaşım problemlerine çözüm sunacak yeni çift modlu bir ulaşım sistemi geliştirilmiştir. Önerilen bu sistem MetroCar Sistemi (MCS) olarak isimlendirilmiş, çok etmenli sistemler yaklaşımı ile tasarlanmış ve NetLogo etmen programlama ortamında hazırlanan mikroskobik bir benzetim modelinde test edilmiştir.

MCS, tek kişilik araçlar ile yapılan yeni çift modlu bir şehir içi ulaşım sistemidir. Bu sistem mevcut çift modlu ulaşım sistemlerinden farklı olarak şerit değişimine imkân sunan yeni bir altyapı gerektirmektedir. Birden fazla ulaşım modunun birleştirilmesi ile kapıdan kapıya ulaşım talebinin sağlanmasını amaçlayan MCS, çok şeritli bir yapıda tasarlanmıştır. Kent ulaşımının belli bölgelerinde bireysel kullanılabilen MCS araçları, hat özerkliğine sahip MCS yollarında otonom olarak hareket etmektedir. Bu sayede farklı bir ulaşım sistemine gerek duyulmadan kapıdan kapıya hızlı ve trafiksiz bir ulaşım sağlanmakta ve sürüş zamanı farklı bir aktivitede kullanılabilir. Bu çalışma bireysel araç kullanımı ile ulaşım esnekliği sağlarken otonom kullanım seçeneği ile özel şoförlü araç rahatlığı sunmaktadır.

Tez kapsamında; sistem etmeni, araç etmeni ve düğüm etmeni olarak isimlendirilen üç farklı etmen türü tanımlanmış ve bu etmenlerin görev ve sorumluluk alanları belirlenmiştir. Çok etmenli sistem yapısına uygun bir biçimde tüm etmenler ilişkilendirilmiş ve iletişim esasları tespit edilmiştir. Ayrıca geliştirilen protokoller ve üretilen algoritmalarla araçların MCS yollarına bağlanma veya ayrılmalara, hızlanma veya yavaşlamaları, diğer etmenler ile olan iletişimleri modellenmiştir. MCS'nin verimliliği ve doğruluğu geliştirilen benzetim modeli ile test edilmiştir. Benzetim sonuçları, bu sistemin şehir içi ulaşımında uygulanabilir ve güvenilir bir sistem olduğunu kanıtlamaktadır.

Sonuç olarak, büyük şehirlerde ulaşım problemlerini çözmek amacıyla MetroCar Sistemi adında şerit değişimine izin veren, kolayca uygulanabilir ve çok şeritli olarak inşa edilecek yeni bir çift modlu ulaşım sistemi önerilmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: MetroCar Sistemi, Çift Modlu Ulaşım, sürücüsüz araçlar, NetLogo, akıllı şehirler

ABSTRACT

METROCAR AS A NEW APPROACH FOR DUAL-MODE TRANSPORTATION SYSTEMS

PH.D THESIS

MEHMET BOZUYLA

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
(SUPERVISOR:PROF. DR. ABDULLAH T. TOLA)

DENİZLİ, AUGUST 2019

Vehicle technology, one of the most important concepts of transportation systems, has achieved a rapid development and change process because of the decrease in production cost and the increase in the demand of personal vehicles. The increase in the number of vehicles due to the competitive market has caused transportation problems such as traffic congestion, noise and environmental pollution.

In this dissertation, a new dual-mode transit system has been developed to provide solutions for urban transportation problems. The proposed system, named MetroCar System (MCS), is designed with a multi-agent system approach and tested in a microscopic simulation model which is prepared in NetLogo agent programming environment.

MCS is a new dual-mode urban transportation system with one-seater vehicles. It requires a new infrastructure that allows lane change, unlike the existing dual-mode transit systems. The MCS is designed in a multi-lane structure with the aim of providing door-to-door transportation demand by combining to multiple modes of transport. MCS vehicles, which can be controlled by driver in certain areas of urban transport, act autonomously on the MCS roads, which are grade-separated. In this way, a fast and traffic-free transportation is provided without the need another transportation system and driving time also can be used in a different activity. This system provides the flexibility of transportation with the use of personal control option while it offers the convenience of chauffeur-driven car with the autonomous control option.

In the scope of the dissertation; three different agent types, namely system agent, vehicle agent and node agent, have been defined and their tasks and problem areas have been identified. In accordance with the multi-agent system structure, all agents were associated and communication principles of them were determined. In addition, new protocols and algorithms have been modeled for MCS in order to enter and exit MCS roads, accelerate or decelerate to vehicle speed, and communicate with other agents. The efficiency and accuracy of the MCS have been tested with the developed simulation model. The simulation results prove that the MCS is a feasible and reliable system for urban transportation.

As a result, a new dual-mode transit system, named MetroCar System, which can be allowed to lane change, applied to easily and built in multi-lane has been proposed to solve transportation problems of metropolitan cities.

KEYWORDS: MetroCar System, Dual-Mode Transit, automated vehicles, NetLogo, smart cities

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
TABLO LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ.....	ix
KISALTMALAR LİSTESİ.....	x
ÖNSÖZ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tez Konusu.....	1
1.2 Literatür Özeti	2
1.2.1 Sürücüsüz Araç Teknolojisi.....	2
1.2.2 Gelişmiş Ulaşım Sistemleri	5
1.2.3 Trafik Benzetim Modelleri	11
1.3 Tezin Amacı	14
1.4 Yöntem ve Tez Tanıtımı.....	15
2. ŞEHİR İÇİ ULAŞIM SİSTEMLERİ.....	17
2.1 Giriş	17
2.2 Şehir İçi Ulaşım Sistemleri.....	17
2.2.1 Bireysel Ulaşım Sistemleri	18
2.2.2 Toplu Ulaşım Sistemleri	20
2.2.2.1 Karayolu Toplu Ulaşım Sistemleri	21
2.2.2.2 Demiryolu Toplu Ulaşım Sistemleri	21
2.3 Gelişmiş Ulaşım Sistemleri	23
2.4 Şehir İçi Ulaşım Sistemlerinin Tercih Ölçütleri.....	24
2.4.1 Uygulanabilirlik	24
2.4.2 Esneklik	25
2.4.3 Zaman	25
2.4.4 Hijyen.....	25
2.4.5 Konfor	25
2.4.6 Zaman Kullanımı	25
2.4.7 Kişisel Güvenlik	26
2.4.8 Araç ve Sistem Güvenliği	26
2.4.9 Araç ve Altyapı Maliyeti	26
2.4.10 Yakıt Maliyeti	26
2.4.11 Hat Özerkliği.....	27
2.4.12 Trafik Sıkışıklığı	27
2.4.13 Çevre Kirliliği	27
2.5 Akıllı Ulaşım Sistemleri	27
2.6 Araçlar Arası Haberleşme Teknolojileri	29
2.6.1 Bluetooth.....	30
2.6.2 ZigBee.....	30
2.6.3 Wi-Fi.....	30
2.6.4 Özel Kısa Mesafeli İletişim	31

3. ETMEN TEKNOLOJİSİ.....	32
3.1 Giriş	32
3.2 Etmen.....	32
3.2.1 Etmen Birincil Özellikleri.....	34
3.2.2 Etmen İkincil Özellikleri	35
3.3 Etmen Tanımlaması.....	36
3.4 Etmen Mimarileri	37
3.4.1 Basit Tepkisel Etmenler.....	37
3.4.2 Model Tabanlı Etmenler	38
3.4.3 Hedef Tabanlı Etmenler.....	38
3.4.4 Fayda Tabanlı Etmenler.....	39
3.4.5 Öğrenen Etmenler	40
3.5 Çok Etmenli Sistemler.....	40
3.6 Etmen Benzetimi	42
3.6.1 Mikroskobik Benzetim Modelleri.....	42
3.6.2 Mezoskopik Benzetim Modelleri.....	43
3.6.3 Makroskopik Benzetim Modelleri	43
3.7 Etmen Tabanlı Yazılım Geliştirme Ortamları ve NetLogo	43
4. METROCAR ULAŞIM SİSTEMİ.....	46
4.1 Giriş	46
4.2 MetroCar Ulaşım Sistemi Nedir?	46
4.3 Protokoller	50
4.3.1 Araç Protokolü	50
4.3.2 Yol Protokolü.....	52
4.3.3 Yol Giriş Protokolü.....	55
4.3.4 Giriş Yolu Bağlanma Protokolü	55
4.3.5 Araç Seyir Protokolü	55
4.3.6 Araç Takip Protokolü.....	56
4.3.7 Şerit Değişirme Protokolü	56
4.3.8 Yol Çıkış Protokolü	57
4.3.9 Acil Durum Protokolü	57
4.4 MCS Etmen Türleri ve Mimarileri	57
4.4.1 Sistem Etmeni	58
4.4.2 Düğüm Etmeni	58
4.4.3 Araç Etmeni	59
4.5 MCS Etmenler Arası İletişim	60
4.6 Etmen Sorumlulukları	65
4.6.1 Giriş Prosedürü	65
4.6.2 Takip Prosedürü	66
4.6.3 Birleşme Prosedürü.....	67
4.6.4 Şerit Değişim Prosedürü	68
4.6.5 Çıkış Prosedürü.....	69
4.7 MCS Benzetim Ortamı	70
5. METROCAR SİSTEMİ ALGORİTMA VE TESTLERİ	72
5.1 Giriş	72
5.2 Rulet Tekeri Seçim Algoritması.....	72
5.3 Düz Yol Takip Algoritması.....	72
5.3.1 Alçak Geçiren Filtre Metodu	79
5.3.2 Histerezis-1 Metodu.....	81
5.3.3 Histerezis-2 Metodu.....	82

5.4	Birleşme Algoritması	85
5.5	Şerit Değişim Algoritmaları	89
5.5.1	Mesafeye Göre Şerit Değişimi.....	92
5.5.2	Ortalama Hıza Göre Şerit Değişimi.....	94
5.5.3	Anlık Ortalama Hıza Göre Şerit Değişimi.....	96
5.5.4	Araç Sayısına Göre Şerit Değişimi.....	97
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER	100
7.	KAYNAKLAR.....	102
8.	ÖZGEÇMİŞ	108

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Şehir içi ulaşım türleri ve araçları	18
Şekil 2.2 : SAE araç otomasyon seviyeleri.....	19
Şekil 2.3 : Gelişmiş ulaşım sistemleri	23
Şekil 2.4 : V2V ve V2I haberleşme	29
Şekil 3.5 : Etmen ve bileşenleri	34
Şekil 3.6 : Basit tepkisel etmen mimarisi	38
Şekil 3.7 : Model tabanlı etmen mimarisi.....	38
Şekil 3.8 : Hedef tabanlı etmen mimarisi	39
Şekil 3.9 : Fayda tabanlı etmen mimarisi	40
Şekil 3.10 : Öğrenen etmen mimarisi	40
Şekil 3.11 : Örnek çok etmenli sistem	41
Şekil 3.12 : NetLogo ekran görünümü	44
Şekil 4.13 : MetroCar Sistemi'ne ait temsili görünüm	47
Şekil 4.14 : MCS özellikleri	48
Şekil 4.15 : Bazı çift modlu ulaşım sistemleri.....	49
Şekil 4.16 : MCS aracı.....	52
Şekil 4.17 : MCS yol tasarımı	52
Şekil 4.18 : Temsili a) normal, b) üç ve c) dört yönlü MCS yol düzeni.....	54
Şekil 4.19 : Sistem etmeni mimarisi	58
Şekil 4.20 : Düğüm etmeni mimarisi.....	59
Şekil 4.21 : Araç etmen mimarisi	60
Şekil 4.22 : MCS etmenleri arasındaki bağlantı şeması	61
Şekil 4.23 : Sistem etmeni sorumluluk alanı	61
Şekil 4.24 : N ₂₄ . düğüm etmeni sorumluluk alanı	62
Şekil 4.25 : Araç etmeni sorumluluk alanı	63
Şekil 4.26 : MCS etmenleri arasındaki bilgi aktarımı	64
Şekil 4.27 : Genel MCS benzetim süreci.....	65
Şekil 4.28 : Giriş prosedürü	66
Şekil 4.29 : Takip prosedürü.....	67
Şekil 4.30 : Birleşme prosedürü	68
Şekil 4.31 : Şerit değişim prosedürü.....	69
Şekil 4.32 : Çıkış prosedürü.....	69
Şekil 4.33 : MCS benzetim ortamı	70
Şekil 5.34 : Rulet tekeri seçim algoritması.....	72
Şekil 5.35 : a) İlk ve b) son durumda araç takibi.....	74
Şekil 5.36 : Araç yol kontrol düzeni.....	76
Şekil 5.37 : Takip algoritması akış diyagramı	77
Şekil 5.38 : Takip algoritması zamana göre a) hız ve b) konum değişimi	78
Şekil 5.39 : Takip algoritması normal hız değişim grafiği	79
Şekil 5.40 : 15. dereceden alçak geçiren filtre uygulanmış sistem.....	81
Şekil 5.41 : Histerezis-1 konuma bağlı hız durum şeması.....	81
Şekil 5.42 : Histerezis-1 uygulanmış sistem.....	82
Şekil 5.43 : Histerezis-2 konuma bağlı hız durum şeması.....	83
Şekil 5.44 : Histerezis-2 uygulanmış sistem.....	83
Şekil 5.45 : Histerezis-1 ve 15. dereceden AGF.....	84

Şekil 5.46 : Histerezis-2 ve 15. dereceden AGF.....	84
Şekil 5.47 : Yol bölümlemesi	85
Şekil 5.48 : Birleşme algoritması akış şeması	86
Şekil 5.49 : Birleşme algoritması a) 0. ms, b) 500. ms ve c) 1000. ms	87
Şekil 5.50 : Birleşme algoritması zamana göre a) hız ve b) konum grafiği	88
Şekil 5.51 : Birleşme algoritması zamana göre konum durumu.....	89
Şekil 5.52 : Örnek üç şeritli MCS yol parçası	90
Şekil 5.53 : Ön kabullere göre zorunlu durumlar	92
Şekil 5.54 : MŞA akış diyagramı.....	93
Şekil 5.55 : Link durumuna göre şeritler	95
Şekil 5.56 : OHŞA akış diyagramı	95
Şekil 5.57 : AHŞA akış diyagramı	97
Şekil 5.58 : AŞA akış diyagramı	98

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1 : Sürücüsüz araç firmaları ve hedeflenen seri üretim yılları	20
Tablo 2.2 : Kablosuz bağlantı teknolojileri ve özellikleri	31
Tablo 3.3 : Örnek etmenler için PEAS parametreleri	37
Tablo 4.4 : MCS ve diğer ulaşım sistemlerinin karşılaştırılması	48
Tablo 4.5 : MCS ve bazı çift modlu ulaşım sistemlerinin karşılaştırılması	49
Tablo 5.6 : AGF derecesine göre x_s hesabı	80
Tablo 5.7 : Simülasyon sabitleri.....	91
Tablo 5.8 : MŞA a) sisteme giren araç sayısı, b) ortalama hız bilgisi	94
Tablo 5.9 : OHŞA a) sisteme giren araç sayısı, b) ortalama hız bilgisi	96
Tablo 5.10 : AHŞA a) sisteme giren araç sayısı, b) ortalama hız bilgisi	97
Tablo 5.11 : AŞA (a) sisteme giren araç sayısı, (b) ortalama hız bilgisi	98

SEMBOL LİSTESİ

m	:	Metre
km	:	Kilometre
sn	:	Saniye
dk	:	Dakika
sa	:	Saat
ms	:	Milisaniye
τ	:	Yenileme Zamanı
α_{dec}	:	Yavaşlama İvmesi
α_{acc}	:	Hızlanma İvmesi
i,j,k,m,n	:	İndis Numaraları
S_{max}	:	Güvenli Duruş Mesafesi
δ	:	Güvenli Takip Mesafesi
v	:	Hız
x	:	Mesafe
a	:	İvme
V_i	:	i . Araç Etmeni
N_i	:	i . Düğüm Etmeni
L_i	:	i . Link
Δx_{min}	:	Toplam Minimum Takip Mesafesi
x_{size}	:	Araç Uzunluğu
x_s	:	Referans Mesafe
ϵ	:	Hata Miktarı Sabiti
ρ	:	Hız Miktarı Farkı Sabiti
Δx_M	:	Düğüm Noktasına Olan Mesafe
q	:	Link Uzunluğu
σ	:	Standart Sapma
μ	:	Ortalama Sabiti
q_1	:	Birinci Şerit Değişirme Mesafe Sabiti
q_2	:	İkinci Şerit Değişirme Mesafe Sabiti

KISALTMALAR LİSTESİ

SARTRE	:	Safe Road Trains for the Environment
CES	:	Consumer Electronics Show
MIT	:	Massachusetts Institute of Technology
PRT	:	Personal Rapid Transit
GRT	:	Group Rapid Transit
DMT	:	Dual-Mode Transit
DRS	:	Driverless Rail Systems
CVS	:	Computer-Controlled Vehicle System
ULTra	:	Urban Light Transport
RUF	:	Rapid Urban Flexible
BPLRT	:	The Bukit Panjang Light Rail Transit
Aimsun	:	Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks
TRANSIMS	:	The Transportation Analysis and Simulation System
CORSIM	:	Corridor Simulation
FHWA	:	Federal Highway Administration
SUMO	:	Simulation of Urban Mobility
MCS	:	MetroCar Sistemi
AUS	:	Akıllı Ulaşım Sistemleri
OGS	:	Otomatik Geçiş Sistemi
KGS	:	Kartlı Geçiş Sistemi
HGS	:	Hızlı Geçiş Sistemi
PIARC	:	Permanent International Association Of Road Congresses
SAE	:	Society Of Automotive Engineers
V2V	:	Vehicle to Vehicle
V2I	:	Vehicle to Infrastructure
I2V	:	Infrastructure to Vehicle
WPAN	:	Wireless Personal Area network
GHz	:	Giga Hertz
Mbps	:	Mega Bit Per Second
DSRC	:	Dedicated Short-Range Communications
PEAS	:	Performance, Environment, Actuators, Sensors
KQML	:	Knowledge Query and Manipulation Language
FIBA	:	Foundation for Intelligent Physical Agents
JOE	:	Java Ontology Editor
JADE	:	Java Agent Development Framework
DüğümID	:	Düğüm Numarası
ŞeritID	:	Şerit Numarası
DüğümÇizgiID:	:	Düşey Eksen Düğüm Kimliği
AraçID	:	Araç Kimliği
MŞA	:	Mesafeye Göre Şerit Değişimi
OHŞA	:	Ortalama Hıza Göre Şerit Değişimi
AHŞA	:	Anlık Ortalama Hıza Göre Şerit Değişimi
AŞA	:	Araç Sayısına Göre Şerit Değişimi

ÖNSÖZ

Öncelikle, sevgili hocam Prof. Dr. Abdullah T. TOLA'ya doktora sürecinde bana göstermiş oldukları ilgi, alaka ve tavsiyeleri ile araştırma konusunda bana öğrettikleri her şey için teşekkür ederim.

Ayrıca, bu tezi mümkün kılan tavsiye ve önerileri için Doç. Dr. Abdullah BAŞÇI'ya, Prof. Dr. Sezai TOKAT'a, Prof. Dr. Yetiş Şazi MURAT'a ve Dr. Öğr. Üyesi M. Zübeyir ÜNLÜ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Doktora sürecinde desteğini hep hissettiğim tüm aileme ve arkadaşlarıma, özellikle annem ve babama bana verdikleri tüm destekler ve sağladıkları imkânlar için teşekkür ederim.

Son olarak, 2015FBE028 numaralı proje kapsamında beni destekleyen Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (BAP) teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

1.1 Tez Konusu

Ulaşım, tarih boyunca insanların en önemli gereksinimlerinden birisi olmuştur. Nüfusun artması ve artan nüfusun şehirlerde yoğunlaşması ile birlikte, ulaşım talebinin karşılanması güçleşmiş ve bu durum, çeşitli problemlerin ortaya çıkmasına yol açmıştır. Trafik sıkışıklığı, gaz salınımı, yakıt tüketimi, zaman kaybı, gürültü vb. problemler, ulaşım talebi karşılanırken meydana gelen sorunlardan bazılarıdır. Ulaşım talebinin iş, eğitim ve sosyal alanlar gibi belirli noktalarda yoğunlaşması, ulaşım problemlerinin artmasına yol açmaktadır. Bu duruma ek olarak altyapı yetersizliği, eğitim eksikliği, çarpık kentleşme, toplu ulaşım olan rağbetin az olması, sabırsızlık ve acelecilik gibi olumsuz sürücü davranışları ulaşım problemlerini artıran diğer bir kısım etkenlerdir. Ulaşım problemlerinin artması ile meydana gelen trafik kazaları can ve mal kayıplarının oluşmasına sebep olmaktadır. Her sene yüzbinlerce insan trafik kazaları sonucunda hayatını kaybetmekte, milyonlarca insan da yaralanmaktadır. Ayrıca, trafik kazaları ile ekonomik zararlar meydana gelmektedir. İnsan, çevre ve ekonomi üzerinde olumsuz etkiler meydana getiren ulaşım problemleri, birçok araştırmacının çözüm aradığı yaygın bir araştırma konusudur.

Ulaşım problemlerinin çözülmesi için başta akademik birimler olmak üzere, ulusal ve uluslararası kuruluşlar öneriler sunmakta ve ilgili kurumlar uygun bulunan önerileri uygulamaktadırlar. Buna ek olarak, eğitim kurumları trafik konusunda eğitim vererek problemin çözümüne katkı sunmaktadırlar. Fakat tüm bu çalışmalar ulaşım problemlerinin artışını durduramamaktadır. Bu durum, yapılan çalışmaların önemini göstermekle beraber, ulaşım problemlerine çözüm olacak yenilikçi ve uygulanabilir çözümlere ihtiyacın da ne kadar yüksek olduğunu göstermektedir. Bu çalışma özgün yapısıyla, bu çözümlere bir örnek teşkil etmektedir.

Bu tez çalışması ile yeni bir ulaşım sistemi tasarlanmıştır. Çalışma; uygulanabilir, yenilikçi, trafik sıkışıklığının oluşmadığı, ışısız, otonom veya manuel kullanılabilen yeni bir çift modlu ulaşım sistemini kapsamaktadır.

Bölüm kapsamında günümüze kadar ulaşım problemlerinin çözümü için yapılan ve tez ile ilişkili başlıca çalışmalar özetlenerek tezin altyapısı hazırlanacak ve önerilen çözümün mevcut çözümlerden farkı ifade edilerek çalışmanın amacı ve geliştirilme yöntemi anlatılacaktır.

1.2 Literatür Özeti

Araç kavramının hayatımıza girmesi, tekerleğin bulunması ile başlamıştır. Zaman içerisinde eklenen yeni özellikler ile gelişen araçlar, kullanım alanları ve kullanım amaçlarına göre farklı bölümlere ayrılmış ve günümüz ulaşım sistemlerini meydana getirmişlerdir.

Ulaşım sistemleri, kullanım durumlarına göre bireysel ve toplu ulaşım sistemleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar. Ulaşımın kişiye özel olduğu bireysel ulaşım sistemleri; bisiklet, motosiklet, taksi başta olmak üzere birçok farklı araç sistemini kapsamaktadır. Otobüs, tren, metro vb. araçların meydana getirdiği toplu ulaşım sistemleri ise ulaşımın toplu olarak gerçekleştirildiği sistemlerdir. Özellikle son yüzyılda hayatımıza giren akıllı sistemler, araç teknolojisinde ve ulaşım sistemlerinde hızlı bir gelişim ve değişim meydana getirmiştir. Sürücüsüz araçlar ve gelişmiş ulaşım sistemleri bu değişim ile hayatımıza giren iki yeni kavram olarak karşımıza çıkmaktadır. İzleyen alt kısımlarda bu kavramlar ile ilgili yapılan başlıca çalışmaların özellikleri tanıtılacak ve tez ile ilgili altyapı oluşturulacaktır. Ayrıca, trafik problemlerinin analizi için kullanılan yaygın benzetim modelleri hakkında da bilgiler sunulacaktır.

1.2.1 Sürücüsüz Araç Teknolojisi

Bugün kullandığımız kişisel araçların ilk örneği 1885 yılında Alman mühendis Karl Benz tarafından icat edilmiştir (Daimler 2019). Sonraki zamanlarda; konfor,

güvenlik, yakıt tasarrufu ve düşük maliyet gibi etkenlerin iyileştirilmesi ile farklı marka ve modellerde yüzlerce araç üretilmiştir. Özellikle akıllı sistemlerin araç teknolojisinde kullanılması araç teknolojisinin gelişimini hızlandırmış ve tamamen otonom araçların üretilmesine zemin hazırlamıştır.

Sürücüsüz araçlar ile ilgili ilk çalışma, 1925 yılında Francis Houdina tarafından radyo sinyalleri kullanılarak kontrol edilebilen bir aracın icadı ile başlamıştır. Bu araç motor çalıştırma, vites değiştirme, korna çalma gibi olayları otomatik olarak gerçekleştirebilmiştir (Kröger 2017). Fakat bir kısım araştırmacılar, sürücüsüz araçlar ile ilgili çalışmaların 1939 yılında General Motors tarafından Amerika'da düzenlenen *Futurama World's Fair* fuarı ile başladığını kabul etmektedirler (Özgüner ve diğ. 2011).

1969 yılına gelindiğinde akıllı sistemlerin babası olarak anılan John Mccarty yayınladığı bir makalede, bilgisayar kontrollü arabaların normal yollarda kullanılabilceğini önermiştir. Araştırmacılara ilham kaynağı olan bu öneri, sürücüsüz araçlar konusunda çalışmaların artmasına katkı sunmuştur (Dormehl ve Edeldtein 2019).

1977 yılında Japonya'nın Tsukuba Makine Mühendisliği Laboratuvarı'nda sürücüsüz bir araç geliştirilmiştir. Bu araç günümüz şartlarında tanımlanan sürücüsüz araç kavramının ilk örneği olmuştur. Araç, sahip olduğu iki kamera ile sokak işaretlerini bilgisayar yardımıyla işleyerek güzergâh takibi yapmıştır (Weber 2014).

1980 yılında Mercedes Benz mühendisi Ernst Dickmanns tarafından kamera görüntüsü ile otonom hareket edebilen robotik bir araç tasarlanmıştır. Bu çalışma sürücüsüz araçların, geleceğe yön verecek bir teknoloji olduğunun kanıtlanmasına katkı sunmuştur (Özgüner ve diğ. 2011).

1987 yılında Amerika'da Gelişmiş Savunma Araştırma Projeleri Ajansı (Defense Advanced Research Projects Agency-DARPA) desteklediği otonom kara aracı ilk kez tamamen sensör tabanlı karmaşık bir arazi yapısında sürüşünü gerçekleştirmiştir. Bu araç kamera görüntüleri, lazer radarı ve robot kontrol mekanizmalarını kullanarak saatte 30 km hıza ulaşmıştır (DARPA 1987).

1990'lı yıllarda Dean Pomerleau tarafından hazırlanan doktora tez çalışması ile kendi kendini kontrol edebilen bir aracın yoldan aldığı görüntüleri yapay sinir ağında işleyerek gerçek zamanlı hareket etmesi sağlanmıştır. Pomerleau sonraki yıllarda Todd Jochem ile beraber *Navlav* sürücüsüz araç sistemini geliştirmiştir (Pomerleau 1992).

1994 yılında Ernst Dickmanns *VaMP* ve *Vita-2* adlarında iki otonom araç geliştirmiştir. Bu araçlar Paris'te normal yoğunluklu bir otobanda saatte 130 km hızla 1000 km yol yapmışlardır. Dickmanns sonraki yıl S-sınıfı bir Mercedes Benz'i Münih'ten Kopenhag'a 1600 km'lik bir mesafede götürmeyi başarmıştır. Araç saatte 175 km'lik bir hıza ve %95'lik bir otonomluğa ulaşmıştır (Joiner 2018).

2009 yılında Google tarafından sürücüsüz araçlar ile ilgili çalışma başlatılmıştır. *Waymo* olarak isimlendirilen proje, bir kaç yıl içerisinde tamamlanmış ve şirket 2014 yılında tamamen sürücüsüz bir araç üretmiştir. Bu araç ile son bir yıla kadar 3,2 milyon km'den fazla bir mesafede sürüş testi yapılmıştır (Waymo 2019).

2009 yılında Avrupa Komisyonu tarafından finanse edilen *Safe Road Trains for the Environment* (SARTRE) sistemi için çalışmalar başlatılmıştır. Üç yıl süren çalışmanın sonucunda bir grup arabanın sürücülü bir lider araç kılavuzluğunda sürücüsüz olarak seyahat ettirilmesi sağlanmıştır. Bu projeye benzer Amerika'da *The Californian program PATH* ve Japonya'da *Japanese Project Energy ITS* adında farklı projeler de çalışılmıştır (Aramrattana ve diğ. 2018).

2010 yılında Alberto Broggi dört adet sürücüsüz aracı İtalya'dan 13.000 km uzakta bulunan Çin'e götürerek *Shanghai Expo*'ya katılmayı başarmıştır (Broggi ve diğ. 2010).

2013 yılına gelindiğinde General Motors, Ford, Mercedes Benz, BMW vb. araba üretim firmaları sürücüsüz araba çalışmalarına başlamışlardır. Bu firmalardan biri olan Nissan, 2020 yılına kadar birçok sürücüsüz araç üreteceğini taahhüt etmiştir. Aynı yıl Amerika Otomotiv Mühendisleri Birliği (Society of Automobile Engineers-SAE) tarafından sürücüsüz araç seviyeleri açıklanmış ve sürücüsüz araçlar otonomluk durumlarına göre 6 seviyede gruplandırılmıştır (CAAT 2019).

Nvidia, 2018 yılında düzenlenen *Consumer Electronics Show (CES) 2018*'de yapay zeka yeteneklerini içerecek olan *Xavier* adında yeni bir otonom araç çipini tanıtmıştır (Glon 2018). Yine aynı yıl Apple, *Pelaton* olarak adlandırdığı sürücüsüz elektrikli araç sistemi için patent başvurusu yapmıştır (Apple 2019).

Günümüzde sürücüsüz araç çalışmaları yoğun bir biçimde devam etmektedir. Bu araçların hayatımıza yakın bir zamanda gireceği kullanıcılar tarafından öngörülüyor olsa da, bazı sorunlar hala çözülmeyi beklemektedir. Özellikle araçların güvenlik problemleri ve olağan dışı durumlarda üretilecek tepkilerin ne olacağı karşıt fikir sahiplerinin en fazla merak ettiği konulardan bazılarıdır. 2016 yılında Tesla tarafından üretilen araç, sürücüsüz kullanım modunda hareket ederken kaza yapmış ve bir kişinin ölümüne yol açmıştır. Bu durum sürücüsüz araçların güvenliği ile ilgili tartışmaların artmasına sebep olmuştur (Diefenbach 2016). Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde (Massachusetts Institute of Technology-MIT) *Moral Machine* olarak isimlendirilen ve Iyad Rahwan tarafından yürütülen ve hala devam eden bir çalışmada, sürücüsüz bir aracın karşılaşılabileceği olağandışı durumlardan bazıları kullanıcılara sorulmakta ve ortaya çıkan anket sonuçları anlık olarak yayınlanmaktadır. Bu sayede olağan dışı durumlarda sürücüsüz bir aracın nasıl karar vereceği tespit edilmeye çalışılmaktadır (MIT 2019). Sonuç olarak, sürücüsüz araçların üretimi kısa bir zaman içerisinde gerçekleşse de günlük hayatta kullanılması için daha fazla zamana ihtiyaç duyulacaktır.

1.2.2 Gelişmiş Ulaşım Sistemleri

Akıllı sistemlerin ulaşım sistemlerinde kullanılmaya başlanması, yeni ulaşım sistemlerinin ortaya çıkmasına zemin hazırlamıştır. Genel olarak gelişmiş ulaşım sistemleri olarak isimlendirilen bu sistemler Kişisel Hızlı Ulaşım (Personal Rapid Transit-PRT), Grup Hızlı Ulaşım (Group Rapid Transit-GRT), Çift Modlu Ulaşım (Dual-Mode Transit-DMT) ve Sürücüsüz Raylı Sistemler (Driverless Rail Systems-DRS) gibi birbirinden farklı özelliklere sahip alt gruplara ayrılmaktadırlar. 2018 yılında Muller ve Andreasson tarafından *ASCE Automated People Movers Conference 2018*'de yayınlanan bir çalışmada bu sistemlerden PRT ve GRT

karşılaştırılarak birbirlerine göre üstünlükleri ifade edilmiştir (Muller ve Andreasson 2018).

PRT, sürücüsüz olarak kullanılan ve 3 ile 6 arası yolcu kapasiteli gelişmiş bir ulaşım sistemidir. Bu sistemde kullanılan araçlar ile ilgili ilk çalışma 1953 yılında şehir ulaşım planlamacısı Don Fichter tarafından önerilmiştir. Az ve orta yoğunluklu bölgeler için otonom bir toplu ulaşım sistemi öneren Fitcher, bu çalışmasını *Veyar* olarak isimlendirmiş ve 1964 yılında yayınladığı bir kitap ile ilan etmiştir. (Fichter 1964). Yine aynı yıllarda Edward Haltom tarafından *Monocab* isminde bir PRT sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem altı kişiden oluşan ve özel yollarda hareket edebilen tekerlekli araçlardan oluşmuştur. Bu araçlar kullanılarak monoraylara göre daha kısa mesafede ve daha az bir zaman periyodunda hareket edebilen bir sistem oluşturulması amaçlanmıştır (Szillat 2001).

1966 yılında Amerika Birleşik Devletleri İskân ve Kentsel Kalkınma Bakanlığı (United States Department of Housing and Urban Development) hızlı, güvenli ve havayı kirletmeyen yeni bir şehir içi ulaşım sistemi için araştırmacılardan öneriler istemiştir. 1968 yılında hazırlanan rapor ile tüm öneriler arasından PRT en uygun sistem olarak seçilmiştir (Cole ve Merritt 1968). Raporun yayınlandığı yıl, ABD Kongresi tarafından kurulan Aerospace şirketi, ulaşım sistemleri üzerinde çalışmalara başlamış ve 1969 yılında PRT alanında yaptığı çalışmayı *Scientific American* dergisinde yayınlamıştır. Bu çalışma PRT alanında *Scientific American* dergisinde yayınlanan ilk çalışma özelliği taşımaktadır (Hamilton ve Nance 1969).

Avrupa’da PRT ile ilgili çalışmaların ilk örneği 1967 yılında Matra isimli havacılık şirketi tarafından geliştirilmiş ve *Aramis* olarak isimlendirilmiştir. Fakat araçların çarpışma durumu kontrol edilemediğinden proje başarısızlıkla sonuçlanmıştır (Latour 2019). Aynı yıllarda Almanya’da kurulan ve 1980 yılına kadar *Mannesmann Demag* ve *Messerschmitt-Bölkow-Blohm* (MBB) ortaklığı ile çalışmalarını sürdüren ortak girişim şirketi, *Cabinetaxi* sistemi üzerinde çalışmıştır. Bu sistem için teleferik benzeri yükseltilmiş yol seviyesinde (elevated rails) hareket eden araçlar tasarlanmıştır. Sistemde kullanılan araçlar farklı boyutlarda tasarlanmış ve toplu taşıma hizmeti sunmuşlardır (Atra 2019).

1970 yılında ise uzak doğu ülkesi olan Japonya, Bilgisayar Kontrollü Araç Sistemi (Computer-Controlled Vehicle System) adında bir çalışma yürütmüştür. Bu çalışmanın sonucunda üretilen araçlar, toplu taşımada kullanılmıştır (Atra 2019).

1977 yılına gelindiğinde Elbert Morgan Sawyer, *Personal Rapid Transit System* adında bir patent başvurusu yapmıştır. Bu sistem yükseltilmiş yol seviyesinde tasarlanmış ve araçlar yola temas etmeden doğrusal motor yardımıyla hareket ettirilme fikrine dayanmaktadır. Bu patent PRT ile ilgili alınan ilk patent özelliği taşımaktadır (Sawyer 1977).

1981 ile 1993 yılları arasında Dr. J. Edward Anderson ve TAXI 2000 şirketi, *The Taxi 2000* sistemini geliştirmiştir (Atra 2019). 2000 yılında *Skyweb Express* ismi ile devam eden bu sistem, yükseltilmiş yol seviyesinde elektrikli PRT araçların sürücüsüz olarak kullanılmasını esas almaktadır (Skyweb 2015).

2002 yılında *2getthere* şirketi tarafından *CyberCabs* sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem Hollanda'da sadece 6 ayda 400,000 yolcu taşımıştır. İki istasyondan oluşan sistem 600 metrelik bir parkurda tek yönlü hizmet sunmuştur (CyberCab 2019). Daha sonra aynı şirket 2008 yılında Birleşik Arap Emirlikleri'nin Masdar kentinde yeni bir PRT ulaşım sisteminin hazırlanması için çalışmalara başlamıştır. Bu sistem ile tekerlekli ve tamamen otonom araçların kullanılmasıyla belirli istasyonlarda ve sadece bu araçlara tahsis edilen yollarda ulaşım talebi karşılanmaktadır. Sistem tamamlanarak kullanıma sunulmuştur (Mueller ve Sgouridis 2011).

2003 yılında *Urban Light Transport* (ULTra) sistemi İngiltere Demiryolu Müfettişliği tarafından 1 km'lik bir test pisti için yolcu taşıma sertifikası almıştır. 2011 yılında *ULTra* sisteminin tüm testleri tamamlanarak Londra'nın Heatrow Havaalanı'nda kullanıma sunulmuştur. Bu sistem *CyberCabs* gibi tekerlekli ve otonom ulaşım hizmeti sunarken farklı olarak altyapı için yükseltilmiş yol seviyesini kullanmaktadır (Ultra 2019).

2005 yılında Kore/İsveç ortaklığı ile kurulan Vectus şirketi, 400 metrelik bir test parkuru inşa etmiştir. Bu çalışma *2007 PodCar City* konferansında sunulmuştur. Şirket, 2009 yılında Güney Kore'nin Sunheon kentinde yeni bir PRT sisteminin uygulanması için çalışma başlatmıştır. *Skycube* olarak adlandırılan sistem, 2013

yılında tamamlanarak hizmete sunulmuştur. Bu sistem, *CyberCabs* ve *ULTra* sistemlerinden farklı olarak altyapı için demiryoluna benzer yükseltilmiş yollar kullanmaktadır (Eco-Trans 2015).

2014 yılında Güney Afrika merkezli Milotek şirketi *Furtran* olarak isimlendirdiği PRT sistemini geliştirmiştir. Bu sistemde araçlar, yükseltilmiş yol seviyesine teleferik benzeri bağlantı sağlayarak hareket ettirmektedir (Milotec 2019). Bu sisteme benzer 2003 yılında Ollie Mikosza tarafından önerilen ve sonraki zamanlarda geliştirilerek *MISTER PRT* olarak isimlendirilen ayrı bir sistem geliştirilmiştir (Metrino 2019).

PRT sistemlerine genel olarak bakıldığında, bu sistemlerin hat özerkliğine sahip yollarda, sabit güzergâhlarda ve otonom toplu taşıma hizmeti sundukları görülmektedir. Hijyen, güvenlik ve esneklik gibi toplu taşımada görülen problemlerinin bu sistemler için de oluşması, PRT sistemlerinin olumsuz yönleri olarak değerlendirilmektedir.

Bir diğer gelişmiş ulaşım sistemi olan GRT, yapı olarak PRT sistemlerine benzemektedir. Fakat GRT'ler yolcu kapasitesi ve hat özerkliği açısından PRT'lere göre farklılık göstermektedir. Bu alanda yürütülen ilk çalışma, 1975 yılında *Morgantown GRT* uygulaması ile ortaya çıkmıştır. Bu çalışma yükseltilmiş yol seviyesinde toplu taşıma hizmeti sunmak amacıyla geliştirilmiştir. Bu sistem zaman içerisinde geliştirilmiş ve günümüzde Batı Virginia Üniversitesi'nde kullanılmaktadır (Samuel 1999).

1995 yılında *2getthere* şirketi tarafından *The Parking Hopper* sistemi önerilmiştir. GRT yapısında olan ve on yolcu kapasiteli dört araçtan oluşan sistem Hollanda'da bulunan Schiphol Havaalanı'nda uygulanmıştır. 1997 yılında aynı şirket ikinci GRT pilot yapısını geliştirmiştir (Atra 2019). Yine benzer bir proje olan ve 1999 yılında 12 yolcu kapasiteli araçların kullanıldığı *ParkShuttle* sistemi, *2getthere* şirketi tarafından Hollanda'nın Rivium kentinde uygulanmaktadır (Shiftan ve diğ. 2006).

