

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTONOM ARAÇLAR İÇİN KOOPERATİF
ADAPTİF SEYİR KONTROL SİSTEMİ TASARIMI,
BENZETİMİ VE ANALİZİ**

Senanur SARIHAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı
Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mümin Tolga EMİRLER

Şubat, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTONOM ARAÇLAR İÇİN KOOPERATİF ADAPTİF SEYİR
KONTROL SİSTEMİ TASARIMI, BENZETİMİ VE ANALİZİ**

Senanur Sarıhan tarafından hazırlanan tez çalışması 06.02.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Mümin Tolga
EMİRLER
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Mümin Tolga EMİRLER, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç.Dr. Yavuz EREN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç.Dr. Osman Taha ŞEN, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mümin Tolga EMİRLER sorumluluğunda tarafımda hazırlanan Otonom Araçlar için Kooperatif Adaptif Seyir Kontrol Sistemi Tasarımı, Benzetimi ve Analizi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Senanur SARIHAN

İmza

Aileme ve Dostlarıma



TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca her daim sabır ve anlayışla desteğini esirgemeyen, tecrübelerini paylaşma konusunda cömert olan danışman hocam Sayın Dr. Mümin Tolga EMİRLER'e teşekkürlerimi sunarım.

Bildirideki çalışma arkadaşım Fatih YALÇIN'a desteğinden dolayı teşekkürü borç bilirim. Yüksek lisans eğitimim boyunca her türlü maddi-manevi desteği sağlayan sevgili eşim Mert Serhat SARIHAN'a şükranlarımı iletir, aileme sevgilerimi sunarım.

Senanur SARIHAN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	4
1.3 Hipotez	4
2 Seyir Kontrol Sistemleri	6
2.1 Seyir Kontrol Sistemlerinde Kullanılan Ekipmanlar	6
2.1.1 RADAR	8
2.1.2 LIDAR	9
2.1.3 Kamera	9
2.2 Seyir Kontrol (SK) Sistemleri	10
2.3 Adaptif Seyir Kontrol (ASK) Sistemleri	11
2.4 Kooperatif Adaptif Seyir Kontrol (KASK) Sistemleri	13
2.4.1 Mesafe Yönetimi	14
3 Araç Modellemesi ve Kontrol Sistemi Tasarımı	16
3.1 Literatür Araştırması	16
3.2 Araç Modellemesi	18
3.2.1 Boyuna Araç Modeli	18
3.3 Kooperatif Adaptif Seyir Kontrol Sistemi Tasarımı	20
3.3.1 Uygun Kontrolcü Seçimi	21

3.3.2	Parametre Uzayı Yöntemiyle Geri Besleme Kontrol Sistem Tasarımı	22
3.3.3	Dayanıklı Geri Besleme Kontrol Sistem Tasarımı	26
3.3.4	Kooperatif Adaptif Seyir Sistemi Tasarımı	27
3.4	Konvoy Kararlılığı	28
4	Kooperatif Adaptif Seyir Kontrol Sistemi Tasarımının CARLA-MATLAB/Simulink Ortamında Benzetimi	31
4.1	Kontrol Sistemi Testleri için CARLA MATLAB/Simulink Benzetim Ortamının Hazırlanması	31
4.2	Tustin Metodu Kullanılması	33
4.3	Benzetim Çalışmaları	34
4.3.1	Benzetim Senaryosu 1: ASK ve KASK sistemlerinin konvooya dışarıdan araç dahil olmadığında karşılaştırılması .	35
4.3.2	Benzetim Senaryosu 2: ASK ve KASK sistemlerinin konvooya dışarıdan araç dahil olduğunda karşılaştırılması . .	39
4.3.3	Benzetim Senaryosu 3: ASK ve KASK sistemli konvoy düzeni	44
4.3.4	Benzetim Senaryosu 4: KASK sistemli üç araçtan oluşan konvoyun Benzetim Senaryosu 3 ile karşılaştırılması	46
4.4	Konvoy Kararlılığı	48
5	Benzetim Senaryoları Sonuçlarının Sayısal Olarak Karşılaştırılması	49
5.1	Senaryoların Karşılaştırılması	49
5.2	Konvoy Kararlılığının Karşılaştırılması	51
6	SONUÇ	52
	KAYNAKÇA	54
	TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	57

SİMGE LİSTESİ

r_i	Araçlar arası güvenli mesafe
$d_{r,i}$	Araçlar arası istenen mesafe
d_i	Araçlar arası mesafe
v_i	Araç hızı
$\ddot{x}$	Araç ivmesi
β	Araç modemleri arasındaki zaman gecikmesi
x_i	Araç pozisyonu
L_i	Araç uzunluğu
k_p	Geri besleme kontrolörünün orantısal katsayısı
k_d	Geri besleme kontrolörünün türevsel katsayısı
H_i	Geri besleme yolu transfer fonksiyonu
m	Kontrolörün derecesi
q	Kontrol modeli belirsiz parametre kümesi
u	Kontrol sinyali
G_i	Lineer araç sisteminin karakteristik denklemi
e_i	Mesafe hatası
n	Model derecesi
k_i	Model kazancı
γ_i	Model zaman gecikmesi
T_s	Örnekleme periyodu
t	Saniye cinsinden serbest değişken zaman
t_{hd}	Takip zamanı
k	Tasarlanabilir veya ayarlanabilir tüm kontrolör parametreleri kümesi

KISALTMA LİSTESİ

ABS	Anti Lock Braking System
ASK	Adaptif Seyir Kontrol
AUS	Akıllı Ulaşım Sistemleri
CC	Cruise Control
CCS	Cruise Control System
DAS	Driver Alert System
ECU	Electronic Control Unit
ESP	Electronic Stability Program
GKS	Gerçek Kök Sınırı
GIS	Geographic Information System
KASK	Kooperatif Adaptif Seyir Kontrol
KKS	Karmaşık Kök Sınırı
LIDAR	Light Detection And Ranging
MATLAB	Matrix Laboratory
PD	Oransal-Türevsel
PID	Oransal-Integral-Türevsel
PI	Oransal-Integral
RADAR	Radio Detection And Ranging
ROS	Robotic Operating System
SKS	Sonsuz Kök Sınırı
USFCC	United States Federal Communications Commission