GRT, PRT sistemlere benzer bir biçimde otonom toplu taşıma hizmeti sunmaktadır. Hat özerkliği bulunmayan GRT'ler, toplu taşımanın barındırdığı

olumsuzluklarla beraber trafik sıkışıklığı probleminin meydana gelmesine de sebep olabilmektedir.

Bir diğ er gelişmiş ulaşım sistemi olan DMT, bir aracın birden fazla ulaşım sistemine ait altyapıyı kullanarak kapıdan kapıya ulaşım hizmetinin sağlandığı sistemlerdir. Bu sistemler bütünleştirdiği modlara göre farklı fiziksel özelliklere sahiptirler.

DMT ile ilgili çalışmalar 1970'li yıllara dayanmaktadır. Sistem ilk defa Baumann tarafından 1970 yılında yayınlanan bir makale ile duyurulmuştur (Baumann 1970). 1974 yılında düzenlenen *Transportation Research Board* konferansında DMT sistemi tartışılmış ve sistemin özellikleri ve teknik yapısı ile ilgili değerlendirmeler yapılmıştır (Yen 1974).

1988 yılına gelindiğinde Jack U. Mowll, *Dual-Mode Transportation System* olarak adlandırılan bir patent başvurusu yapmıştır. Mowll aldığı bu patent ile hem normal yollarda hem de teleferik benzeri askılı yollarda seyahat edebilen araçlar ve bu araçlara uygun tek hatlı bir yol tasarımı önermiştir (Mowll 1988).

1990 yılında çift modlu bir ulaşım sistemi olan *Rapid Urban Flexible* (RUF) sistemi tasarlanarak patent başvurusu yapılmıştır. Bu patent ile hem normal yollarda hem de monoray benzeri tek raylı yollarda kullanılabilen araçlar tasarlanmıştır. Tek hatlı ve özel tasarlanmış yolların kullanıldığı sistem, 25 sene sürmüş ve günümüzde Kopenak'ta kullanılmaya başlanmıştır (Jensen 2015).

2002 yılında Steingröver ve Krevet tarafından *Autoshuttle* sistemi önerilmiştir. Sistem, kabinlerle araçların yüksek hızda taşınması fikrine dayanmaktadır. Bu sistem ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. Çok şeritli tasarlanan sistem şeritler arası geçişlere izin vermemektedir (Krevet ve Woronowicz 2014).

2005 yılında Roane tarafından *TriTrack System of Mass Transit* adında bir patent alınmıştır. Bu patent ile özel tasarlanmış araçların hem normal yollarda hem de monoray benzeri tek raylı ve özel tasarlanmış yollarda kullanımının sağlanması hedeflenmiştir. Bu sistemde farklı olarak üç tekerlekli kişisel bir araç ve bu araçlara uygun özel çok şeritli bir yol sistemi kullanılmaktadır. Bu sistem de şerit değişimine izin vermemektedir (Roane 2005).

2008 yılında normal araçların yükseltilmiş seviyede askılı olarak hareket ettirilmesi fikrine dayanan ve *GTS* olarak adlandırılan yeni bir DMT sistemi önerilmiştir. Çalışmaların devam ettiği proje, normal arabaların teleferik benzeri tek şeritli askılı yollarda yüksek hızda hareket etmesi fikrine dayanmaktadır (Tegnér ve diğ. 2007).

2010 yılında Jr. Davis tarafından *BiModal Glideway* keşfedilerek patentlenmiştir. Bu sistemde normal arabalar, demiryolu hatlarını da kullanabilecek biçime dönüştürülmüştür. Bu sistem tek şeritli bir yol yapısı kullanacak biçimde tasarlanmıştır (Davis 2010). Aynı yıl Rusya'da faaliyet gösteren Zesttrans şirketi *Prt Zest* sistemini önermiştir. Bu sistem, hem raylı yollarda hem de normal yollarda hareket edebilen araçlardan oluşmaktadır. Altyapı olarak her iki sistem birbirine benzerse de, araç yapısı ve donanımları tamamen birbirinden farklıdır (ZestTrans 2019).

2013 yılında Elon Musk tarafından kurulan Boring Company şirketi, *Hyperloop* sistemini duyurmuştur. Bu sistem ile şirket, yer altından yüksek hızlarda sürücüsüz toplu taşımanın yapılmasını hedeflemektedir. Sonraki yıllarda şirket, hem kişisel araçların hem de toplu ulaşım araçlarının şehir altında açılacak tüneller yardımıyla taşınmasını sağlayan bir dizi proje önermiştir (Boring 2019). Yine bu sistemlere benzer 2016 yılında Londra merkezli PLP Architecture şirketi, *CarTube* sistemini duyurmuştur. Bu sistem sürücüsüz elektrikli araçlar ile toplu ulaşım sistemini birleştiren ve yer altından ulaşımın sağlandığı çift modlu bir ulaşım sistemidir (Hesselgren ve diğ. 2019).

DMT sistemlerini incelediğimizde çoğu sistemin tek hatlı bir yol düzeninde hızlı ve otonom hizmet sundukları, çok hatlı DMT'ler ise şerit değişimine uygun olmadığı görülmektedir.

Diğer bir gelişmiş ulaşım sistemi olan DRS çalışmaları metro, tren vb geleneksel ulaşım araçlarının akıllı sistemlerle desteklenmesi ve otonom kullanıma hazır hale getirilmesi fikrine dayanmaktadır. DRS için ilk çalışmalar 1967 yılına dayanmaktadır. O sene içerisinde Montreal'de düzenlenen Expo 67 fuarında sürücüsüz monoray sistemi tartışılmıştır. 1989 yılında Bombardier Transportation şirketi tarafından başlanan monoray çalışmaları, günümüzde tamamen sürücüsüz olarak

kontrol edilebilecek düzeye ulaşmıştır. Bu şirketin *Cityflo 650* haberleşme sistemi ile tren, monoray ve metro araçları birbirleri ile haberleşerek sürücüsüz hareket etmektedirler (Bombardier 2010).

1981 yılında Japonya'nın Kobe kentinde ilk sürücüsüz metro sistemi hizmete sunulmuştur. Sonraki yıllarda başta Avrupa ve Amerika olmak üzere neredeyse tüm metropol şehirlerde bu sistem kullanılmaya başlanmıştır (Metro 2019).

1998 yılında *AirTrain* sistemi için altyapı çalışmaları başlamıştır. Sürücüsüz tren kullanımı sağlayan bu sistem, John F. Kennedy Uluslararası Havaalanı ile metro hattı arasındaki bağlantıyı kurmak amacıyla inşa edilmiştir. 10 istasyondan oluşan sistem, 2003 yılında tamamlanarak hizmete sunulmuştur (AirTrain 2019).

1999 yılında *The Bukit Panjang Light Rail Transit* (BPLRT) adında sürücüsüz bir tramvay hattı Singapur'da kullanıma sunulmuştur. Kısa mesafede toplu taşıma hizmeti sunan bu sistem saatte 25 km hız ve yaklaşık 105 yolcu kapasitesi ile trafik akışının sağlanmasına hizmet etmiştir (Landtransportguru 2019).

DRS sistemleri PRT gibi otonom ve hat özerkliği olan yollarda toplu taşıma hizmeti sunduğu için PRT sistemlerde karşılaşılan hijyen, güvenlik ve esneklik problemlerine sebep olmaktadır. Fakat hat özerkliği bulunan bu sistemlerde, trafik sıklığına karşılaşılmamaktadır.

1.2.3 Trafik Benzetim Modelleri

Bu kısımda, bazı trafik problemlerinin bilgisayar ortamında benzetimine imkân sağlayan trafik modellerinden bahsedilecektir. Trafik benzetim modelleri ile ilgili çalışmalar Gerlough'un 1955 yılında yaptığı doktora tez çalışmasına dayanmaktadır. Bu çalışma bilgisayarda, trafik alanında yapılan ilk çalışma olma özelliği taşıırken sonraki yıllarda birçok araştırmacının farklı model ve çalışmalar yapmasına da zemin hazırlamıştır (Gerlough 1955).

1989 yılında Katalonya Politeknik Üniversitesi'ndeki Simülasyon ve Yöneyim Araştırması Laboratuvarı üyeleri mikroskobik bir benzetim örneği geliştirmiştir. Zamanla geliştirilen sistem günümüzde *Advanced Interactive*

Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks (Aimsun) olarak isimlendirilmiştir. Mikro seviyede araç ve altyapı davranışlarının analiz edildiği bu model, trafik konusunda çalışan araştırmacılar tarafından yaygın bir biçimde kullanılmaktadır (Boxill ve Yu 2000). Yine aynı yıl Helsinki Teknoloji Üniversitesi, Ulaştırma Mühendisliği Laboratuvarı tarafından *HUTSIM* adında farklı bir mikroskobik benzetim modeli geliştirilmiştir. Başlangıçta sinyal kontrolünün değerlendirilmesi için geliştirilen model, zamanla daha farklı problemleri çözmek amacıyla düzenlenmiş ve günümüz seviyesine ulaşmıştır (Kosonen 1999).

1990'ların başında *Paramics* projesi ilk olarak İngiltere Ulaştırma Bakanlığı tarafından kurulmuş ve Edinburgh Üniversitesi'nde bulunan Edinburgh Paralel Hesaplama Merkezi tarafından bir proje olarak geliştirilmiştir. Mikroskobik bir benzetim modeli olan *Paramics*, günümüzde geliştirilmeye devam etmektedir (Boxill ve Yu 2000).

1992 yılında mikroskobik bir benzetim modeli olan *VISSIM* birçok uzmanın ortak çalışması ile Almanya'da geliştirilmiştir. Özel araç trafiği, lojistik hizmetler, toplu taşıma, yayalar ve bisiklet sürücülerini gibi tüm yol elemanları ve bunların etkileşimleri tek bir modelde gösterilebilmektedir. İlk başta MS-DOS ortamında hazırlanan model, zamanla diğer ortamlarda kullanılacak şekilde geliştirilmiştir. Halen trafik çalışmalarında aktif bir şekilde kullanılan model, *PTVGroup* tarafından geliştirilmeye devam etmektedir (Vissim 2019).

1996 ile 1998 yılları arasında *The Transportation Analysis and Simulation System* (TRANSIMS) isminde ayrı bir benzetim modeli geliştirilmiştir. Mikro düzeyde bölgesel ulaşım sistemlerinin analizinin yapılması amacıyla oluşturulan sistem, zamanla gelişerek günümüz seviyesine ulaşmıştır (Rilett ve Zietsman 2011).

1998 yılında mikroskobik benzetimlerin hazırlanmasında yaygın olarak kullanılan *CORridor SIMulation* (CORSIM) modelinin ilk sürümü yayınlanmıştır. Bu model Florida Üniversitesi tarafından geliştirilmeye devam etmektedir (Naghawi ve Idewu 2014).

2000 yılında *Simulation of Urban MObility* (SUMO) mikroskobik benzetim modeli ile ilgili çalışmalar başlamıştır. Bu model trafik taleplerinin belirli bir karayolu

ağı içinde nasıl karşılandığının hesaplanması amacıyla kullanılmaktadır. Açık kaynak kodlu olarak geliştirilmeye devam edilen model, günümüzde trafik davranışlarının kontrolünde aktif olarak kullanılmaktadır (Sumo 2019).

Bu alışmalar ile beraber çok etmenli sistemler de trafik problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılmıştır. 2005 yılında Oliveira ve Duarte tarafından hazırlanan bir çalışmada, trafiği oluşturan araçlar nesne; trafik ışıkları ve kavşaklar ise etmen olarak tanımlanarak çok etmenli bir sistem gerçekleştirilmiş ve trafik durumu analiz edilmiştir (Oliveira ve Duarte 2005).

2011 yılında Al-Dmour tarafından NetLogo etmen programlama ortamı kullanılarak *TraffSim* olarak isimlendirilen bir model geliştirilmiştir. Bu model yardımıyla mikroskobik ve makroskobik düzeyde trafik davranışları takip edilebilmektedir (Al-dmour 2011).

2012 yılında Carlino ve arkadaşları geniş bir Őehirde çok etmenli bir trafik benzetimi düzenleyerek sürücüsüz araçların kavşaklarda birbirine göre durumlarını incelemiştir (Carlino ve diğ.2012).

2012 yılında Zohdy ve Rakha tarafından yapılan bir çalışmada trafik ışığı olmayan kontrollü bir kavşakta dört ayrı sürücüsüz arabanın Monte Carlo yöntemiyle bekleme sürelerini düşüren çok ajanlı bir çalışma yapılmıştır (Zohdy ve Rakha 2012).

2015 yılında Han ve arkadaşları NetLogo etmen programlama ortamını kullanarak bir benzetim ortamı hazırlamıştır. Çok etmenli yaklaşımlar kullanılarak tasarlanan ortam, sinyalizasyon ve araç davranışlarının takip edilmesinde kullanılmıştır (Han ve diğ. 2015).

Bu modeller ve çalışmalar dışında trafik problemlerinin çözümü için kullanılan yüzlerce model ve teknik vardır. Önerilen bu modeller yardımıyla gerçek hayatta kullanılan yollar modellenmekte ve ulaşım problemlerine çözümler üretilmektedir.

1.3 Tezin Amacı

Ulaşım teknolojileri ile canlı veya eşyanın bir noktadan başka bir noktaya kolay, hızlı ve az maliyetle taşınması hedeflenmekte ve oluşabilecek sorunlara çözüm yolları üretilmektedir. Yoğun olarak kullandığımız kişisel otomobiller ulaşım teknolojilerinin en önemli parçalarından birisidir. Teknolojinin gelişimi ile birlikte kişisel otomobiller kullanım kolaylığı, güvenlik, düşük maliyet ve yüksek konfor gibi yeni özellikler kazanmıştır. Bu durum kişisel araçlara olan talebin artmasına neden olmuş ve artan araç sayısı ulaşım problemlerinin meydana gelmesine sebep olmuştur. Yerel yönetimlerin sürücüleri toplu taşımaya yönlendirmesi, yeni kavşaklar ve geniş yollar yapmasına rağmen bu problemler çözülememektedir. Bu durumun doğal bir sonucu olarak bu alanda farklı çözüm yollarının bulunması ve uygulanması zorunluluk haline gelmiştir.

Literatür kısmında özetlenen çalışmalar incelendiğinde ulaşım problemlerinin çözümü için araştırmacılar ve özel kuruluşlar tarafından birçok önerinin yapıldığı görülmektedir. Fakat bu öneriler incelendiğinde avantajlı yönler olmakla beraber bazı eksikliklerin bulunduğu görülmektedir.

Toplu taşıma ve sabit güzergahlarda hareket eden PRT, GRT ve DRS sistemleri, sürücüsüz ulaşım imkanı sunarken hijyen, güvenlik ve istasyona ulaşmak için yürüme veya farklı bir ulaşım sistemine ihtiyaç duyma gibi bazı olumsuz durumları içermektedirler. Bu problemi ortadan kaldıran DMT sistemleri incelendiğinde ise yüksek altyapı ve araç maliyeti gerektirdikleri görülmektedir. Ayrıca mevcut tüm DMT sistemlerinin şerit değişimine elverişsiz olması hat giriş ve çıkışlarında gecikmelerin meydana gelmesine sebep olmaktadır. Bu durum talebin fazla olduğu periyotlarda sıkışıklıkların oluşmasına sebep olmaktadır. Tüm bu çalışmalardan farklı olarak gelişimi devam eden sürücüsüz araçlar; trafik, sinyalizasyon vb. durumlara çözüm olamamakla beraber uygulanabilirliğinin zaman alacağı düşünülmektedir (Sparrow ve Howard 2017).

Bu tez çalışmasının amacı; trafik problemlerine çözüm olan, hem otonom hem de manuel kullanılabilen, kolay uygulanabilir, kişiye özel ve kapıdan kapıya ulaşım imkanı sağlayan yeni bir çift modlu ulaşım sistemi tasarlamaktır. Tasarlanan bu sisteme MetroCar Sistemi (MCS) ismi verilmiştir. MCS, sürücülerin araç kontrolü

esnasında geçirdikleri zamanı; dinlenme, okuma, yazma vb. farklı aktivitelerde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Tek kişilik elektrikli araçların kullanıldığı MCS, çevre dostu bir ulaşım sistemi olacaktır. Kişiye özel ve tek yön için en az üç şeritten oluşan bu sistem, sürücülerin kolay bir biçimde sisteme girebilmelerini sağlamakla beraber belirli noktalarda daha az yoğunluklu hatlara geçiş yaparak araçların trafik sıkışıklığı olmadan hedef istasyona ulaşmasına imkân sağlayacaktır.

Geliştirilen benzetim ortamında yapılan testler ve geliştirilen özgün algoritmalar ile MCS'nin başta kent içi ulaşımı olmak üzere üniversite kampüsleri, havaalanları, hastane vb. gibi geniş alanlarda kullanılabileceğini göstermektedir. Çalışmanın gerçek hayatta uygulanması ile trafik sorununun azaltılması ve kullanıcılara daha konforlu bir ulaşım hizmeti sunulması hedeflenmektedir.

1.4 Yöntem ve Tez Tanıtımı

Bu tez çalışması tasarım ve yöntem bakımından tamamen yeni ve özgün bir ulaşım sistemini tanıtmaktadır. Çalışma ile tek kişilik, elektrikli, sürücüsüz veya manuel olarak kullanılabilen kişisel araçlar ve bu araçlara uygun olarak en az üç şeritten oluşan çift yönlü ve hat özerkliği olan yollar tasarlanmıştır. Araba boyutlarının küçük olması hem araç maliyetinin azalmasına hem de altyapı maliyetinin düşük olmasına sebep olmaktadır. Yapılan hesaplamalara göre günümüzde kullanılan kişisel bir araç yerine, dört adet MCS aracının kullanılabilceği tespit edilmiştir. Ayrıca şeritler arasında sollama imkânının olması trafik yoğunluğunun oluşmasına engel olmaktadır.

Tasarlanan araçlar, MCS istasyonlarına kullanıcı kontrolünde getirilmekte ve giriş izni alındıktan sonra tam otonom bir şekilde hedef istasyona doğru hareket etmektedir. Kullanıcı bu süre içerisinde zamanını farklı aktivitelerde kullanabilirken aracın ihtiyaç duyduğu enerji yolda bulunan özel kılavuz yardımıyla temin edilmektedir. Çıkış izni verilen araçlar tekrar kullanıcı kontrolünde son hedefe götürülmektedir. Bu durum hem sağlıklı hem güvenli hem de farklı bir ulaşım sistemine ihtiyaç duymadan ulaşım talebinin sağlanmasına imkân sunmaktadır.

Sistemin tasarımında çok etmenli sistem yapısı kullanılmıştır. Üç farklı etmen türü barındıran sistem; araç, düğüm ve sistem etmenlerinden oluşmaktadır. Bu etmenlerin haberleşmesi ile MCS trafik akışı ışiksiz bir biçimde ve MCS yollarında tam otonom olarak gerçekleştirilmiştir. Tüm etmenler basit tepkisel etmen mimarisi ile modellenmiş ve gerekli prosedür, protokol ve algoritmalar tasarlanmıştır.

Geliştirilen algoritmaların uygulanması ve gerekli senaryoların test edilmesi için NetLogo etmen programlama ortamı kullanılmıştır. Bu yazılım kullanılarak özel bir mikroskobik benzetim modeli hazırlanmış ve sistem özellikleri test edilmiştir. Aracın bir noktadan farklı bir noktaya en hızlı ve en kısa yoldan gitmesi, MCS istasyonuna girmesi veya ayrılması ve farklı şeritlere geçmesi gibi durumlar bu sayede test edilmiştir.

Bu tez çalışması altı farklı bölümden oluşmaktadır. Tezin bundan sonraki bölümleri aşağıdaki gibi olacaktır.

İkinci Bölüm, şehir içi ulaşım sistemleri ve kullanıcıların sistem tercihi yaparken uyguladıkları tercih kriterlerini özetlemektedir. Bununla beraber akıllı ulaşım sistemleri tanıtılarak araçlar arası haberleşme teknolojileri hakkında bilgiler sunulmuştur.

Üçüncü Bölüm’de, etmen teknolojileri, etmen özellikleri ve etmen mimarileri hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca çok etmenli yapılar, etmen benzetimi ve yaygın bir benzetim hazırlama ortamı olan NetLogo tanıtılmıştır.

Dördüncü Bölüm’de, MCS’nin genel özellikleri, diğer ulaşım sistemlerine göre farklılıkları ifade edilmiştir. MCS genel etmen mimarileri ve iletişim durumlarının anlatıldığı bu bölümde, prosedür ve protokoller de ayrıntılı olarak tanıtılmıştır.

Beşinci Bölüm’de, MCS trafik akışının sağlanması için geliştirilen algoritmalar ve bu algoritmaların çalıştırılması ile elde edilen benzetim sonuçları sunulmuştur.

Altıncı Bölüm’de, bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ve öneriler ifade edilmiştir.

2. ŞEHİR İÇİ ULAŞIM SİSTEMLERİ

2.1 Giriş

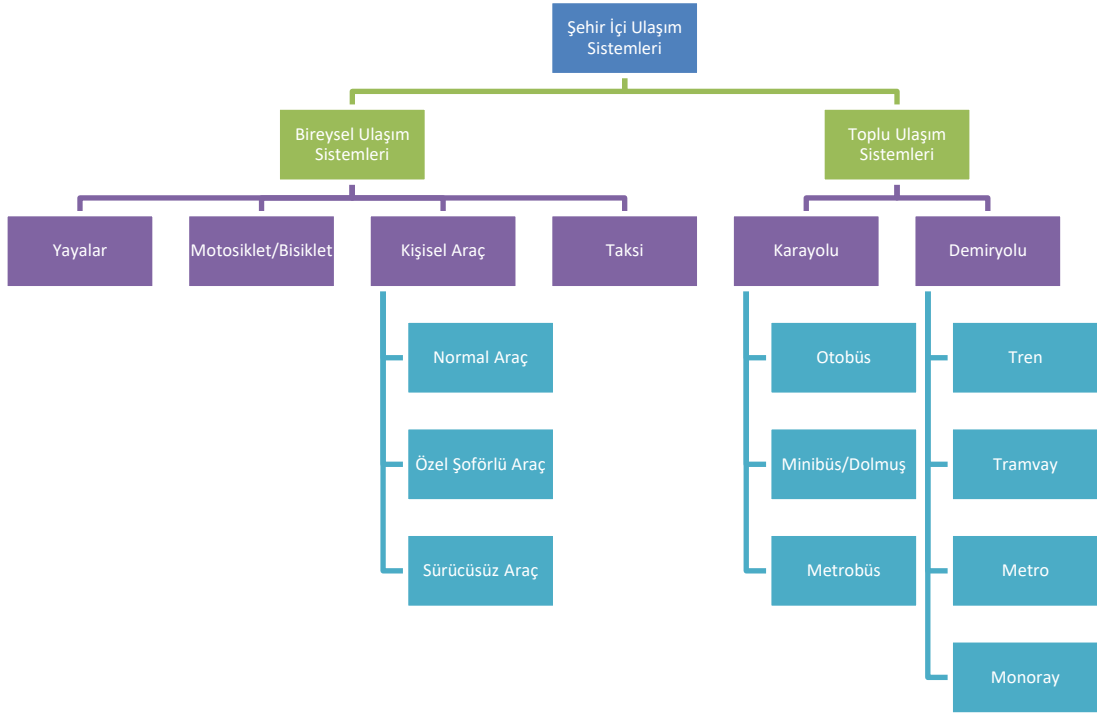
İnsanların en büyük gereksinimlerinden birisi olan ulaşım, tarih boyunca önemini korumuőtur. Nüfusun Şehirlerde yoğunlaşması, gelir seviyesinin artması, araç maliyetlerinin azalması gibi etkenler, Şehir içi ulaşımda kullanılan araç sayısının artmasına ve çeşitli problemlerin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Trafik sıklıőlığına bağlı olarak meydana gelen zaman kaybı, yorgunluk, bıkkınlık bu sorunlardan sadece birkaç tanesidir. Ulaşım gereksinimini sağlamak ve oluşan problemleri ortadan kaldırmak amacıyla, kamu kurum ve kuruluőları özömler üretmektedir. Fakat nüfus yoğunluğunun artması, göç, Şehrin fiziki durumu, çarpık kentleşme vb. durumlar bu özömleri yetersiz kılmaktadır. Bu durum ulaşım alanında yapılacak çalışmalara her zaman ihtiyaç olacağının bir göstergesidir. Yapılan çalışmanın daha iyi anlaşılması amacıyla bu bölümdede, günümüzde kullanılan Şehir içi ulaşım sistemleri ve bu alanda geliştirilen teknolojiler hakkında bilgi verilecektir.

Bölüm kapsamında; Şehir içi ulaşım türleri, Şehir içi ulaşımda kullanılan araçlar, bu araçların kullanıcılar tarafından tercih edilme ölçütleri, teknolojik geliőmelere bağlı ortaya çıkan akıllı özömler hakkında bilgiler sunulacak ve bu özömlerin uygulanmasında kullanılan haberleşme teknolojileri tanıtılacaktır.

2.2 Şehir İçi Ulaşım Sistemleri

Őehirlerdeki ulaşım talebini karşılamak amacıyla oluşturulmuş, bireysel ya da toplu kullanılabilen araçların oluşturduğu sistemlerin tamamı Şehir içi ulaşım sistemleri olarak ifade edilmektedir. Şehirlerin fiziki durumuna göre ulaşım sistemleri ve ulaşımda kullanılan araçlar farklılık göstermektedir. Şehir içi ulaşım sistemleri, kullanım alanı ve kullanım durumuna göre farklı Őekillerde sınıflandırılmaktadır. Kullanım alanlarına göre karayolu, demiryolu, denizyolu olmak üzere üç gruba ayrılan bu sistemler, kullanım durumlarına göre bireysel veya toplu ulaşım sistemleri olmak üzere iki farklı grupta incelenmektedir. Bu kısımda denizyolu ulaşım sistemlerine değinilmeden, karayolu ve demiryolu ulaşım sistemleri ve bu ulaşım sistemlerinde

kullanılan araçlar tanıtılacaktır. Bu sistemler genel olarak Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Gelecek kısımda bu ulaşım sistemleri hakkında ayrıntılı bilgi sunulacaktır.



Şekil 2.1 : Şehir içi ulaşım türleri ve araçları

2.2.1 Bireysel Ulaşım Sistemleri

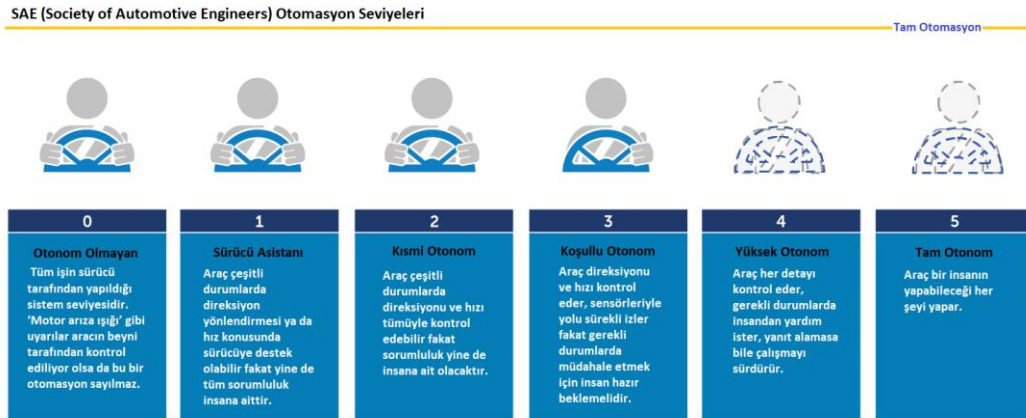
Ulaşımın bireysel olarak yapıldığı ve kişiye özel araçların kullanıldığı ulaşım türüdür. Hijyen, güvenlik, konfor ve esneklik gibi ölçütler, bireysel taşıma sistemlerinin tercih edilmesine sebep olurken, maliyet ve zaman gibi olumsuz etkenler toplu taşımanın tercih edilmesine sebep olmaktadır. Bireysel ulaşım sistemlerine normal araç, taksi ve motosiklet örnek olarak verilebilir.

Motosiklet ve bisiklet bireysel ulaşım da kullanılan iki farklı yaygın araç türüdür. Motosiklet boyut olarak küçük olması sayesinde trafik ve park sorunu oluşturmamakla birlikte, düşük motor hacmi ile yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Fakat bu araçların güvenlik seviyelerinin düşük olması ve olumsuz hava şartlarında kullanımında karşılaşılan güçlükler, kullanıcılar açısından olumsuz yönler olarak değerlendirilmektedir. Bisiklet ise hem sağlık hem de maliyet olarak avantajlı bir

sistem olmakla beraber ulaşım amacıyla kullanılması daha çok şehrin fiziki yapısına bağlı olarak farklılık göstermektedir.

Normal araç, şahsa özel olan araçlardır. Bu araçlar genellikle kullanıcı tarafından kontrol edilmesi gereken ve hedef noktaya ulaşım esnekliğine sahip araçlardır. Yakıt maliyeti ve direksiyon kontrolü sebebiyle şehir içi ulaşımında az tercih edilmektedir. Diğer yandan, direksiyon kontrolünün özel şoför kullanılarak yapıldığı özel şoförlü bireysel araçlarda, maliyet daha yüksek seviyeye ulaşmaktadır.

Sürücüsüz araçlar son yıllarda en çok tartışılan diğer bir bireysel ulaşım sistemidir. Amerikan Otomotiv Mühendisleri Birliği (Society of Automotive Engineers-SAE) tarafından beş seviyede incelenen sürücüsüz araç teknolojisi tam otonom araç seviyesine doğru hızla ilerlemektedir. Bu seviyeler Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : SAE araç otomasyon seviyeleri

Tam otonom olarak tanımlanan beşinci seviye sürücüsüz araçlar konusunda birçok firma çalışma yürütmektedir. Firmalar yaptıkları açıklamalarda, önümüzdeki yıllarda günlük hayatta kullanılacak şekilde, tam otonom araçların üretileceğini ifade etmektedirler. Bu alanda çalışma yürüten firmalardan bazıları ve tam otonom araç üretim hedefleri Tablo 2.1’de gösterilmiştir. Firmalar tarafından yapılan açıklamalara göre 2025 yılına kadar tüm dünyada sürücüsüz araç teknolojisinin kullanılacağı öngörülmektedir (Naughton 2016). Fakat sistemin uygulanabilirliği ve insanların bu teknolojiye adaptasyonu ciddi bir tartışma konusudur. Araştırmacıların öngörülerine

göre sürücüsüz araçların üretimi hızlı olsa da normal trafikte kullanılması zaman alacaktır (Sparrow ve Howard 2017).

Tablo 2.1 : Sürücüsüz araç firmaları ve hedeflenen seri üretim yılları

Firma	Hedef
Ford	2020
Volkswagen	2019
GM	2020
BMW	2021
Ford	2021
Tesla	2023
Toyota	2020

Son olarak farklı bir bireysel ulaşım aracı olan taksi, özel araç konforunun yanında direksiyon kontrolü problemini de ortadan kaldırmaktadır. Fakat bu sistem, seyahat maliyetinin yüksek olması ve bireysel araçların tamamında karşılaştığımız trafik sıkışıklığı ve gaz salınımına bağlı çevre kirliliği problemlerine çözüm sunamamaktadır.

Sonuç olarak ulaşım için çok farklı araçlar kullanılmakta ve araç tercihi için bazı ölçütler kullanılmaktadır. Gelecek kısımda bu ölçütler ele alınacaktır.

2.2.2 Toplu Ulaşım Sistemleri

Bir şehrin gelişmişlik düzeyini belirleyen en önemli ölçütlerden birisi, toplu ulaşım sistemlerinin yeterlilik durumudur. Toplu ulaşım, insanların ulaşım gereksiniminin sabit güzergâh ve belirlenmiş zaman periyotlarında toplu bir şekilde gerçekleştirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Türkiye’de belediyeler tarafından organize edilen toplu ulaşım, şehrin fiziki durumuna göre farklılık göstermektedir. Toplu ulaşımında ortak olan özellik, araç güzergâhlarının belirli olmasıdır. Bu güzergâhların birbirinden farklı mesafelerde, belirli duraklara bölünmesi ile ulaşım talebi karşılanmaktadır. Araçlar önceden belirlenmiş sabit varış ve ayrılış zamanlarında veya periyotlarında hareket etmektedirler. Şehir içinde kullanılan toplu ulaşım sistemleri genel olarak karayolu ve demiryolu olmak üzere iki grupta incelenmektedir.

2.2.2.1 Karayolu Toplu Ulaşım Sistemleri

Ulaşım ağının lastikli araçlar kullanılarak toplu bir şekilde yapılması durumudur. Karayolu toplu ulaşım sistemlerinde kullanılan araçlar genel olarak otobüs, minibüs/dolmuş ve metrobüs olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır.

Otobüs, esnek kullanım ve altyapı maliyetinin düşük olması ile toplu ulaşımında en fazla tercih edilen araç türüdür. 40 ile 150 arası yolcu kapasiteli bu araçlar, tükettikleri yakıt türlerine ve boyutlarına göre farklı isimler almaktadırlar. Trolleybüs, elektrobüs, trambüs ve körüklü otobüs bunlardan bazılarıdır.

Diğer bir ulaşım aracı olan minibüs veya dolmuş, boyut olarak otobüsten daha küçük olmasına rağmen, ulaşım ücreti olarak daha pahalı araçlardır. Bu araçlar ortalama 5 ile 15 arasında yolcu kapasitelidir. Ücretlendirme sabit olmakla beraber güzergâha göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu araçlar belediyelerin özel kişi veya kuruluşlara ihale usulüyle devredilmesi şeklinde işletilmektedir.

Son olarak metrobüs, otobüse benzer tekerli bir araç olup trafik sorununu ortadan kaldırmak amacıyla tasarlanmış ve hat özerkliği bulunan yollara sahip toplu ulaşım aracıdır.

2.2.2.2 Demiryolu Toplu Ulaşım Sistemleri

Raylı araçların kullanımı ile ulaşım gereksiniminin gerçekleştirildiği toplu ulaşım sistemidir. Özellikle kalabalık şehirlerde kullanılan bu sistemler, karayolu araçları kadar esnek olmadıkları halde, yüksek yolcu kapasitesi ve trafik sorununa alternatif bir çözüm sunmalarından ötürü toplu taşımada etkin kullanılmaktadırlar. Genel olarak bu sistemlerde kullanılan araçların yolcu kapasitesi karayolu taşıt sistemlerine göre daha fazla olduğu halde, bakım ve altyapı maliyetleri daha yüksektir. Tren, tramvay, metro ve monoray bilinen en yaygın şehir içi demiryolu toplu ulaşım sistemleridir.

Bilinen en eski demir yolu ulaşım aracı olan tren, genel olarak şehirlerarası ulaşımında kullanıldığı halde, şehir içi ulaşımında da kullanılmaktadır. Metrodan farklı

olarak daha düşük hızda hareket eden tren, sefer düzenlemesini daha uzun zaman periyotlarında yapmaktadır. Özel yollara sahip oldukları halde bu yollar bazen karayolu veya diğer tren hatları ile çakışmakta ve gecikmelere sebep olmaktadır.

Tramvay, altyapısı karayolları üzerine rayların döşenmesi ile oluşturulan, yüzey seviyesinde kullanılan diğer bir ulaşım sistemidir. Bu ulaşım sisteminde kullanılan araçlar, bilinen en yavaş demiryolu araçlarıdır. Altyapı maliyetinin azlığı ve karayolu araçları ile beraber kullanılabilmesi avantaj olarak değerlendirilebilirken, güvenlik, ulaşımın yavaş olması ve trafik sıkışıklığına sebep olması bu sistemin dezavantajları olarak görülmektedir.

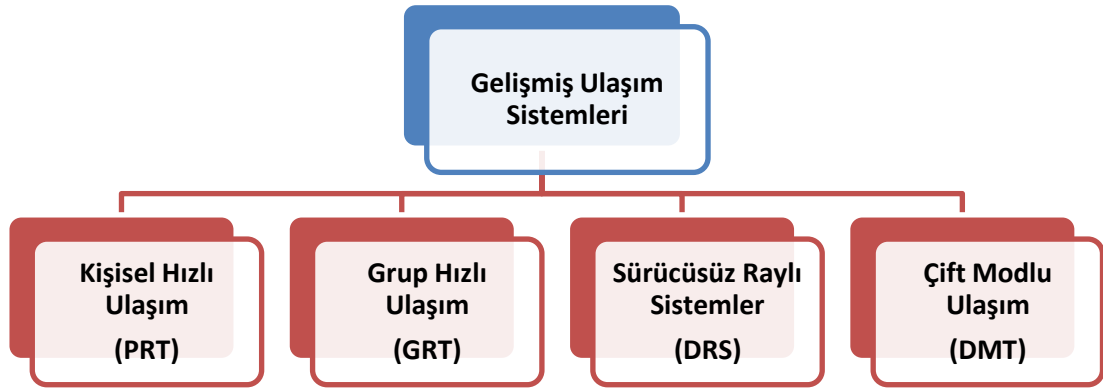
Metro, kalabalık şehirlerde kullanılan en popüler toplu ulaşım sistemidir. Bu sistem için hazırlanmış özel yollarda, trafik problemi olmadan hareket eden metro araçları 10 dakikayı geçmeyen periyotlarla ve yüksek yolcu kapasitesi ile hizmet sunmaktadır. Metro, diğer sistemlere göre altyapı maliyeti daha yüksek olmasına rağmen, hızlı ve güvenli ulaşım avantajı ile kullanıcılar tarafından daha fazla tercih edilmektedir.

Son olarak tek bir ray üzerine oturtularak ulaşım ağını temin eden monoraylar, özel yollara sahip olduklarından trafik problemi olmadan kullanılmaktadırlar. Yüksek altyapı maliyeti, sistemin uygulanabilirliğini olumsuz etkilemektedir. Monoray sistemler farklı fiziki özelliklerle dünyanın çeşitli şehirlerinde toplu ulaşımı sağlamak amacıyla kullanılmaktadırlar.

Bu sistemlerin haricinde teleferik, finüküler, kablolu araba gibi kablolu sistemler de şehir içi ulaşımında kullanılan diğer bir kısım sistemlerdir.

2.3 Gelişmiş Ulaşım Sistemleri

Akıllı sistemlerin ulaşım teknolojisinde kullanılması, araç ve ulaşım sistemlerinde bir kısım değişiklikler meydana getirmiştir. Gelişmiş ulaşım sistemleri ise bu değişim sonucunda ortaya çıkan ve Kişisel Hızlı Ulaşım (Personal Rapid Transit-PRT), Grup Hızlı Ulaşım (Group Rapid Transit-GRT), Sürücüsüz Raylı Sistemler (Driverless Rail Systems-DRS) ve Çift Modlu Ulaşım (Dual-Mode Transit-DMT) gibi sistemleri kapsayan yapıya verilen isimdir. Şekil 2.3'te gelişmiş ulaşım sistemleri gösterilmiştir. Otobüs, tren, tramvay gibi geleneksel ulaşım sistemlerinden farklı özellikler içeren bu sistemlere ait tarihsel gelişim süreci, Birinci Bölüm'de ayrıntılı ifade edilmiştir. Bu kısımda ise PRT, GRT, DRS ve DMT sistemlerinin özelliklerinden ve birbirine göre üstünlüklerinden bahsedilecektir.



Şekil 2.3 : Gelişmiş ulaşım sistemleri

PRT, hat özerkliğine sahip yükseltilmiş veya zemin seviyesinde inşa edilmiş özel yollarda hareket eden araçların oluşturduğu sistemlere verilen isimdir. 3-6 yolcu kapasiteli araçlar ile 7/24 hizmet sunan PRT, sinyal ve dışsal etkenlerden soyutlanmış hat özerkliği olan yollar ile sürücüsüz ve kesintisiz (nonstop) ulaşım imkânı sunmaktadır. İstasyonda ortalama bir dakika bekleme süresi ile hizmet veren araçların kullanıldığı bu sistemler, ortalama 45 km/s hızla ulaşım talebini karşılamaktadırlar.