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Avrupa kaza oranları [3]	3
Şekil 2.1	Araçtaki sensörler [4]	7
Şekil 2.2	RADAR sensörü [7]	8
Şekil 2.3	LIDAR sensörü [10]	9
Şekil 2.4	Kamera sensörü [12]	10
Şekil 2.5	Araçlarda seyir kontrol sistemi örneği [13]	11
Şekil 2.6	Adaptif seyir kontrol sistemi [16]	12
Şekil 2.7	Kooperatif adaptif seyir kontrol sistemi	13
Şekil 2.8	Araçlar arası mesafe gösterimi	14
Şekil 3.1	Otomatik sürüş kontrol katmanı	18
Şekil 3.2	Seyir kontrol sistemi mimarisi	19
Şekil 3.3	CARLA araç modeli ile model doğrulaması	20
Şekil 3.4	Kooperatif adaptif seyir kontrol tasarımı	20
Şekil 3.5	PID kontrol algoritması [12]	21
Şekil 3.6	Geri beslemeli kontrol yapısı blok diyagramı	22
Şekil 3.7	Karmaşık düzlemde Hurwitz kararlı bölgeler	23
Şekil 3.8	Geri beslemeli kontrol sistemi için parametre uzayı çözüm alanı	26
Şekil 3.9	Belirsiz parametre kutusu	26
Şekil 3.10	Dört köşe parametre uzayı çözüm alanı	27
Şekil 3.11	Kooperatif adaptif seyir kontrol sistemi blok diyagramı	27
Şekil 3.12	Konvoy kararlılığı gösterimi	29
Şekil 4.1	CARLA ortamı sinyal akışı	32
Şekil 4.2	Benzetim senaryosu 1: Lider araç hızı düşürülmeden önce	35
Şekil 4.3	Benzetim senaryosu 1: Lider araç hızı düşürüldükten sonra	35
Şekil 4.4	Benzetim senaryosu 1: ASK sistem konum-zaman grafiği	35
Şekil 4.5	Benzetim senaryosu 1: ASK sistem hız-zaman grafiği	36
Şekil 4.6	Benzetim senaryosu 1: ASK sistem ivme-zaman grafiği	36
Şekil 4.7	Benzetim senaryosu 1: ASK sistem takip süresi-zaman grafiği	37
Şekil 4.8	Benzetim senaryosu 1: KASK sistem konum-zaman grafiği	37
Şekil 4.9	Benzetim senaryosu 1: KASK sistem hız-zaman grafiği	38
Şekil 4.10	Benzetim senaryosu 1: KASK sistem ivme-zaman grafiği	38
Şekil 4.11	Benzetim senaryosu 1: KASK sistem takip süresi-zaman grafiği	39

Şekil 4.12	Benzetim senaryosu 2: Şerit değişikliği öncesi araç konumları . . .	39
Şekil 4.13	Benzetim senaryosu 2: Yanal konum-zaman grafiği	40
Şekil 4.14	Benzetim senaryosu 2: ASK sistem konum-zaman grafiği	40
Şekil 4.15	Benzetim senaryosu 2: ASK sistem hız-zaman grafiği	41
Şekil 4.16	Benzetim senaryosu 2: ASK sistem ivme-zaman grafiği	41
Şekil 4.17	Benzetim senaryosu 2: ASK sistem takip süresi-zaman grafiği . .	42
Şekil 4.18	Benzetim senaryosu 2: KASK sistem konum-zaman grafiği	42
Şekil 4.19	Benzetim senaryosu 2: KASK sistem hız-zaman grafiği	43
Şekil 4.20	Benzetim senaryosu 2: KASK sistem ivme-zaman grafiği	43
Şekil 4.21	Benzetim senaryosu 2: KASK sistem takip süresi-zaman grafiği .	43
Şekil 4.22	ASK ve KASK sistemli araç konvoyu	44
Şekil 4.23	Benzetim senaryosu 3: Konum-zaman grafiği	44
Şekil 4.24	Benzetim senaryosu 3: Hız-zaman grafiği	45
Şekil 4.25	Benzetim senaryosu 3: İvme-zaman grafiği	45
Şekil 4.26	Benzetim senaryosu 3: Takip Süresi-zaman grafiği	45
Şekil 4.27	KASK sistemli araç konvoyu	46
Şekil 4.28	Benzetim senaryosu 4: Konum-zaman grafiği	46
Şekil 4.29	Benzetim senaryosu 4: Hız-zaman grafiği	47
Şekil 4.30	Benzetim senaryosu 4: İvme-zaman grafiği	47
Şekil 4.31	Benzetim senaryosu 4: Takip Süresi-zaman grafiği	47
Şekil 4.32	Konvoy kararlılığı grafiği	48

TABLO LİSTESİ

Tablo 5.1	Benzetim Senaryosu 1 : ASK ve KASK sistem karşılaştırılması .	50
Tablo 5.2	Benzetim Senaryosu 2 : ASK ve KASK sistem karşılaştırılması .	50
Tablo 5.3	Benzetim Senaryosu 3 ve Benzetim Senaryosu 4'teki Konvoyların değerlerinin karşılaştırılması	50
Tablo 5.4	KASK ve ASK sistemlerde konvoy kararlılığı karşılaştırılması . .	51

Otonom Araçlar için Kooperatif Adaptif Seyir Kontrol Sistemi Tasarımı, Benzetimi ve Analizi

Senanur SARIHAN

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mümin Tolga EMİRLER

Ulaşım, toplumu doğrudan etkileyen merkezi bir faktördür ve ulaşım sistemlerinde yapılan değişiklikler, hem insanları hem de çevreyi etkiler. Akıllı ulaşım sistemleri, araçlar, taşınan yükler, rotalar ve yolcular gibi unsurları kontrol etmek için ulaşım altyapısı ile iletişim ve bilgi sistemlerini entegre eder. Aynı zamanda yol güvenliğini artırmayı, araç yıpranmasını azaltmayı, yolculuk süresini ve yakıt tüketimini düşürmeyi amaçlar. Artan trafik sıkışıklığı ve trafik kazalarının artması, otonom sistemlerin geliştirilmesini teşvik etmiştir. Bu sistemler seyir kontrolü, adaptif seyir kontrolü ve kooperatif adaptif seyir kontrolü olarak üç ana kategoriye ayrılabilir. Bu kategoriler, sürüş deneyimini optimize etmek ve trafik akışını iyileştirmek için geniş bir yelpazede teknolojik yenilikler sunarlar.

Seyir kontrol sistemleri, sürücünün konforunu ve güvenliğini artırmak için tasarlanmıştır. Ulaşım sektöründe önemli bir rol oynayarak trafik sorunlarına çözümler sunmayı hedefler. Adaptif seyir kontrol sistemleri, araç seyir kontrolüne ek olarak öndeki araçla güvenli bir mesafe sağlayarak sürücüye yardımcı olur. Sürücü direksiyona odaklanırken aracın boylamasına direksiyonu otomatik olarak gerçekleştirir. Araçların hızını ve mesafesini otomatik ayarlayarak konvoy halinde hareket etmelerini kooperatif adaptif seyir sistemleri sağlar. Bu sistemler, trafikte daha etkili ve güvenli bir şekilde hareket etmeyi amaçlar. Kooperatif adaptif seyir kontrol sistemleri, otonom ve bağlantılı araç uygulamalarının gelişimini hızlandıran, güvenli ulaşım teknolojilerinin yükselişini sağlayan otomotiv teknolojisinin gelecekteki önemli bir bileşenidir.

Bu çalışmada, kooperatif adaptif seyir kontrol sisteminin geri beslemeli kontrol kısmı için parametre uzayı tabanlı analitik bir yöntem önerilmektedir. Tasarım sürecinde, alt seviye eyleyicilerde gözlemlenen saf zaman gecikmesi belirsiz bir parametre olarak ele alınmıştır. Ek olarak, konvoydaki araçlar arasındaki konum hatasını azaltmayı ve kontrol performansını artırmayı amaçlayan ileri beslemeli kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen tasarım, adaptif seyir kontrol sistemi ile donatılmış dört araçlı bir konvoy için iki farklı senaryoda karşılaştırılmıştır. Sonrasında kooperatif adaptif seyir kontrol sistemli iki aracın arasına adaptif seyir kontrol sistemli aracın dahil olduğu üç araçlı konvoy ile kooperatif adaptif seyir kontrol sistemli  araç konvoyu karşılaştırılmıştır. Yöntemin etkinliği, konvoy sürüş çalışmaları için tasarlanan ve hazırlanan CARLA-MATLAB/Simulink ortamındaki benzetim çalışmalarıyla gösterilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçları değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Otonom sistemler, benzetim senaryosu, pd kontrolcü, konvoy kararlılığı.

ABSTRACT

Cooperative Adaptive Cruise Control System Design, Simulation and Analysis for Autonomous Vehicles

Senanur SARIHAN

Department of Control and Automation Engineering
Master of Science Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mmin Tolga Emirler

Transport is a central factor that directly affects society, and changes to transport systems affect both people and the environment. Intelligent transportation systems integrate transportation infrastructure and communication and information systems to control elements such as vehicles, transported loads, routes and passengers. It also aims to improve road safety, reduce vehicle wear, and reduce travel time and fuel consumption. Increasing traffic congestion and the increase in traffic accidents have encouraged the development of autonomous systems. These systems can be divided into three main categories: cruise control, adaptive cruise control and cooperative adaptive cruise control. These categories offer a wide range of technological innovations to optimize the driving experience and improve traffic flow.

Cruise control systems are designed to increase driver comfort and safety. It aims to provide solutions to traffic problems by playing an important role in the transportation sector. In addition to vehicle cruise control, adaptive cruise control systems assist the driver by maintaining a safe distance from the vehicle in front. Longitudinal steering of the vehicle occurs automatically while the driver focuses on steering. Cooperative adaptive cruise systems enable vehicles to move in convoys by automatically adjusting their speed and distance. These systems aim to move more effectively and safely in traffic. Cooperative adaptive cruise control systems are an important future component of automotive technology, accelerating the development of autonomous and connected vehicle applications and enabling the rise of safe transportation technologies.

In this study, an analytical method based on parameter space is proposed for the feedback control part of cooperative adaptive cruise control systems. In the design process, the observed pure time delay in lower-level actuators is treated as an uncertain parameter. Additionally, a feedforward controller design is implemented to reduce the position error between vehicles in the convoy and enhance control performance. The proposed design is compared for a convoy equipped with an adaptive cruise control system in two different scenarios. Subsequently, a comparison is made for a three-vehicle convoy where two vehicles are equipped with the adaptive and cooperative adaptive cruise control system. The effectiveness of the method is demonstrated through simulation studies conducted in the CARLA-MATLAB/Simulink environment designed and prepared for convoy driving research.

Keywords: Autonomous systems, simulation scenario, pd controller, string stability.

1.1 Literatür Özeti

Ulaşım, toplumu etkileyen merkezi bir faktördür. Ulaşımında yapılan değişimler insanı ve çevreyi doğrudan etkiler. Araç kullanımının artmasına bağlı olarak trafik akış hızı azalmış ve kazalar artmıştır. Buna bağlı olarak otomotiv sektöründe, araçların konfor ve güvenlik seviyelerini artırmaya yönelik yeni eğilimler ortaya çıkmaktadır. Bu gelişmeler, otomotiv üreticilerini hem yasal zorunluluklar kapsamında trafik kazalarını azaltıcı önlemler almaya zorlamakta, hem de piyasa rekabeti nedeniyle ürünlerini en son teknolojik eklemelerle donatma konusunda çeşitli adımlar atmaya teşvik etmektedir. Özellikle araç güvenlik sistemleri firmaların çok önemsedığı ve son yıllarda önemli ilerlemeler kaydettiği bir alandır. Aktüatör ve sensör teknolojilerindeki ilerlemeler, bu sistemlerin araçlara güvenilir bir şekilde entegre edilmesine olanak tanır [1].

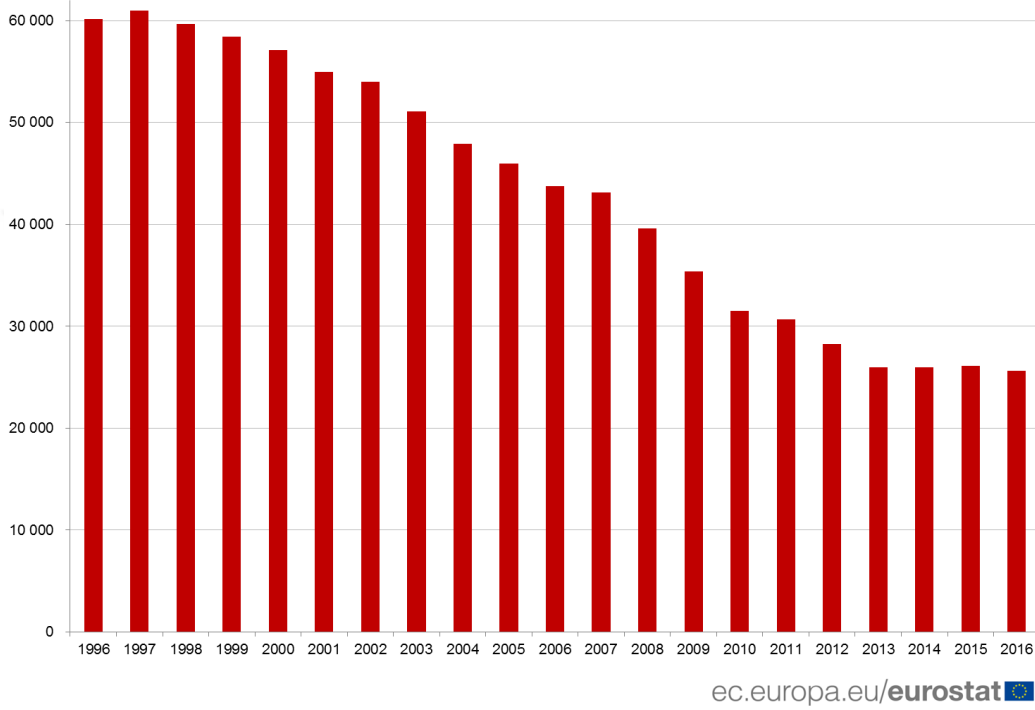
Aktif güvenlik sistemleri, sürücü komutlarına gerektiğinde müdahale edebilen ve potansiyel kazaları önlemek için tasarlanmış sistemlerdir. Örneğin, ABS (anti-lock braking system) kilitlenmeyen fren sistemleri gibi, seksenlerin başında pazara sunulan ya da günümüzde birçok araçta standart olarak bulunan ani manevraları algılayıp devreye giren ESP (Electronic Stability Program) sistemi, aktif güvenlik sistemlerine başarılı örnekler olarak gösterilebilir. Bu ikincil güvenlik sistemlerinin yanı sıra, konfor odaklı sistemlere de değinilebilir. Sürücünün seyahat esnasındaki rutin hareketlerini üstlenerek, yorgunluğunu azaltan ve acil durumlarda daha sağlıklı reaksiyonlar sunan seyir sistemleri gibi örnekleri bu kapsamda bulunmaktadır.

İlk olarak seyir kontrol sistemleri, araçların belirli bir hızda seyretmelerini sağlayan basit sistemlerle başladı. Bu sistemler, sürücülere manuel kontrolde yardımcı olmayı amaçlıyordu. 2000'lerin başlarına doğru adaptif seyir kontrol sistemleri, radar ve sensör teknolojileri kullanarak aracın çevresini izleyip, önündeki araca göre hızını ayarlayabilen daha sofistike hale geldi.