GRT ise PRT'ye göre daha büyük ve yolcu kapasitesi daha yüksek olan araçların kullanıldığı sistemlere verilen isimdir. Hat özerkliği bulunmayan bu sistemler; sinyal, yaya ve diğer ulaşım araçları gibi dışsal etkenler sebebiyle kesintisiz ulaşım imkânı sunamamaktadırlar. Ortalama seyahat hızı PRT ile benzerlik gösteren bu sistemlerin istasyonda bekleme süresi ortalama 2,5 dakikadır (Muller ve Andreasson 2018).

Diğer bir gelişmiş ulaşım sistemi olan DRS, metro, monoray ve tren gibi geleneksel raylı ulaşım sistemlerinin sürücüsüz ve daha hızlı ulaşım imkanı sunmalarına olanak sağlayacak şekilde dönüştürülmesi ile ortaya çıkan sistemlere verilen isimdir. Bu sistemler hat özerkliğine sahip farklı seviyelerde inşa edilen yollar kullanmakta ve bu sayede kesintisiz ulaşım imkânı sunmaktadırlar. Saatte 420 km'ye kadar yol alabilen bu araçlar hızlı ulaşım için kullanılmaktadırlar.

Son olarak DMT, birden fazla ulaşım modunun bir sistemde birleştirildiği ulaşım sistemleridir. Bu sistemler genel olarak kapıdan-kapıya ulaşım sunmak ve kılavuz yol olarak isimlendirilen ve hat özerkliğine sahip yollarda hızlı ulaşım hizmeti sunmak amacıyla tasarlanmıştır. Kılavuz yollarda sürücüsüz, normal yollarda sürücülü kontrol edilen araçların kullanıldığı bu sistemler; yol yapısı, araç yapısı, yol bağlanma biçimi ve şerit yapısına göre farklılıklar göstermektedir. Çift modlu ulaşım sistemler ile ilgili gelişmeler ve öne çıkan bazı sistemler Birinci Bölüm'de ayrıntılı ifade edilmiştir.

2.4 Şehir İçi Ulaşım Sistemlerinin Tercih Ölçütleri

Kullanıcılar ulaşım araçlarını tercih ederken bazı ölçütleri kullanarak seçim yapmaktadırlar. Her bir sistem veya araç, duruma göre farklı ölçütlere sahiptir. Bu ölçütler çevresel, ekonomik ve teknolojik ölçütler olmak üzere üç farklı grupta incelenmektedir (Çalış 2016). Konumuzla ilgili bazı ölçütler ve bu ölçütlere ait açıklamalar aşağıda verilecektir.

2.4.1 Uygulanabilirlik

Bir sistemin, şehir ulaşımında uygulanabilmesi durumunu temsil etmektedir. Bazı sistemler, altyapı ve araç maliyetlerinin düşük olması ve şehrin fiziki durumuna daha rahat uyarlanabilmesi ile uygulanabilirliği daha yüksek sistemler olarak ifade edilmektedir. Örneğin; otobüs veya minibüs, metro ulaşım sistemine göre uygulanabilirliği daha yüksek ulaşım sistemleridir.

2.4.2 Esneklik

Tercih edilen sistemin kullanıcıların ulaşım ihtiyacını karşılama düzeyi, esneklik ölçütü ile ölçülmektedir. Diğer bir ifade ile esneklik, bir kullanıcının ulaşım gereksinimini, yürüme olayını en aza indirecek şekilde gerçekleştirmesidir. Örneğin, metro ulaşım sistemini kullanacak olan bir yolcu, metro istasyonuna ulaşmak için yürümek veya farklı bir ulaşım aracı kullanmak zorundadır. Bu durum hedef istasyonuna vardikten sonra da geçerlidir. Fakat normal aracı tercih eden bir kullanıcı, farklı bir ulaşım aracı kullanmadan hedefine ulaşabilir. Bu durum normal aracın metroya göre daha esnek bir sistem olduğunu göstermektedir.

2.4.3 Zaman

Kullanıcının başlangıç konumu ile hedef konumu arasındaki seyahatinde harcadığı süre zaman ölçütü ile temsil edilmektedir. Zaman ölçütüne göre metro ulaşım sistemi, otobüse göre daha uygun bir sistemdir.

2.4.4 Hijyen

Bu ölçüt araç içerisindeki temizliği ifade etmektedir. Bu ölçüte göre bireysel ulaşım sistemleri, toplu ulaşım sistemlerine göre daha fazla hijyene sahip sistemlerdir.

2.4.5 Konfor

Ulaşım sistemlerinde kullanılan araçların teknolojik donanımları ve kullanıcının oturma, ayakta yolculuk veya sarsılma gibi durumlarının tamamını temsil eden kavramdır. Örneğin taksi, minibüse göre daha konforlu bir ulaşım aracıdır.

2.4.6 Zaman Kullanımı

Bu kavram kullanıcının seyahat esnasında zamanını farklı bir aktivitede kullanabilme durumunu ifade etmektedir. Bu ölçüt, normal araçlar için kullanıcının kendi arabasını kontrol etmesi gerektiğinden olumsuz olarak değerlendirilmektedir. Fakat toplu ulaşım veya taksi gibi sistemlerde, kullanıcı zamanını dinlenme, kitap okuma veya mesajlaşma gibi aktivitelerde kullanabilmektedir. Dolayısıyla toplu ulaşım sistemlerinde kullanılan araçlar, normal araçlara göre zaman kullanımını daha yüksek araçlardır.

2.4.7 Kişisel Güvenlik

Kullanıcıların hırsızlık, darp veya sözlü saldırılara karşı korunması olarak ifade edilen kişisel güvenlik kavramı, ulaşımda dikkate alınan etkili bir ölçüttür. Bu anlamda bireysel ulaşım sistemleri, toplu ulaşım sistemlerine göre kişisel güvenliğin daha yüksek olduğu sistemlerdir.

2.4.8 Araç ve Sistem Güvenliği

Kişisel güvenlikten farklı olarak kullanılan aracın arıza veya çarpışma olasılığını temsil eden ölçüttür. Bu ölçüte göre kaza oranları ve kazalarda meydana gelen yaralanma ve ölüm sayıları karşılaştırıldığında metro, normal araçlara göre daha güvenli bir ulaşım sistemi olarak kabul edilmektedir.

2.4.9 Araç ve Altyapı Maliyeti

Sistem içerisinde kullanılan araçların üretim, bakım ve altyapı maliyetleri bu ölçüt ile değerlendirilmektedir. Örneğin, demiryolu toplu ulaşım sistemleri, karayolu ulaşım sistemlerine göre araç ve altyapı maliyeti yüksek sistemlerdir.

2.4.10 Yakıt Maliyeti

Bu ölçüt, sistem içerisindeki araçların kullandığı yakıt türünü ve kilometre bazında tükettiğini yakıt miktarını göstermektedir. Günümüzde elektrikli araçların yaygın hale gelmesi ve araç teknolojisinin gelişmesi ile yakıt tüketiminin azalması, yakıt maliyeti ölçütünün değişimine sebep olmuştur. Bu ölçüte göre kullanıcılar yakıt maliyetinin yüksek olması sebebiyle normal araç kullanmak yerine toplu ulaşımı tercih etmektedirler.

2.4.11 Hat Özerkliği

Sistemin kendine özel bir hata sahip olduğu; yaya, hayvan, trafik ışığı veya herhangi bir dışsal etmenin hat üzerinde bulunmadığı sistemlerdir. Metro ulaşım sistemi, hat özerkliğine sahip bir ulaşım sistemi iken; taksi, hat üzerinde yaya veya farklı araçların bulunması sebebiyle hat özerkliği bulunmayan bir ulaşım sistemidir.

2.4.12 Trafik Sıkışıklığı

Hat özerkliği ile ilişkili olan bu ölçüt, trafikte oluşan gecikmeyi ifade etmektedir. Şehir nüfusu, altyapı durumu veya seyahat zamanına göre değişiklik gösteren bu kavram, araştırmacıların çözüm aradığı en büyük sorunlardan birisidir. Metro ve metrobüs dışındaki tüm ulaşım sistemlerde trafik sıkışıklığı problemi yaşanmaktadır.

2.4.13 Çevre Kirliliği

Çevre kirliliği, araçların doğada meydana getirdiği kirliliği temsil eden ölçüttür. Bu duruma göre, elektrik enerjisi ile çalışan araçlar diğer yakıt türleri ile çalışan araçlara göre çevreyi daha az kirletmektedirler.

2.5 Akıllı Ulaşım Sistemleri

21. yüzyılın son çeyreğinde hayatımıza giren Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS), her geçen gün yeni özelliklerin keşfedilmesi ile ilerleyerek önceki kısımlarda özetlenen şehir içi ulaşım sistemlerinin gelişmesine ve bu sistemlerin tercih ölçütlerinin iyileşmesine katkıda bulunmaktadır. Bilgi ve iletişim teknolojilerini uygulayarak ulaştırma ağının işletimine yardımcı olan akıllı ulaşım sistemleri, son zamanların en merak edilen konularından birisi haline gelmiştir. Rekabetçi piyasa, gelişen teknoloji ve her geçen gün artan talep yeni araçların ortaya çıkmasına sebep olurken, akıllı ulaşım sistemlerinin de gelişmesine zemin hazırlamıştır.

Trafikte sürücü ve yayalara düşünme ve karar verme konusunda yardımcı olan akıllı ulaşım sistemleri, ilk olarak trafik ışıkları ile hayatımıza girmiştir. Fakat günümüzde bilindiği anlamıyla AUS uygulamalarının ilk örneği; Amerika, Almanya ve Japonya'da uygulanan ve otoyollardaki işletim problemlerini çözmek amacıyla oluşturulan sistemlerdir. Bu sistemler, zaman içerisinde araç ve altyapı sistemleri için önerilen yeni uygulamalar ile zenginleşmiş ve günümüz seviyesine ulaşmıştır. Türkiye'de ilk defa 1992 yılında başlayan AUS çalışmaları, Otoyol Ücret Toplama Sistemi olarak bilinen sistem ile hayatımıza girmiştir. Bu uygulamaları sonraki yıllarda Otomatik Geçiş Sistemi (OGS), Kartlı Geçiş Sistemi (KGS) ve Hızlı Geçiş Sistemi (HGS) uygulamaları takip etmiştir.

Dünya Yol Birliği (PIARC) tarafından hazırlanan AUS uygulamalarının kullanım ve üretim amaçları şunlardır:

- Karayolu güvenliği ve emniyetinin iyileştirilmesi,
- Trafik sıklığının giderilmesi veya azaltılması,
- Çevrenin korunması ve olumsuz etkilerin ortadan kaldırılması,
- Ulaşım sistemi verimliliğinin artırılması ve işletme koşullarının iyileştirilmesi,
- Ulaşım sisteminde konforun artırılmasıdır.

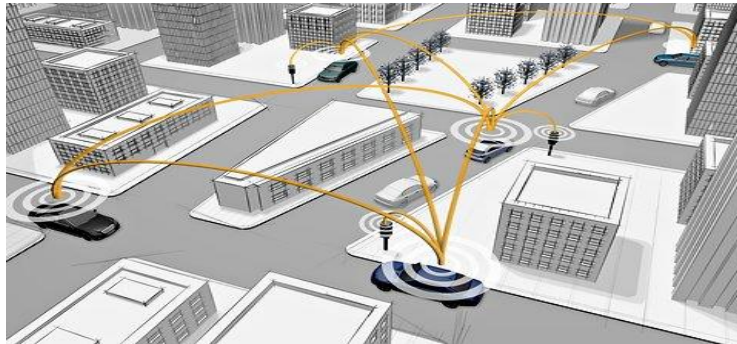
Bu amaçlar çerçevesinde geliştirilen uygulamalar, yaya, altyapı ve araç yapılarına veya alanlarına uygulanarak verimliliğin artmasına ve koordinasyonun sağlanmasına katkıda bulunmaktadır. Günümüzde üstyapıda kullanılan bazı AUS uygulamalarına; sinyalizasyon, kavşak kontrolü, elektronik uyarı tabelaları, araç tanıma sistemleri, trafik kontrolü vb. örnek olarak verilebilir. Özellikle kişisel araçlar

alanında hazırlanmış AUS uygulamaları ile araçlara yeni özellikler eklenmiştir. Böylelikle araçlarda konfor, güvenlik ve sürüş kolaylığının artması ve yakıt tasarrufunun oluşması sağlanmıştır. Şerit algılama sistemleri, otomatik park sistemleri, hız kontrol sistemleri, araç takip sistemleri vb. uygulamalar araçlar için hazırlanmış AUS sistemlerine örnek olarak verilebilir.

Sonuç olarak AUS uygulamaları, her geçen gün hız kesmeden gelişmekte ve kullanıcılara sundukları kolaylıklarla yaşam kalitesinin artmasına olanak sağlamaktadırlar. Böylelikle, geçmişte hayal olarak ifade edilen uygulamalara, her gün bir adım daha yaklaşmaktadır.

2.6 Araçlar Arası Haberleşme Teknolojileri

AUS uygulamalarının en önemli konularından birisi, araçlar arasındaki haberleşmenin hangi teknolojilerle gerçekleştirileceği sorusudur. Özellikle tam otonom sürücüsüz araçların popüler olduğu günümüzde, bu kavram daha da önem kazanmıştır. Araç-Araç Haberleşme (Vehicle to Vehicle-V2V) olarak literatüre giren ve araçlar arası haberleşmeyi sağlayan sistemler ve protokoller, sürücüsüz araç kavramının uygulamaya geçmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu sistemlere ek olarak Araç-Altyapı Haberleşme (Vehicle to Infrastructure-V2I), Altyapı-Araç Haberleşme (Infrastructure to Vehicle-I2V) gibi sistemler sayesinde, araçların diğer araçlar dışında Şekil 2.4'te gösterilen kavşaklar, ışıklar vb. altyapı araçlarıyla da haberleşmesine olanak sağlamaktadır (Stenquist 2012).



Şekil 2.4 : V2V ve V2I haberleşme

Gelişen teknolojinin sunduğu imkânlarla araçlar arası haberleşme birçok farklı protokol ve sistem kullanılarak yapılmaktadır. Kullanım alanlarına göre farklı özellikler barındıran bu sistemler; iletişim kapasitesi, iletişim hızı ve iletişim maliyeti gibi ölçütler göz önüne alındığında farklılık göstermektedirler. Teknolojideki gelişme ve bu alanda yapılan çalışmaların devam etmesi ile daha hızlı iletişim kurabilen ve daha yüksek bant genişliğine sahip sistemler ve cihazlar üretilecektir. Bu alanda kullanılan bazı sistemler ve bu sistemlere ait özellikler izleyen alt kısımlarda özetlenecektir.

2.6.1 Bluetooth

Bluetooth, Kablosuz Kişisel Alan Ağı (Wireless Personal Area Network-WPAN) olarak da bilinen ve ilk olarak 1994 yılında Ericsson şirketi tarafından cep telefonları arasında veri aktarımını sağlamak amacıyla oluşturulan bir sistemdir. Düşük maliyet, düşük güç tüketimi ve düşük mesafede 2.4 GHz veri iletim bandında 24 Mbps'a kadar veri aktarım hızına ulaşabilen bu teknoloji, araç ve telefon gibi cihazların birbiri ile iletişim kurmasına olanak sağlamaktadır (Lende ve Bhangale 2015).

2.6.2 ZigBee

Çoklukla kısa mesafe kablosuz iletişimde kullanılan bu sistem, düşük enerji gereksinimi ve düşük donanım maliyetiyle rakiplerine göre daha fazla tercih edilmektedir. 2.4 GHz veri iletim bandında ve yaklaşık 250 Mbps veri aktarım hızıyla, düşük veri akışı gerektiren sistemlerde kullanışlıdır. Ayrıca 30 ms gibi düşük gecikme süresi ile haberleşme kapasitesi orta mesafeli sistem tasarımlarında oldukça elverişlidir (Abinayaa ve Jayan 2014).

2.6.3 Wi-Fi

IEEE 802.11x standartlarıyla bluetooth sistemine göre daha hızlı ve daha geniş mesafelerde iletişim olanağı sunan bir sistemdir. Wi-Fi sistemleri, araçlar ve diğer

altyapı sistemleri arasındaki haberleşmeyi sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Bu cihazlar IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11ac, IEEE 802.11e, IEEE 802.11g ve IEEE 802.11n isimleriyle 2.4 GHz ile 5 GHz veri iletim bantlarında maksimum 100 Mbps hıza kadar haberleşme olanağı sağlamaktadırlar.

2.6.4 Özel Kısa Mesafeli İletişim

Temelde bir Wi-Fi standardı olan Özel Kısa Mesafeli İletişim (DSRC), 5.9 GHz veri iletim bandında 1 km mesafeye kadar haberleşebilmektedir. DSRC yüksek güvenlik ve iletim hızıyla V2V ve V2I haberleşmede sıklıkla kullanılmaktadır.

V2V haberleşmede kullanılan ve kısaca özellikleri hakkında bilgi verilen bu sistemlere ait karşılaştırma Tablo 2.2’de sunulmuştur (Anwer ve Guy 2014). ZigBee ve DSRC düşük maliyet ve uygun iletişim mesafesiyle araç haberleşmelerinde en sık kullanılan teknolojilerdir.

Tablo 2.2 : Kablosuz bağlantı teknolojileri ve özellikleri

	GHz	Veri iletim hızı	Max sinyal mesafesi	Sinyal bozulması	Maliyet	Güvenlik
Bluetooth 802.15.1	2.4	≈ 1-24 Mbps	100 m	Yüksek	Düşük	Düşük
ZigBee 802.15.2	2.4	≈ 250 Kbps	100 m	Yüksek	Düşük	Yüksek
Wi-Fi 802.11a	5.1/5.8	≈ 54 Mbps	100 m	Düşük	Yüksek	Düşük
Wi-Fi 802.11b	2.4	≈ 11 Mbps	100 m	Yüksek	Orta	Düşük
Wi-Fi 802.11g	2.4	≈ 54 Mbps	140 m	Yüksek	Orta	Düşük
Wi-Fi 802.11n	2.4/5	≈100 Mbps	250 m	Yüksek	Yüksek	Yüksek
DSRC 802.11p	5.8/5.9	≈ 27 Mbps	1 km	Düşük	Orta	Yüksek

3. ETMEN TEKNOLOJİSİ

3.1 Giriş

İnsan gibi düşünen makinalar veya sistemler, son yüzyılda en fazla tartışılan ve üzerinde araştırma yapılan konuların başında gelmektedir. Bu alanda yapılan çalışmalar sayesinde akıllı olarak nitelendirdiğimiz birçok cihaz üretilmeye başlanmıştır. Elimizdeki telefonlardan, üretim yaptığımız makinalara kadar yaşamımızın her alanında karşılaştığımız akıllı sistemler, yapay zekâ tekniklerinde meydana gelen gelişmeler sayesinde her geçen gün gelişerek insan yaşamına daha fazla katkı sunmaktadır. Üretim alanında sunulan çözümler dışında gezgin satıcı problemi gibi çözümü zaman alan problemler, sezgisel yaklaşımlar sayesinde hızlı bir biçimde çözülebilmektedir. Geniş bir kapsama sahip olan akıllı sistemler ve yapay zekâ kavramları zaman içerisinde etmen teknolojisi, genetik algoritmalar, yapay sinir ağları vb. gibi alt alana ayrılmıştır. Bu bölümde, bahsi geçen alanlardan sadece etmen teknolojisi hakkında bilgiler sunulacaktır.

Bölüm kapsamında, etmen teknolojisi ve çok etmenli sistemler hakkında bilgi birikiminin sağlanması amaçlanmakta; etmen, etmen türleri ve etmen özellikleri ayrıntılı olarak ifade edilerek etmen tanımlaması, etmen mimarileri ve benzetim ortamlarından biri olan NetLogo etmen benzetim ortamı tanıtılacaktır.

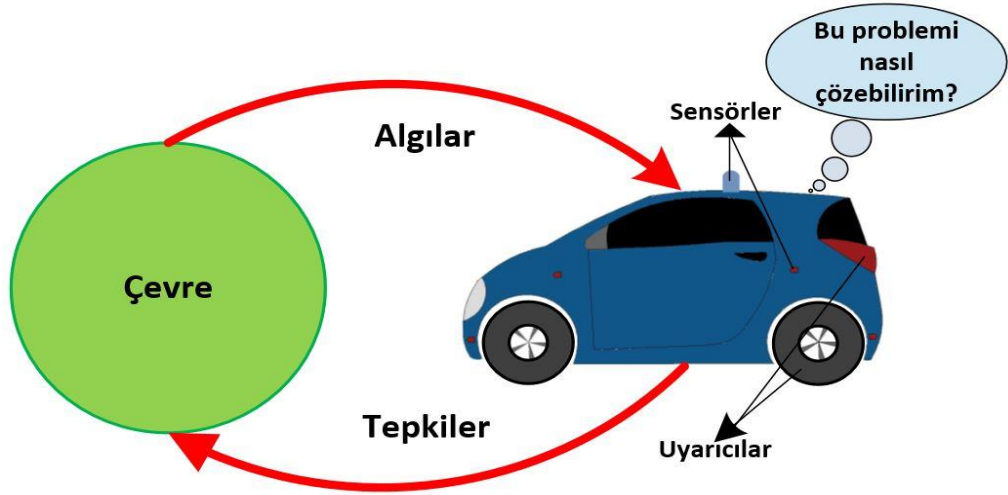
3.2 Etmen

Literatürde etmen için belirlenen ortak bir tanım bulunmamaktadır. Her bir araştırmacı etmen tanımını, çalıştığı konu üzerinde öne çıkan özellikleri kapsayacak şekilde yapmıştır (Erdur 2001). Bu tanımlardan bazıları şunlardır;

- “Algılayıcıları yardımıyla ortamı algılayan ve etkileyicileri yardımıyla bu ortamı etkileyen bir sistem etmendir” (Russell ve Norvig 2016).
- “Etmen, bir işi nasıl yapıldığının anlaşılmasına gerek kalmadan kullanıcıları adına gerçekleştiren makinedir” (Minsky ve Riecken 1994).

- “Etmeler, aşağıdaki özellikleri barındıran donanım veya genellikle yazılım tabanlı sistemlerdir:
 1. Kullanıcıların doğrudan katılımı olmadan belli bir derecede özerklik çerçevesinde çalışmak.
 2. Kullanıcılar ve diğer etmenler ile iletişimde bulunmak.
 3. Ortamı algılamak ve ortamdaki değişimlere karşı eylemde bulunmak.
 4. Belirli amaçlara ulaşabilmek için eylemlerde bulunmak”
(Wooldridge ve Jennings 1994).
- “Etmeler, kullanıcısının adına bir takım görevleri yerine getirmek üzere davranma yeteneği olan yazılım veya donanım bileşenidir” (Nwana 1996).
- “zerk etmenler, karmaşık ve dinamik olarak değişebilen bir ortamda bulunan, ortamı algılayan, ortamı etkileyen ve bunları bir takım amaçlar doğrultusunda yapan sistemlerdir” (Maes 1995).
- “Akıllı etmenler sürekli olarak aşağıda belirtilen üç fonksiyonu yerine getiren sistemlerdir:
 1. Ortamdaki dinamik değişimleri algılamak.
 2. Ortamı etkileyen eylemlerde bulunmak.
 3. Algıları yorumlamak ve amaçlar doğrultusunda yapılması gereken eylemlerin belirlenmesi için akıl yürütmek” (Hayes-Roth 1995).

Bu tanımların tamamı incelendiğinde etmen için řu genel tanım önerilebilir: Etmeler, algılayıcıları ile çevreden aldıkları bilgileri, uyarıcıları ile amaca uygun tepkilere dönüştüren yapılarıdır. Etmeler durumu ve bileşenleri şekil 3.5’te görülmektedir.



Şekil 3.5 : Etmen ve bileşenleri

Şekil 3.5’te ifade edilen kavramlar ve açıklamaları şunlardır:

- Sensörler: Çevre hakkında durum tespiti yapmak veya çevreyi fark etmek için kullanılan araçlardır. Örneğin; Kamera, lidar, sıcaklık sensörü vb.
- Uyarıcılar: Etmenin sensörler yardımıyla elde ettiği algılara, fiziki tepkiyi vermeye yardımcı olan araçlardır. Hareket motoru, tekerlek, sinyal vb.
- Algılar: Sensörler yardımıyla elde edilen bilgiler olarak tanımlanmaktadır.
- Tepkiler: Uyarıcılar yardımıyla çevrede yapılan değişiklikler olarak ifade edilmektedir.
- Çevre: Etmenin görev yaptığı fiziksel ortamı temsil eden kavramdır.

Etmenlere ait özellikler, birincil ve ikincil özellikler olmak üzere iki ayrı grupta incelenmektedir. Birincil özellikler, bir yapının etmen olarak nitelendirilebilmesi için sahip olması gereken asgari özellikler olarak tanımlanırken ikincil özellikler ise etmen yapısını güçlendiren özellikler olarak tanımlanmaktadır. Bu özellikler ayrıntılı olarak izleyen alt kısımlarda incelenecektir.

3.2.1 Etmen Birincil Özellikleri

Bir yapının etmen olarak tanımlanabilmesi için sahip olması gereken asgari özelliklere birincil özellikler denir. Bu özellikler sırasıyla; özerklik, karşıt-eylemlilik, amaç-yönelimlilik, sosyal yetenek ve kalıcı süreklilik özellikleridir.

Özerklik, bir etmenin herhangi bir dış etki olmaksızın kendi davranışlarını kendisinin belirleyebilmesi durumudur. Fakat özerklik, sınırsız bir özerklik olarak anlaşılmalıdır. Bir etmenin özerkliği, programcının veya yöneticinin belirlemiş olduğu sınırlar içerisinde bir özerklik olarak anlaşılmalıdır. Kullanıcının satın alma ile yetkilendirdiği bir etmenin, kullanıcıya sormadan kullanıcının ihtiyacı olan bir ürünü tespit etmesi ve onu satın alması bu özelliğe örnek olarak verilebilir.

Karşıt-Eylemlilik, etmenlerin buldukları ortamdaki değişikliklere göre durumunu değiştirebilmeleri olarak ifade edilmektedir. Algılayıcılar yardımı ile ortam hakkında bilgi alan etmenler, gerektiğinde çevresinde oluşan değişiklikleri algılayarak durumlarını değiştirmektedirler. Böylece yanlış tepkilerin oluşmasının önüne geçilmektedir. İnternet ortamında bilgi takibi yapan bir etmenin, sunucu özellikleri değiştiğinde kendi durumunu güncellemesi bu özelliğe bir örnektir.

Amaç-Yönelimlilik, bir etmenin almış olduğu görevi yerine getirebilmesi için planlama yaparak bu planlara uygun tepkiler üretmesi durumunu temsil etmektedir. Çöp toplayan bir etmenin görevini nasıl ve hangi sırada yapacağını belirlemesi bu özelliğe örnek olarak verilebilir.

Sosyal yetenek, bir etmenin tanımlandığı görevi yerine getirirken ortam araçlarıyla veya diğer etmenlerle iletişim kurabilme yeteneğini ifade etmektedir. Bir araç etmeninin önündeki etmen ile haberleşerek hızını güncellemesi veya bilgi alış veriş yapması sosyal yeteneğe örnek olarak verilebilir.

Kalıcı süreklilik, etmenlerin buldukları ortamda kesintisiz çalışması durumunu temsil eden özelliktir. Bir etmen tanımlandığı görevi tamamladıktan sonra çevre ile iletişim halinde olmalı ve uygun tepkiler üretmek için çalışır durumda bulunması gerekmektedir. Trafik ışıklarını ayarlayan bir etmenin araç olmadığı durumlar da dâhil, sürekli çalışmaya hazır olması durumu bu özelliğe bir örnektir.

3.2.2 Etmen İkincil Özellikleri

İkincil özellikler, tüm etmenlerin sahip olmak zorunda olmadığı, çalışma alanına veya etmen türüne göre farklılık gösteren ve etmen yapısını güçlendiren ek

özelliklerdir. Etmenler taşıdıkları ikincil özellik sayısına göre güçlü etmen veya zayıf etmen olarak isimlendirilmektedirler. Etmenlere ait öne çıkan bazı ikincil özellikler şunlardır:

Gezicilik, etmenlerin buldukları ortamda serbestçe hareket edebilmeleri özelliğidir. Etmenler, sahip oldukları uyarıcılar ile ortamda konum değiştirebilmekte ve amaca uygun tepki üretebilmektedirler.

Öğrenme, bir etmenin ortama adapte olabilmesi ve uygun tepkiler üretebilmesi durumunu temsil etmektedir. Bu sayede yeni durumlara uygun çözümler sunabilmek mümkündür.

Dürüstlük, bir etmenin kasıtlı olarak yanlış bilgi sunmaması durumunu temsil etmektedir. Özellikle çok etmenli sistemlerde bu özellik önem arz etmektedir.

Olumluluk, etmenlerin kendisinden beklenen görevleri yerine getirmek için amaçlarına aykırı olmadıkça tüm beklentileri karşılama ve çalışmasına devam etmesi durumudur.

3.3 Etmen Tanımlaması

Etmen tasarımlarında en önemli adımlardan birisi etmenin doğru şekilde tanımlanmasıdır. Etmen tanımlamalarında dört farklı parametre kullanılmaktadır. Literatürde PEAS (Performance, Environment, Actuators, Sensors) kuralları olarak tanımlanan bu parametreler dilimize başarımlar, çevre, uyarıcılar ve algılayıcılar şeklinde çevrilmiştir. Bu parametrelerden başarımlar, etmenin çalışma amaçlarını; çevre, etmenin hareket edeceği ortamı ve ortam parametrelerini; uyarıcılar, etmenin hareket etme kapasitesini ve sahip olduğu donanımları; algılayıcılar ise etmenin çevreyi algılama işlevini sağlayan cihazları ifade etmektedir. Bu parametreler ve durumlarını ifade eden sorular şunlardır;

- Başarımlar (Performance): Performansı nasıl ölçeceğim?
- Çevre (Environment): Ortam özellikleri nelerdir?
- Uyarıcılar (Actuators): Ortamı etkileyecek hareketler nelerdir?
- Algılayıcılar (Sensors): Ortam nasıl algılanır?

Parametreler arasındaki farkların daha iyi anlaşılması için Tablo 3.3'te üç farklı etmen için PEAS parametreleri örneklerle verilmiştir.

Tablo 3.3 : Örnek etmenler için PEAS parametreleri

	<u>P</u>erformance	<u>E</u>nvironment	<u>A</u>ctuators	<u>S</u>ensors
Taksi sürücü etmeni	Güvenlik, hedefe ulaşma, kurallara uyma...	Sokaklar, trafik, hava durumu, müşteri	Tekerlek, korna, motor	Kamera, hızölçer, gps
Hastalık teşhis etmeni	Sağlıklı hasta, düşük maliyet	Hasta, hastane, personel	Sorular, testler, tetkikler	Test sonuçları, belirtiler
Rafineri kontrol etmeni	Güvenlik, maksimum temizlik	Rafineri, operatörler	Vanalar, ısıtıcılar, pompalar	Sıcaklık, basınç,

3.4 Etmen Mimarileri

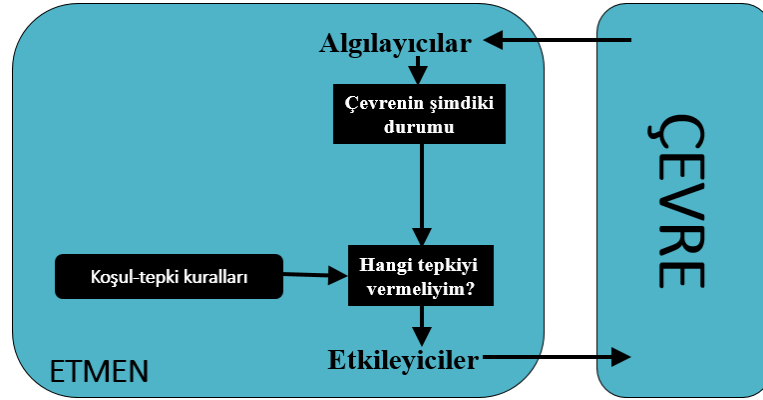
Etmenler, etmen programı ve etmen mimarisi olmak üzere iki ana yapıdan oluşmaktadırlar. Etmen programı, yönetici tarafından tanımlanan ve etmen mimarisinden gelen algıları amaca uygun sonuçlara dönüştüren fonksiyondur. Etmenlerin karar verme birimi olarak çalışmaktadır. Etmen mimarisi ise sensörler yardımıyla çevreden elde edilen bilgileri, etmen programına göndererek etmen programının ürettiği sonucu uyarıcılar yardımıyla tepkiye dönüştüren yapıdır.

Russell ve Norvig tarafından 2016 yılında yayınlanan yapay zekâ kitabında, etmen mimarileri; basit tepkisel etmenler, model tabanlı etmenler, hedef tabanlı etmenler, fayda tabanlı etmenler ve öğrenen etmenler olmak üzere beş farklı türe ayrılmıştır (Russell ve Norvig 2016). İzleyen alt kısımlarda sayılan bu etmen türleri hakkında bilgi verilecektir.

3.4.1 Basit Tepkisel Etmenler

Etmen mimarileri içerisinde en basit yapıya sahip olan etmen türüdür. Tanımlanan kural ve koşullara göre hareket eden bu etmenler, eylemlerin seçiminde

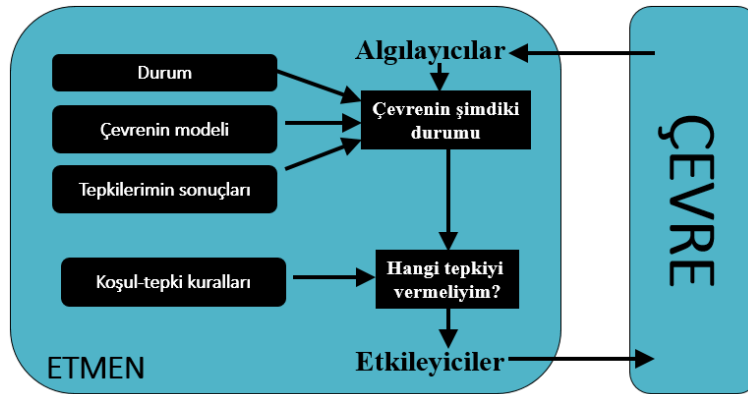
geçmişteki algıları yok sayarak mevcut algılar ile hareket etmektedirler. Basit tepkisel etmen mimarisine ait şema gösterimi Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



Şekil 3.6 : Basit tepkisel etmen mimarisi

3.4.2 Model Tabanlı Etmenler

Model tabanlı etmen mimarisinde, etmen yerine etmenin çalıştığı ortam modellenmektedir. Bu mimaride etmen, yapısına göre çevreyi anlar ve bir modelini hafızasında tutmaya çalışır. Böylelikle çevreden doğrudan bilgi almakla beraber model bilgisini de kullanarak tepkiler üretir. Bu mimariye ait şema gösterimi Şekil 3.7’de verilmiştir.

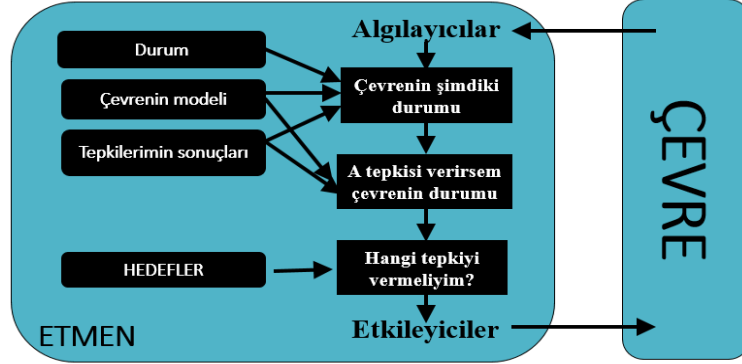


Şekil 3.7 : Model tabanlı etmen mimarisi

3.4.3 Hedef Tabanlı Etmenler

Bu mimaride tanımlanan etmenler için belirli bir hedefe ulaşmak amacıyla önceden tanımlanmış kurallar dizisi işletilmektedir. Hedef tabanlı etmenler

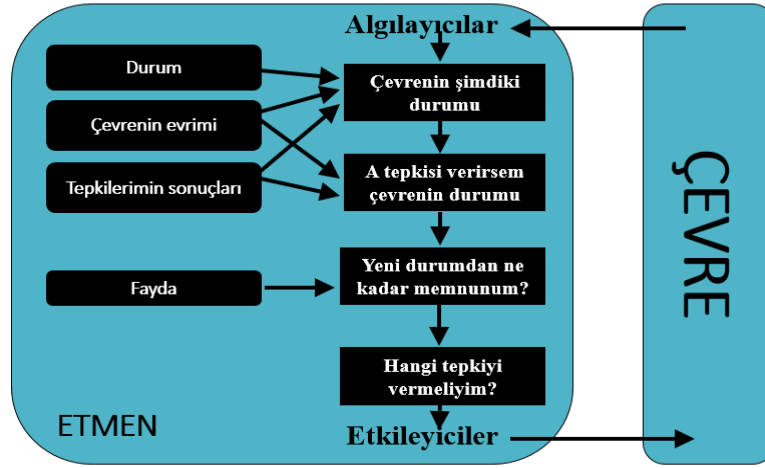
karşılaşılan durumu önceden tanımlanmış en yakın duruma benzetmekte ve bu durumu, ulaşmak istedikleri hedefe en uygun biçimde eylemlerle değiştirmeye çalışmaktadırlar. Böylelikle eski tecrübeler kullanılarak daha uygun çözümler bulmaktadırlar. Hedef tabanlı etmen mimarisine ait şema gösterimi Şekil 3.8’de görülmektedir.



Şekil 3.8 : Hedef tabanlı etmen mimarisi

3.4.4 Fayda Tabanlı Etmenler

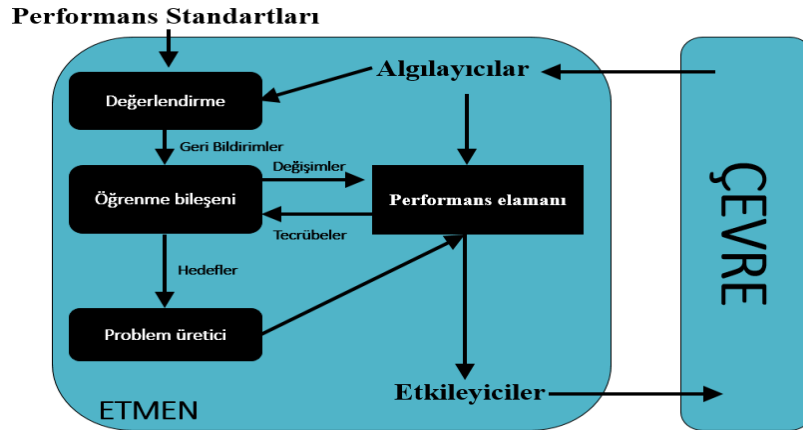
Bu etmenler, hedef tabanlı etmenlerden farklı olarak durumlar arasındaki geçişi önceden tanımlı bir fonksiyon kullanarak yapmaktadırlar. Bu mimaride, daha çok tercih edilen durumlara yüksek fayda değeri verilerek, durumlar arası geçişin bu değerlere göre yapılması sağlanmaktadır. Bu etmen mimarisine ait şema gösterimi Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9 : Fayda tabanlı etmen mimarisi

3.4.5 Öğrenen Etmenler

Bu mimari etmenlerin kendi durum fonksiyonlarını kendisinin belirleyip değiştirmesine olanak sağlamaktadır. Çevrenin tamamen bilinemediği durumlarda daha çok tercih edilmektedir. Öğrenen etmen mimarisine ait şema gösterimi Şekil 3.10'da verilmiştir.