Adaptif seyir kontrol sisteminden detaylı bahsedildiğinde, seyir kontrol sistemine ek olarak, aracın önüne yerleştirilen bir sensör aracılığıyla trafikteki diğer araçlarla etkileşim halindedir. Sistem, araç hızını öndeki araçlara göre dinamik olarak ayarlar ve belirli bir mesafeyi korumaya çalışır. Bu şekilde, aracın negatif ve pozitif ivmesi sistem tarafından kontrol edilirken, direksiyon komutları sürücü tarafından verilmeye devam eder. Sürüş sırasında, aracın önündeki hedef aracın hızı belirli bir hedef hız olarak ayarlanır ve güvenli bir mesafe korunur. Önündeki araç şerit değiştirirse veya hedef araç olmaktan çıkarsa, sistem seyir kontrol sistemi gibi çalışarak sürücünün belirlediği sabit hıza kadar hızlanır. Güvenden çok konfor sistemi olarak düşünülebilir çünkü olası bir çarpışma durumunda yeterli müdahaleyi yapacak yetkisi yoktur. Örneğin hızlı bir şekilde giderken ani fren yapılması gereken durum olduğunda sürücünün freni kendisi yapması gerekmektedir. Çünkü bu sistem, konfor odaklı olduğundan dolayı frenleme ivmeleri belirli bir sınırlama altında tutulmuştur. Bu nedenle, bu sistemin çarpışma önleyici bir özelliği bulunmamaktadır.

2010’larda, araçlar arası iletişim ve otonom araç teknolojilerindeki ilerlemelerle birlikte kooperatif seyir kontrolü kavramı gelişti. Bu, araçların birbirleriyle iletişim kurarak konvoy halinde seyretmelerini sağlayan bir yaklaşımı temsil eder. Bu sistem, araçların birbirleriyle kablosuz olarak araçlar arası iletişim kurmasına dayanır. Bu iletişim; araçların konumunu, hızını, ivmesini ve diğer önemli parametreleri paylaşmalarını sağlar. Tahmin ve koordinasyon özelliğiyle bir aracın diğer araçların davranışlarını daha önceden tahmin edebilmesini sağlar. Bu sayede, araçlar birbirleriyle daha yakın bir şekilde ve güvenli bir mesafede seyredebilirler. Araçların hızlarını ve birbirlerine olan mesafelerini sürekli olarak ayarlar. Bu sayede, araçlar bir konvoy halinde seyredebilir ve trafik akışını daha verimli bir hale getirebilirler. Kooperatif adaptif seyir kontrol sisteminin temel amaçlarından biri trafik akışını iyileştirmek ve trafikteki yavaşlamaları azaltmaktır. Bu, araçların birbirleriyle daha etkili bir şekilde iş birliği yapmasını içerir. Trafikteki araçlar arasındaki mesafeyi optimal bir şekilde koruyarak güvenliği artırır. Aynı zamanda, daha düzenli bir trafik akışı sağlayarak yakıt verimliliğini artırabilir. Dünyada karayolu ulaşımının insan ve taşımacılık olarak önemlisi olması, trafik kazalarının sayısının son derece yüksek olması ve bu kazaların sonucunda birçok kişinin hayatını kaybetmiş olmasından kaynaklı otomotiv sektörü güvenlik konusuna odaklanmış, araştırma ve geliştirmeye devam etmektedir [2]. Şekil 1.1’deki grafik, teknolojinin gelişimi ile birlikte geçen yıllarda kaza oranlarının azaldığını net bir şekilde göstermektedir. Özellikle günümüzde otonom araç teknolojilerindeki büyük ilerlemeler ve yapay zeka kullanımının artışı, seyir kontrol sistemlerini daha karmaşık hale getirmiştir.

Bu bağlamda, akıllı otoyol sistemleri ve konvoy tabanlı seyir kontrolü gibi ileri düzey uygulamalar geliştirilmiştir. Gelecekteki beklentiler, ulaşım sektöründeki dijitalleşme ve otonom araç teknolojilerindeki ilerlemelerle birlikte seyir kontrol sistemlerinin daha da entegre ve gelişmiş hale gelmesidir. Bu gelişmeler; trafik yönetimi, güvenlik ve enerji verimliliği gibi kritik alanlarda önemli avantajlar sağlamayı amaçlamaktadır. Bu noktada, seyir kontrol sistemlerinin daha akıllı, etkili ve sürdürülebilir bir ulaşım ortamı oluşturmak adına önemli bir rol oynayacağı öngörülmektedir.



Şekil 1.1 Avrupa kaza oranları [3]

Yapılan çalışma sırasında araç modellemesi ve kontrolcüler ilk etapta MATLAB/Simulink ortamında oluşturulmuştur. Daha sonrasında CARLA arayüzünde gerçek zamanlı simülasyonlar oluşturmak için Tustin methoduyla ayrık zamanlıya çevrilip simülasyon sonuçları elde edilmiştir. Tez altı başlık altında incelenmiştir. İlk kısımda özet bir şekilde bilgiler verilip tez hakkında genel bilgilendirme yapılmıştır. İkinci kısımda seyir sistemleri hakkında bilgiler verilmiş, seyir sistemlerinde kullanılan donanımlardan bahsedilmiştir. Üçüncü kısımda adaptif seyir kontrol ve kooperatif adaptif seyir sistemleri kontrolünden bahsedilip, araç modellemesinin nasıl yapıldığı ve kontrol sistemi tasarımı anlatılmıştır. Dördüncü kısımdaysa kooperatif adaptif seyir kontrol sistemi tasarımının CARLA-MATLAB/Simulink ortamında benzetim senaryolarından bahsedilmiştir. Beşinci kısımda modellemeler ve tasarımlar sonucu elde edilen benzetim sonuçlarının yorumlanıp karşılaştırılması yer almaktadır. Sonuçlar kısmıyla tez sonlanmaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin temel amacı, kooperatif adaptif seyir kontrol sisteminin geri beslemeli kontrol kısmı için bir analitik yöntem sunarak parametre uzayını belirlemektir. Bu tasarımda, alt seviye eyleyicilerde meydana gelen saf zaman gecikmesi belirsiz bir parametre olarak ele alınmıştır. Ayrıca, konvoydaki araçlar arasındaki konum hatasını azaltmayı ve kontrol performansını artırmayı amaçlayan ileri beslemeli kontrolcü tasarımı başarıyla uygulanmıştır. Önerilen tasarım, adaptif seyir kontrol sistemi ile dört araçlı bir konvoy için iki farklı senaryoda karşılaştırılmıştır. Ardından üç araçlı bir konvoy için de aynı karşılaştırma yapılmıştır.

- Parametre uzayı tabanlı yöntem ile MATLAB/Simulink ortamında kooperatif adaptif seyir kontrol sistemi tasarımını otonom araçlar için gerçekleştirmek.
- MATLAB ile CARLA arasındaki bağlantıyı kurmak.
- Çeşitli senaryolar uygulayıp CARLA benzetimleri ile önerilen sistemi test etmek ve adaptif seyir kontrol sistemi ile karşılaştırmak.

Bu hedefler, tezin kapsamlı bir şekilde ele alınmasını ve geliştirilen kooperatif adaptif seyir kontrol sistemine dair kapsamlı bir değerlendirme sunulmasını amaçlamaktadır.

1.3 Hipotez

Bu çalışmanın temel hipotezi, kooperatif adaptif seyir kontrol sistemlerinin otonom araçlarda kullanılmasıyla, araçların etkileşimli bir şekilde iletişim kurarak ve birbirleriyle işbirliği yaparak trafik akışını daha verimli ve güvenli hale getirebileceği yönündedir. Bu sistemlerin, özellikle CARLA-MATLAB/Simulink ortamında simülasyonlarla test edilmesi ve analiz edilmesi, tasarımın etkinliğini ve uygulanabilirliğini değerlendirmek açısından kritiktir. Bu şekilde, araştırmanın bulgularının gerçek dünya uygulamalarına olan potansiyel etkisi daha iyi anlaşılabilir.

Hipotez şu unsurları içermektedir:

- Otonom araçlardaki kooperatif adaptif seyir kontrol sistemlerinin kullanılması, trafik akışındaki verimliliği artırabilir. Bu sistemler, araçların birbirleriyle iletişim kurarak ve etkileşime girerek trafik akışını daha düzenli ve akıcı hale getirebilir.
- Araçlar arası etkileşim ve işbirliği, trafikte güvenliği artırabilir, kazaların azalmasına katkıda bulunabilir. Kooperatif adaptif seyir kontrolü, araçların birbirleriyle olan ilişkilerini optimize ederek çarpışma riskini azaltabilir ve sürücülere güvenli bir yolculuk ortamı sunabilir.
- CARLA-MATLAB/Simulink ortamında yapılan simülasyonlar, tasarımın gerçek dünya performansını doğru bir şekilde yansıtabilir ve tasarımın güvenilirliğini değerlendirebilir. Bu benzetim senaryoları, tasarımın farklı senaryolarda nasıl davrandığını anlamak ve iyileştirmeler yapmak için önemli bir araç olabilir.
- Bu çalışma, kooperatif adaptif seyir kontrolünün gelecekteki ulaşım sistemlerine olan potansiyel katkısını açıklayabilir ve bu teknolojinin sürdürülebilir, güvenli ve etkili ulaşımı teşvik edebileceği hipotezini öne sürebilir. Bu, otonom araçların yaygınlaşması ve trafik akışının iyileştirilmesi için önemli bir adım olabilir.

Bu hipotezler, çalışmanın çerçevesini belirlerken aynı zamanda elde edilecek sonuçların ve bulguların bu temel önermelerle uyumlu olup olmadığını değerlendirme amacını taşımaktadır. Bu noktada, tasarlanan kooperatif adaptif seyir kontrol sisteminin gerçek dünya uygulamalarına yönelik potansiyel avantajlarını ve zorluklarını anlamak için kapsamlı bir benzetim ve analiz yapılacaktır.

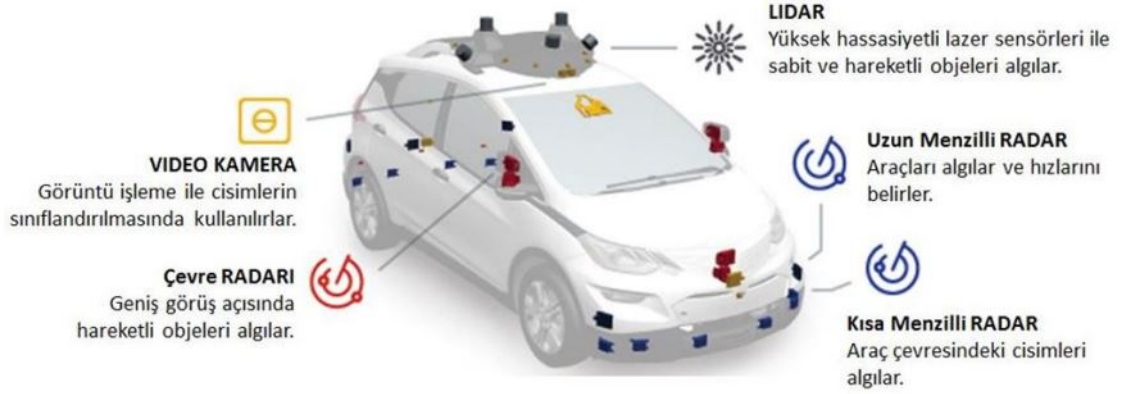
2 Seyir Kontrol Sistemleri

2.1 Seyir Kontrol Sistemlerinde Kullanılan Ekipmanlar

Son yıllarda trafik sorunları ve altyapı sorunları gibi nedenlere karşı sağlam bir çözüm bulma isteği artmıştır. Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS), bu sorunları azaltmak için bir olasılık sunar. Bunlar yol tabanlı veya araçtan araca teknolojiler olarak sınıflandırılabilir. Akıllı araç sistemleri, diğer araçların bilgi ve iletişim altyapısının yanı sıra kendi sensörlerinden gelen bilgileri de kullanan, kaza önleme ve gelişmiş sürücü desteği gibi uygulamaları içerir. Sürücünün yolculuk sırasında eylemlerini devralarak, böylece sürücünün olası acil durumlarda daha sağlıklı tepki vermesini sağlar. Bu sistemler, sürücünün sürerken hem konforunu hem de güvenliğini artırmak amacıyla tasarlanmıştır.

Tez konusuyla uyumlu olarak, bu tezde kooperatif adaptif seyir kontrol sistemi açıklanmıştır. Kooperatif adaptif seyir kontrol sistemi (KASK) ile araçlar otoyolda konvoy oluşturabilir ve hedeflerine daha güvenli ve hızlı bir şekilde ulaşabilirler. Elektronik fren uyarısıyla trafikte öndeki araçlardan biri fren yaparsa, sürücünün müdahalesi olmadan araç sürücüsüz otomatik olarak durabilir, böylece trafik akışı ani olarak kesilmez ve kazalar minimize edilir. Kooperatif adaptif seyir kontrol ve adaptif seyir kontrol sistemlerinin verimli çalışması için, sensörler, aktüatörler ve araç içi denetleyiciler gibi donanımlara gereksinim duyulmaktadır. Araçlarda güvenilir mesafe ve sorunsuz bir sürüş deneyimi sağlamak için RADAR (Radyo Algılama ve Mesafe Belirleme) ve LIDAR (Işık Algılama ve Mesafe Belirleme) gibi boyuna sensörler kullanılır. Araçların gelişen görüntü işleme teknolojisi ile birlikte kamera sistemleri de kullanılmaktadır. Bunlar birbirleriyle karşılaştırıldığında avantajları ve dezavantajları sıralanabilir.

Şekil 2.1 'de Araç donanımı gösterilmektedir. Aracın sensörlerinden alınan bilgiler araçta elektronik kontrollerin bulunduğu parçalara iletilir ve bu parçalara Elektronik Kontrol Üniteleri (ECU) adı verilir.

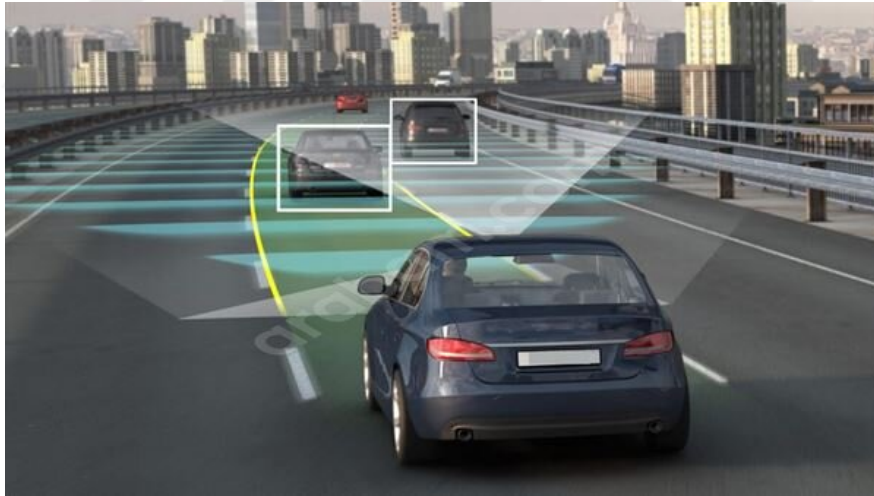


Şekil 2.1 Araçtaki sensörler [4]