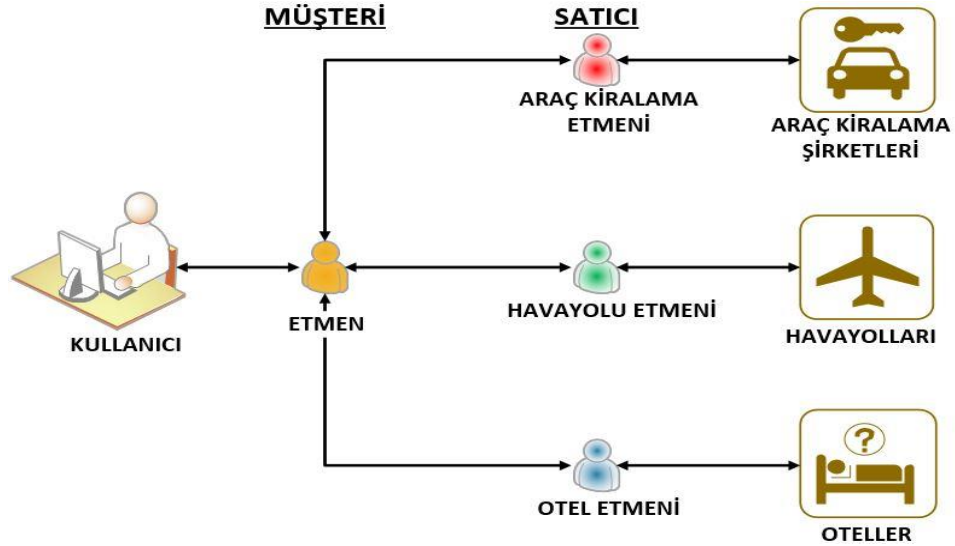


Şekil 3.10 : Öğrenen etmen mimarisi

3.5 Çok Etmenli Sistemler

Birden fazla etmenin bir araya gelerek ortak bir problemi çözmek amacıyla oluşturdukları ağa, çok etmenli sistemler (multi-agent systems) denir. Çok etmenli

sistemi oluşturan her bir etmen, gerçek dünyada modellenen ortamın bağımsız bir parçası olarak çalışır. Bu sistemlerin çözüm aradığı problemler bir etmenin kendi bilgi ve becerisiyle tek başına çözemeyeceği seviyede karmaşık ve zor problemlerdir. Örneğin, Şekil 3.11’de verilen ve tatil organizasyonu yapan bir sistem için araba kiralama etmeni, otel etmeni ve havayolu etmeni ortak çalışmakta ve en uygun tatil ve ulaşım seçeneğini bularak kullanıcıya sunmaktadırlar (Durfee ve Lesser 1989).



Şekil 3.11 : Örnek çok etmenli sistem

Çok etmenli sistemlerin oluşturulmasında en önemli aşamalardan birisi etmenler arası iletişimin nasıl gerçekleşeceğinin belirlenmesi sürecidir. Etmenlerin düzenli çalışması ve doğru sonuçlar üretmesi, etmenler arası iletişimin sorunsuz olması ile mümkündür. Sağlıklı bir iletişimin gerçekleşmesi için etmen iletişim dilinin belirlenmesi ve buna bağlı iletişim protokollerinin tanımlanması gerekir. Etmen iletişim dilleri, etmenler arası iletişimde kullanılan kavramların tamamı olarak ifade edilirken iletişim protokolleri, iletişimin nasıl gerçekleşeceğini organize eden kurallar kümesi olarak ifade edilmektedir. *Knowledge Query and Manipulation Language* (KQML) ve *Foundation for Intelligent Physical Agents* (FIPA) etmenler arası iletişimde kullanılan en yaygın etmen iletişim dilleridir.

Etmenler, iletişim için kullanılan kavramların hangi anlama geldiğini diller yardımıyla belirlerken, iletişim kurallarını ise protokoller yardımıyla tespit etmektedirler. Fakat etmen iletişiminin gerçekleşmesi için iletişim dili ve protokoller

dışında ontoloji olarak tanımlanan ve iletişimde kullanılan kavramların etmenler tarafından aynı şekilde anlaşılmasını sağlayan soyut yapılar da gerekmektedir.

Ontolojilerin tanımlanmalarını kolaylaştırmak için bazı ontoloji tanım araçları hazırlanmıştır. Bu araçlara örnek, Stanford Üniversitesi'nde geliştirilen *Ontolingua* ve Güney Karolina Üniversitesi'nde geliştirilen *Java Ontology Editor* (JOE) tanımlama araçlarıdır. Bu araçlar, ontolojilerin sınıf, kavram, öznitelik, ilişki vb. bileşenlerini tanımlamaya olanak sağlamaktadırlar.

3.6 Etmen Benzetimi

Benzetim, herhangi bir sistemin veya problemin tüm özellikleri ile modellenmesi olarak tanımlanmaktadır. Maliyet avantajı ve kullanım kolaylığı sunan benzetim ortamları, neredeyse bütün alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu durum farklı amaçları gerçekleştirmek için tanımlanmış yüzlerce benzetim modelinin ortaya çıkmasına sebep olmuştur.

Trafik sıkışıklığı, gaz yayılımı, yakıt kullanım durumu, kavşak organizasyonu vb. problemlere çözüm üretmek amacıyla oluşturulan modeller, mikroskobik, mezoskobik ve makroskobik modeller olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır. İzleyen alt kısımlarda sırasıyla bu modeller hakkında bilgi sunulacaktır.

3.6.1 Mikroskobik Benzetim Modelleri

Mikroskobik benzetim modellerinde her bir etmen veya çevresel faktör bireysel olarak incelenmektedir. Bu tür modellerde tüm etmen bileşenleri ayrıntılı bir biçimde tanımlanmalıdır. Bu sayede gerçek zamanlı sistem tamamen sanal ortama aktarılmakta ve davranışları mikro seviyede kontrol edilebilmektedir. CORSIM, INTEGRATION, MITSIMLab ve PARAMICS trafik modelleme alanında en sık kullanılan mikroskobik benzetim modelleridir. Bu modellerin kullanımı ile oluşturulan benzetim ortamları yardımıyla araç yakıt tüketimi, araç bekleme zamanı, detaylı sinyal organizasyonu, detaylı kavşak yönetimi vb. sorunlar analiz edilerek çözümler üretilmektedir.

3.6.2 Mezokobik Benzetim Modelleri

Mikro seviyede tanımlanan modellere göre geniş, makro seviyede tanımlanan modellere göre dar kapsama sahip benzetim modelleri mezokobik modeller olarak tanımlanmaktadır. Bu modeller mikro ve makro seviyede tanımlanan modellerin doğru bir şekilde bağlanmasını veya ilişkilendirilmesini sağlamaktadırlar. VISSIM ve Dynasmart-P trafik konusunda hazırlanan mezokobik benzetim modellerine örnek olarak verilebilir.

3.6.3 Makroskobik Benzetim Modelleri

Benzetim ortamının bir bütün olarak ele alındığı modeller, makroskobik benzetim modelleri olarak tanımlanmaktadır. Bu grupta tanımlanan modeller, kapsam olarak geniş olmakla beraber, tüm model davranışlarını kontrol etmek amacıyla hazırlanmaktadır. MASSVAC, TransCAD, Transplan, DYNEV ve CTM makro seviyede trafik modellemesi yapmak amacıyla hazırlanan modellere örnek olarak verilebilir. Bu seviyede genel araç durumları, genel yol organizasyonu veya ortalama araç bilgileri analiz edilebilmektedir.

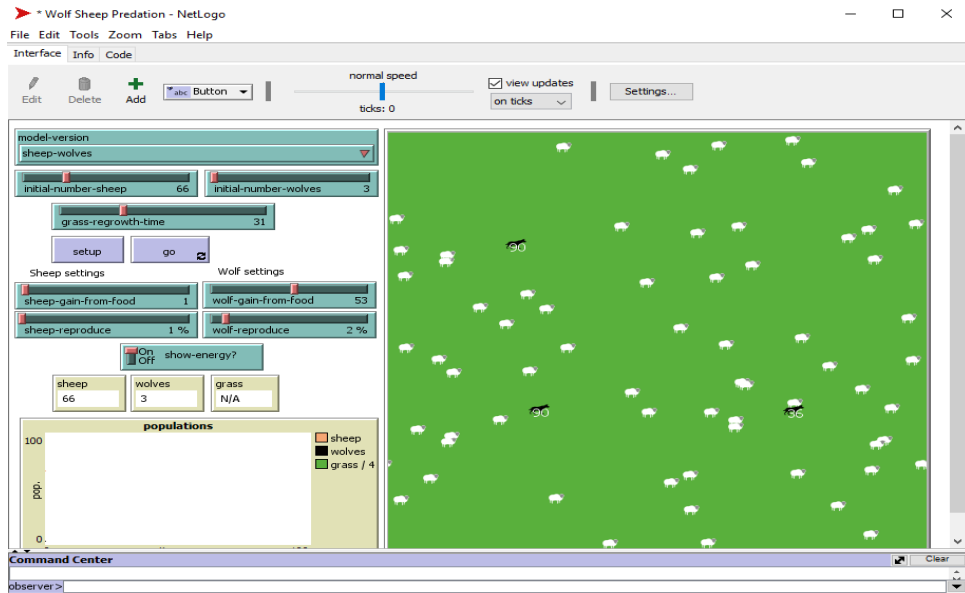
3.7 Etmen Tabanlı Yazılım Geliştirme Ortamları ve NetLogo

Etmen davranışlarını izlemek amacıyla etmen tabanlı yazılım veya benzetim ortamları geliştirilmiştir. Bu amaçla hazırlanmış çok sayıda yazılım ortamı olmakla beraber araştırmacılar tarafından en çok NetLogo, *Java Agent Development Framework* (JADE) ve Jadex etmen geliştirme ortamları kullanılmaktadır. JADE, *Telecom Italia Lab* tarafından 2003'te geliştirilmiştir. Jadex, ise Hamburg Üniversitesi Dağıtık Sistemler Grubu tarafından geliştirilmiş ve yine Java dilini destekleyen bir geliştirme ortamıdır. Ayrıca MASON, Repast Symphony, CORMAS, AnyLogic, JIAC, JAMES 2 vb. onlarca etmen yazılım geliştirme ortamı mevcuttur.

Bu çalışmada basit kullanımı ve etkin sonuçlar vermesi sebebiyle NetLogo çoklu etmen geliştirme ortamı tercih edilmiştir. NetLogo, Uri Wilensky ve ekibi tarafından Northwestern Üniversitesi'nde geliştirilmektedir. Her geçen gün yeni

özelliklerin ve yeni modellerin eklendiği yazılım, 2019 yılında 6. sürümü ile kullanıcıların hizmetine sunulmaktadır. NetLogo, konuşma diline yakın olması sebebiyle öğrenilmesi kolay bir yazılımdır. Etmen davranışlarının mikro seviyede izlenmesine olanak sağlayan NetLogo, çok etmenli sistemlerin benzetiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. NetLogo fizik, kimya, astronomi, matematik, bilgisayar vb. fen bilimleri alanlarının haricinde coğrafya, sanat ve psikoloji gibi sosyal alanlarda da hazırlanmış yüzlerce modeli kullanıcılarına hazır olarak sunmaktadır. Basit bir kullanıcı ara yüzüne sahip olan NetLogo, üç ana sekmeden oluşmaktadır. Bu sekmeler; *interface*, *info* ve *code* sekmeleridir.

Interface sekmesi, *world* olarak tanımlanan ve etmenlerin hareket ettiği çevreyi temsil eden ortamı ve *world* üzerinde değişiklikler yapmak için kullanılan kontrol elemanlarını kapsamaktadır. Görüntüleme, veri girişi, veri çıkışı vb. kontrol elemanlarının eklenip değiştirilebildiği bu sekme, benzetim sonuçlarının grafik olarak sunulmasına da imkân sağlamaktadır. Ayrıca bu sekme yardımıyla etmen davranışları, iki veya üç boyutlu olarak takip edilebilmektedir. NetLogo'nun genel görünümü Şekil 3.12'de görülmektedir.



Şekil 3.12 : NetLogo ekran görünümü

Dokümantasyon işlemlerinin gerçekleştirildiği *info* sekmesi, benzetime ait programcı veya sürüm bilgisini, programda kullanılan değişkenlerin veya metotların

görevlerini ve değişkenlere ait ayrıntılı tanımlamaları göstermek amacıyla kullanılmaktadır.

Interface sekmesi ile bütünleşik olarak çalışan *code* sekmesi ise etmen ve çevre birimlerine ait tüm davranışların NetLogo dil notasyonu kullanılarak ayarlanmasına imkân sağlamaktadır. Ayrıca *world* sekmesinde oluşturulan tüm kontrol elemanları *code* sekmesi ile ortak çalışabilmektedir.

Temelde Scala ve Java programlama dilleri ile hazırlanan NetLogo etmen programlama ortamı, Logo dilinden uyarlanmış kendine has ve özel tanımlanmış bir notasyona sahiptir. Örneğin, özellikleri kullanıcı tarafından filtrelenen tüm etmenlere bir anda erişme imkânı olmakla beraber, erişilen bu etmenlere ait özellikler de bir anda değiştirilebilmektedir. Son olarak program ile beraber sunulan yardım dokümanı, NetLogo kullanımı ve kodlaması hakkında bilgiler içermektedir.

NetLogo her geçen gün yeni özelliklerin eklenmesi ile gelişmekte ve etkin benzetim ortamlarının hazırlanmasında araştırmacılara kolaylıklar sunmaktadır. Güçlü bir ekip ile kullanıcılardan gelen önerileri değerlendirerek gelişen program, kullanıcılar arasında iletişim kurmayı sağlayan özel e-posta gruplarına sahip olup kullanıcının karşılaştığı problemleri paylaşarak ortak çözüm bulunmasına da imkân sunmaktadır. Ayrıca farklı dil seçenekleri ile hizmete sunulan NetLogo Windows, Linux ve Mac ortamlarında çalışabilmektedir.

4. METROCAR ULAŞIM SİSTEMİ

4.1 Giriş

Akıllı sistemlerin hayatımıza girmesi ile her geçen gün yeni teknolojiler hayatımıza girmektedir. Akıllı sistemler yardımıyla bir yandan mevcut sistemler gelişmiş diğer yandan kullanıcı dostu yeni ulaşım sistemleri ortaya çıkmıştır. Yapılan bu çalışmalar ve çözüm bekleyen sorunlar alternatif bir ulaşım sistemi geliştirilmesine zemin hazırlamıştır. MetroCar Sistemi (MCS) olarak isimlendirilen bu yeni sistem, şehir içi ulaşımında kullanılacak yeni ve çift modlu bir bireysel ulaşım sistemidir. Genel olarak sürücüsüz araç teknolojisi ve metro ulaşım sisteminin olumlu yönlerini birleştiren MCS, ulaşım problemlerine alternatif bir çözüm sunarken sürüş zamanının farklı amaçlarda kullanılmasına olanak sağlamaktadır.

Tezin bu bölümünde, MCS ile diğer şehir içi ulaşım sistemlerinin ilişkisi ve önerilen sistemin avantajları sunularak MCS'ye ait belirlenen protokoller ve sistem mimarisi tanıtılmaktadır

4.2 MetroCar Ulaşım Sistemi Nedir?

MetroCar Sistemi (MCS), yeni çift modlu bir ulaşım sistemidir. Önceki bölümlerde ayrıntılı ifade edildiği üzere şehir içi ulaşım problemlerinin çözümü için tasarlanan bu sistem, mevcut ulaşım sistemlerinin avantajlarını birleştirmektedir. Bu sayede, çevre dostu ve uygulanabilir özgün bir ulaşım sistemi üretilmiştir.

MCS diğer çift modlu ulaşım sistemlerinde olduğu gibi ulaşım için iki ayrı süreci takip etmektedir. Bu süreçler kullanıcı kontrollü ulaşım süreci ve MCS kontrollü ulaşım süreci olarak isimlendirilmiştir. Kullanıcı kontrollü ulaşım sürecinde, araç kontrolü normal kişisel araçlarla aynı özellikleri taşımaktadır. Ev/ofis ile MCS istasyonu arasındaki ulaşımın temsil edildiği bu süreçte, sürüş sorumluluğu tamamen sürücüye aittir. Kullanıcı kontrolünde MCS istasyonuna getirilen araç, tespit edilmiş protokoller yardımıyla sisteme giriş yapmaktadır. Bu aşamadan sonra MCS kontrollü ulaşım süreci başlamaktadır. MCS kontrollü ulaşım sürecinde ise araçlar tamamen

otonom bir biçimde hareket ederek ulaşım talebi karşılanmaktadır. Bu süreçte kullanıcı, trafik problemi yaşamadan, hat özerkliğine sahip MCS yollarında zamanını farklı bir aktivitede kullanarak hedef istasyonuna ulaşabilmektedir.

MCS yolları, sadece MCS araçlarına özel olup her türlü dış etkenden arındırılmış özel alanlardır. MCS araçları bu yollarda diğer araçlarla haberleşerek sürücüsüz bir biçimde çarpışma olmadan hareket etmektedirler. Şekil 4.13'te görüldüğü üzere, tek kişilik MCS araçları çok şeritli MCS yolları üzerinde hareket etmektedirler.



Şekil 4.13 : MetroCar Sistemi'ne ait temsili görünüm

MCS hat özerkliği ile insan ve hayvan gibi dışsal etkenlerden soyutlandığı için uygulanabilirliği yüksek bir ulaşım sistemidir. Sürücüsüz araç teknolojisinde önemli bir problem olan dışsal etkenler, bu teknolojilerin uygulanabilirliğini ve güvenilirliğini olumsuz etkilemektedir. Hat özerkliği ölçütü sayesinde, trafik ışığı ve trafik sıkışıklığı olmadan ulaşım talebi karşılanmaktadır. Bu sayede kapıdan kapıya ve trafik problemi yaşamadan seyahat edilmekte ve zaman tasarrufu sağlanmaktadır. Kişiye özel araçların kullanıldığı MCS, hem kişisel güvenliğin sağlanması hem de sürüş zamanının farklı aktivitelerde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Araçların tek kişilik seyahat için özel tasarlanmış olması konforlu ve hijyenik bir seyahat imkanı sunmaktadır. MCS'nin ifade edilen bu özellikleri Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Ayrıca

MCS, İkinci Bölüm’de ayrıntılı ifade edilen sürücüsüz araçlar, metro ve kişisel araçlar ile karşılaştırılmış ve bu sistemlerin birbirlerine göre üstünlükleri Tablo 4.4’te ifade edilmiştir.

Şekil 4.14 : MCS özellikleri

Tablo 4.4 : MCS ve diğer ulaşım sistemlerinin karşılaştırılması

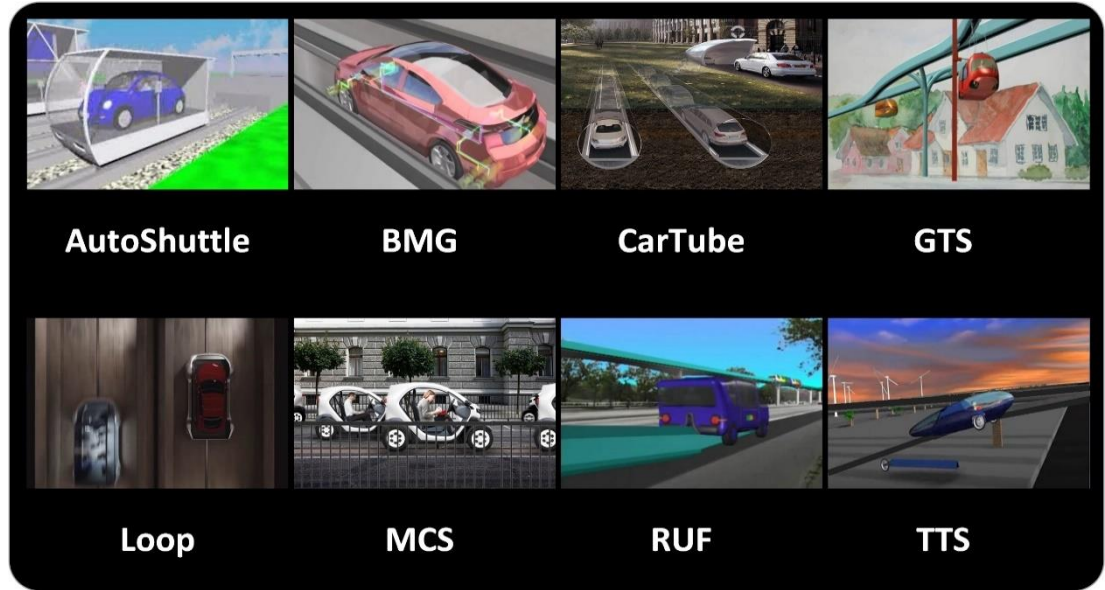


	MCS	Sürücüsüz Araçlar	Metro	Kişisel Araçlar
Konfor	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek
Hijyen	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek
Kişisel Güvenlik	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek
Zaman Kullanımı	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Düşük
Trafik Sıkışıklığı	Düşük	Yüksek	Düşük	Yüksek
Trafik Işığı	Hayır	Evet	Hayır	Evet
Hat Özerkliği	Evet	Hayır	Evet	Hayır
Yakıt Türü	Elektrik	Değişken	Elektrik	Değişken
Altyapı Maliyeti	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük
Sürücü Psikolojisi	Pozitif	Pozitif	Pozitif	Negatif
Esneklik	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek

Tablo 4.4’ten de anlaşılacağı üzere MCS, sürücüsüz araçlarda olduğu gibi konfor, hijyen ve kişisel güvenliğin yüksek olduğu bir ulaşım sistemidir. MCS hat özerkliği ölçütü sayesinde, sürücüsüz araçlarda karşılaşılan trafik sıkışıklığı ve trafik ışığı problemlerini ortadan kaldırmıştır. Kapıdan kapıya ulaşım hizmetinin sağlandığı MCS, tüm MCS yollarını aktarma vb. durumlara gerek duymadan kolayca

kullanabileceğinden dolayı hat özerkliği bulunan metro ulaşım sistemine göre daha esnek bir ulaşım sistemi olmuştur. MCS sürücüsüz araçlar ve kişisel araçlara göre altyapı maliyetinin yüksek olması dışında diğer mevcut şehir içi ulaşım sistemlerine göre daha avantajlı bir ulaşım sistemidir. Altyapı maliyetinin ise metro ulaşım sistemine göre daha düşük olacağı öngörülmektedir.

MCS literatürde önerilen çift modlu ulaşım sistemlerine göre yeni özellikler içermektedir. Şekil 4.15'te verilen bazı çift modlu ulaşım sistemleri ile MCS karşılaştırılmış ve sonuçlar Tablo 4.5'te verilmiştir. Bu tabloda sistemler kılavuz yolunun durumuna göre yükselmiş (elevated), yeraltı (below-grade) ve yüzey (at-grade) olmak üzere üç seviyeye ayrılmıştır. Ayrıca araçlar hız, boyut ve tip olarak karşılaştırılmıştır. Son olarak araçların kılavuz yollara bağlanma biçimleri karşılaştırılmış ve bağlanma biçimleri kişisel araç benzeri tekerlek ile tren benzeri demiryolu bağlantı, teleferik benzeri kablo bağlantı, monoray benzeri tek ray bağlantı ve özel tasarlanmış araçların üzerine bindirilerek hareket ettirildiği kızak (skate) ile yapılması şeklinde belirlenmiştir.



Şekil 4.15 : Bazı çift modlu ulaşım sistemleri

Tablo 4.5 : MCS ve bazı çift modlu ulaşım sistemlerinin karşılaştırılması

	Kılavuz Yol	Hız (km/s)	Şerit Sayısı	Şerit Değişimi	Araç Boyutu	Bağlantı	Durum	Araç Tipi
MCS	Hepsi	~80	Çok	Evet	Tek-kişilik	Tekerlek	Tasarım	Tek
AutoShuttle	Yüzeyden	~180	Çok	Hayır	Dört-kişilik	Kızak	Tasarım	Çok

BMG	Yükselmiş	~100	Tek	Hayır	Dört-kişilik	Demir yolu	Tasarım	Çok
CarTube	Yeraltı	~80	Çok	Hayır	Dört-kişilik	Tekerlek	Tasarım	Çok
GTS	Yükselmiş	~250	Tek	Hayır	Dört-kişilik	Kablo	Tasarım	Tek
Loop	Yeraltı	~240	Çok	Hayır	Dört-kişilik	Kızak	Test	Çok
RUF	Yükselmiş	~120	Tek	Hayır	Dört-kişilik	Tek ray	Test	Çok
TTS	Yükselmiş	~290	Çok	Hayır	Dört-kişilik	Tek ray	Tasarım	Tek

Tablo 4.5'ten de anlaşılacağı üzere MCS, diğer çift modlu ulaşım sistemlerinden farklı olarak şerit değişimine olanak sağlamaktadır. AutoShuttle, CarTube, Loop ve TTS gibi birden fazla şerit ile hizmet sunan MCS, GTS ve TTS'de olduğu gibi fiziksel ve mekaniksel özellikleri aynı olan tek tip araçların kullanılmasına izin vermektedir. GTS ve TTS dışındaki diğer sistemler, farklı boyut ve özellikteki araçların kullanımına olanak sağlamaktadır. Fakat bu durum sistem güvenliği ve kontrol bakımından problemler oluşmasına sebep olabildiğinden MCS'de uygulanmamıştır. Diğer sistemlere göre daha düşük hızda ulaşımın sağlandığı MCS, tekerlekli olarak kılavuz yollara bağlanmakta ve farklı seviyede inşa edilebilen kılavuz yollar kullanmaktadır. Şehirlerin fiziksel durumu farklı olacağından MCS yollarının tasarımı ve uygulanması esnek bırakılmıştır. Ulaşım hızının yüksek olması ek güvenlik riskleri taşıdığından şehir içi ulaşımı için ideal bir hız olan 80 km/s yeterli bulunmuştur. Tek kişilik araçların kullanıldığı MCS, tasarım seviyesinde olup gelişim süreci devam etmektedir.

Bu kısımda ifade edilen tüm bu bilgiler ışığında MCS, şehir için ulaşım talebinin karşılanmasında kullanılacak alternatif ve günümüz koşullarına uygun yeni bir ulaşım sistemi olacaktır.

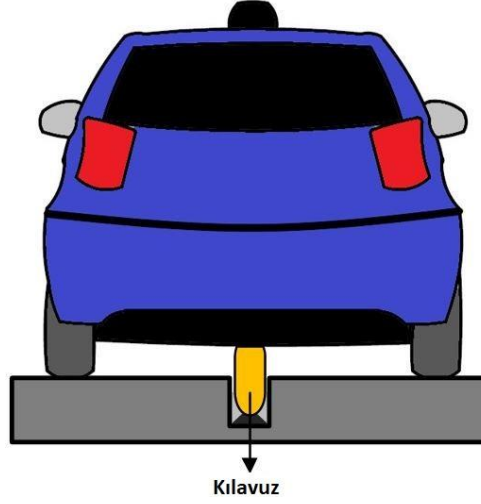
4.3 Protokoller

Bu kısımda MCS ile ilgili tanımlanan protokoller anlatılacaktır. MCS ile ilgili tüm kabulleri ve kuralları kapsayan bu protokoller, dokuz ayrı alt başlıktan oluşmaktadır. Bu başlıklar MCS araç ve yol tasarımının nasıl olacağını belirlerken sistem akışı ile ilgili bilgiler ve kurallar içermektedir. İzleyen alt kısımlarda bu kurallar ve bilgiler ayrı ayrı ayrıntılı bir biçimde ifade edilecektir.

4.3.1 Araç Protokolü

MCS kapsamında kullanılan ve MCS aracı olarak isimlendirilen araçlara ait kurallar ve kabuller bu kısımda tanımlanmıştır. Genel görünümü Şekil 4.16'da verilen bu araçlar, hem manuel hem de MCS yollarında otonom biçimde kullanılabilirdiğinden, mekaniksel olarak kişisel araçlardan farklı bazı özellikler taşımaktadırlar. MCS, çift modlu bir ulaşım sistemi olduğundan dolayı MCS aracının da önerilen bu yeni sisteme uygun olması gerekmektedir. Normal araçlardan farklı kılavuz olarak isimlendirilen bir yapı içeren MCS araçları, konum belirleme ve enerji gereksinimini bu yapı ile sağlamaktadırlar. MCS araçlarına ait özellikler ve kurallar şunlardır;

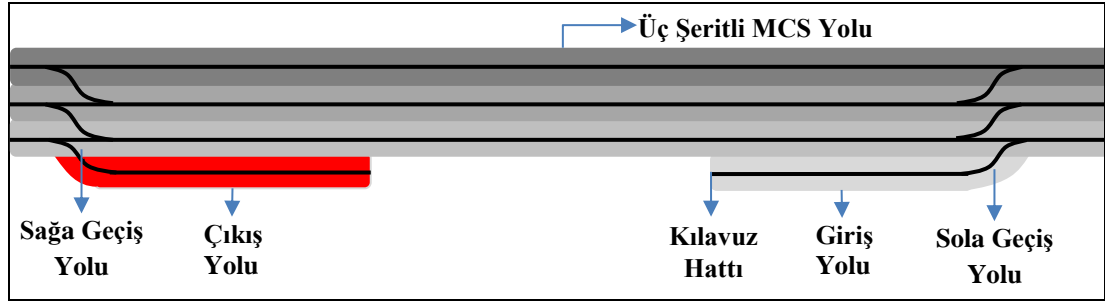
- MCS araçları tek kişilik olmalıdır.
- Araçlar, sadece elektrik enerjisi ile çalışmalıdır.
- Araçların tamamı; uzunluk, genişlik ve yükseklik bakımından aynı ölçülerde olmalıdır.
- Araçlar, genel fiziksel görünüm olarak bireysel araçlara benzemelidir.
- Araçların bütün mekanik özellikleri aynı olmalıdır.
- Araçlar hem sürücülü hem de sürücüsüz hareket edebilmelidir.
- Araçlar sabit hızlanma ivmesi ile hızlanıp sabit yavaşlama ivmesi ile yavaşlayabilecek tarzda kontrol edilebilmelidir.
- Araçlar, veri transferi ve enerji gereksinimini karşılamak için hareketli kılavuza sahip olmalıdır.
- Araçlar, bireysel çalışma ve dinlenme için elverişli olmalıdır.
- Araçlar, diğer etmenlerle haberleşebilecek etmen donanımına ve teknolojisine sahip olmalıdır.
- Araçlar; DRSC, GPS vb. haberleşme ve güvenlik teknolojilerini barındırmalıdır.
- Araçlar, kılavuz yoluna tekerlek ile bağlanmalıdır.



Şekil 4.16 : MCS aracı

4.3.2 Yol Protokolü

Bu kısımda, MCS yol bileşenleri tanımlanarak bu yolların kullanım durumlarına ait kurallar belirlenmiştir. Şekil 4.17’de üç şeritli MCS yollarına ait tasarım görülmektedir.



Şekil 4.17 : MCS yol tasarımı

Giriş yolu, MCS yoluna bağlanmayı sağlayan tali yollara verilen isimdir. Bu yol yardımıyla sürücü kontrolünde MCS giriş istasyonuna getirilen araçlar, giriş yolu ile sisteme giriş yapmaktadırlar. Araç kontrolü bu aşamadan sonra otonom biçimde gerçekleştirilmektedir. Giriş yoluna ait kurallar ve kabuller şunlardır;

- Giriş yolu ana yola paralel inşa edilmelidir.
- Sistem içerisindeki tüm giriş yolları aynı uzunluk ve genişlikte olmalıdır.
- Giriş yolu, MCS aracının maksimum hıza ulaşabileceği uzunlukta olmalıdır.

- Giriş yolu üzerinde araçların savrulmalarını engellemek, veri transferi yapmak ve araçlar için gerekli enerji gereksinimini sağlamak amacıyla bağlanabilecekleri kılavuz hattı bulunmalıdır.
- Giriş yollarının girişinde MCS araçlarının giriş önceliklerinin belirlenmesi ve yoğunluğunun organize edilmesi için inşa edilmiş araç bekleme istasyonları bulunmalıdır.

Çıkış yolları, MCS araçlarının MCS'den çıkmak için kullandıkları yollardır. Bu yolların sonunda araç kontrolü kullanıcıya devredilir. Bu yollara ait kurallar şunlardır;

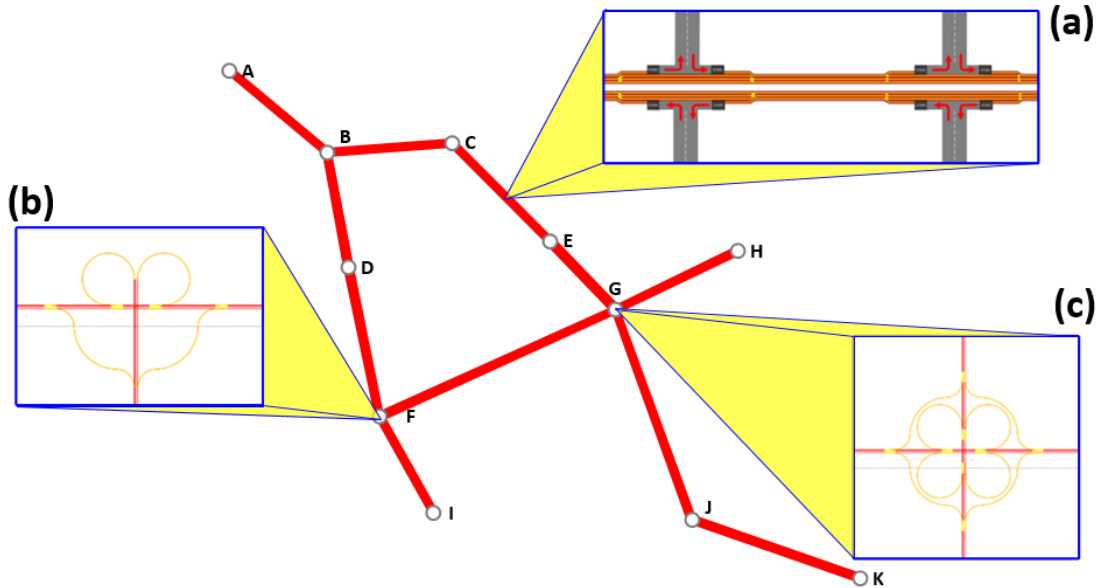
- Çıkış yolu ana yola paralel inşa edilmelidir.
- Sistem içerisindeki tüm çıkış yollarının uzunlukları ve genişlikleri aynı olmalıdır.
- Çıkış yolu üzerinde, araçların savrulmalarını engellemek, veri transferi yapmak ve araçlar için gerekli enerji gereksinimini sağlamak amacıyla bağlanabilecekleri kılavuz hattı bulunmalıdır.
- Çıkış yolları, maksimum hızdaki MCS araçlarının yavaşlama ivmesi ile yavaşlayarak durabileceği uzunlukta olmalıdır.
- Çıkış yolları, giriş yollarından bir düğüm öncesinde konumlandırılmalıdır.

Ana yol, MCS'nin ana gövdesini oluşturan yollardır. Bu yollar giriş yolu ile sisteme dâhil olan MCS araçlarının, gidilecek güzergâha ulaşmaları için kullanılan ve en az üç şeritten oluşan yol parçalarıdır. Bu yollara ait kurallar şunlardır;

- Ana yollar en az üç şeritten oluşmalıdır.
- Link olarak isimlendirilen iki düğüm arası yollar, düz olmalıdır.
- Ana yol kavisleri iki düğüm noktası arasında ayarlanmalıdır.
- Ana yol üzerinde araçların savrulmalarını engellemek, veri transferi yapmak ve araçlar için gerekli enerji gereksinimini sağlamak amacıyla bağlanabilecekleri kılavuz hattı bulunmalıdır.
- Ana yolun kavis yapma miktarı maksimum hızda hareket eden bir aracın güvenli ve konforlu bir biçimde dönebileceği uzunlukta ve açıda olmalıdır.

- Ana yolun kavis yaptığı bölüm için başlangıç ve bitiş düğümleri şerit değişimine kapalı olmalıdır.
- Şerit değişimi sağa/sola geçiş yolları kullanılarak sağlanmalıdır.
- Ana yol düğüm noktaları sabit mesafe aralıklı ve sıralı olarak sağa geçiş yolu ve sola geçiş yolu olacak şekilde tasarlanmalıdır.
- Geçiş yolları arasındaki mesafe sabit olmalıdır.
- Sağa/sola geçiş yollarındaki kavislik, bir aracın maksimum hızda ve yüksek konforda geçişini sağlayacak uzunlukta olmalıdır.
- Sağa/sola geçiş yollarının sonunda, link başlangıç noktalarında, düğüm etmenleri yerleştirilmelidir.
- Sistem etmeni, diğer etmenlerle haberleşebilecek şekilde MCS'nin merkezine konumlandırılmalıdır.

MCS yolları için oluşturulmuş örnek bir şehir yapısı Şekil 4.18'de verilmiştir. Bu şekilde istasyonlar ve üç farklı alt şekil görülmektedir. Şekil 4.18.a'da iki yönlü MCS ulaşımı ve MCS istasyonları ile normal yol bağlantıları gösterilmiştir. Burada normal yollar, gri renkle temsil edilirken, MCS yolları ise sarı ve kırmızı renkte gösterilmiştir. Şekil 4.18.b'de üç farklı yön için yol düzeni gösterilirken Şekil 4.18.c'de dört farklı yön için MCS yol tasarımı verilmiştir.



Şekil 4.18 : Temsili a) normal, b) üç ve c) dört yönlü MCS yol düzeni

4.3.3 Yol Giriş Protokolü

Kullanıcı tarafından MCS giriş istasyonuna getirilen MCS aracı, yol giriş protokolü ile sisteme dâhil olmaktadır. Bu protokol kapsamında belirlenen kurallar şunlardır;

- Araçlar, MCS giriş istasyonuna kullanıcı kontrolünde getirilmelidir.
- MCS aracı, MCS giriş istasyonuna ulaştığında durmalıdır. Araç hızı sıfırdan başlamalı ve kontrol sürücüden araç etmenine devredilmelidir.
- Araç etmeni düğüm etmeni ile haberleşerek sisteme giriş izni istemelidir.
- Sisteme giriş izni sistem etmeni tarafından düğüm etmeni üzerinden verilmelidir.
- Birden fazla aracın MCS'ye girmek istemesi durumunda öncelik ilk yol talebinde bulunan araca verilmelidir.
- Giriş yoluna yeni girecek olan bir araç, kendinden önce giren aracı t kadar bir süre beklemelidir. Burada t güvenli takip süresidir.

4.3.4 Giriş Yolu Bağlanma Protokolü

MCS yollarına farklı konumlardan giriş ve çıkışlar yapılabilmektedir. Araçların giriş yolundan ana yola dâhil olması için uyması gereken kurallar bu protokol ile düzenlenmektedir. Bu protokol ile tespit edilen genel kurallar şunlardır;

- Araçların giriş yoluna girmesi, yol giriş protokolüne uygun olmalıdır.
- Giriş yolunda bulunan araçlar, ana yolda bulunan araçlara göre öncelik hakkına sahip olmalıdır.
- Farklı şeritte bulunan araçların düğüm noktasında çarpışmasını engellemek için tüm araçların birleşme algoritmasına uygun hareket etmesi gerekmektedir.
- Araç kontrolü araç etmeni tarafından otonom biçimde sağlanmalıdır.

4.3.5 Araç Seyir Protokolü

Araç seyir protokolü, MCS yoluna giren araçların seyir halinde hız değişimini kontrol etmektedir. Bu protokol kapsamında belirlenen kurallar şunlardır;

- Araçlar hızlanırken yenileme zamanı (τ) sıklığında ve hızlanma ivmesi (a_{acc}) miktarında hızlanmalıdır.
- Araçlar yavaşlarken yenileme zamanı (τ) sıklığında ve yavaşlama ivmesi (a_{dec}) miktarında yavaşlamalıdır.
- Araçlar, hız güncellemesini iletişimde oldukları araç etmenlerine ve sorumlu oldukları düğüm etmenlerine göre düzenlemelidir.
- Araçlar, MCS yolunda hareket ederken araç mekaniğine göre belirlenen maksimum hızı aşmamalıdır.
- Araçlar, MCS yollarında geri gitmemelidir.
- Araçlar zorunlu durumlar dışında durmamalıdır.

4.3.6 Araç Takip Protokolü

Birden fazla MCS aracının hareket ettiği MCS yollarında, güvenli sürüşün temin edilmesi gerekmektedir. MCS araçları, kablolu ve kablosuz haberleşme sayesinde olası çarpışma durumlarını hesaplayarak hız güncellemelerini yapmaktadırlar. Araç takip protokolü de birbirini takip eden araçların çarpışmasını engellemek amacıyla oluşturulmuştur. Bu protokole ait kurallar şunlardır;

- Araçlar, araç seyir protokolüne göre hareket etmelidir.
- Araçlar, hız güncellemesini düz yol takip algoritmasına göre yapmalıdır.
- Araçlar seyir halinde hem diğer araç etmenleri ile hem de düğüm etmenleri ile haberleşebilecek donanıma sahip olmalıdır.
- Araçlar hız güncellemesini, yenileme zamanı (τ) sıklığında yapmalıdır.