Araçlarda motor kontrolü, şanzıman kontrolü, fren kontrolü, süspansiyon kontrolü gibi elektronik kontrollerin pek çok örneği bulunmaktadır. Günümüzün modern araçlarında, 80'e kadar elektronik kontrol üniteleri bulunabilmektedir. Bu üniteler, sistem denetleyicilerinin yerleştirildiği kısımlardır. İçlerine yerleştirilen denetleyiciler yardımıyla, sensörlerden alınan bilgiler doğrultusunda aracın işleyişini kontrol ederler. Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle, araçlar trafikte birbirleriyle ve çevreleriyle iletişim kurabilirler. Bu iletişim, kısa mesafeli iletişim antenlerini (DSRC - Özel Kısa Menzilli İletişim) kullanır. Araçlarda kullanılmak üzere tasarımı özel olarak hazırlanmış, bir yada iki taraflı, kısa ve orta menzilli kablosuz iletişim kanalları ve alakalı standartlar ve protokoller için kullanılan genel bir terimdir. 1999 senesinde Amerika Birleşik Devletleri Federal İletişim Komisyonu (USFCC), özel kısa mesafeli iletişim ve akıllı otoyol sistemleri için 5,9 GHz bandında 75 MHz bant genişliği belirledi. Avrupa'da 2008 yılında 5,9 GHz bandında da aynı amaçla 30 MHz bant genişliği kullanılmaya başlanmıştır. Araç iletişiminde 5,9 GHz frekansının tercih edilmesinin temel nedeni, sıradan bir bilgisayar iletişiminden farklı olan ve yüksek hızda hareket eden araçlar arasında güvenilir iletişim sağlamak için gereken özelliklere sahip olmasıdır. Bu frekans aralığı, hava şartlarına dayanıklılığı, hızlı veri iletimini ve yaklaşık 1000 metre menzil sağlayabilme yeteneği gibi önemli özellikleri içerir. Bu yüksek frekans değeri, sistemin yoğun trafik veya otoyolda meydana gelen bir kazayı arkadan gelen araçlara hızlı bir şekilde aktarabilmesini sağlar. Bu, trafikteki diğer araçların durumu hakkında bilgilendirilmesi ve kazaya müdahale edilmesi için gerekli önlemlerin alınmasına olanak tanır. Bu sayede, kazaların etkileri en aza indirilerek trafik güvenliği artırılabilir. [5, 6].

2.1.1 RADAR

Kooperatif adaptif ve adaptif seyir kontrol sistemlerinde, araç ile çevre arasındaki etkileşim, sistemde temel bir bileşen olan radar tarafından sağlanmaktadır. Radar, aracın rota boyunca önünde hareket eden diğer araçlara olan mesafesini ve göreceli hızını belirlemek için kullanılır. Farklı fiziksel prensiplere dayalı pek çok farklı radar türü bulunmasına rağmen, genellikle seyir sistemlerinde öne çıkan iki tür radar bulunmaktadır. Bunlardan ilki, belirli bir aralıkta nesneleri algılamak için Doppler etkisini kullanan uzun menzilli milimetre dalga radarıdır. Sistem, belirli bir frekansta milimetre dalga aralığında bir sinüs sinyali gönderir ve bir alıcı antenin yardımıyla sinyali tekrar alır. Sinyalin menzilde karşılaştığı nesneye çarpması ve oradan yansması için geçen süre, tekrar radara ulaşma süresi ile birlikte uçuş süresi olarak tanımlanır. Uçuş süresi, ölçülecek mesafenin 2 katını ışık hızına bölerek uzunluğundaki farkı kullanarak elde edilir. Milimetrik radarlar mesafe ve hızı ölçmek için ses dalgalarını kullandığından, yağmur, sis benzer biçimde olumsuz hava koşullarından, sıcaklık ve çamur gibi çevre koşullarından lidar sensörüne nazaran daha az etkilenir. Bu radarın içi küçük elektronik devreler ve bir anten içerir ve plastik bir dış kabuk ile kaplanmıştır. Şekil 2.2 'de Radar algı alanları örneği gösterilmiştir.

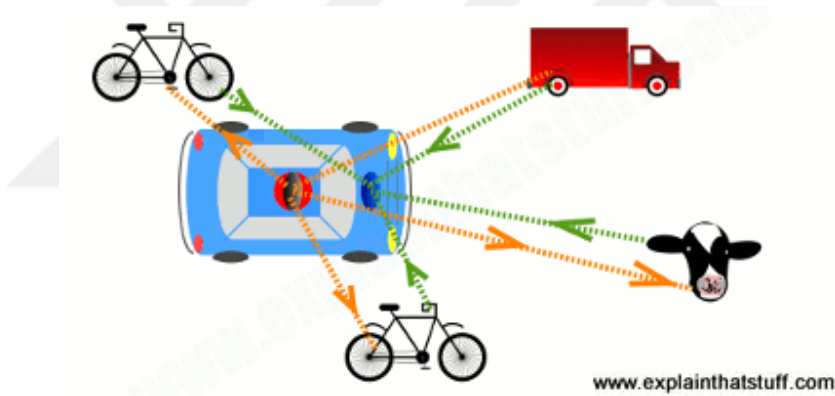


Şekil 2.2 RADAR sensörü [7]

Radar genellikle aracın ön tarafında, motor kaputunun altında, milimetre dalga enerjisine geçirgen bir malzemeden yapılmış olarak bulunur. Bu tip sensörler, kamera sistemlerine nazaran ucuz ve kullanımı ergonomik olsa da lidarlara kıyasla yüksek maliyetlidir. Diğer radar türlerine göre ise düşük frekans aralığına sahip radardır. Bu radarlar, sistem içinde şeritlerin içindeki araçlar ve nesneler hakkında bilgi sahibi olması için daha kısa bir alanda yaklaşık 80 derece tarar. Genellikle dur-kalk sistemleri ve otomatik park sistemlerinde kullanılır.

2.1.2 LIDAR

LIDAR (Light Detection and Ranging) sistemleri, radar veya sesle seyir ve menzil tespiti (sonar) gibi prensiplerde çalışan lazer tabanlı sistemlerdir [8]. Lidar (Light + Radar), yakın kızılötesi ışık lazer darbelerini kullanarak önceki bir konumla arasındaki mesafeyi ve hız farkını ölçmek için kullanılan optik bir uzaktan algılama teknolojisidir. Bu sistem, ışık darbelerini yayar ve darbenin uzaktaki bir yüzeyden dönmesi için geçen süreyi ölçer. Işık sabit bir hızda hareket ettiği için Lidar ünitesi, kendi konumu ile hedefi arasındaki mesafeyi doğru bir şekilde hesaplayabilir. Lidar sensör merceği optik olarak bitişik lazer ışınlarını yayar ve bu tarz şeyleri toplar. Düşük maliyeti ve araca kolayca yerleştirilebilmesi, Lidar sensörünün diğerlerine kıyasla en büyük avantajıdır. Lidarların diğer bir avantajıysa çoklu tarama fonksiyonuna sahip olmalarıdır [9]. Bu şekilde aynı zamanda birden fazla nesneyi ayırt edebilirler. Fakat sensörün gönderip aldığı lazer ışınları çevre koşullarına oldukça duyarlıdır. Bu nedenle, bu sensörün ölçümleri kötü hava koşullarında güvenilir değildir. Bu nedenle, otomotiv endüstrisinde üreticiler araçlarında lidar sensörünün yanı sıra radar sensörünü de kullanır.



Şekil 2.3 LIDAR sensörü [10]

2.1.3 Kamera

Otonom araçlar genellikle, insan sürücülerinin gözleriyle yaptığı gibi yol üzerindeki nesneleri görmek ve yorumlamak için video kameralar ve sensörler içerir. Araçları her açıdan bu kameralarla donatarak, araçlar dış ortamlarının 360° görüntüsünü koruyabilir ve bu sayede çevrelerindeki trafik koşullarıyla ilgili daha geniş bir perspektif sağlayabilirler. Günümüzde, yüksek detaylı ve gerçekçi görüntüler göstermek için kullanılabilen 3D kameralar bulunmaktadır. Bu görüntü sensörleri otomatik olarak nesneleri tespit eder, sınıflandırır ve araç ile aralarındaki mesafeyi belirler. Örneğin, kameralar kolayca diğer araçları, yaya ve bisiklet sürücülerini, trafik işaret ve levhalarını, yol işaretlemelerini, köprüleri ve bariyerleri tanımlayabilir. Ne yazık ki, bu kamera sensörleri hâlâ mükemmel değildir.

Yağmur, sis veya kar gibi kötü hava koşulları, kameraların yol üzerindeki engelleri net bir şekilde görmesini engelleyebilir, bu da kazaların olasılığını artırabilir. Ayrıca, sıklıkla kameralardan gelen görüntülerin bilgisayarın aracın ne yapması gerektiği konusunda iyi bir karar vermesi için yeterli olmadığı durumlar bulunmaktadır. Örneğin, nesnelerin renkleri arka planla çok benzerse veya aralarındaki kontrast düşükse, sürüş algoritmaları başarısız olabilir [11].

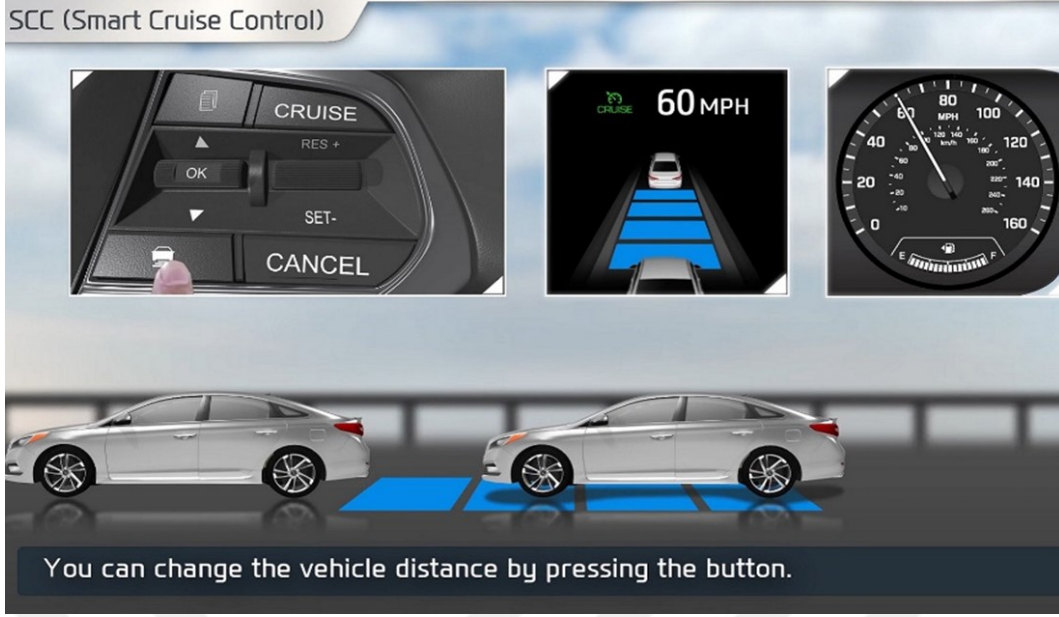


Şekil 2.4 Kamera sensörü [12]

2.2 Seyir Kontrol (SK) Sistemleri

Görme engelli mühendis Ralph Teeter, 1945 yılında araçlar için ilk uygulanabilir Seyir Kontrol (Cruise Control - CC) cihazını icat etmiştir. Seyir kontrol sisteminin arkasındaki şey, sürücünün bir referans hızı ayarladığı ve gazın bu belirlenen referans hızı tutmak üzere rüzgar, yol eğimi veya değişken araç parametreleri gibi dış yüklerin etkisi altında kontrol edildiği yaygın ve tanınmış bir Sürücü Destek Sistemi (DAS) idi. Sürücü, seyir kontrol sistemini açabilir, böylece aracın aynı hız oranını kontrol etmesine izin verir ve sürüşe odaklanmasını sağlar. Seyir Kontrol Sistemleri (Cruise Control System - CCS), özellikle şehirlerarası trafikte, sabit bir hızda seyahat etmeyi mümkün kılan temelde yardımcı bir sistemdir. Şekil 2.5 'de Hyundai aracının tasarlandığı seyir kontrol sistemi gösterilmektedir.

Trafiğin yoğun olduğu otoyol vb. gibi yollarda bu sistem kullanılır. Yollarda sürücü, maksimum izin verilen hızı aşmamak için hız göstergesine sürekli bir göz atmaya çalışır. Eğimi değiştiğinde hızı düzeltmek için gaz pedalına müdahale eder. Seyir kontrol sistemi, sürücüyü bu sıkıntıdan kurtarır. Bu sistem sayesinde sürücü, hız göstergesini kontrol etme zahmetinden kurtulur, daha fazla yol üzerine konsantre olur ve gaz pedalından tamamen ayağını çıkararak daha rahat bir sürüş elde eder.



Şekil 2.5 Araçlarda seyir kontrol sistemi örneği [13]

Seyir kontrol sistemleri, aracın belirli bir hızda hareket etmesine izin veren bir sistemdir. Bu sistemler aracın hızını gaz kontrolü ile kontrol eder.

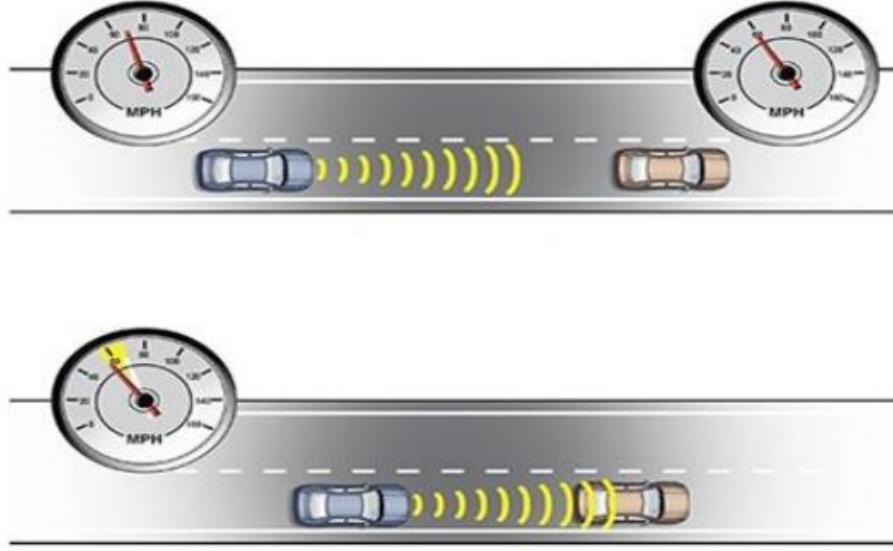
Gaz, motordan alınacak enerjiyi belirlemek için sorgulanır. Birçok otomobilde, motor vakumu ile çalışan aktuatörler gaz kontrolünü yapmak için kullanılır [14]. Yukarıda bahsedilen seyir kontrol sistemleri, trafiğin yoğun olmadığı düz ve geniş yollar (şehirlerarası yollar gibi) için geliştirilmiştir ve kontrol edilen aracın önünde engel yoktur (trafikte seyreden diğer araçlar vb.). Bu sistemler, yoğun trafik olduğu şehir içi trafiğinde pek işe yaramamaktadır. Bu gibi durumlar için adaptif seyir kontrol sistemleri geliştirilmiştir [15].