4.3.7 Şerit Değişirme Protokolü

Ana yol üzerinde bulunan araçlar, şerit değişirme protokolüne göre sağ veya sol şeritlere geçiş yapabilmektedirler. Bu protokol ile tespit edilen kurallar şunlardır;

- Şerit değiştirecek olan araç, geçiş yapacağı linkten önceki ilk düğüm noktasından itibaren, geçiş yapacağı şerit yönünde sinyal vermelidir.
- Araçlar, şerit değişiminde hem geçiş yapacakları şeritteki araçlarla hem de önlerinde bulunan araçlarla haberleşerek hız kontrolü yapmalıdır.

- Araçlar, sorumlu oldukları düğüm etmenleri ile haberleşerek şerit değişimi yapmalıdır.
- Şerit değişimi yapacak olan araç, öncelik hakkına sahip olmalıdır.
- Şerit değişimi yapılırken sorumlu düğüm etmeninin sistem etmeni ile haberleşmesi buna göre karar vermesi sağlanmalıdır.

4.3.8 Yol Çıkış Protokolü

MCS yollarında seyahatini tamamlayan araçların sistemden çıkmaları, çıkış protokolü ile düzenlenmektedir. Bu kapsamda belirlenen kurallar şunlardır;

- Çıkış izni, düğüm etmeni aracılığıyla sistem etmeninden alınmalıdır.
- Çıkış izni alınması için aracın çıkış yolu sonunda durması diğer bir ifade ile hızını sıfırlaması gerekmektedir.
- Çıkış izni alan araç, kullanıcı kontrolünde hareket ettirilmelidir.

4.3.9 Acil Durum Protokolü

Acil durum protokolü araçların olağan dışı durumda uyması gereken kuralları içermektedir. Bu protokol kapsamında tespit edilen kurallar şunlardır;

- Herhangi bir araçtan sinyal alınmadığı durumda, aracın son sinyal verdiği konumdan önceki araçlar, düğüm etmenleri tarafından bilgilendirilmelidir.
- Herhangi bir araç arıza yaptığında, sinyal arızası veya mekanik arıza gibi hata mesajlarıyla düğüm etmeni bilgilendirmelidir.

4.4 MCS Etmen Türleri ve Mimarileri

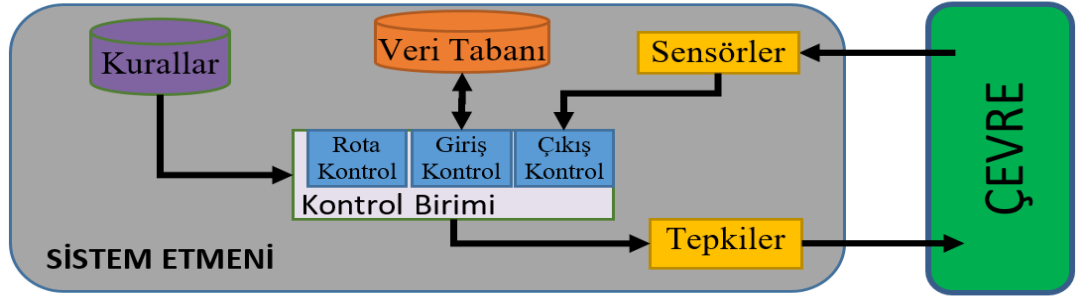
MCS, özgün bir etmen mimarisine sahiptir. Çok etmenli sistem yaklaşımı ile tasarlanan MCS, üç farklı etmen türü kullanılarak tasarlanmıştır. Sistem etmeni, düğüm etmeni ve araç etmeni olarak isimlendirilen bu etmenler, mimari olarak benzer

yapıda oldukları halde, farklı görev ve sorumluluklar üstlenmektedirler. İzleyen alt kısımlarda MCS etmen türlerinin özellikleri ve durumları hakkında bilgi verilecektir.

4.4.1 Sistem Etmeni

Sistem etmeni, MCS içerisinde sorumluluk alanı en geniş olan etmen türüdür. Bu tez çalışmasında sadece bir adet sistem etmeni tanımlanmıştır. Tanımlı olan bu etmenin görevi, düğüm etmenleri ile bilgi alışverişi yaparak trafik organizasyonunu sağlamaktır. Sistem etmeni, düğüm etmeninden gelen istek üzerine araç etmeninin MCS'ye giriş ve çıkışına izin vermek ve rota kontrolü ile genel yol organizasyonunu sağlamak ile görevlidir. Araç etmeni ile doğrudan iletişimi bulunmayan sistem etmeni, ihtiyaç olması durumunda düğüm etmeni üzerinden bu gereksinimi karşılamaktadır.

Genel mimarisi Şekil 4.19'da verilen sistem etmeni, sensörler yardımıyla çevreden aldığı bilgileri kontrol bölümünde işleyerek tepkilere dönüştürmektedir. Sistem etmeni, kontrol biriminde sorumlu olduğu görevleri gerçekleştirirken sistem yöneticisinin belirlediği kuralları ve daha önce kazanılan tecrübelerin kayıtlı olduğu veri tabanını kullanmaktadır.



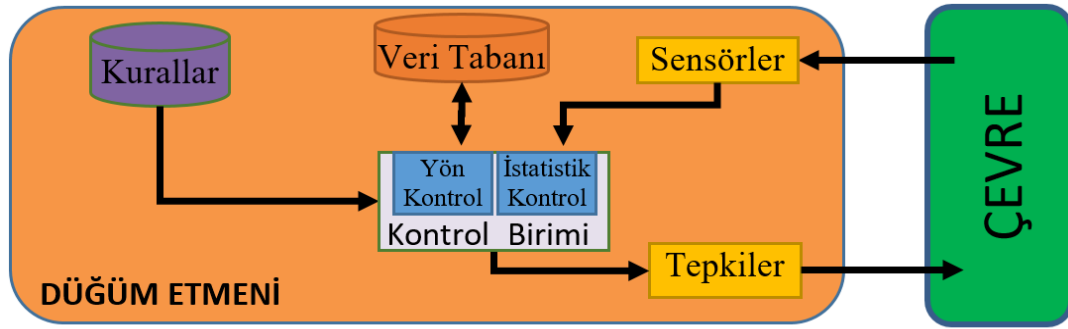
Şekil 4.19 : Sistem etmeni mimarisi

4.4.2 Düğüm Etmeni

Sistem etmeni ile araç etmenleri arasında veri haberleşmesi ile görevli olan düğüm etmeni, sabit aralıklarla tanımlanmış düğüm noktalarına konumlandırılmıştır. Düğüm noktaları arasındaki mesafe, sistem yöneticisi tarafından değiştirilebilmektedir. Yol protokolünde ayrıntılı ifade edildiği gibi MCS, ardışık sağa/sola bağlanma yollarından oluşurken araçların şerit değişimi sadece bu yollarda

gerçekleşmektedir. Bu durum sistemin daha kolay kontrol edilmesine olanak sağlamaktadır.

MCS’de tanımlı düğüm etmeni sayısı, yol uzunluğuna göre değişiklik göstermektedir. Her bir düğüm noktasında şerit sayısı kadar düğüm etmeni bulunmaktadır. Sistem etmenine göre daha dar bir sorumluluk alanına sahip olan düğüm etmenleri, yol protokolünde link olarak tanımlanan ve iki düğüm noktası arasındaki şeritleri temsil eden bölgeden sorumludur. Bu etmenler, sistem etmeni ve araç etmenleri arasında aracı görevi görmekle beraber sorumluluk alanında bulunan linklere ait istatistiksel bilgileri de saklamaktadırlar. Araç etmeninin yön değişimi kararı da düğüm etmeni tarafından belirlenmektedir. Şekil 4.20’de genel mimarisi verilen düğüm etmeni, sorumlu olduğu görevler dışında sistem etmeni ile aynı mimariye sahiptir.

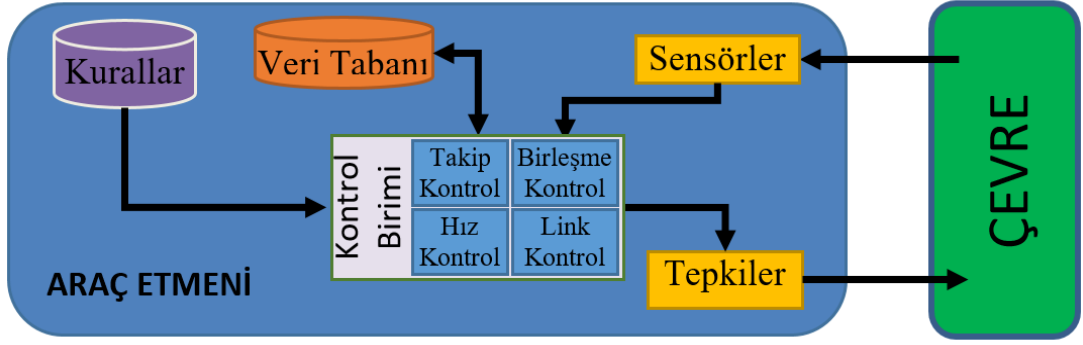


Şekil 4.20 : Düğüm etmeni mimarisi

4.4.3 Araç Etmeni

Araç etmenleri, her bir araç üzerine yerleştirilmiş ve araçların MCS içerisindeki davranışlarını düzenleyen etmenlerdir. Sayıları araç sayısı ile aynıdır. Bu etmenler üzerinde hareket ettikleri linklere göre o linkten sorumlu olan düğüm etmenleri ile haberleşmektedirler.

Genel mimarisi basit tepkisel etmenlere benzeyen araç etmeni, mimari olarak diğer etmenler ile aynı özellikler barındırmaktadır. Şekil 4.21’de araç etmenlerinin genel mimarisi verilmiştir. Bu etmenler, takip kontrolü, birleşme kontrolü, hız kontrolü ve link kontrolü gibi görevleri yerine getirmekle sorumludurlar.



Şekil 4.21 : Araç etmen mimarisi

Takip kontrolü, araçların aynı şerit üzerinde, önünde bulunan araç ile çarpışmasını engellemek ve güvenli takip mesafesini korumak amacıyla oluşturulmuş kontrol mekanizmasıdır. Bu süreç ile ilgili ayrıntılı bilgi, araç takip protokolü kısmında ifade edilmiştir.

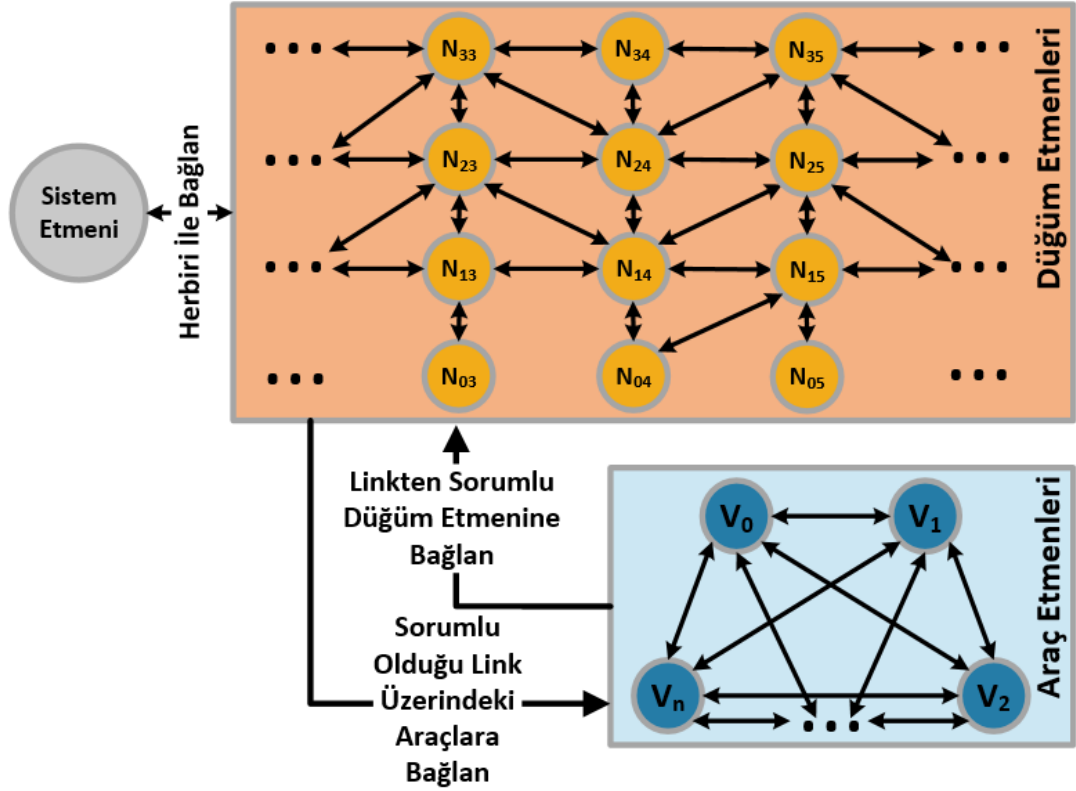
Birleşme kontrolü, tali yoldan ana yola bağlanma veya şerit değişimi esnasında araçların birbirleri ile çarpışmasını engelleyen kontrol yapısıdır. Bu yapının nasıl işlediği ile ilgili ayrıntılı bilgi birleşme protokolü kısmında anlatılmıştır.

Hız kontrolü, araçların seyir halinde hızlanma, yavaşlama veya sabit hızda hareket etme durumlarının kontrol edildiği kontrol birimidir. Sabit ivmeli hareketin esas alındığı bu çalışmada hız değişimi, yavaşlama ve hızlanma ivmesinin miktarına göre değişmektedir. Bu süreç ile ilgili ayrıntılı bilgi araç seyir protokolü kısmında ifade edilmiştir.

Son olarak link kontrolü, araç etmeninin bir sonraki link boyunca hangi yöne sinyal vereceğinin kararını veren kontrol mekanizmasıdır. Bu işlem link sonunda düğüm etmeninden alınan bilgilere göre gerçekleştirilmektedir. Bu süreç ise ayrıntılı olarak şerit değiştirme protokolünde anlatılmıştır.

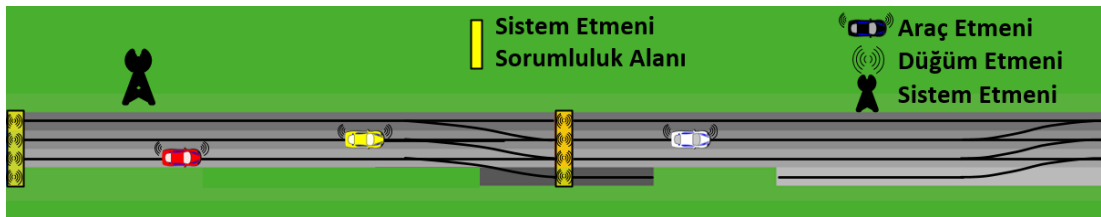
4.5 MCS Etmenler Arası İletişim

MCS içerisinde tanımlanan etmenler, çok etmenli sistemler tasarımına uygun bir biçimde sorumluluklarını yürütmektedirler. Bir etmenin sorumluluklarını doğru bir şekilde takip edebilmesi için etmenler arası iletişimin ve etmenlerin birbirine karşı olan sorumluluklarının tanımlanması gerekmektedir. MCS içerisinde tanımlanan etmenlerin birbirleri ile iletişim durumları Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



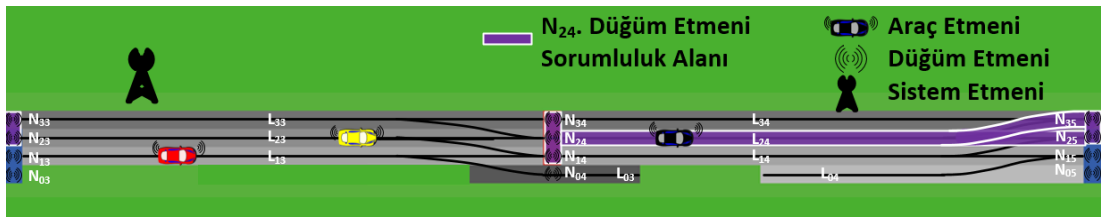
Şekil 4.22 : MCS etmenleri arasındaki bağlantı şeması

Şekil 4.22’de bir adet sistem etmeni, m adet düğüm etmeni ve n adet araç etmeni görülmektedir. Sistem etmeni her bir düğüm etmeni ile her bir τ zaman diliminde haberleşebilmektedir. Şekil 4.23’te gösterildiği gibi sistem etmeninin sorumluluk alanı tüm düğüm etmenleri olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.23 : Sistem etmeni sorumluluk alanı

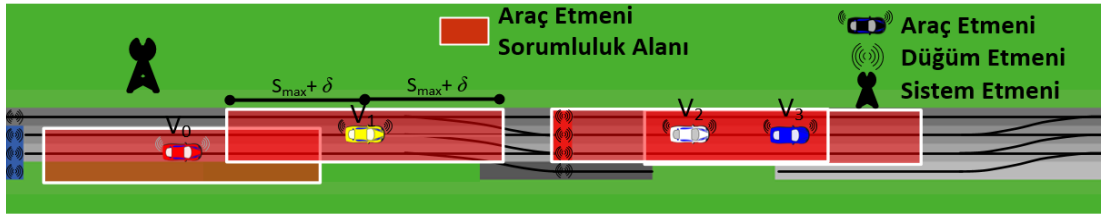
Düğüm etmenleri ise sistem etmeni, komşu düğüm etmenleri ve sorumlu oldukları link üzerinde bulunan araç etmenleri ile haberleşebilmektedirler. Sürecin daha düzenli takip edilebilmesi amacıyla her bir düğüm etmeni için N_{ij} biçiminde benzersiz bir *DüğümID*'si tanımlanmıştır. Burada i *ŞeritID*'si, j ise düşey eksen düğümlerini gösteren *DüğümÇizgiID*'yi ifade etmektedir. Her bir düğüm etmeni komşuluğu olan düğüm etmeni ile haberleşebilmektedir. Komşuluk durumu, düğümlerin *ŞeritID*'si ve *DüğümÇizgiID*'sine göre değişiklik göstermektedir. Düğüm etmeni, j indisinin tek sayı olduğu durumda, *sağ düğüm etmeni* olarak görev yaparken çift sayı olduğu durumlarda, *sol düğüm etmeni* olarak görev yapmaktadır. i indisinin *sıfır* olduğu düğüm etmenleri; j değerinin tek olması durumunda *giriş düğüm etmeni*, çift olması durumunda ise *çıkış düğüm etmeni* olarak adlandırılmaktadır. Düğüm etmenleri, buldukları konuma göre ayrı düğüm etmenleri ile haberleşmektedirler. Giriş ve çıkış düğüm etmenlerinin haricindeki tüm düğüm etmenleri kendi buldukları noktaya göre *sağ*, *sol*, (varsa) *üst* ve *alt* düğüm etmenleri ile haberleşebilmektedirler. Bundan farklı olarak çıkış düğüm etmenleri *sol çapraz* ve *üst* düğüm etmenleri ile haberleşebilirlerken giriş düğüm etmenleri sadece *üst* düğüm etmeni ile haberleşmektedirler. Sol düğüm etmenleri varsa ek olarak *sol üstünde* ve *sağ üstünde* bulunan düğüm etmenleri ile haberleşebilmektedirler. Son olarak sağ düğüm etmenleri varsa ek olarak *sağ altında* ve *sol altında* bulunan düğüm etmenleri ile haberleşebilmektedirler. Örnek olarak N_{24} . düğüm etmeninin sorumluluk alanı Şekil 4.24'te gösterilmiştir.



Şekil 4.24 : N_{24} . düğüm etmeni sorumluluk alanı

Diğer bir MCS etmen türü olan araç etmenleri, üzerinde hareket ettikleri linkten sorumlu olan düğüm etmeni ile haberleşebilmektedirler. Ayrıca her bir araç etmeni, her bir τ zaman periyodunda, sorumluluk alanında bulunan diğer araç etmenleri ile haberleşerek güvenli takip mesafesini korumaktadır.

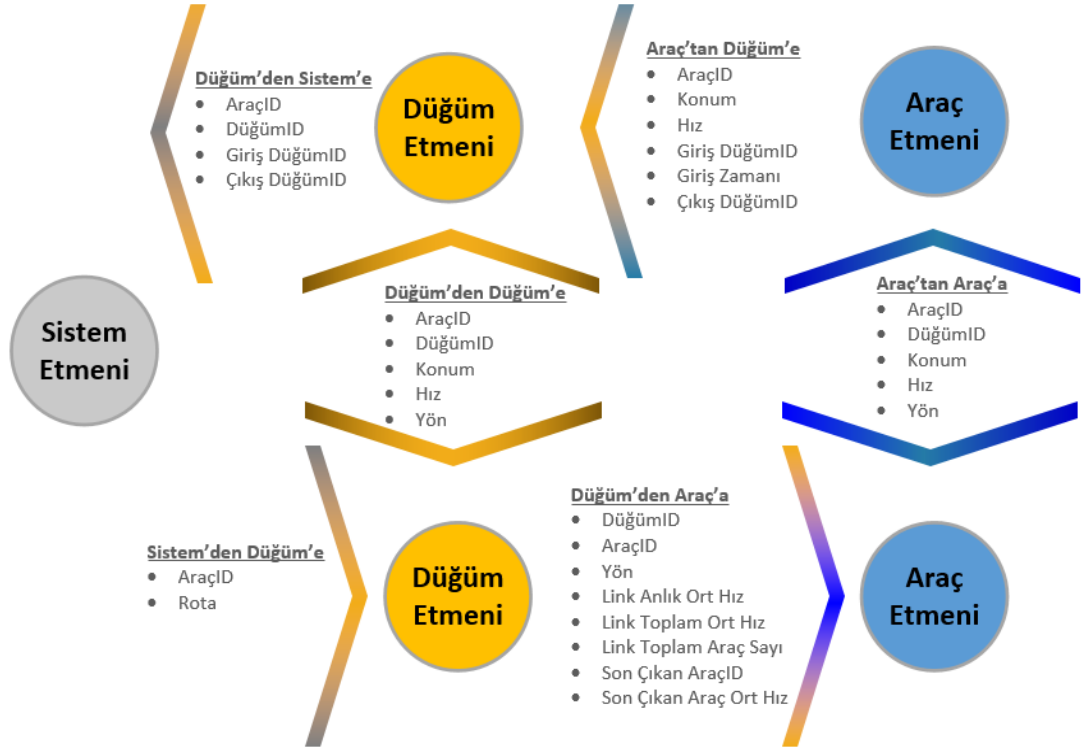
Araç etmeninin sorumluluk alanı Şekil 4.25'te gösterilmiştir. Şekilde görülen kırmızı alanlar, merkezinde bulunan aracın sorumluluk alanını temsil etmektedir. Buna göre her bir araç etmeni; kendi bulunduğu şeridi, varsa sağ ve sol komşu şeritleri, τ olarak ifade edilen her bir yenileme zamanında kontrol etmektedir. Bu kontrol, araç etmeninin bulunduğu konumdan $S_{max} + \delta$ kadar bir mesafede gerçekleşmektedir. Burada δ , araçlar arası güvenli takip mesafesini göstermektedir. δ , tüm MCS araçları için ortak sabit bir mesafedir. Ayrıca S_{max} güvenli duruş mesafesini göstermektedir. Bu mesafe, MCS araçlarının maksimum hızda hareket ederken aniden durması halinde ilk duruma göre aldığı yol miktarını ifade etmektedir.



Şekil 4.25 : Araç etmeni sorumluluk alanı

Şekilden de anlaşılacağı üzere iki araç etmeninin iletişime geçebilmesi için benzer sorumluluk alanında olmaları gerekmektedir. Araç etmenlerinin tüm araçlar ile haberleşebilme kabiliyeti olduğu halde sistemin sadeliği ve gereksiz haberleşmenin engellenmesi amacıyla bu sınırlama getirilmiştir. Bu durumda yukarıdaki örnek şekil incelendiğinde, V_0 ve V_1 araçları benzer sorumluluk alanında olmadıkları için haberleşemezlerken, V_2 ve V_3 araçları sorumluluk alanlarının örtüşmesi sebebiyle haberleşebilmektedirler. Ayrıca her bir araç etmeni üzerinde konumlandığı linkten sorumlu düğüm etmeni ile de iletişim kurabilmektedir.

Sorumluluk alanları ve genel özellikleri anlatılan MCS etmenleri, sorumluluklarını yerine getirirken bilgi alışverişi yapmaktadırlar. Şekil 4.26'da etmen türlerinin birbirlerine gönderdikleri bilgiler gösterilmiştir.



Şekil 4.26 : MCS etmenleri arasındaki bilgi aktarımı

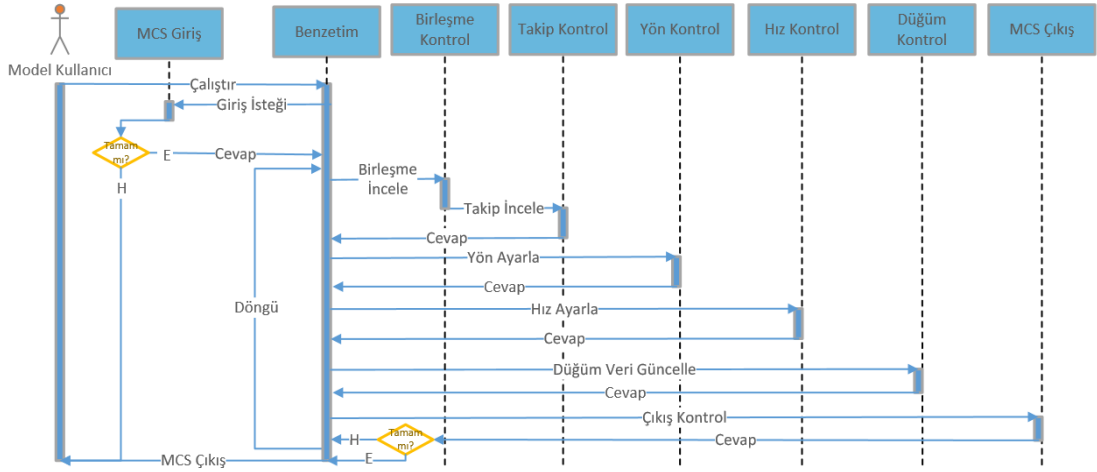
Şekil 4.26'dan da anlaşılacağı üzere bilgi alışverişi, etmen türüne göre farklılık göstermektedir. Etmenler hem kendi türlerinde olan etmenlerle hem de farklı türde olan etmenlerle haberleşerek gerçekleştirilecek göreve göre farklı bilgiler talep etmekte veya iletmektedirler. Genel olarak her etmen bilgi alma veya iletme anında *ID* olarak tanımlanan etmen numarasını paylaşmaktadır. Bunun dışında linkler ile ilgili bilgiler tutan düğüm etmenleri araç etmenlerinin talebine göre şerit değişimi gibi olayların sorunsuz gerçekleşmesine hizmet sunmakta ve sorumlu oldukları link üzerinde bulunan veya gün boyu geçen araçların araç sayısını ve bu araçların hız bilgilerini iletmektedirler. Sistem etmeni giriş talebi olan araç etmenlerinin *DüğümID*'lerini alarak benzersiz bir *AraçID*'si belirlemekte ve talep durumunda araç etmenleri ile ilgili rota bilgisi sunmaktadır. Aynı şekilde araç etmenlerine ait hız, konum, yön vb. bilgiler araç etmenleri ve düğüm etmenleri tarafından birbirleri ile paylaşılmaktadır. Tüm bilgilerin talep ve iletim durumu sonraki kısımda ayrıntılı ifade edilecektir.

Şekil 4.26'da gösterilen bilgiler, sürekli (on-time) veya talepli (on-demand) yayın olmak üzere iki farklı tarzda iletilmektedir. Sürekli yayın, her bir τ zaman periyodunda sürekli olarak paylaşılan etmen bilgileridir. Her bir etmenin *AraçID* ve hız bilgisini paylaşması, bu duruma örnek olarak verilebilir. Talepli yayın ise belli

koşulların oluşması durumunda yayınlanan bilgilerdir. Örneğin; araçlar düğüm noktalarına geldiklerinde, düğüm değişikliği yapmak zorundadırlar. Bu şartın oluşması ile yayınlanan bilgiler, talepli yayına örnek olarak gösterilebilir.

4.6 Etmen Sorumlulukları

MCS etmenleri türlerine göre farklı sorumluluklar taşımaktadırlar. Bu sorumluluklar etmenler arası bilgi alışverişi ile gerçekleştirilmektedir. Önceki kısımda ayrıntılı ifade edilen etmen türleri ve sorumluluk alanları bu bölümde görevleri açısından ele alınacaktır. Genel olarak MCS benzetim süreci Şekil 4.27’de verilmiştir.



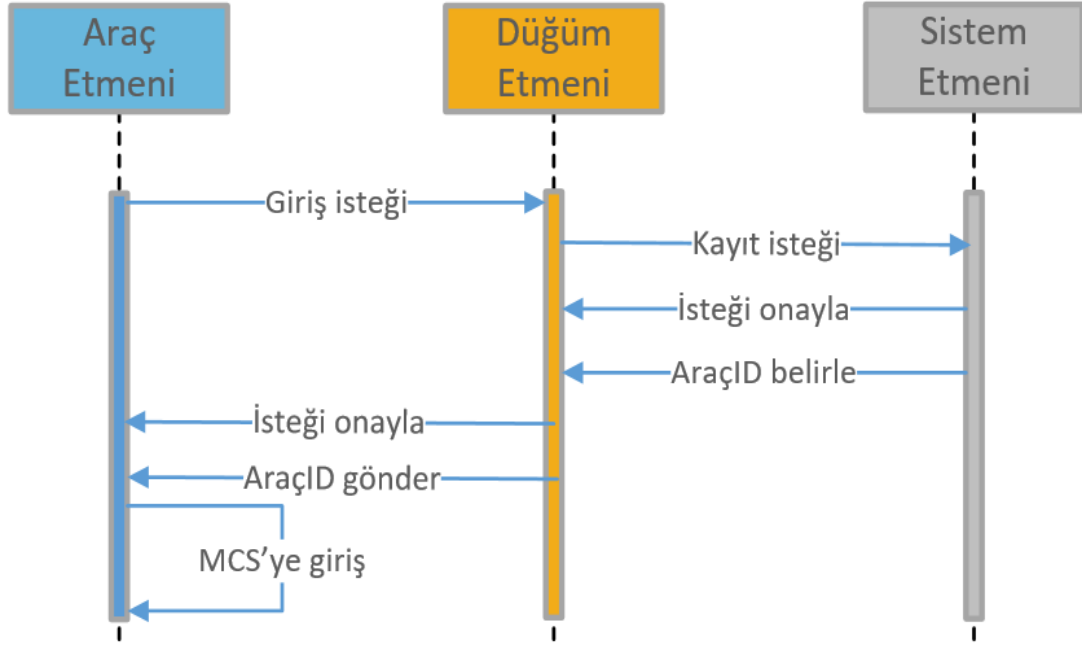
Şekil 4.27 : Genel MCS benzetim süreci

MCS benzetimi sistem yöneticisinin belirlediği standartlar ile yürütülmektedir. MCS benzetimi beş ana prosedür içermektedir. Bu prosedürler; giriş prosedürü, takip prosedürü, birleşme prosedürü, şerit değişim prosedürü ve çıkış prosedürüdür. İzleyen alt kısımlarda bu prosedürler hakkında bilgiler sunulacaktır.

4.6.1 Giriş Prosedürü

MCS araçlarının MCS'ye ilk giriş esnasında takip ettikleri süreç, giriş prosedürü ile düzenlenmektedir. Bu süreç üç ayrı etmenin haberleşmesi ile gerçekleşmektedir. Sisteme giriş yapacak olan araç, giriş yapacağı linkten sorumlu olan düğüm etmeni ile haberleşmektedir. Bu haberleşmede araç etmeni düğüm

etmeninden sisteme giriş izni istemekte ve çıkış yapacağı istasyonu bildirmektedir. İsteği alan düğüm etmeni, sistem etmeni ile haberleşerek kayıt isteği yapmakta ve sistem etmeni, benzersiz bir *AraçID* üreterek düğüm etmenine iletmektedir. Son olarak düğüm etmeni aldığı *AraçID*'sini araç etmenine göndererek aracın MCS'ye girişine yardımcı olmaktadır. Böylelikle araç sisteme benzersiz bir *AraçID*'si ile giriş yapmaktadır. Bu süreç Şekil 4.28'de gösterilmiştir.

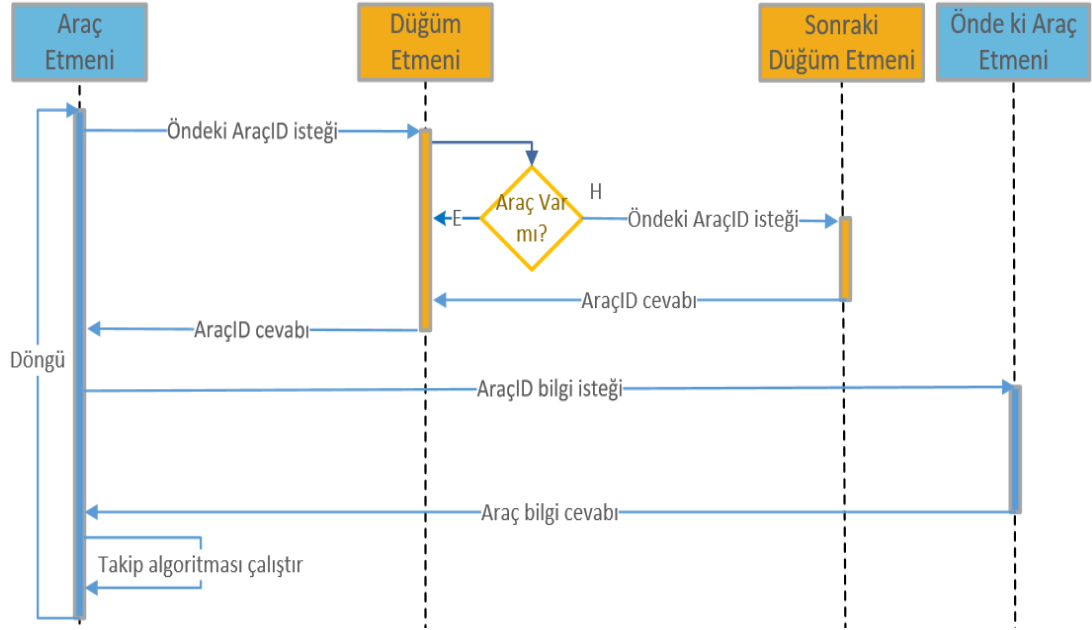


Şekil 4.28 : Giriş prosedürü

4.6.2 Takip Prosedürü

MCS'ye dâhil olan araçların, aynı şeritte hareket ederken çarpışmalarının engellenmesi gerekmektedir. Bu sorunun çözümü için takip prosedürü uygulanmaktadır. Bu prosedüre göre araç etmeni, kendisinden sorumlu olan düğüm etmeni ile haberleşmekte ve kendisine en yakın olan ve önünde hareket eden araca ait *AraçID*'sini talep etmektedir. Bu işlem için iki senaryo bulunmaktadır. Birincisi; her iki aracın aynı link üzerinde hareket etme durumudur. Bu durumda düğüm etmeni başka bir düğüm etmeni ile haberleşmeye gerek duymadan, öndeki araç etmeninin *AraçID*'sini paylaşır. İkinci durum; araçların farklı linklerde olması durumudur. Bu durumda düğüm etmeni sağ ya da sol düğüm noktası olma durumuna göre sonraki düğüm etmeni ile haberleşerek öndeki araç etmeninin *AraçID*'sini talep eder. Sonraki düğüm etmeninden *AraçID*'sini alan düğüm etmeni, bu bilgiyi araç etmenine iletir.

Sonraki aşamada araç etmenleri kendi aralarında haberleşerek takip algoritması için gerekli olan konum, hız ve yön bilgilerini paylaşırlar. Son olarak, araç etmeni tarafından çalıştırılan takip algoritmasının ürettiği sonuca göre güvenli yol takibi gerçekleştirilmektedir. Bu algoritma ile ilgili detaylı bilgi Beşinci Bölüm’de ifade edilmiştir. Takip algoritmasına ait süreç takibi Şekil 4.29’da gösterilmiştir.



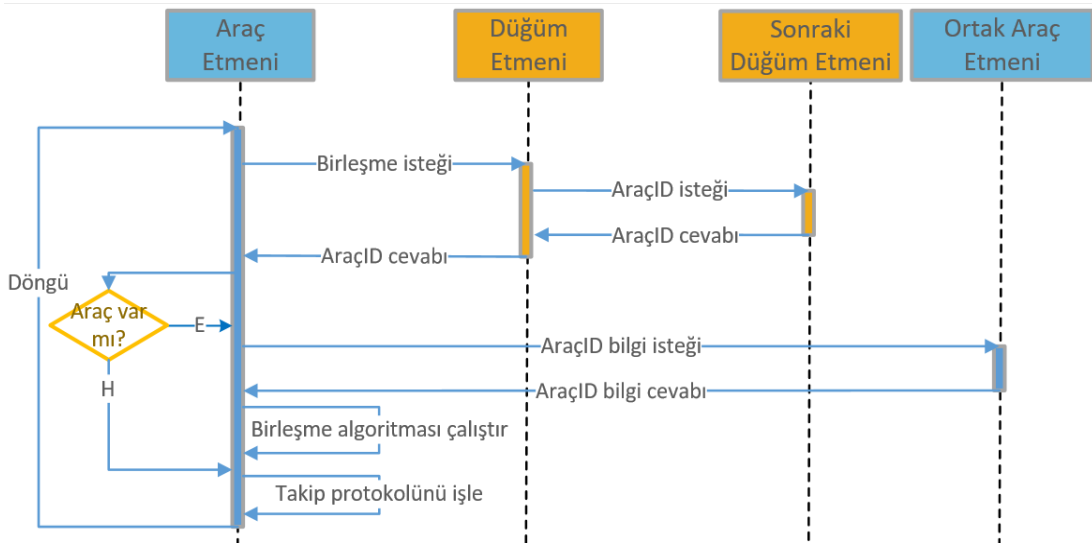
Şekil 4.29 : Takip prosedürü

4.6.3 Birleşme Prosedürü

Paralel ve komşu linklerde hareket eden araçların aynı link üzerinde birleşmeleri durumunda takip edilen süreçtir. Birleşme prosedürü olarak isimlendirilen bu süreç, takip prosedürünü de kapsamaktadır.

Araç etmeni, hareket ettiği linkten sorumlu düğüm etmeni ile haberleşerek kendisi ile düğüm noktasına yakın zamanlarda varabilecek araçlara ait *AraçID*'sini talep etmektedir. Düğüm etmeni ise sağ veya sol düğüm noktası olma durumuna göre kendisine komşu olan sonraki düğüm etmeni ile haberleşerek *AraçID*'sini istemektedir. *AraçID*'si olması durumunda bu bilgi düğüm etmeni aracılığı ile araç etmenine iletilmekte ve bu *AraçID*'sine sahip araç etmeni ile haberleşerek birleşme prosedürü için gerekli olan konum, hız, yön ve link bilgileri paylaşılmaktadır. Bu bilgileri alan araç etmeni takip prosedürü ve birleşme algoritmasını çalıştırarak

çarpışma ve gecikme olmadan aynı linkte birleşmenin gerçekleştirilmesine hizmet etmektedir. Bu süreç Şekil 4.30’da gösterilmiştir.

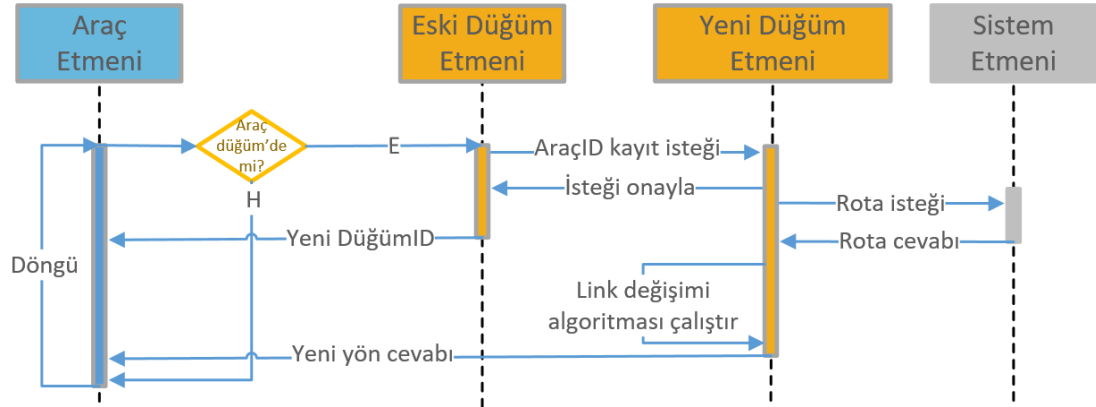


Şekil 4.30 : Birleşme prosedürü

4.6.4 Şerit Değişim Prosedürü

Bu prosedür ile hedeflenen, araçların farklı bir şeride geçme esnasında sorumlu oldukları düğüm etmenlerine ait bilgilerin güncellenmesidir. Bu prosedür her bir linkin son noktasında veya diğer bir ifade ile düğüm noktasında gerçekleşmektedir. Bu noktaya gelen bir aracın eski düğüm etmeni tarafından anlık olarak takip edildiği için anlık konumu bilinmektedir. MCS aracı düğüm noktasına geldiğinde, eski düğüm etmeni yeni düğüm etmeni ile haberleşerek *AraçID*'sinin kayıt edilmesi talebinde bulunmaktadır. İsteği onaylayan yeni düğüm etmeni araç etmenine bir sonraki link boyunca hareket ederken sinyal vermesi gereken yön bilgisini de iletmelidir. Bu amaçla düğüm etmeni, sistem etmeni ile haberleşmekte ve rota talebinde bulunmaktadır. Yön değişiminin belirlenmesi düğüm etmeninin sorumluluğunda olduğu halde araç etmeninin çıkışa yakın olması veya sonraki bölümde anlatılacak olan yön değişim algoritma sabitlerine göre zorunlu durumlar meydana gelebilmesi sebebiyle sistem etmeni yardımıyla yapılmaktadır. Bu durumlar sistem etmeni tarafından kontrol edilmekte ve rota bilgisi olarak düğüm etmenine iletilmektedir. Yeni düğüm etmeni ise aldığı rota bilgisi ve seçilen yön değişim algoritmasına göre diğer düğüm etmenleri ile haberleşmekte ve yön tespiti yapmaktadır. Yön bilgisi araç

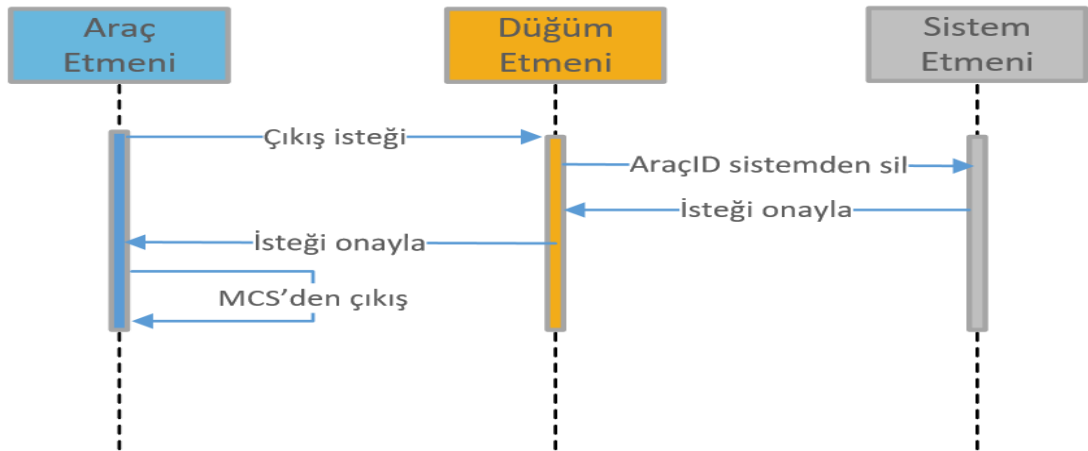
etmeni ile paylaşarak araç etmenlerinin şeritlere uygun hızda ve sayıda girmesi sağlanmaktadır. Şerit değişim prosedürü Şekil 4.31’de gösterilmiştir.



Şekil 4.31 : Şerit değişim prosedürü

4.6.5 Çıkış Prosedürü

Araç etmenlerinin belirlenen rotanın sonuna geldiği ve MCS’den ayrılma durumunun organize edildiği süreçtir. Giriş prosedürüne benzeyen bu süreç üç etmenin organize çalışması ile gerçekleştirilmektedir. İlgili araç etmeni, düğüm etmeni ile haberleşerek çıkış isteğinde bulunmaktadır. Düğüm etmeni de sistem etmeni ile haberleşerek ilgili araca ait *AraçID*’sinin silinmesini istemektedir. Onaylanan isteklerin sonucunda, MCS’den çıkış sağlanmakta ve araç sürücü kontrolünde istasyondan ayrılmaktadır. Çıkış prosedürü Şekil 4.32’de gösterilmiştir.

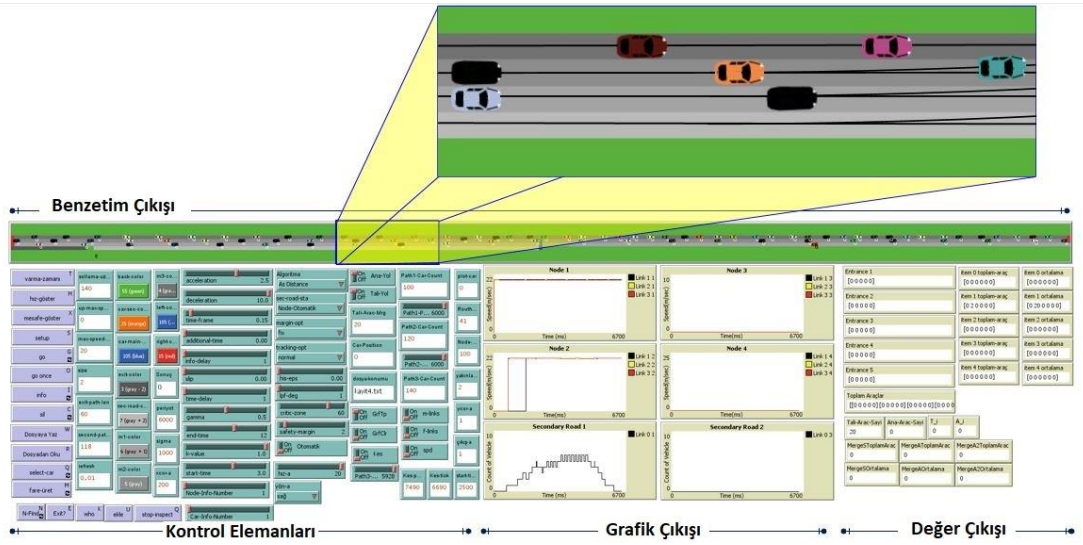


Şekil 4.32 : Çıkış prosedürü

4.7 MCS Benzetim Ortamı

MCS için NetLogo yazılımı kullanılarak yeni bir mikroskobik benzetim ortamı hazırlanmıştır. Bu benzetim ortamı yardımıyla, geliştirilen algoritmalar ve belirlenen prosedürler test edilmiştir.

Geliştirilen ortam dört ayrı kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlar; benzetim çıkışı, kontrol elemanları, grafik çıkışı ve değer çıkışıdır. Tüm bu kısımların gösterildiği MCS benzetim ortamı Şekil 4.33'te verilmiştir.



Şekil 4.33 : MCS benzetim ortamı

Benzetim çıkışı, MCS'nin iki veya üç boyutlu bir biçimde, anlık olarak takip edilebildiği kısımdır. Burada MCS için oluşturulan yollar ve bu yollarda hareket eden MCS araçları görülmektedir.

Kontrol elemanları ise, MCS ortamı için gerekli tüm yol, araç ve sistem sabitlerini kapsamakla beraber, algoritma ve prosedürlerin çalıştırılması için gerekli olan değerleri içermektedir. Bu elemanlar sayesinde farklı MCS yolları ve araçları tasarlanabilmekte ve farklı senaryolar hazırlanabilmektedir.

Grafik çıkışı, MCS ile ilgili üretilen verilerin grafiğe dönüştürüldüğü bölümdür. Bu kapsamda MCS etmenlerinin zaman içerisindeki durumları ve değişimleri hem bireysel hem de tüm sistem için gözlemlenebilmektedir.

Son olarak değer çıkışı ile MCS ıktıları matematiksel olarak gözlemlenebilmektedir. Bu değerler kullanılarak performans ve hata düzenlemeleri yapılmaktadır.

Sonuç olarak bölüm kapsamında, bir aracın MCS'ye giriş anından çıkış anına kadar geçen süre içerisinde takip edilen süreçler ayrıntılı bir biçimde anlatılmıştır.

5. METROCAR SİSTEMİ ALGORİTMA VE TESTLERİ

5.1 Giriş

Bu bölüm, MCS için geliştirilen algoritmalar ve bu algoritmaların çalıştırılması ile elde edilen sonuçları kapsamaktadır. Bölüm kapsamında araçların MCS yollarında güvenli bir biçimde hareket etmesi ve çarpışma olmadan seyahatlerini tamamlaması için çeşitli algoritmalar geliştirilmiştir. İzleyen alt kısımlarda geliştirilen bu algoritmalar tanıtılarak elde edilen test sonuçları sunulacaktır.

5.2 Rulet Tekerı Seçim Algoritması

Bir veri kümesi içerisinde uygunluk derecesine göre eleman seçimi için kullanılan bu algoritma, genetik algoritmalar alanında birey seçiminde sıklıkla kullanılmaktadır. Çalışmada araçların çıkış yollarının belirlenmesi, bu algoritma kullanılarak belirlenmiştir. Rulet tekerı seçim algoritması ile çıkış yolları rastgele değil günlük yaşama uygun bir tarzda, yolların seçilme olasılığına göre ayarlanmaktadır (Lipowski ve Lipowska 2012). Çeşitli düzenlemeler ile yeni bir biçimde tasarlanan bu algoritma, Şekil 5.34'te gösterilen biçimde çalışmaktadır.

1. Başla
2. Tüm dizi değerlerini topla ve dizi içerisindeki yüzdelik oranlarını belirle
3. Oranları küçükten büyüğe sırala
4. Rastgele bir sayı üret
 - a. Üretilen sayı \geq dizi[a] ve sayı $<$ dizi[a+1] ise
 - i. Çıkış = a
 - ii. Bitir
 - b. 4.adıma git

Şekil 5.34 : Rulet tekerı seçim algoritması

5.3 Düz Yol Takip Algoritması

Aynı şerit üzerinde hareket eden sürücüsüz araçların çarpışma olmadan hız kontrolünün yapılması, trafik akışı açısından önem arz etmektedir. Düz yol takip algoritması yardımı ile mekaniksel ve fiziksel özellikleri aynı olan araçların, V2V haberleşme ile aynı şerit üzerinde çarpışmadan hız kontrolünün sağlanması hedeflenmektedir. Her bir τ anında, araçlara ait hız ve konum bilgilerinin servis edildiği bir ortamda; her bir araç, önünde bulunan aracın hız ve konumuna göre hızını arttırıp azaltarak hareket etmektedir. Araçlar hız değişiminde sabit hızlanma/yavaşlama ivmeleri kullanmaktadırlar. Araç kontrolleri, haberleşme sisteminin ayrık zamanlı bilgi üretmesi sebebiyle sürekli zamanlı sistemlerden farklı bir biçimde, ayrık zamanlı kontrol mantığına uygun tasarlanmıştır. Bu durum sürekli zamanlı sistemlerde geçerli olan denklemlerin değişmesine yol açmıştır. Bu değişimler ve yararlanılan denklemler (5.1) ve (5.2) ile verilmiştir.

$$v[n + 1] = v[n] + a \cdot \tau \quad (5.1)$$

$$x[n + 1] = x[n] + v[n] \cdot \tau \quad (5.2)$$

Burada v hız, x konum, a ivme, n zaman indisi, τ ise haberleşme periyodu olarak tanımlanmıştır. (5.1) ve (5.2) ile tüm araçların kendi hızlarını kontrol etmesi sağlanabilmektedir. Bu denklemlerden yola çıkılarak her bir aracın bir sonraki adımda bulunacağı konum ve hız hesaplanabilmektedir. (5.1) denklemini tümevarım şeklinde işlendiğinde (5.3) denklemini elde edilir. Yine aynı şekilde, (5.2) denkleminde (5.4) denklemini elde edilebilmektedir. Bu denklemlerde m başlangıç zaman periyodunu temsil eden zaman indisi olarak kullanılmıştır. Elde edilen denklemler m başlangıç periyodundan $n + 1$ periyot sonra araçların hız ve konum bilgisini vermektedir.

$$v[m + n + 1] = v[m] + (n + 1) \cdot a \cdot \tau \quad (5.3)$$

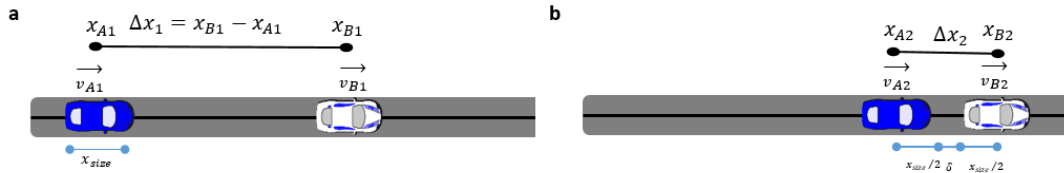
$$x[m + n + 1] = x[m] + \tau \cdot \sum_{k=0}^n v[m + k] \quad (5.4)$$

Burada k zaman indisi olarak kullanılmıştır. (5.4) denkleminde $v[m + k]$ yerine (5.3)'teki denklem $v[m + k]$ formuna dönüştürülerek yazılır ve çözülür ise, (5.5) denklemi elde edilir.

$$x[m + n + 1] = x[m] + \frac{v^2[m + n] - v^2[m]}{2 \cdot a} + \frac{\tau}{2} \cdot (v[m + n] + v[m]) \quad (5.5)$$

(5.5) denklemi kullanılarak, m zaman periyodunda hız ve konumu bilinen bir aracın n periyot sonra bulunacağı konum tespit edilebilmektedir. Bu denklem sabit a değerli artan ya da azalan ivme için geçerlidir. Diğer bir ifade eli araç hızlarının sabit olduğu durumlarda a sıfır olacağından tanımsızdır.

Güvenli takip için iki araç arasındaki toplam minimum konum farkı Δx_{min} olmalıdır. $\Delta x_{min}, \delta + x_{size}$ toplamına eşit kabul edilen mesafesidir. Burada δ güvenli takip mesafesini ve x_{size} ise araç uzunluğunu göstermektedir. İki farklı zaman dilimi için araçlar arasındaki konum farkı, Şekil 5.35'te gösterilmiştir. Burada A arkadaki, B ise öndeki aracı temsil etmektedir.



Şekil 5.35 : a) İlk ve b) son durumda araç takibi

Takip sürecinde A aracı B aracına Δx_{min} mesafesinden daha az bir mesafede yaklaştığında, çarpışmanın olmaması için A aracı hızını azaltmalıdır. $m + n$ zaman periyodunda araçların durduğu varsayıldığından araç hızları sıfıra eşit olacaktır. (5.5) denklemi her iki araç için bu varsayım ile yeniden yazılırsa (5.6) ve (5.7) denklemleri elde edilir.

$$x_A[m + n + 1] = x_A[m] + \frac{v_A^2[m]}{2 \cdot a_{dec}} + \frac{\tau \cdot v_A[m]}{2} \quad (5.6)$$

$$x_B[m + n + 1] = x_B[m] + \frac{v_B^2[m]}{2 \cdot a_{dec}} + \frac{\tau \cdot v_B[m]}{2} \quad (5.7)$$

Burada a_{dec} yavaşlama ivmesini göstermektedir. Güvenli trafik akışı için (5.8) denklemi her bir zaman dilimi için sağlanması gerekmektedir.

$$x_B[m + n + 1] - x_A[m + n + 1] \geq \Delta x_{min} \quad (5.8)$$

(5.8) düzenlenerek çözümlerse (5.9) denklemi elde edilir.

$$\frac{v_B^2[m] - v_A^2[m]}{2 \cdot a_{dec}} + \frac{\tau \cdot (v_B[m] - v_A[m])}{2} + x_B[m] - x_A[m] \geq \Delta x_{min} \quad (5.9)$$

Bu denklemde araçların son durumda yani $(m + n)$ anında durduğu varsayıldığından $v_A[m + n]$ ve $v_B[m + n]$ değerleri sıfır olacaktır. Bu denklem yardımıyla m zaman periyodundaki hızı ve konumu bilinen iki aracın sabit azalan ivme ile yavaşladıklarında durma anındaki konum farkı kolaylıkla tespit edilebilmektedir. Sonuç olarak, ayrık zamanlı sistem mantığıyla çalışan MCS için araç takibi (5.9) denklemi kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir.

Araç takibinin nasıl bir algoritma ile düzenleneceği ayrı bir problemdir. Bu problemi aşmak amacıyla tez sürecinde farklı alternatifler geliştirilmiş ve eksikler tespit edilerek hatalar giderilmiş ve sonuçta uygun bir takip algoritması önerilmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında sürekli zamanlı sistem tasarımı uygulanmıştır. Uzun benzetim testlerinin sonucunda, sabit ivmeli ayrık zamanlı bir sisteme sürekli zamanlı bir eşitlikle çözüm aramanın, hatalı ve tutarsız sonuçlar ürettiği görülmüştür. Bu durumun sonucu olarak ayrık zamanlı sistem tasarımına geçilmiştir. Bu aşamada takip mesafesi, (5.9)'da verilen denklem kullanarak belirlenmiştir. Böylelikle tek şeritte hareket eden araçların hız kontrolü, sorunsuz gerçekleştirilmiştir. Bu araçların τ sürelik zaman periyodunda hız güncellemesi Alg. 1 kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Algoritma 1: Takip algoritması

$$if \left[\frac{v_B^2[m] - v_A^2[m]}{2 \cdot a_{dec}} + \frac{\tau \cdot (v_B[m] - v_A[m])}{2} \leq (x_A[m] - x_B[m] - \Delta x_{min}) \right]$$

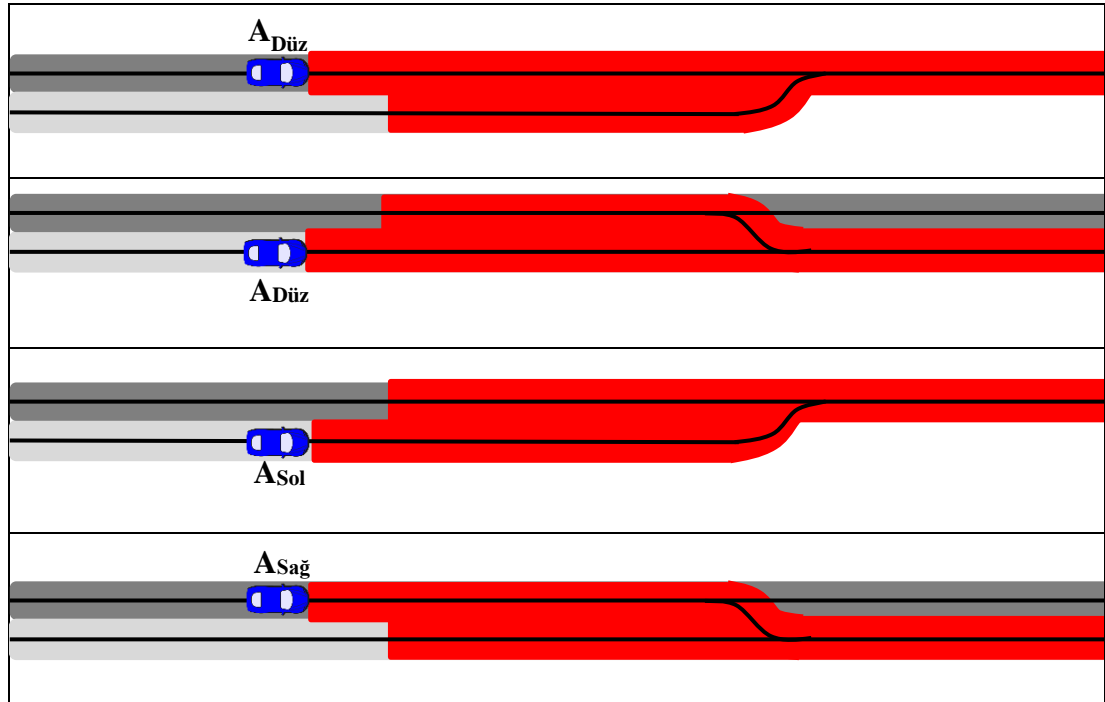
$$v_A[n + 1] = v_A[n] + \tau \cdot a_{acc}$$

else

$$v_A[n + 1] = v_A[n] - \tau \cdot a_{dec}$$

Tek şeritli yollarda düzenli sonuçlar üreten Alg. 1'in, çok şeritli yol düzeninde, ani yavaşlamalara neden olduğu gözlemlenmiştir. Performansı iyileştirmek amacıyla algoritmada iyileştirmeler yapılarak performans ve güvenlik bakımından daha verimli bir algoritma önerilmiştir.

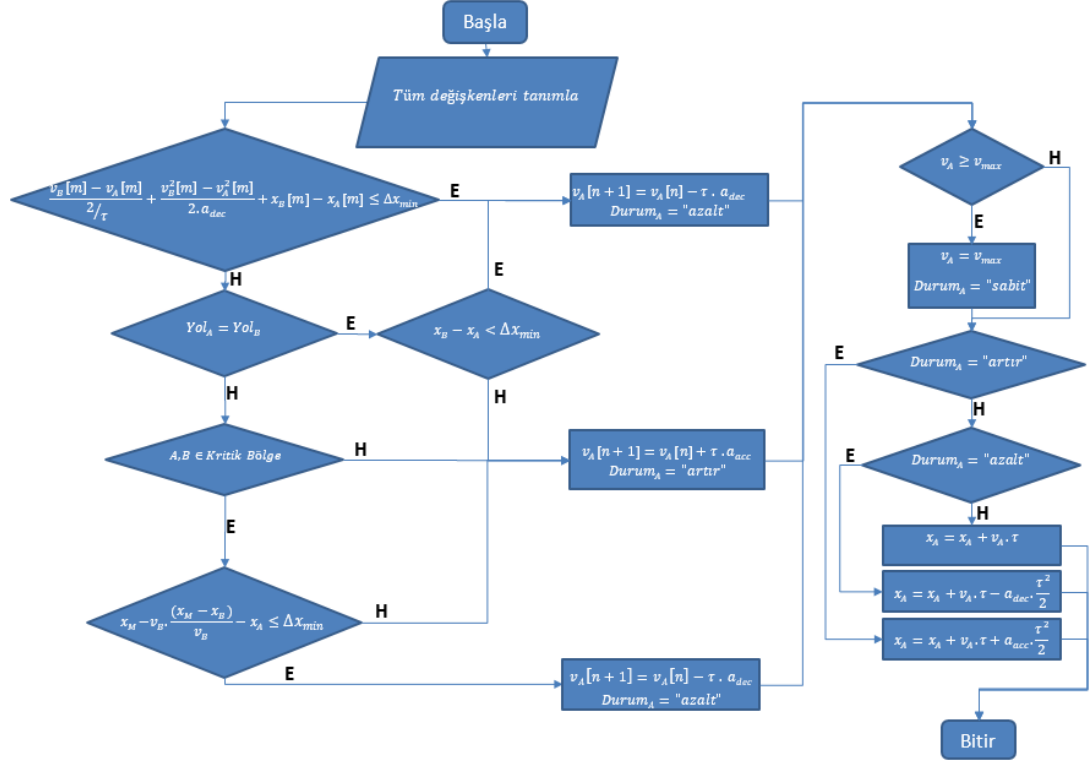
Bu algoritmanın tanıtımından önce, MCS için geçerli olan özel bir durumdan bahsedilecektir. MCS araçları, link boyunca hareket ederken sinyal verilen şeride göre farklı linklerde bulunan araçları bilmesi çarpışmanın olmaması için önem arz etmektedir. Düz giden bir araba, önündeki düğüm noktasının sağ/sol olmasına göre önündeki yolun haricinde sağa veya sola geçiş yollarını da kontrol etmesi gerekmektedir. Bu durumlar her bir aracın pozisyon, bağlanma türü ve sinyal durumuna göre Şekil 5.36'da kırmızı renkle gösterilmiştir.



Şekil 5.36 : Araç yol kontrol düzeni

Yukarıda ifade edilen düzen göz önüne alınarak geliştirilen algoritmaya ait akış diyagramı Şekil 5.37'de verilmiştir. Burada A arkadaki aracı, B ise öndeki aracı temsil etmektedir. Bu algoritma yardımıyla birleşme algoritması kısmında ayrıntılı anlatılan linklerin "kritik bölge" kısmı, komşu linkler için de kontrol edilmektedir. Diğer bir ifade ile kontrol bölgesinde hareket eden araçlar farklı linklerde olsalar dahi bir linkte hareket ediyormuş gibi kabul edilerek düğüm noktasında çarpışma ve ani yavaşlamalar

engellenmektedir. Sonuçta aynı şeritte otonom biçimde seyir halindeki araçların hız kontrolü, güvenli bir biçimde ve çarpışma olmadan gerçekleştirilmektedir.

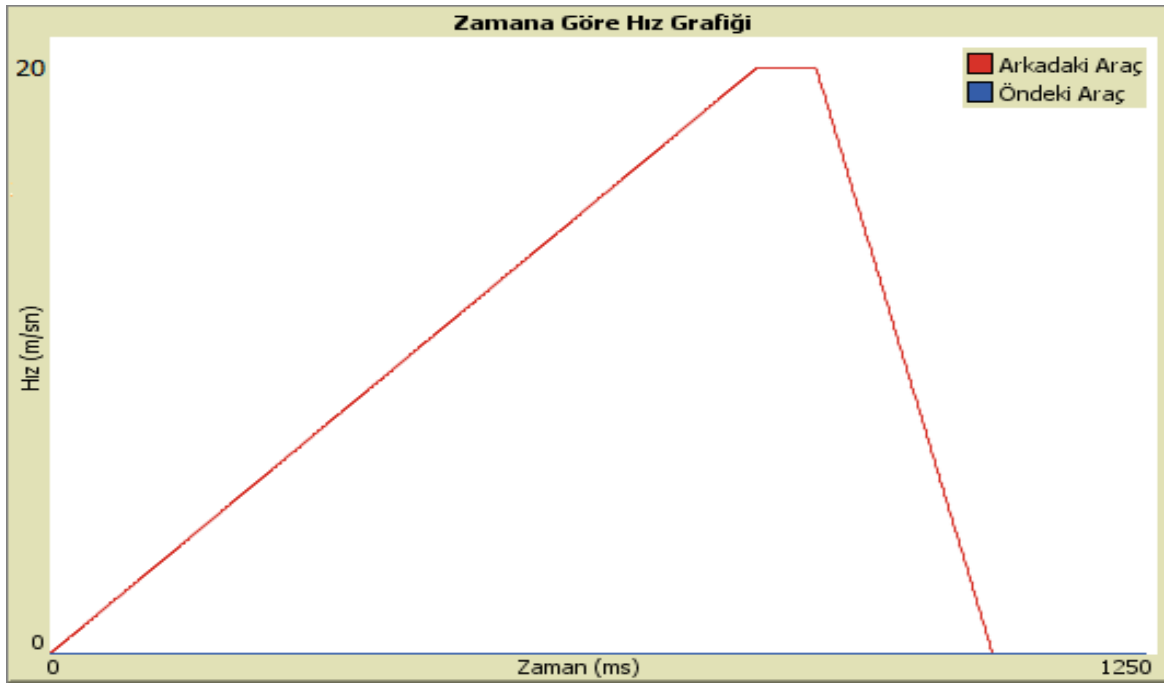


Şekil 5.37 : Takip algoritması akış diyagramı

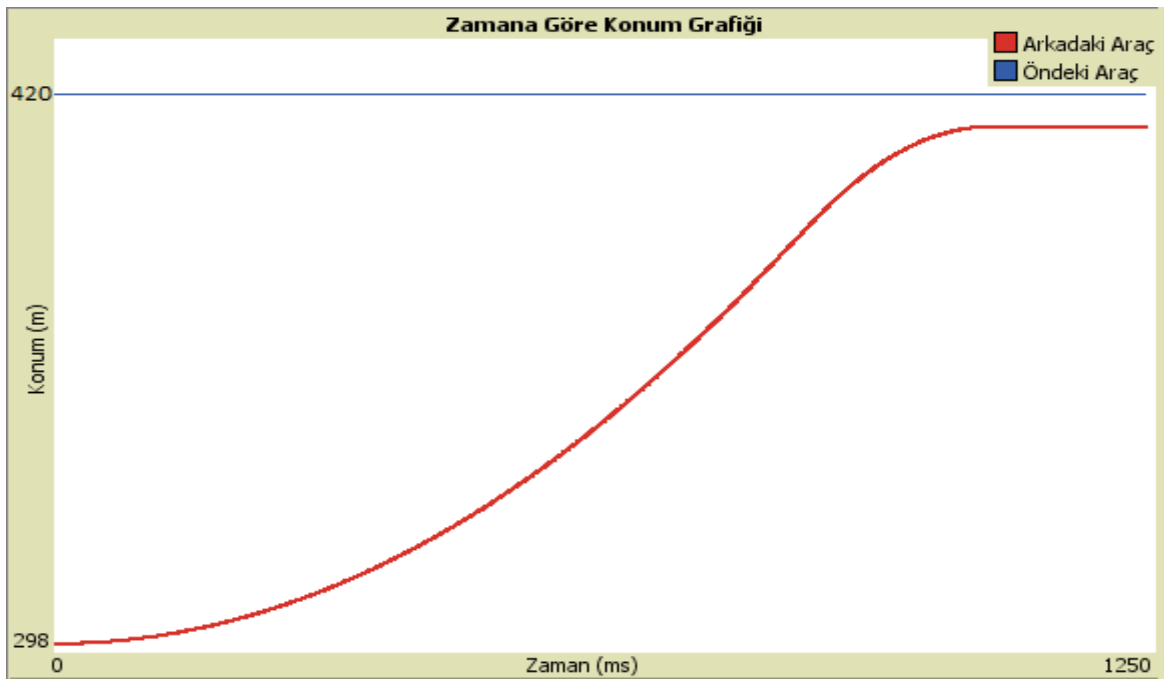
Bu algoritmada τ zaman periyodu; x_{size} , araç boyutu; $Durum_A$, A aracının hız güncelleme durumu; x_M , düğüm noktası konumu; Δx_{min} , minimum takip mesafesi; v_A , arkadaki aracın hızı; v_{max} , maksimum araç hızı; x_A , arkadaki aracın konumu; v_B , öndeki aracın hızı; x_B , öndeki aracın konumu; a_{dec} , yavaşlama ivmesi ve son olarak a_{acc} , hızlanma ivmesi olarak tanımlanmıştır. $Yol_{A,B}$ ise araçların üzerinde hareket ettiği linkin *LinkID*'sini göstermektedir. Bu algoritma ile verilen link değişim sinyaline göre paralel linklerin kritik bölgesinde bulunan araçların takibi de sağlanmaktadır. Bu aşamada araçlar aynı linkte hareket ediyormuş gibi düşünülerek düğüm noktasının konumunu temsil eden x_M noktasına varma zamanları ve buna bağlı olarak kalan mesafe hesaplanarak güvenli takip mesafesi kontrol edilmektedir.

Düz yol takip algoritması, yukarıda ifade edildiği biçimde sorunsuz çalışmaktadır. Bu kapsamda geliştirilen bir senaryo ile takip algoritmasının doğruluğu test edilmiştir. Bu senaryo, hareket halindeki bir aracın, önünde durmakta olan diğer bir aracı fark etmesi ve hızını çarpışma olmadan ayarlaması durumunu göstermektedir.

Şekil 5.38’de bu senaryo test edilmiş ve takip algoritması için zamana göre hız ve konum durumu gösterilmiştir.



(a)

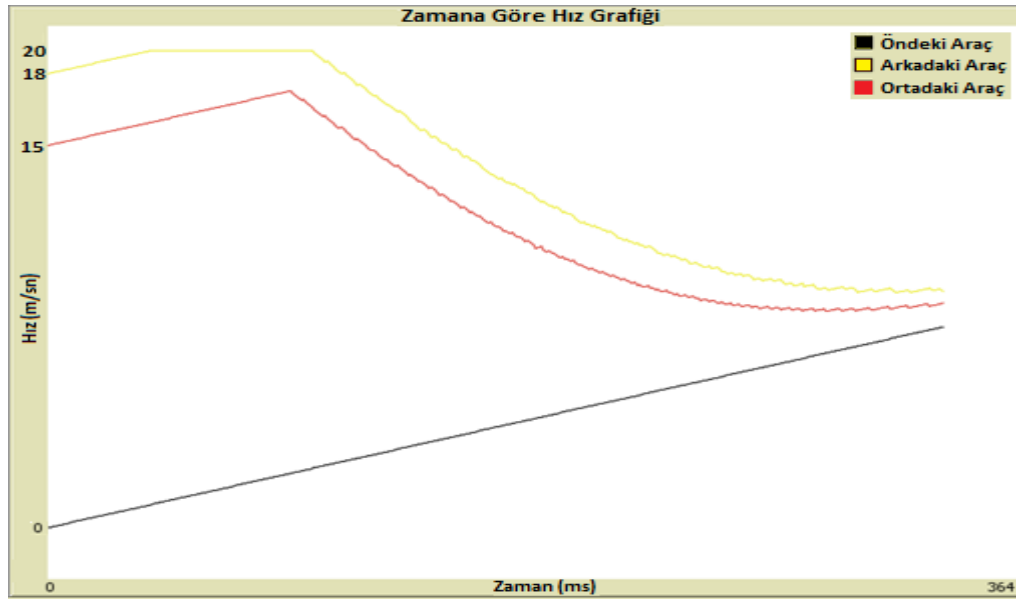


(b)

Şekil 5.38 : Takip algoritması zamana göre a) hız ve b) konum değişimi

Elde edilen sonuca göre takip algoritması problemsiz çalışmaktadır. Fakat araçların önünde bulunan araca çarpmamak için ardışık hız azaltması ve artırma

yapması konforu ve araç mekaniğini olumsuz etkilemektedir. Şekil 5.39’da aynı link üzerinde bulunan üç aracın zamana göre hız grafikleri verilmiştir.



Şekil 5.39 : Takip algoritması normal hız değişim grafiği

Bu senaryoda en arkada bulunan araç 18 m/sn , ortada bulunan araç 15 m/sn ve en önde bulunan araç 0 m/sn hızla hareket etmektedir. Zaman içerisinde arkada bulunan araçların hızlarını arttırdıkları, sonrasında öndeki araca çarpmamak için yavaşladıkları ve son olarak güvenli takip mesafesi oluştuğunda tekrar hızlarını arttırdıkları görülmektedir. Fakat takip esnasında hızda meydana gelen ardışık artma ve azalma istenmeyen bir durumdur. Bu problemi ortadan kaldırmak için üç farklı metot geliştirilmiştir. Bu metotlar şunlardır;

- Alçak geçiren filtre (AGF) metodu,
- Histerezis-1 metodu,
- Histerezis-2 metodu

İzleyen alt kısımlarda bu metotları ayrıntılı olarak ifade edilecektir.

5.3.1 Alçak Geçiren Filtre Metodu

Farklı disiplinlerde sinyal düzenlemek amacıyla kullanılan filtreler, bu tezde ardışık hız artma-azalma problemine çözüm bulmak amacıyla kullanılmıştır. Bu metot sisteme uyarılırken, araçlar arası güvenli takip mesafesi referans alınmıştır. İki araç

arasındaki minimum toplam güvenli takip mesafesi (5.10)'da ve (5.11)'de görülmektedir.

$$\frac{v_B^2[m] - v_A^2[m]}{2 \cdot a_{dec}} + \frac{\tau \cdot (v_B[m] - v_A[m])}{2} + x_B[m] - x_A[m] = x_s \quad (5.10)$$

$$\Delta x_{min} \leq x_s \quad (5.11)$$

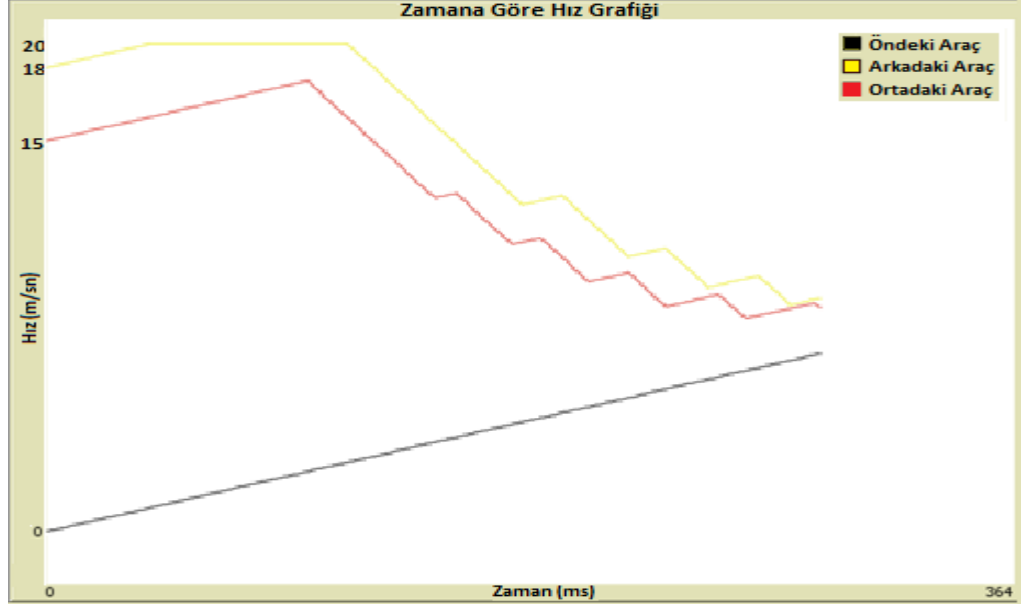
Burada τ zaman periyodu; Δx_{min} , minimum toplam güvenli takip mesafesi; v_A , arkadaki aracın hızı; v_B , öndeki aracın hızı; a_{dec} , hız azalma ivmesi ve son olarak x_s , güvenli takip mesafesi olarak tanımlanmıştır. A ve B araçlarının çarpışma olmadan hareket etmesi için eşitsizliğin korunması, her bir τ zaman dilimi için sağlanmalıdır.

Alçak geçiren filtre (AGF) metodunda ise x_s değerleri anlık olarak değişmek yerine alçak geçiren filtre derecesine göre ortalama alınarak sisteme uygulanmaktadır. Diğer bir ifade ile sadece anlık hesaplanan ve en son üretilen x_s değeri hesaplama için kullanılırken, AGF'de farklı olarak, belirlenen dereceye göre ortalama x_s değeri uygulanmaktadır. Bu değer geçmiş bilgilerinde hesaba eklenmesini sağlamaktadır. Dereceye göre x_s değerleri, Tablo 5.6'da gösterilen denklemlere göre hesaplanmaktadır.

Tablo 5.6 : AGF derecesine göre x_s hesabı

2 dereceli AGF	$x_s = \frac{x_s[n-1] + x_s[n]}{2}$	<i>n: en son zaman</i>
3 dereceli AGF	$x_s = \frac{x_s[n-2] + x_s[n-1] + x_s[n]}{3}$	<i>n: en son zaman</i>
<i>k</i> dereceli AGF	$x_s = \frac{x_s[n-k+1] + x_s[n-k+2] + \dots + x_s[n]}{k}$	<i>n: en son zaman</i>

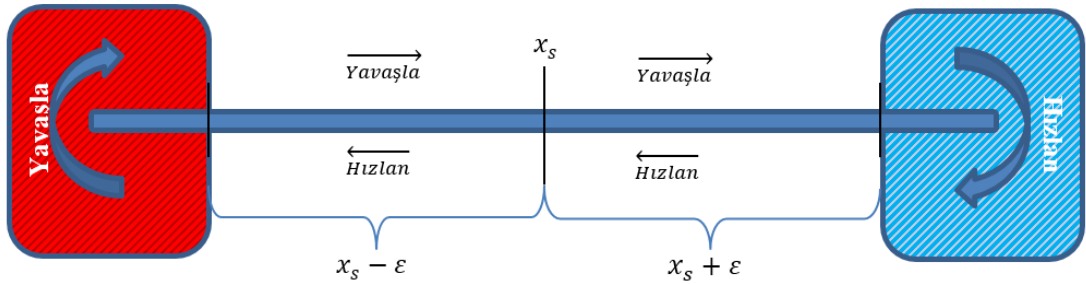
Yukarıdaki denklemlerde k ve n indis değerlerini göstermektedir. Örneğin; Şekil 5.39'da elde edilen durum için 15 dereceli AGF uygulanarak ilgili senaryo uygulandığında, Şekil 5.40'da gösterilen sonuçlar elde edilmektedir. AGF sayesinde ani hız değişimlerinin azaldığı ve daha konforlu bir seyahat sağlandığı gözlemlenmektedir.



Şekil 5.40 : 15. dereceden alçak geçiren filtre uygulanmış sistem

5.3.2 Histerezis-1 Metodu

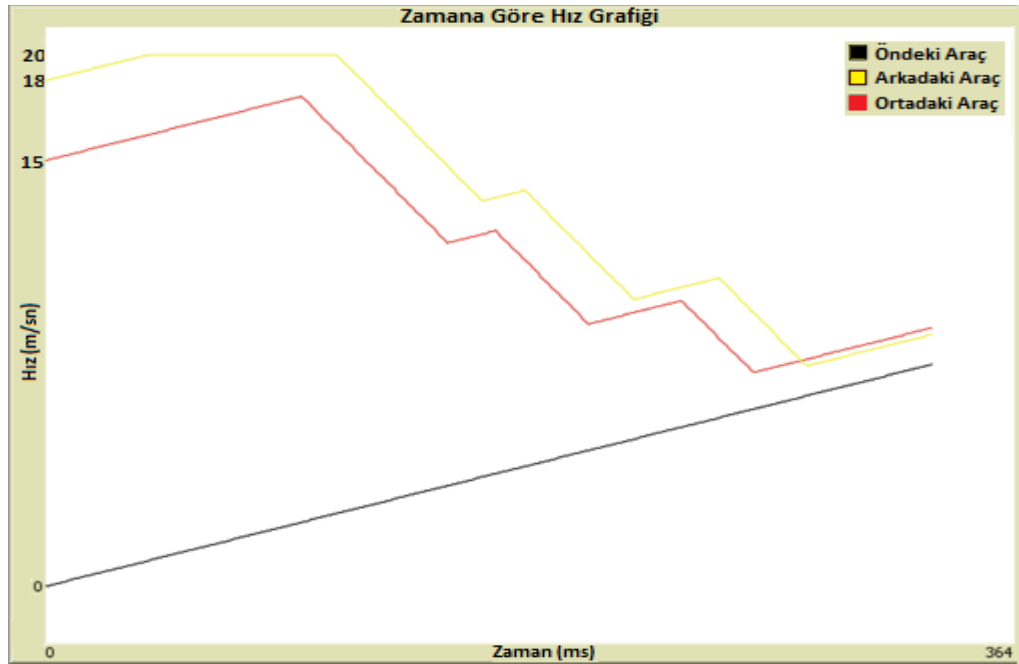
Diğer bir metot olan Histerezis-1; klima, kombi vb. cihazlarda sıcaklık ayarlaması yapmak amacıyla kullanılmaktadır. Belirlenen değer aşıldığı anda sistemin çalıştırılması sürekli aç/kapa yapılmasına neden olduğundan ε miktarındaki bir aşım tampon değer olarak kabul edilmektedir. Bu metot ani hız değişimi problemine uyarlandığında, x_s değerinin sınır değere göre değişimi yerine; $x_s \pm \varepsilon$ miktarında bir aralıkta araçların hızlarını koruması şeklinde uygulanmaktadır. Şekil 5.41'de Histerezis-1 metoduna ait şekil gösterilmektedir.



Şekil 5.41 : Histerezis-1 konuma bağlı hız durum şeması

$\varepsilon = 1$ için Şekil 5.39'daki senaryo yeniden uygulandığında Şekil 5.42'de gösterilen sonuç elde edilmiştir. Yapılan diğer testlerde ε değerinin artması, daha az miktarda hız azalma ve artmaya sebep olduğu gözlemlenmiştir. Fakat ε değerinin

gereğinden fazla yüksek olması hassasiyetin azalmasına ve araçların çarpışmasına yol açtığı görülmüştür. Yapılan testler ile ε için 1 değerinin uygun olduğu belirlenmiştir.

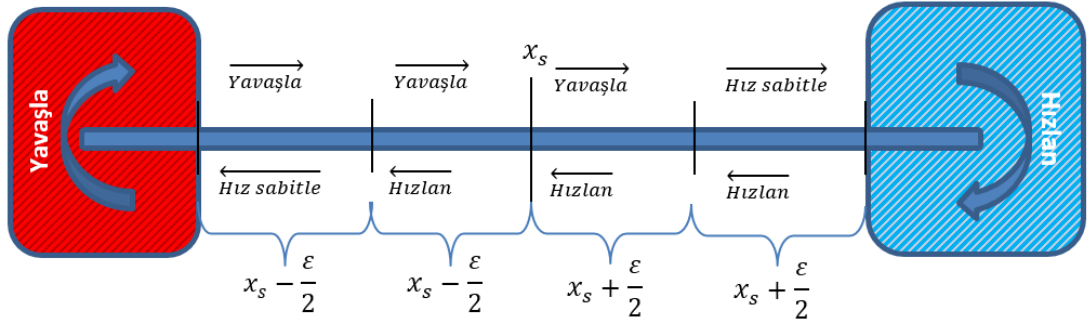


Şekil 5.42 : Histerezis-1 uygulanmış sistem

Yukarıda elde edilen sonucun hem normal duruma hem de AGF'ye göre daha uygun bir sonuç olduğu görülmektedir.

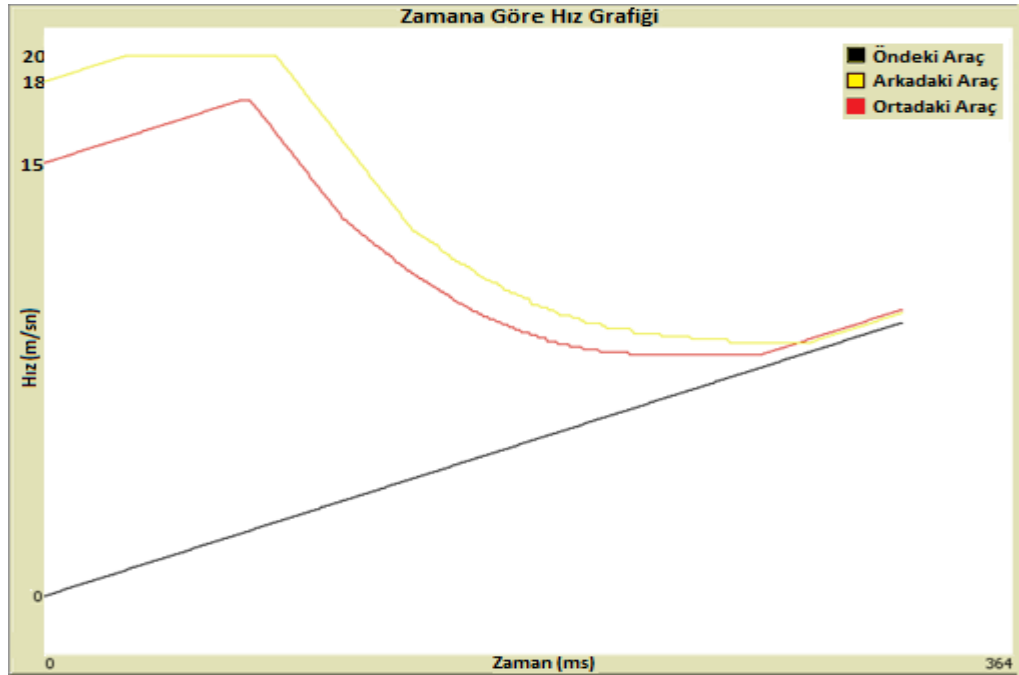
5.3.3 Histerezis-2 Metodu

Bu yöntem Histerezis-1 yöntemi ile benzerlik göstermektedir. Histerezis-2, Histerezis-1 yönteminden farklı olarak araçların belirli bir mesafe bandında hızlarını sabitlemesi fikrine dayanmaktadır. Hem hız artırma ve azaltma hem de hız sabitleme seçeneği ile daha esnek bir metot ortaya çıkmıştır. Bu durum da, araçların performans ve konfor açısından etkinliğini arttırmaktadır. Şekil 5.43'te Histerezis-2 yöntemi gösterilmiştir.



Şekil 5.43 : Histerezis-2 konuma bağlı hız durum şeması

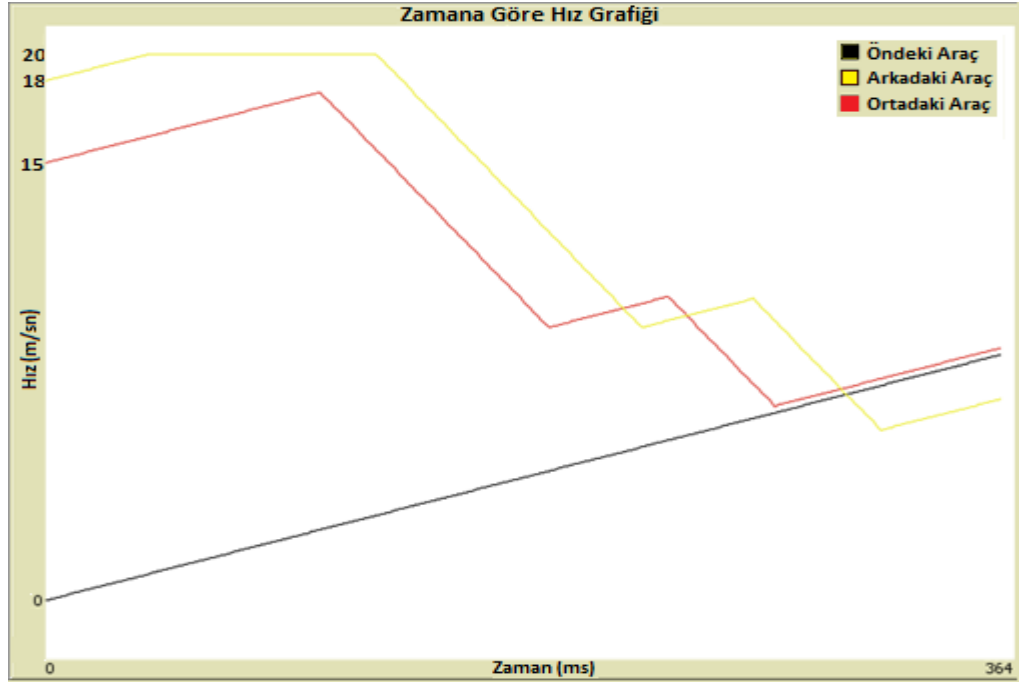
Burada araçlar x_s değerine kadar hızlarını takip algoritmasına göre arttırmak veya azaltmaktadırlar. x_s bandı aşıldığında $x_s \mp \varepsilon/2$ miktarında eski hız durumu (hızlanma/yavaşlama) devam ederken, geriye kalan $x_s \mp \varepsilon/2$ mesafede hızını sabitlemektedir. Eğer $x_s \mp \varepsilon$ değeri aşılsa hız durumunu değiştirerek çarpışma engellenmektedir. $\varepsilon = 1$ için Şekil 5.39'teki senaryo yeniden uygulandığında Şekil 5.44'te gösterilen sonuç elde edilmektedir.



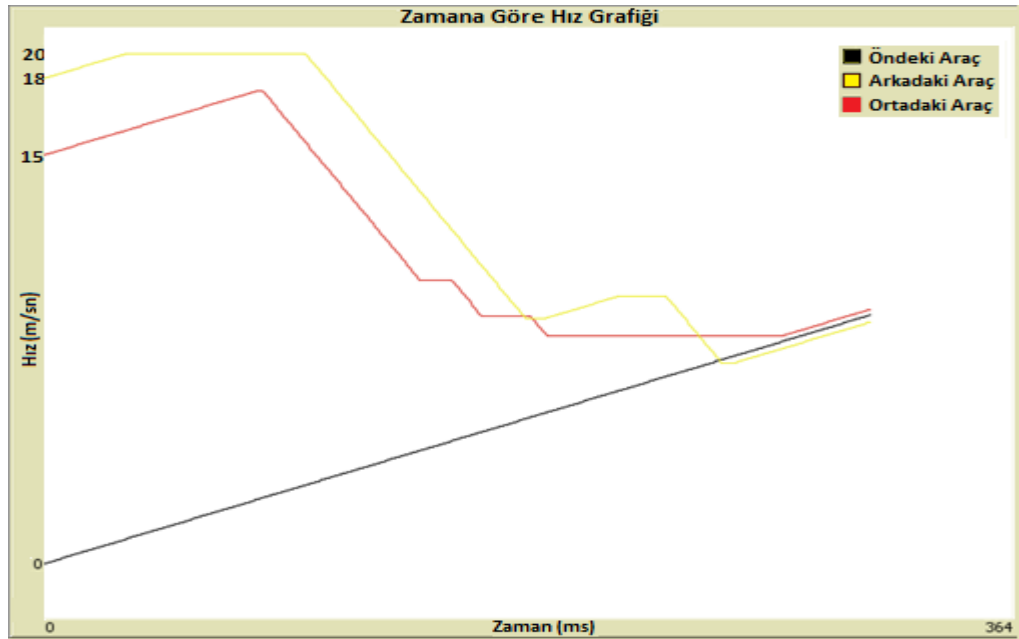
Şekil 5.44 : Histerezis-2 uygulanmış sistem

Yukarıda araç hızlarında oluşan ardışık hız azalma ve artma problemi normal takip algoritmasında oluşan problemden farklıdır. Bu farklılık kısaca şöyle ifade edilebilir; Normal takip algoritmasında x_s değeri $\delta + x_{size}$ değerinin çevresinde hareket etmesiyle hız azalma ve artma problemi oluşurken; Histerezis-2'de ise

$x_s \pm \varepsilon/2$ değerinin çevresinde bu problem oluşmaktadır. Bu problemleri ortadan kaldırmak için Histerezis-1 ve Histerezis-2 algoritmaları AGF ile birleştirilerek kullanılabilir. Bu işlem, sistemde ardışık hızlanma ve yavaşlama durumunu tamamen ortadan kaldırırken güvenli ve konforlu bir seyahat imkanı sunmaktadır. Histerezis-1 ve Histerezis-2 yöntemlerine 15. dereceden AGF uygulandığında elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 5.45'te ve Şekil 5.46'da gösterilmiştir.



Şekil 5.45 : Histerezis-1 ve 15. dereceden AGF

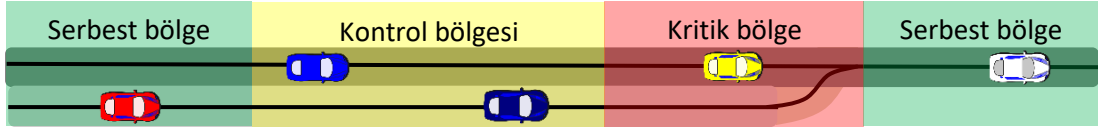


Şekil 5.46 : Histerezis-2 ve 15. dereceden AGF

5.4 Birleşme Algoritması

Giriş yolunun ana yol ile kesiştiği noktada veya şerit değişiminin olduğu düğüm noktalarında, araçların çarpışmadan en uygun hızda hareket etmesi, trafik akışı bakımından önem arz etmektedir. Bu amaç doğrultusunda hazırlanan birleşme algoritması, araçların düğüm noktasına varmadan önce birbirleri ile haberleşmesi ve hızlarını güncellenmesi durumunu esas almaktadır.

Bu algoritma ile ilk aşamada araçların düğüm noktasına hangi sırada gireceği belirlenmektedir. Bu sıralamayı gerçekleştirmek için Şekil 5.47’de görüldüğü gibi her bir MCS linki; serbest bölge, kontrol bölgesi ve kritik bölge olmak üzere üç ayrı bölüme ayrılmıştır.



Şekil 5.47 : Yol bölümlenmesi

Serbest bölgede hareket eden araçlar, farklı şeritteki araçlarla iletişim kurmadan, düz yol takip algoritmasına göre hızlanmaktadır. Bu bölgede araçların belirli bir hıza ulaşarak yüksek performanslı trafik akışının gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Giriş yolunda hareket eden araçlar, ana yoldaki araçların hız ortalamasına $\rho m/s$ kadar kaldığında kontrol bölgesine girmiş sayılmaktadırlar. Dolayısıyla kontrol bölgesinin başlangıç konumu her araç için değişiklik göstermektedir. ρ ise sistem kontrolcüsü tarafından belirlenen sabit bir hız değeridir.

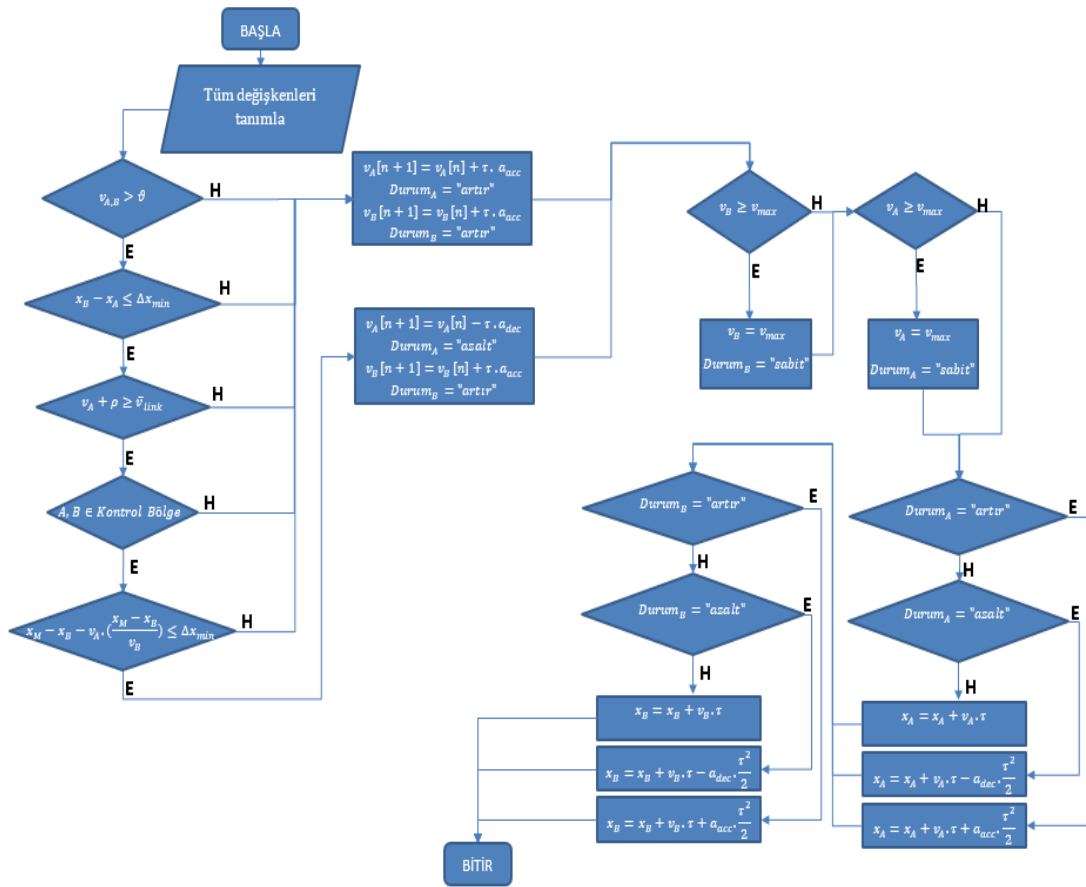
Kontrol bölgesinde ise araçlar geçiş önceliğini belirlemek için birbirleriyle haberleşmeye başlamaktadırlar. Haberleşme esnasında, giriş yolundaki araç kontrolör vazifesini görmektedir. Kritik bölgeye gelmeden önce, araçların düğüm noktasına giriş sıralaması tamamlanmak zorundadır. Bu sıralamanın yapılması için (5.12)’deki eşitsizlik kontrol edilmektedir.

$$x_M - x_B - \frac{v_A(x_M - x_B)}{v_B} \leq \Delta x_{min} \quad (5.12)$$

Burada x_B öndeki arabanın konumunu, x_M düğüm noktası konumunu, v_A arkadaki arabanın hızını, v_B öndeki arabanın hızını ve Δx_{min} toplam minimum takip mesafini ifade etmektedir. Bu eşitsizlik ile öndeki araç düğüm noktasına vardığında arkada

bulunan aracın konumu hesaplanmakta ve elde edilen değer, Δx_{min} değeri ile karşılaştırılarak hız azalma veya artırma kararı verilmektedir. Bunun dışında giriş yolunda ve ana yollarda bulunan araçların haberleşebilmeleri için hızlarının, ϑ olarak ifade edilen minimum ortalama haberleşme başlangıç hızı sabitinden yüksek olması gerekmektedir. Bu kabul, düşük hızdaki araçların performans kaybı oluşturmasına engel olmak için belirlenmiştir. Kontrol bölgesinde olan her bir giriş yolu aracı, ana yolda bulunan ve kendisine Δx_{min} mesafede bulunan araçlar ile haberleşebilmektedir. Bu koşulu sağlayan araçlar grup oluşturmakta ve düğüm noktasına yakın olan araç hızını arttırarak, uzak olan araç ise hızını azaltarak araç organizasyonunu sağlamaktadırlar.

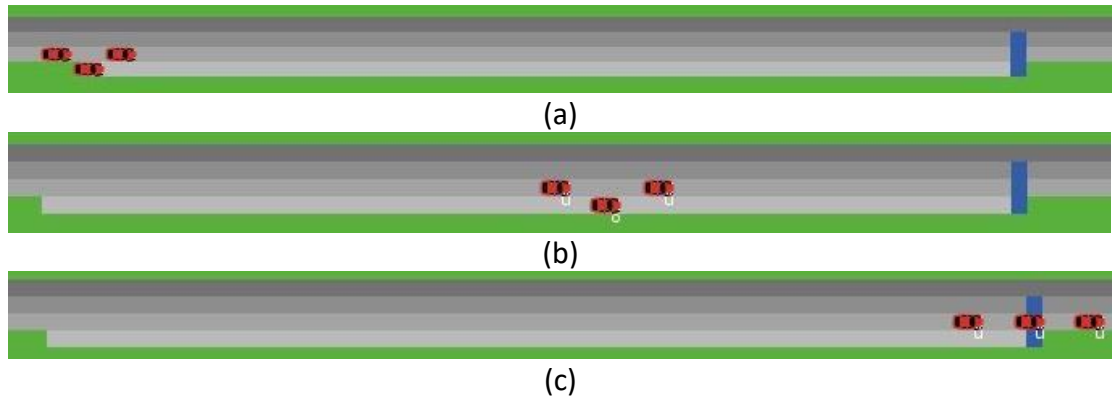
En son kısım olan kritik bölgede ise giriş ve ana yol, sanal bir biçimde tek şeritli bir yol gibi kabul edilerek - farklı şeritlerde olan araçlar aynı şeritte hareket ediyormuş gibi davranarak - hareket etmektedirler. Bu aşamada takip algoritması işletilerek olası çarpışmalar engellenmektedir. Birleşme algoritmasına ait akış diyagramı Şekil 5.48'de gösterilmiştir.



Şekil 5.48 : Birleşme algoritması akış şeması

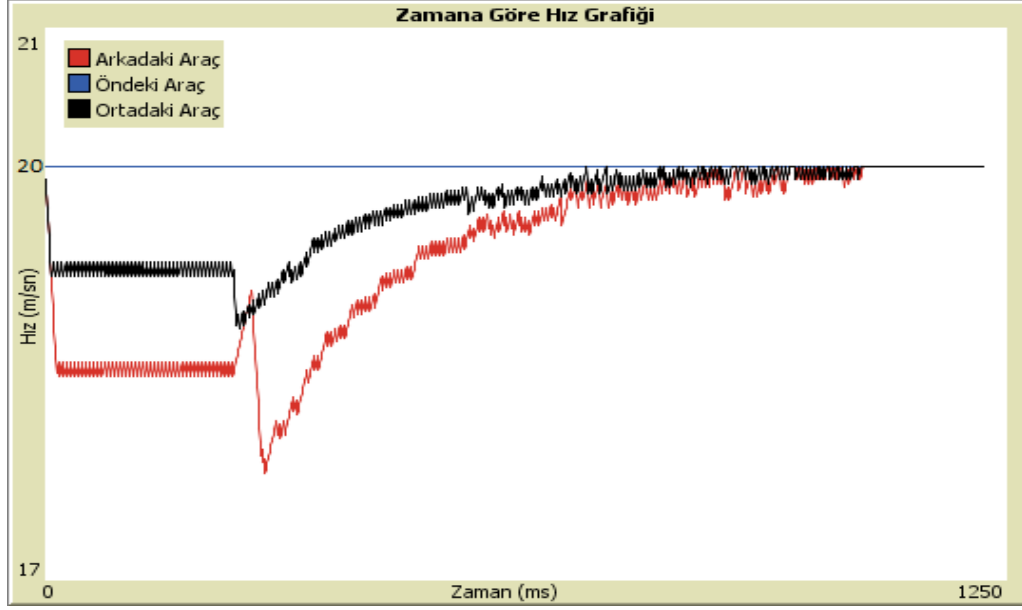
Bu algoritmada dikkat edilmesi gereken bir durum ise şudur; kontrol bölgesinde seyreden araçlar, hız güncellemesini gerçekleştirirken düz yol takip algoritmasını ihlal etmemelidirler.

Birleşme algoritmasının çalışma sistemi iki farklı senaryo ile test edilmiştir. Birinci senaryo, üç aracın birbirine göre durumlarını göstermektedir. Bu araçlar üç metre aralıkla iki farklı şeritte hareket etmektedirler. Bu örnek için takip mesafesi, 6 m olarak kabul edilmiştir. Bu senaryoya göre yolun ilk bölümünde araçlar yeteri kadar hızlanmalı ve ikinci kısımda araç sıralaması tamamlanmalıdır. Son bölümde ise sıralanmış şekilde hareket eden araçlar herhangi bir çarpışma olmadan tek şeritte birleşmektedirler. Şekil 5.49'da bu durumlar gösterilmiştir.

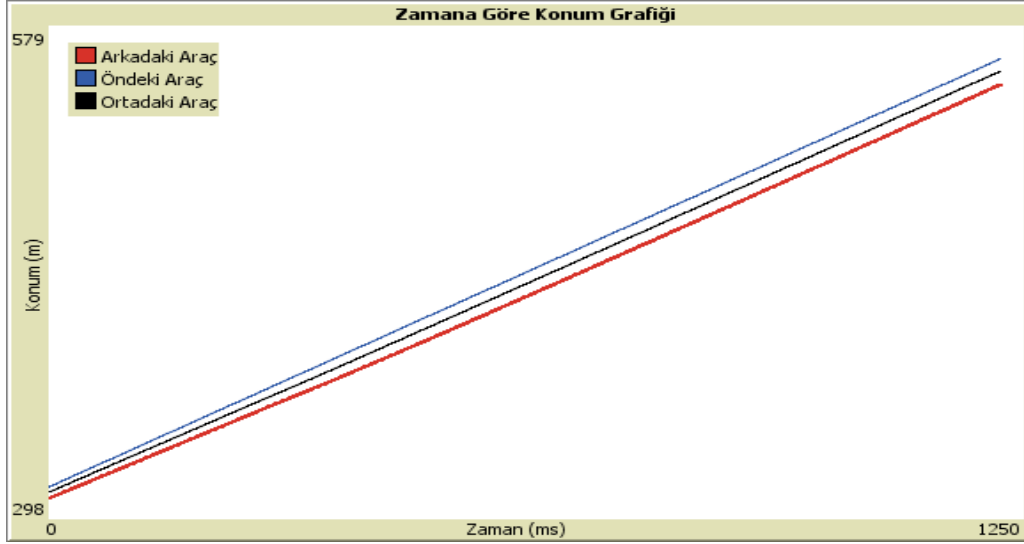


Şekil 5.49 : Birleşme algoritması a) 0. ms, b) 500. ms ve c) 1000. ms

Şekil 5.49'da üç farklı zaman diliminde gösterilen senaryo için sonuçlar Şekil 5.50'de verilmiştir. Bu örnekte, araçların başarılı bir biçimde şerit değişimi yapabildiği görülmektedir.



(a)

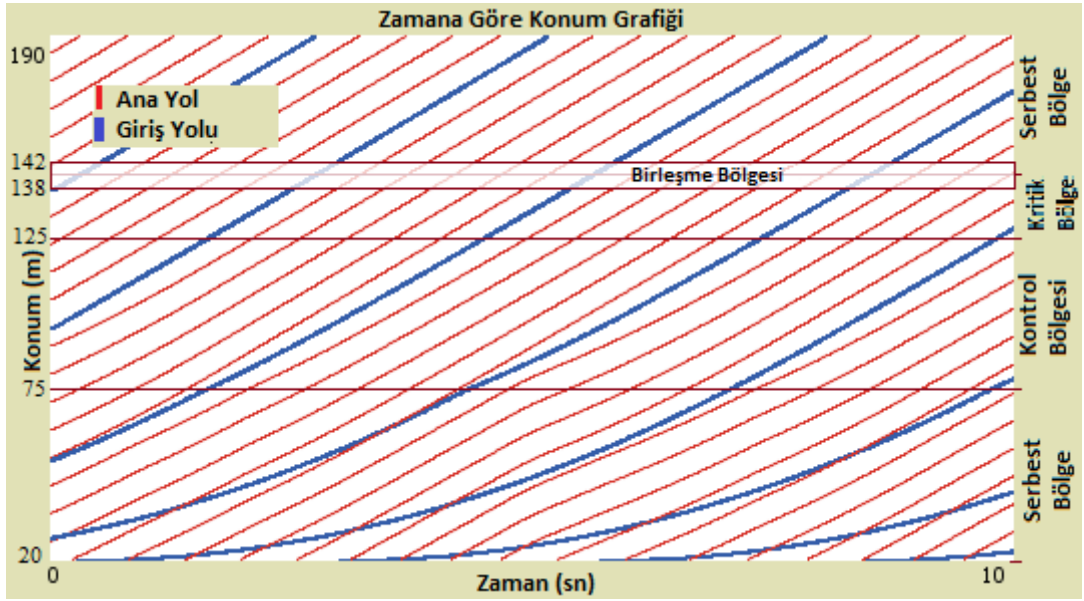


(b)

Şekil 5.50 : Birleşme algoritması zamana göre a) hız ve b) konum grafiği

İkinci senaryoda ise birden fazla aracın ana yolda hareket etmesi ve aynı esnada giriş yolundan sisteme dâhil olan araçların durumu gösterilmiştir. Şekil 5.51’de sonuçları verilen bu senaryoda; ana yol araçları kırmızı, giriş yolu araçları ise mavi biçimde gösterilmiştir. Ayrıca önceki kısımlarda ayrıntılı ifade edilen serbest bölge, kontrol bölgesi, kritik bölge ve birleşme bölgeleri işaretlenerek araçların bu bölgelerdeki davranışları incelenmiştir. Sonuçta tüm giriş yolu araçlarının serbest bölgede hızlarını arttırdıkları, kontrol bölgesinde ise haberleşerek sıralamayı belirledikleri ve son olarak kritik bölgede hassas kontrollerini gerçekleştirilerek

sorunsuz bir şekilde birleşme bölgesinde takip mesafesinin korunmuş biçimde bağlandıkları görülmüştür.



Şekil 5.51 : Birleşme algoritması zamana göre konum durumu

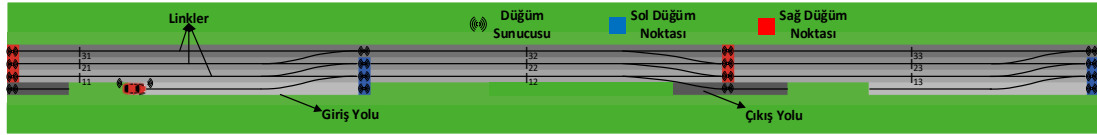
5.5 Şerit Değişim Algoritmaları

Sürüş zamanı, sürüş konforu ve bu durumların olumlu ya da olumsuz sonucu olan sürücü psikolojisi, trafik akışının düzenli olması ile doğrudan bağlantılı kavramlardır. Araçların trafikte dur/kalk yapmadan hareket etmesi durumu olarak ifade edebilen trafik akışı, ideal bir ulaşım sisteminin en önemli parametrelerinden birisidir. Bu çalışmada da bu parametrenin verimliliğinin yüksek olması en önemli problemlerden birisidir. Bu problemi ortadan kaldırmak ve ideal trafik akışı amacına ulaşmak için şerit değişim algoritmaları önerilmiş ve uygulanmıştır. Bu algoritmalarda temel hedef, çok şeritli MCS yollarının yoğunluk dengesini sağlamak ve yön belirleme bölgesi olan düğüm noktalarında, az yoğunluklu linki tercih ederek yol düzenini sağlamaktır.

Protokoller kısmında ayrıntılı olarak ifade edildiği gibi araçlar, giriş yolunu kullanarak sisteme giriş yapmakta ve çıkış yolunu kullanarak sistemden ayrılmaktadırlar. Bir araç sisteme giriş yaptığı anda, düğüm etmeni ve diğer araç etmenleri ile haberleşmeye başlamakta ve anlık olarak haberleşme protokollerine göre

bilgi alışverişi gerçekleştirmektedir. Genel güzergâh ve şerit yönetimi bu sayede güvenli bir şekilde organize edilmektedir.

Protokoller kısmında belirtildiği gibi link, çok şeritli MCS ana yolunun her bir şeridinin sabit aralıklara bölünmesi ile oluşan şerit parçalarına verilen isimdir. Uzman bilgisi ile belirlenen link mesafesi, tüm linkler için eşit uzunlukta olmalıdır. Her bir link, birbirine düğüm noktası ile bağlanmakta ve bu düğüm noktalarına konumlandırılan, araç ve sistem ile haberleşmeyi sağlayan düğüm etmenleri bulunmaktadır. Düğüm noktaları linklerin sonuna yerleştirilmiş ve ardışık sağ/sol düğüm noktaları olarak iki sınıfa ayrılmıştır. Bu sayede şerit yapısı basitleştirilerek daha rahat bir kontrol ortamı hazırlanmıştır. Bu kavramların ifade edildiği MCS yol kesiti Şekil 5.52’de verilmiştir.



Şekil 5.52 : Örnek üç şeritli MCS yol parçası

Bu şekilde; araç, sağ/sol düğüm noktaları, linkler ve yollar görülmektedir. Her bir link l_{ij} olarak ifade edilmiştir. Burada i şerit numarasını, j ise şeritteki link sırasını ifade etmektedir. Bir araç link bitimi olan düğüm noktasına geldiğinde, bir sonraki link için yön kararını vermelidir. Bu kararın verilmesi için araç ile komşu düğüm etmenleri arasında iletişim başlamakta ve araç etmeni tarafından toplanan bilgiler şerit değişim algoritmaları ile işlenerek sonraki link için yön kararı verilmektedir.

Araçlar, yön kararı verirken en fazla iki seçenek arasında tercih yapmaktadırlar. Sağ düğüm noktasında olan bir araç, düz veya sol yönde; sol düğüm noktasında olan bir araç ise sağ veya düz yönde gitme kararı alabilmektedir. Bu durum;

$$yön = \begin{cases} düz || sol , & sağ\ düğüm\ noktası \\ düz || sağ , & sol\ düğüm\ noktası \end{cases}$$

şeklinde ifade edilebilir.

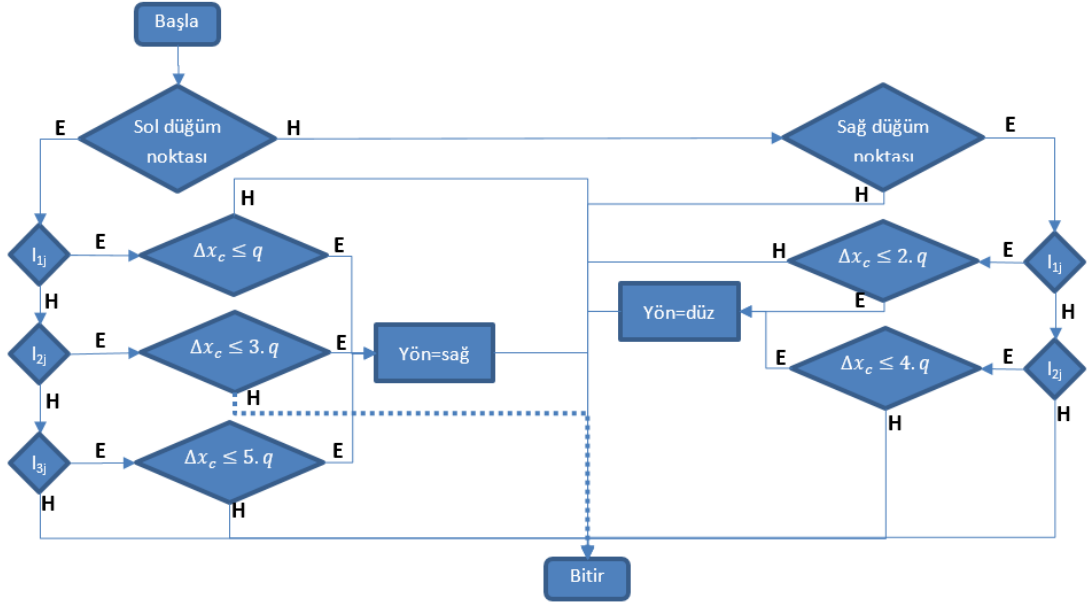
Şerit değişimi için önerilen algoritmalar ve tespit edilen kabullere göre elde edilen benzetim sonuçları sırasıyla verilecektir. Yapılan karşılaştırmalarda ve testlerde bazı ön kabullerin yapılması gerekmektedir. Bu kabuller Tablo 5.7’de verilmiştir.

Tablo 5.7 : Simülasyon sabitleri

Link uzunluğu (q)	= 140 m	δ	= 2 m
Giriş yol uzunluğu	= 120 m	σ	= 1000
Çıkış yol uzunluğu	= 55 m	μ	= 3000
Maksimum araç hızı	= 20 m/sn	α_{dec}	= 10 m/sn ²
Kritik bölge uzunluğu	= 60 m	α_{acc}	= 2,5 m/sn ²
Ana yol birinci şerit giren araç	= 100 adet/periyo	τ	= 0,01 sn
Ana yol ikinci şerit giren araç	= 120 adet/periyo	x_{size}	= 2 m
Ana yol üçüncü şerit giren araç	= 140 adet/periyo	q_1	= 840 m
Tali yol giren araç	= 20 adet/periyo	q_2	= 1540 m
k	= 1		

MCS yol ve algoritma sabitlerinin haricinde tüm şerit değişim algoritmalarında geçerli olan kabuller de mevcuttur. Şerit değişim algoritmalarının yön kararından sonra değerlendirilen bu kabuller sisteme giren araçların sistemden ayrılırken problem yaşamasını engellemek amacıyla belirlenmiştir.

Hazırlanan MCS yol düzeninde sağ/sol düğüm noktaları bulunmaktadır. Bir araç sağ düğüm noktasında, sağa dönüş yerine düz gitme kararı aldığı anda; sağ şeride dönebilmesi için en az iki düğüm noktası geçmesi gerekmektedir. Dolayısıyla şerit değişim algoritmaları çalıştırılırken elde edilen sonuçlar tekrardan MCS yol düzeni göz önüne alınarak değerlendirilmekte ve araçların çıkış yolunu geçmeden birinci şeride ulaşması sağlanmalıdır. Bu kabuller akış diyagramı şeklinde Şekil 5.53’te görülmektedir. Algoritmada l_{ij} linkleri ve Δx_c aracın çıkış noktasına olan mesafeyi göstermektedir. Diğer simgeler ve değerleri Tablo 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.53 : Ön kabullere göre zorunlu durumlar

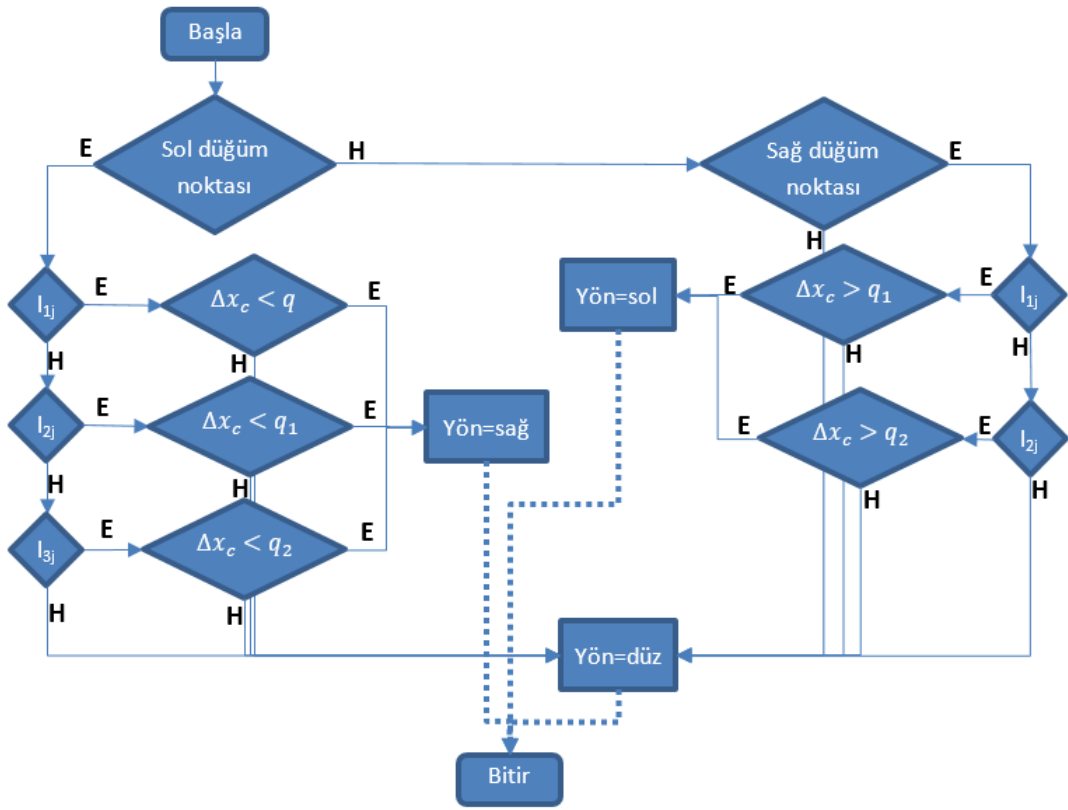
Şekilden de anlaşılacağı üzere şerit değişim algoritmalarının sonunda işlenen bu zorunlu durumlar genel yol organizasyonu sağlamak için önem arz etmektedir. Bu kabullere göre üçüncü şeritte hareket eden bir araç en az 5 link öncesinde sağ şeride geçiş yapmalıdır. Yine benzer şekilde ikinci şeritte hareket eden bir araç en az 3 link önce sağ şeride geçiş yapmalıdır. İzleyen alt kısımlarda sırasıyla link organizasyonunu sağlamak amacıyla oluşturulan algoritmalar ve Tablo 5.7’de belirlenen sabitlere göre elde edilen sonuçlar verilecektir. Algoritmalar çalıştırılırken rastgele ve sabit bir veri seti oluşturularak tüm algoritmalar için giriş yollarından MCS’ye dâhil olan araçların aynı zaman, aynı konum ve aynı giriş-çıkış yollarında bulunmaları sağlanmıştır.

5.5.1 Mesafeye Göre Şerit Değişimi

Mesafeye göre şerit değişimi algoritması (MŞA), şerit değişiminde mesafenin referans alınması ile oluşturulmuştur. Her bir aracın sisteme giriş yaparken çıkış yolunu MCS düğüm etmeni vasıtasıyla sistem etmenine bildirmesi gerekmektedir. Bu sayede araçlara ait çıkış mesafesi hesaplanmaktadır. Δx_c olarak ifade edilen çıkış mesafe bilgisi, şerit organizasyonunun gerçekleştirilmesinde referans olarak kullanılmaktadır.

Bu algorithmada önemli adımlardan birisi şerit değişimlerinin hangi mesafede yapılması gerektiğinin tespitidir. Belirlenen mesafe sabitlerinin uygunluğu, ideal trafik

akışının sağlanmasında en önemli aşamalardan birisidir. Uzman bilgisi kullanılarak tespit edilen referans mesafeler, sistem etmenine kaydedilir ve etmenler bu mesafeleri kullanarak genel trafik akışını protokollerde belirlenen sorumluluklar çerçevesinde gerçekleştirirler. Tespit edilen mesafe parametrelerinin ana yol şerit sayısından bir eksik olması gerekmektedir. Çalışmada üç şeritli bir anayol düzeni kullanıldığından iki farklı mesafe sabiti belirlenmelidir. Bu parametreler q_1 , q_2 olarak kabul edilmiştir. Bu kabuller ile oluşturulan MŞA'ya ait akış diyagramı, Şekil 5.54'te gösterilmiştir. Algoritmada l_{ij} linkleri ve Δx_c aracın çıkış noktasına olan uzaklığını ifade etmektedir.



Şekil 5.54 : MŞA akış diyagramı

MŞA, NetLogo ile hazırlanan benzetim ortamında test edilmiştir. Bu test Tablo 5.7'de belirtilen sabitler kullanılarak hazırlanmış ve Tablo 5.8'de görülen sonuçlar elde edilmiştir. Bu tabloda üç şeritli bir yol için beş giriş ve beş çıkıştan oluşan bir MCS ortamı hazırlanmıştır. Tablo 5.8.a ile giriş ve çıkış istasyonlarına göre araç sayısı gösterilmektedir. Tablo 5.8.b'de ise bu araçların kullandıkları güzergâhta ortalama hızları verilmiştir. Bu durum, sonraki algoritmaların sonuçlarının gösterildiği tablolarda da aynı şekilde uygulanmıştır.

Tablo 5.8 : MŞA a) sisteme giren araç sayısı, b) ortalama hız bilgisi

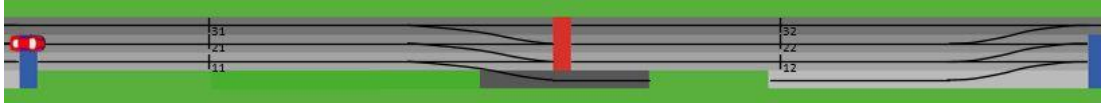
(a)						(b)					
	Çıkış 1	Çıkış 2	Çıkış 3	Çıkış 4	Çıkış 5		Çıkış 1	Çıkış 2	Çıkış 3	Çıkış 4	Çıkış 5
Giriş 1	11	23	46	51	31	Giriş 1	13,3	15,3	16,4	17,1	17,6
Giriş 2	0	15	29	41	46	Giriş 2	0	12,8	15,2	16,2	17,3
Giriş 3	0	0	9	27	54	Giriş 3	0	0	12,4	15,2	16,4
Giriş 4	0	0	0	18	32	Giriş 4	0	0	0	12,5	15,6
Giriş 5	0	0	0	0	17	Giriş 5	0	0	0	0	12,4

Tablo 5.8’de görüldüğü üzere tüm yol sisteminde uygun parametreler seçildiği sürece ideal sonuçlar elde edilmektedir. Araçların kısa mesafede hız ortalamalarının düşük olması giriş yolunda başlangıç hızının sıfır kabul edilmesi ve giriş yolu boyunca araç hızının maksimum hıza ulaşmaya kadar α_{acc} ivmesi ile artmasıdır. Bu durum çıkış yolunda da geçerlidir. Araçlar sistemden ayrılırken hızlarını α_{dec} ivmesi ile azaltmakta ve son noktada hızları sıfıra düşmektedir. Fakat uzun mesafelerde maksimum hızla hareket edebilen araçlar, hız ortalamasının daha yüksek bir değerde elde edilmesine sebep olmaktadır.

5.5.2 Ortalama Hıza Göre Şerit Değişimi

Ortalama hıza göre şerit değişimi algoritmasında (OHŞA), düğüm etmeni tarafından anlık olarak kontrol edilebilen ve linkten son ayrılan araç bilgisi kullanılmaktadır. Bir araç bu algoritma ile yön belirlemesi yaparken, o anda linkten ayrılan son arabanın ortalama hız bilgisini referans almaktadır.

Araçlar OHŞA ile yön tayini yaparken, buldukları düğümün özelliğine göre dört farklı link bilgisini kullanarak karar vermektedirler. Şekil 5.55’te görüldüğü gibi sol düğüm noktasında *sağ* ya da *düz* gitme kararı verecek olan bir araç; l_{22} ile l_{12} linklerinden son ayrılan araçların ortalama hız bilgilerini ve komşu linklerin araç sayılarını kullanarak karar vermektedir.



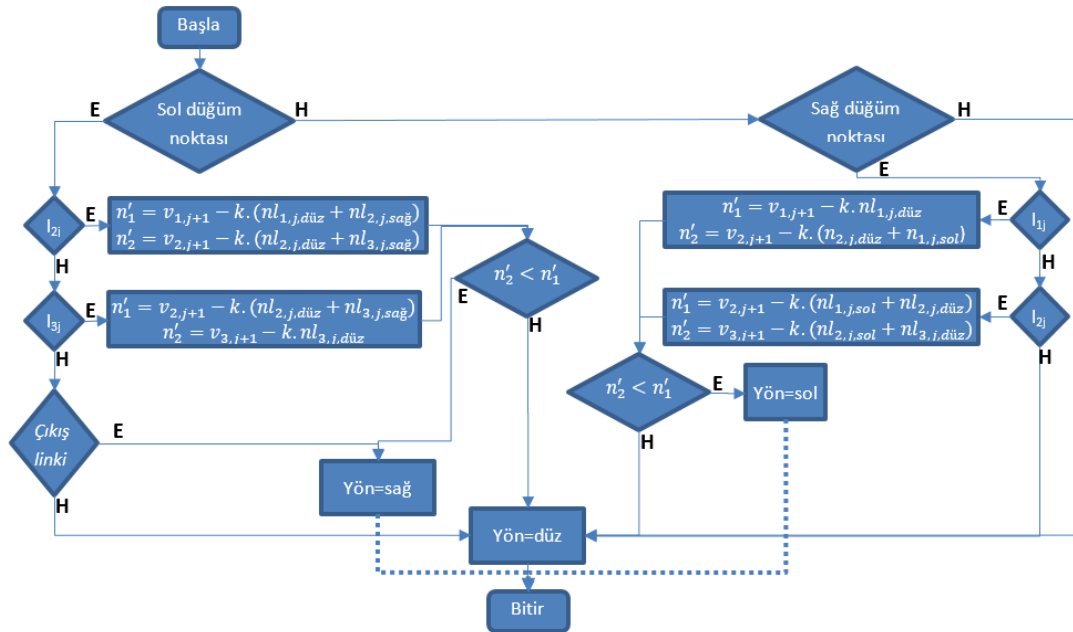
Şekil 5.55 : Link durumuna göre şeritler

Bu araç için karar verme eşitliği (5.13)'te gösterilmiştir.

$$v_{11} - k.(nl_{11,düz} + nl_{21,sağ}) \geq v_{21} - k.(nl_{21,düz} + nl_{31,sağ}) \rightarrow sağ \quad (5.13)$$

burada v_{11} , l_{11} 'den ve v_{21} ise l_{21} 'den son ayrılan aracın ortalama hızı, $nl_{11,düz}$ l_{11} linkinde düz giden araçların sayısı, $nl_{21,sağ}$ l_{21} 'de sağa giden araçların sayısı, $nl_{21,düz}$ l_{21} 'de düz giden araçların sayısı, $nl_{31,sağ}$ l_{31} 'de sağa giden araçları ve son olarak k OHLA sabitidir.

OHŞA algoritması genel hatlarıyla akış diyagramı şeklinde Şekil 5.56'da gösterilmiştir. Algoritmada l_{ij} linkleri, $nl_{i,j,yön}$ l_{ij} linkinde $yön(düz/sağ/sol)$ 'e doğru giden araç sayılarını, $v_{i,j+1}$, $l_{i,j+1}$ linkinin son çıkan araç ortalama hızını, $n'_{1,2}$, geçici değişkeni ve son olarak k , algoritma sabitini ifade etmektedir.



Şekil 5.56 : OHŞA akış diyagramı

Tablo 5.7'de verilen kabullerle OHŞA test edilmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 5.9'da verilmiştir.

Tablo 5.9 : OHŞA a) sisteme giren araç sayısı, b) ortalama hız bilgisi

(a)

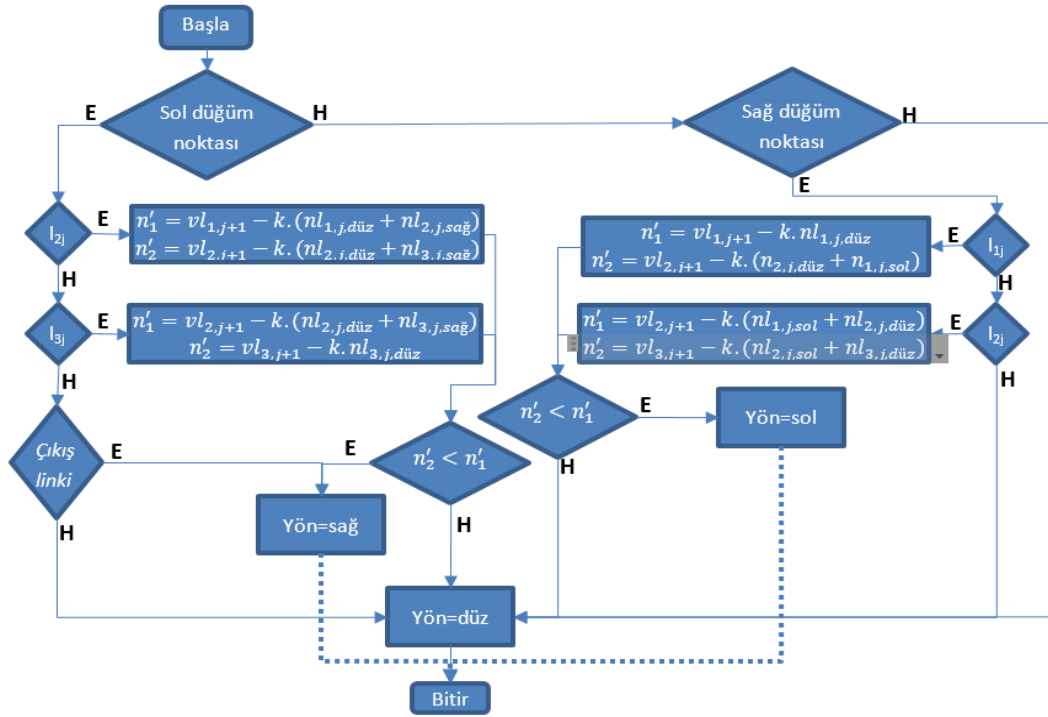
	Çıkış 1	Çıkış 2	Çıkış 3	Çıkış 4	Çıkış 5
Giriş 1	11	23	46	51	31
Giriş 2	0	15	29	41	46
Giriş 3	0	0	9	27	54
Giriş 4	0	0	0	18	32
Giriş 5	0	0	0	0	17

(b)

	Çıkış 1	Çıkış 2	Çıkış 3	Çıkış 4	Çıkış 5
Giriş 1	13,3 2	15,3 6	16,4 5	17,0 9	17,7 2
Giriş 2	0	12,8 3	15,2 8	16,2 2	17,2 8
Giriş 3	0	0	12,4 5	15,2 3	16,4 2
Giriş 4	0	0	0	12,4 8	15,5 9
Giriş 5	0	0	0	0	12,4 5

5.5.3 Anlık Ortalama Hıza Göre Şerit Değişimi

Araçlara ait hız bilgisini anlık olarak alabilen düğüm etmeni, linklere ait anlık ortalama hızları da kolaylıkla tespit edebilmektedir. Anlık ortalama hıza göre şerit değişimi algoritması (AHŞA) ile tespit edilen ortalama link hızları referans alınarak, araçların daha yüksek ortalamaya sahip linklere yönlendirilmesi ile trafik akışının artırılması sağlanmaktadır. AHŞA Şekil 5.57’de akış diyagramı şeklinde verilmiş ve Tablo 5.7’de gösterilen kabullerle çalıştırılan algorithmadan elde edilen sonuçlar Tablo 5.10’da gösterilmiştir. Algorithmanda l_{ij} linkleri, $nl_{i,j,yön}$ l_{ij} linkinde $yön(düz/sağ/sol)$ ’e doğru giden araç sayılarını, $vl_{i,j+1}$ l_{ij+1} linkinin anlık ortalama araç hızını, $n'_{1,2}$ geçici değişkeni ve son olarak k , algoritma sabitini ifade etmektedir.



Şekil 5.57 : AHŞA akış diyagramı

Tablo 5.10 : AHŞA a) sisteme giren araç sayısı, b) ortalama hız bilgisi

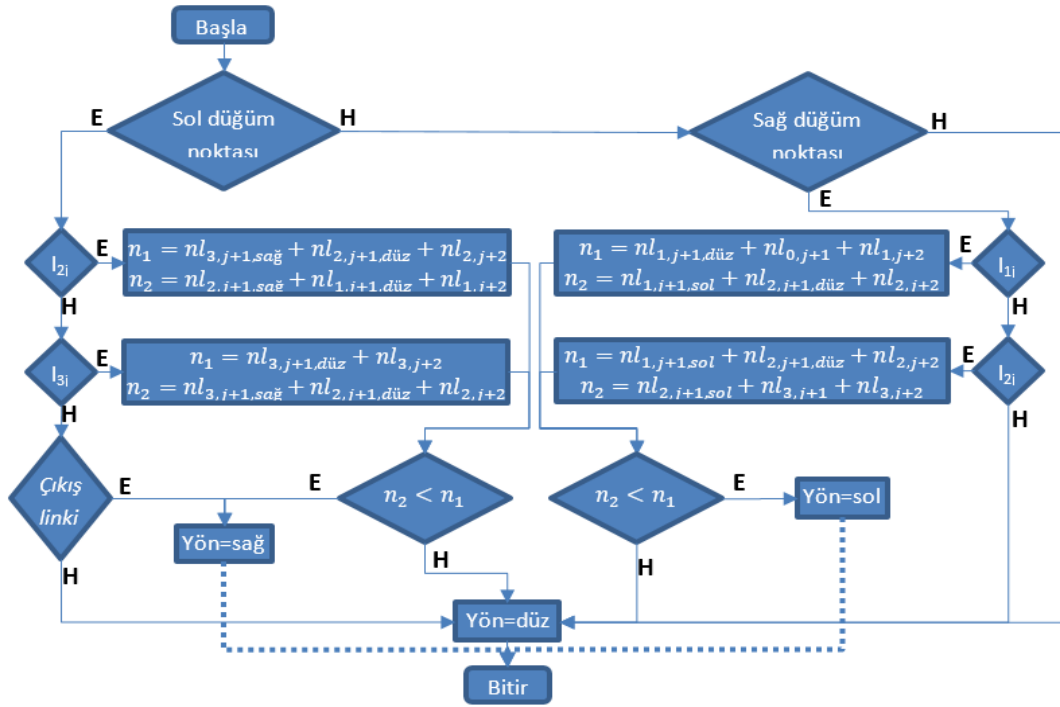
(a)						(b)					
	Çıkış 1	Çıkış 2	Çıkış 3	Çıkış 4	Çıkış 5		Çıkış 1	Çıkış 2	Çıkış 3	Çıkış 4	Çıkış 5
Giriş 1	11	23	46	51	31	Giriş 1	13,3	15,3	16,4	17,0	17,7
Giriş 2	0	15	29	41	46	Giriş 2	2	6	6	8	1
Giriş 3	0	0	9	27	54	Giriş 3	0	0	12,4	15,2	16,4
Giriş 4	0	0	0	18	32	Giriş 4	0	0	0	12,4	15,6
Giriş 5	0	0	0	0	17	Giriş 5	0	0	0	0	12,3
											7

5.5.4 Araç Sayısına Göre Şerit Değişimi

Araç sayısına göre şerit değişimi algoritmasında (AŞA) amaç; her bir linkte bulunan araç sayısını tespit etmek ve daha az sayıda araç bulunan linkin tercih edilmesi ile yol organizasyonunu sağlamaktır. Bir araç AŞA ile yön kararı verirken sağ ya da sol düğüm noktasında olma durumu ve bulunduğu şerit önem arz etmektedir. Diğer algoritmalarından farklı olarak bir linkte düz/sağ/sol yönlerine gitme kararı veren

araçlarda hesaplama dâhil edilmektedir. Böylece şerit organizasyonu sadece araç sayısının bilinmesi ile sağlanabilmektedir.

AŞA'nın ayrıntısı, Şekil 5.58'de gösterilen akış diyagramı ile gösterilmiştir. Tablo 5.7'de gösterilen kabullerin AŞA'da çalıştırılması ile elde edilen sonuçlar Tablo 5.11'de verilmiştir. Algoritmada l_{ij} linkleri, $nl_{i,j,yön}$ l_{ij} linkinde $yön(düz/sağ/sol)$ 'e doğru giden araç sayılarını ve son olarak $n_{1,2}$ geçici değişkeni gösterir.



Şekil 5.58 : AŞA akış diyagramı

Tablo 5.11 : AŞA (a) sisteme giren araç sayısı, (b) ortalama hız bilgisi

(a)						(b)					
	Çıkış 1	Çıkış 2	Çıkış 3	Çıkış 4	Çıkış 5		Çıkış 1	Çıkış 2	Çıkış 3	Çıkış 4	Çıkış 5
Giriş 1	11	23	46	51	31	Giriş 1	13,3	15,3	16,4	17,0	17,7
Giriş 2	0	15	29	41	46	Giriş 2	0	12,8	15,2	16,2	17,2
Giriş 3	0	0	9	27	54	Giriş 3	0	0	12,4	15,1	16,4
Giriş 4	0	0	0	18	32	Giriş 4	0	0	0	12,4	15,5
Giriş 5	0	0	0	0	17	Giriş 5	0	0	0	0	12,3

Sonuç olarak bir aracın yola girişi, yolda nasıl hareket edeceği, şerit değişiminin nasıl yapılacağı ve çarpışma olmadan genel yol organizasyonunun nasıl

düzenleneceği bölüm kapsamında ifade edilmiştir. Dördüncü Bölüm’de belirlenen protokoller ve prosedürler, Beşinci Bölüm’de tanıtılan algoritmalar ile test edilmiş ve elde edilen sonuçlar MCS’nin uygulanabilir bir sistem olduğunu göstermektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması, MetroCar Sistemi olarak isimlendirilen yeni çift modlu bir ulaşım sistemini kapsamaktadır. Mevcut çift modlu ulaşım sistemlerden farklı olarak bu çalışma ile çok şeritli ve şeritler arası geçişin mümkün olduğu bir ulaşım sistemi geliştirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında yeni yollar ve bu yollara uygun yeni araçlar tasarlanmıştır. Ayrıca MCS'ye ait kuralları ifade eden protokoller ve prosedürler belirlenerek uygulanabilirliği yüksek bir ulaşım sistemi geliştirilmiştir. Çalışmada çok etmenli sistem mantığına uygun bir biçimde üç farklı etmen türü tasarlanmış ve bu etmenlerin birbirleri ile olan ilişkileri, her bir etmenin sorumluluğu ve sınırlamaları belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında çeşitli algoritmalar geliştirilmiş ve genel yol organizasyonu sağlanmıştır. Etmenlerin çalışmaları için belirlenen prosedürler, arka planda çalıştırılan bu algoritmalar yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Son olarak NetLogo etmen yazılımı kullanılarak hazırlanan mikroskobik bir benzetim ortamı ile sistemin bilgisayar ortamında benzetimi yapılmıştır. Yapılan testler sayesinde hem MCS'nin hem de geliştirilen protokol, prosedür ve algoritmaların doğruluğu ve verimliliği test edilmiştir.

Bu çalışma ile mevcut çift modlu ulaşım sistemlerinden farklı bir çözüm üretilmiştir. Üretilen sistemin avantajları ve literatüre katkısı özet olarak şunlardır;

- Genel olarak çift modlu ulaşım sistemlerinde yollar tek şeritli hizmet sunarken, MCS ile en az üç şeritli yollarda ulaşım talebi karşılanmaktadır.
- MCS tüm sistemlerden farklı olarak şeritler arası geçiş imkânı sağlamaktadır. Bu sayede az yoğunluklu şeritler aktif kullanılabilir. Bu sayede az yoğunluklu şeritler aktif kullanılabilir.
- Mevcut sistemlerde, sistem girişi için bekleme süresi problem oluştururken, MCS'nin çok şeritli yapısı sayesinde bu problem en aza indirgenmiştir.
- Bu çalışma Türkiye'de çift modlu ulaşım sistemleri alanında geliştirilen ilk çalışma özelliği taşımaktadır.

MCS yukarıda belirtilen katkılar dışında, bazı sınırlamalar barındırmaktadır. Tespit edilen sınırlamalar şunlardır;

- Sistemin altyapısı için düz yolların gerekmesi ve sadece belirli şerit değişim noktalarında kavis verilebilmesi sistem için bir sınırlama meydana getirmektedir. Bu durum uygulama esnasında güzergâh belirleme işlemini zorlaştırmaktadır.
- Sistem ile tespit edilen ulaşım hızı, şehir içi ulaşım için yüksek olsa da diğer çift modlu ulaşım sistemlerine göre düşüktür.
- Altyapı maliyeti diğer çift modlu sistemlerde olduğu gibi geleneksel ulaşım sistemlerine göre yüksektir.
- Sistem için yapılan testlerde haberleşme ve veri işleme gecikmeleri hesaba katılmamış hız ve konum bilgisinin anlık tespit edilebildiği varsayılmıştır.

Bu tez çalışması, gelecekte yapılacak katkılarla geliştirilebilir bir çalışmadır. Eklenebilecek katkıların bazıları şunlardır:

- Algoritmaların performans açısından geliştirilmesi,
- Doğrusal hareket dışında, dairesel hareketin araştırılarak hesaplamalara dâhil edilmesi,
- İletişim gecikmesi ve karar verme gecikmelerinin hesaba katılması,
- Kablolu veya kablosuz iletişim altyapısının oluşturulması,
- Araç, yol ve gerekli diğer MCS gereçlerinin tasarlanması ve üretilmesi ve gerçek hayatta test edilmesi,

MCS için oluşturulan bir araştırma ekibi, bu eksiklerin tamamlanması ve sistemin gerçek hayata geçirilmesi için çalışmalarına devam etmektedir. Bu tez çalışması ise ekibin yapacağı çalışmalara esas teşkil edecektir. MCS'nin gerçek hayatta uygulanması ile şehir içi ulaşımı dışında, toplu yaşam alanlarında da kullanılabileceği öngörülmektedir. Örneğin; üniversite kampüsleri, hastaneler, alış-veriş merkezleri, havalimanları vb. alanlar için yenilikçi bir çözüm olması beklenmektedir.

7. KAYNAKLAR

- Abinayaa, V. ve Jayan, A., “Case study on comparison of wireless technologies in industrial applications”, *Int. J. Sci. Res. Publ.*, 4 (2), 2250–3153, (2014).
- AirTrain, “AirTrain - JFK - John F. Kennedy International Airport [online]”, (22 Mart 2019), <https://www.jfkairport.com/to-from-airport/air-train>, (2019).
- Al-dmour, N. A. A., “TarffSim : Multiagent traffic simulation”, *Eur. J. Sci. Res.*, 53 (4), 570–575, (2011).
- Anwer, M. S. ve Guy, C., “A survey of VANET technologies”, *J. Emerg. Trends Comput. Inf. Sci.*, 5 (9), 671, (2014).
- Apple, “Apple working on self-driving car ‘peloton’ system to share power, increase efficiency [online]”, (21 Mart 2019), <https://appleinsider.com/articles/18/10/23/apple-working-on-self-driving-car-peloton-system-to-share-power-increase-efficiency>, (2019).
- Aramrattana, M., Detournay, J., Englund, C., Frimodig, V., Jansson, O. U., Larsson, T., ... Shahanoor, G., “Team halmstad approach to cooperative driving in the grand cooperative driving challenge 2016”, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 19 (4), 1248–1261, (2018).
- Atra, “A history of advanced transit - ATRA [online]”, (20 Mart 2019), <http://www.advancedtransit.org/advanced-transit/history/>, (2019).
- Baumann, D., “Advanced urban transportation systems”, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, (1970).
- Bombardier, “Automated monorail system [online]”, (21 Mart 2019), www.bombardier.com, (2010).
- Boring, “The Boring Company[online]”, (21 Mart 2019), www.boringcompany.com, (2019).
- Boxill, S. A. ve Yu, L., “An evaluation of traffic simulation models for supporting ITS development”, *Cent. Transp. Train. Res.*, Texas, (2000).
- Broggi, A., Bombini, L., Cattani, S., Cerri, P. ve Fedriga, R. I., “Sensing requirements for a 13,000 km intercontinental autonomous drive”, *2010 IEEE Intell. Veh. Symp.*, San Diego, CA, USA, 500–505, (2010).

- CAAT, “Automated and Connected Vehicles [online]”, (25 Şubat 2019), *Cent. Adv. Automot. Technol.*, http://autocaat.org/Technologies/Automated_and_Connected_Vehicles/, (2019).
- Çalış, E. A., “Monoray ulaşım sisteminin özellikleri ve diğer kentiçi ulaşım araçları ile karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, (2016).
- Carlino, D., Depinet, M., Khandelwal, P. ve Stone, P., “Approximately orchestrated routing and transportation analyzer: large-scale traffic simulation for autonomous vehicles”, *15th Int. IEEE Conf. Intell. Transp. Syst.*, Anchorage, AK, USA, 334–339, (2012).
- Cole, L. M. ve Merritt, H. W., “Tomorrow’s transportation: New systems for the urban future”, *The USA Department of Housing and Urban Development*, (1968).
- CyberCab, “CyberCab [online]”, (20 Mart 2019), <https://staff.washington.edu/jbs/itrans/cybercab1.htm>, (2019).
- Daimler, “Benz Patent Motor Car: The first automobile (1885–1886) [online]”, (29 Mart 2019), <https://www.daimler.com/company/tradition/company-history/1885-1886.html>, (2019).
- Davis, J. W. D., “Public highway system”, *United States Patent*, No: 7788000, (2010).
- Diefenbach, B., “Tesla driver dies in first fatal autonomous car crash in US [online]”, (21 Mart 2019), *New Sci.*, <https://www.newscientist.com/article/2095740-tesla-driver-dies-in-first-fatal-autonomous-car-crash-in-us/>, (2016).
- Dormehl, L. ve Edeldtein, S., “10 major milestones in the history of self-driving cars [online]”, (29 Mart 2019), *Digit. Trends*, <https://www.digitaltrends.com/cars/history-of-self-driving-cars-milestones/>, (2019).
- Durfee, E. H. ve Lesser, V. R., “Negotiating task decomposition and allocation using partial global planning”, M. N. Huhn ve L. G. Gasser (Ed.), *Distrib. Artif. Intell.* (Vol. 2), Pitman Publishing Ltd., (1989).
- Eco-Trans, “SunCheon PRT: SkyCube project overview”, 2015 *Podcar City 9th*, (2015).

- Erdur, R. C., “Yazılım etmeni teknolojisinin internet tabanlı yazılım yeniden kullanımına uygulanması”, Doktora Tezi, *Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, İzmir, (2001).
- Fichter, D., *Individualized automated transit and the city*, B. H. Sikes, 1430 East 60th Place, Chicago, Illinois 60637, (1964).
- Gerlough, D., “Simulation of freeway traffic on a general-purpose discrete variable computer”, PhD Thesis, *University of California*, Los Angeles, (1955).
- Glou, R., “Volkswagen enlists Nvidia’s powerful Xavier chip for autonomous cars [online]”, (21 Mart 2019), *Digitaltrends*, <https://www.digitaltrends.com/cars/nvidia-xavier-processor-news-uses-capacities-partnerships/>, (2018).
- Hamilton, W. F. ve Nance, D. K., “Systems analysis of urban transportation systems”, *Sci. Am.*, (221), 19–27, (1969).
- Han, Z., Zhang, K., Yin, H. ve Zhu, Y., “An urban traffic simulation system based on multi-agent modeling”, *27th Chinese Control Decis. Conf. (2015 CCDC)*, Qingdao, China, 6378–6383, (2015).
- Hayes-Roth, B., “An architecture for adaptive intelligent systems”, *Artif. Intell.*, 72 (1–2), 329–365, (1995).
- Hesselgren, L., Andreasson, I., Mueller, U., Prieto Rábade, M. ve Janhäll, S., “NuMo – New Urban Mobility : New urban infrastructure support for autonomous vehicles [online]”, (20 Mart 2019), <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%253A1286741&dswid=8993>, (2019).
- Jensen, P. R., “RUF international investment case”, *RUF International*, (2015).
- Joiner, I. A., *Emerging library technologies: It’s not just for geeks* (G. Jones, Ed.), Chandos Publishing, (2018).
- Kosonen, L., *HUTSIM - Urban traffic simulation and control model: Principles and applications*, Helsinki Univ. Technol. Transp. Eng. Publ., 100, (1999).
- Krevet, R. ve Woronowicz, K., “Autoshuttle electric express highway”, *22 MAGLEV Conf.*, Rio de Janeiro, (2014).
- Kröger, F., “Automated driving in its social, historical and cultural contexts”, *Auton. Driv.*, Berlin: Springer, (2017).

- Landtransportguru, “Bukit Panjang LRT line [online]”, (22 Mart 2019), *L. Transp. Guru*, <https://landtransportguru.net/train/bplrt/>, (2019).
- Latour, B., *Aramis, or the love of technology*, Harvard University Press, (2019).
- Lende, R. A. ve Bhangale, H. K., “Inter vehicle wireless communication system”, *Int. J. Eng. Sci. Res. Technol.*, 4 (2), 621–625, (2015).
- Lincoln Laboratory., “DARPA neural network study final report”, *Massachusetts institute of technology*, (1987).
- Lipowski, A. ve Lipowska, D., “Roulette-wheel selection via stochastic acceptance” *Phys. A Stat. Mech. its Appl.*, 391 (6), 2193–2196, (2012).
- Maes, P., “Artificial life meets entertainment: Lifelike autonomous agents”, *Commun. ACM*, 38 (11), 108–114, (1995).
- Metrino, “Metrino – PRT – Personal rapid transit [online]”, (28 Mart 2019) <https://metrino-prt.com/>, (2019).
- Metro, “Driverless metro lines break new worldwide record [online]”, (28 Mart 2019), <https://www.railway-technology.com/features/around-world-driverless-metro-lines/>, (2019).
- Milotec, “Milotek [online]”, (28 Mart 2019), <http://www.milotek.co.za/#home>, (2019).
- Minsky, M. ve Riecken, D., “A conversation with Marvin Minsky about agents”, *Commun. ACM*, 37 (7), 22–29, (1994).
- Moral Machine, “Moral Machine [online]”, (27 Mart 2019), <http://moralmachine.mit.edu/>, (2019).
- Mowll, J. U., “Dual-mode transportation system”, *United States Patent*, No: 4791871, (1988).
- Mueller, K. ve Sgouridis, S. P., “Simulation-based analysis of personal rapid transit systems: service and energy performance assessment of the Masdar City PRT case”, *J. Adv. Transp.*, 45 (4), 252–270, (2011).
- Muller, P. J. ve Andreasson, I. J., “A light rail, group rapid transit, personal rapid transit comparison”, *ASCE Autom. People Movers Conf.*, (2018).

- Naghawi, H. H. ve Idewu, W., “Analysing delay and queue length using microscopic simulation for the unconventional intersection design Superstreet”, *J. South African Inst. Civ. Eng.*, 56 (1), 100–107, (2014).
- Naughton, K., “Ford to sell driverless cars to public by 2025 [online]”, (04 Mart 2019), *Bloomberg*, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-09-12/ford-to-sell-driverless-cars-to-consumers-around-2025-ceo-says>, (2016).
- Nwana, H. S., “Software agents: An overview”, *Knowl. Eng. Rev.*, 11 (3), 205, (1996).
- Oliveira, E. ve Duarte, N., “Making way for emergency vehicles”, *2005 Eur. Simul. Model. Conf.*, Porto, Portugal, (2005).
- Özgüner, Ü., Acarman, T. ve Redmill, K., *Autonomous ground vehicles*, Norwood, MA: Artech House, (2011).
- Pomerleau, D. A., *Neural network perception for mobile robot guidance*, Springer Science & Business Media, Pittsburg, PA, (1992).
- Rilett, L. R. ve Zietsman, J., “An overview of the Transims micro-simulation model: Application possibilities for South Africa”, *South. African Transp. Conf.*, Pretoria, (2011).
- Roane, J. M., “TriTrack system of mass transit”, *United States Patent*, No: 6923124 , (2005).
- Russell, S. ve Norvig, P., *Artificial intelligence: A modern approach*, Malaysia: Pearson Education Limited, (2016).
- Samuel, P., “Raytheon PRT prospects dim but not doomed”, *ITS Int. Retrieved Novemb.*, 13 (2005), (1999).
- Sawyer, E. M., “Personal rapid transit system”, *United States Patent*, No: 4061089, (1977).
- Shiftan, Y., Vary, D. ve Geyer, D., “Demand for park shuttle services -a stated-preference approach”, *J. Transp. Geogr.*, 14 (1), 52–59, (2006).
- Skyweb, “Skyweb Express personal rapid transit system [online]”, (28 Mart 2019), *Electr. Veh. Res.*, <https://www.electricvehiclesresearch.com/articles/7782/skyweb-express-personal-rapid-transit-system>, (2015).

- Sparrow, R. ve Howard, M., “When human beings are like drunk robots: Driverless vehicles, ethics, and the future of transport”, *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, 80, 206–215, (2017).
- Stenquist, P., “Daimler plans a field test of car-to-infrastructure communications [online]”, (10 Mart 2019), <https://wheels.blogs.nytimes.com/>, (2012).
- Sumo, “Sumo at a glance [online]”, (23 Mart 2019), *Sumo*, https://sumo.dlr.de/daily/userdoc/Sumo_at_a_Glance.html#History, (2019).
- Szillat, M. T., “A low-level PRT microsimulation”, PhD Thesis, *University of Bristol.*, (2001).
- Tegnér, G., Hunhammar, M., Andréasson, I., Nowacki, J.-E. ve Dahlström, K., “PRT in Sweden: From feasibility studies to public awareness”, *11th Int. Conf. Autom. People Movers*, Vienna, (2007).
- Ultra, “The Ultra vehicle [online]”, (20 Mart 2019), <http://www.ultraglobalprt.com>, (2019).
- Vissim, “PTV Vissim [online]”, (20 Mart 2019), <http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-vissim/>, (2019).
- Waymo, “Waymo [online]”, (20 Mart 2019), <https://waymo.com/>, (2019).
- Weber, M., “Where to? A history of autonomous vehicles [online]”, (27 Mart 2019), *Comput. Hist. Museum*, <https://www.computerhistory.org/atchm/where-to-a-history-of-autonomous-vehicles/>, (2014).
- Wooldridge, M. ve Jennings, N. R., “Agent theories, architectures and languages: A survey”, *Int. Work. Agent Theor. Archit. Lang.*, Netherlands, 1–32, (1994).
- Yen, A. M., “Dual-mode system management”, *Transp. Res. Board*, Washington, DC: Transportation Research Board, National Research Council, (1974).
- ZestTrans, “Zest Trans [online]”, (21 Mart 2019), <http://zesttrans.com/en/>, (2019).
- Zohdy, I. H. ve Rakha, H., “Game theory algorithm for intersection-based cooperative adaptive cruise control (CACC) systems”, *IEEE Conf. Intell. Transp. Syst. Proceedings, ITSC*, 1097–1102, (2012).

8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mehmet Bozuyla
Doğum Yeri : Karakoçan
Doğum Tarihi : 26.08.1988
Lisans : Pamukkale Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Y. Lisans : Pamukkale Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
İletişim Adresi : Yunus Emre Mah. 6464 Sok. No: 14 Pamukkale/Denizli
E-Posta : mbozuyla05@posta.pau.edu.tr

Yayın Listesi :

1. Bozuyla, M., Tola, A. T. ve Murat, Y. S. “A Novel Safe Merging Algorithm For Connected Vehicles Using Netlogo.”, *Elektronika ir Elektrotehnika*, 24, 3-7, (2018).
2. Bozuyla, M. ve Tola, A. T. “MetroCar – A Novel Transportation System for Cities.”, *Electronics World*, 124,32-33, (2018).
3. Bozuyla, M. ve Tola, A. T., “Designing A Novel Transportation System Using Microscopic Models and Multi-Agent Approach”, *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, (submitted)
4. Tola, A.T. ve Bozuyla, M., “Comparison of MetroCar System Versus Dual-Mode Transit Systems.”, *ITE Journal*, (submitted)