2.3 Adaptif Seyir Kontrol (ASK) Sistemleri

Adaptif seyir kontrol sistemi, otonom hız kontrolü veya radar hız kontrolü sistemi olarak da adlandırılır. Adaptif seyir kontrol sistemi incelendiğinde, bunun bir güvenlik sisteminden ziyade bir konfor sistemi olduğunu görülmektedir. Çünkü sistem, acil bir durumda araca gerekli müdahaleyi yapma yetkisine sahip değildir. Örneğin, sürüş sırasında bir yaya veya nesne aracın önüne gelirse, sistem belirli standartlara göre sınırlı olan fren müdahalesi nedeniyle yeterince müdahale edemez. Bu sistemde direksiyon sürüş esnasında sürücü tarafından kontrol edilmektedir.

Sürücünün sisteme girdiği iki değer bulunmaktadır. Bu iki değer, önde bir araç olmadığında takip edilecek olan aracın hız değeri ve araç ile takip edilecek olan araç arasındaki saniye cinsinden mesafe değeridir.

Genellikle adaptif seyir kontrol sistemi konuşulduğunda, hedef aracın önüne göre belirli bir mesafede hızı ayarlayan sistemler akla gelir, bunun bir örneği Şekil 2.6'de gösterilmiştir.



Şekil 2.6 Adaptif seyir kontrol sistemi [16]

Seyir kontrol sistemleri yalnızca hız kontrolü sağlarken, ASK sistemleri aynı zamanda hız kontrolüyle birlikte mesafe kontrolü de sağlar. ASK, radar gibi bir mesafe sensörünü kullanarak, önde giden araçla güvenli bir şekilde mesafeyi korumak için aracın hızını ayarlar. Araçların direksiyon kontrolü sürücü tarafından gerçekleştirilirken, boyuna kontrol ASK sistemi tarafından gerçekleştirilir. Özellikle çok düşük hızlarda (örneğin, 0-10 km/saat arasında) yoğun trafikte sürüş yaparken, önündeki araçtan bir belirli bir mesafeyi koruma amaçlayan sistemlere düşük hızlı ASK sistemleri (Low-speed ACC) denir. Bu uygulamanın amacı, yaya ve bisikletlilerin güvenliğini sağlamak için sürücünün araca müdahale etmesini gerektirmektir. Yüksek hızlı ASK sistemlerinde (High-speed ACC), yolun belirli bir mesafesinde engel tespit edildiğinde, seyir kontrol sistemi gibi çalışır ve araç daha yavaş hareket eden bir araçsa, sürücünün belirlediği mesafeyi korur. Önde giden araç hızlandığında, şerit değiştirdiğinde veya ASK'a sahip araç şerit değiştirdiğinde, araç tekrar mevcut hızda hızlanır. Genellikle 30 km/saat üzerindeki hızlarda kullanılır. Büyük şehirlerde trafik yoğunluğundan kaynaklanan sorunlardan biri olan trafik kazalarının %1'inin yol, %1'inin yolcu ve %5'inin araç faktöründen kaynaklandığı verilere göre, geriye kalan %93'ü sürücü kaynaklı kazalardır.

Adaptif seyir sistemleri, takip mesafesine uyulmamasından kaynaklanan kazaların büyük ölçüde önlenmesine yardımcı olabilir. Acil durumlar dışında, şehir içi trafikte ASK'a sahip bir araçla sürücü daha az yorulur çünkü araç otomatik olarak önündeki aracı takip eder. Ayrıca, ASK sistemleri yalnızca araçlarda konforu ve güvenliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda yakıt tüketimi açısından tasarruf sağlar. Adaptif seyir kontrol sistemlerinde, önde giden araç veya herhangi bir engelin mesafesini ölçmek için kızılötesi ışınlar, ultrasonik sensörler, lazer ışınları veya milimetre dalga radarı kullanılabilir. ASK sistemleri genellikle belirli hız aralıklarında etkindir. Sistemin yoğun trafikte kullanılmasını önlemek için alt sınır belirlenir (örneğin, 30 km/saat gibi). Aşırı hızlı sürüşü teşvik etmemek için üst sınır belirlenir (örneğin, 180 km/saat gibi). Bu tür sistemler uzun yolculuk amaçları için tasarlanmıştır. ASK sistemleri dur-kalk sistemleri geliştirilmiş ve şehir içi trafik koşulları için elde edilmiştir. Bu tür sistemler, diğerlerinin aksine mesafe ve hız kontrolünün işletim aralığının sıfıra inebilmesi ve çıkabilmesi gerektiğinden, trafik durumunu açığa çıkarmak için ölçülen değerlerin yorumlanmasına izin verecek ek sensör yapıları ve trafik durumunu ortaya çıkarmak için modeller gerektirir [2].

2.4 Kooperatif Adaptif Seyir Kontrol (KASK) Sistemleri

Çok sayıda akıllı ulaşım sistemi, araç kontrolünün büyük bir bölümünü içerdiğinden, araçların otonom hale gelmesi gerekmektedir. Otonom bir araç inşa etmenin amacı, sürücü kaynaklı kazaları ortadan kaldırarak ve güvenliği artırarak aynı zamanda araç takibi, şerit değiştirme gibi manevraları otonom hale getirerek yollardaki kapasiteyi artırmaktır. Aynı zamanda kooperatif adaptif seyir kontrol sistemi, araçların yolda konvoy halinde ilerlemesine izin vererek, araçlar arasındaki takip süresini 2 ila 3 saniyeden 0,5 saniyeye kadar düşürme imkanı sağlar [17]. Araçlar arasındaki takip sürelerini bu seviyelere düşürmek, yollardaki kapasiteyi artırmak anlamına gelir. Şekil 2.7'de Kooperatif adaptif seyir kontrol sistemi kablosuz haberleşme gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Kooperatif adaptif seyir kontrol sistemi

2.4.1 Mesafe Yönetimi

Mesafe yönetimi, araçların birbirlerine olan istenen mesafeyi koruma yöntemi olarak tanımlanır. Mesafe yönetiminin nasıl yapıldığı, sürüş karakteristikleri, konvoyun kararlılığı, trafik akışının kararlılığı gibi araç ve yol parametrelerini etkilerken aynı zamanda araçtaki sürücünün güvenlik ve konfor algısını da etkiler. Sabit takip aralığı yöntemi, sabit takip süresi yöntemi ve değişken takip süresi yöntemi olmak üzere üç farklı yöntem vardır. Sabit takip aralığı ve sabit takip süresi yöntemleri, en çok tercih edilen mesafe kontrol yöntemleridir. [18].

2.4.1.1 Sabit Takip Aralığı Yöntemi

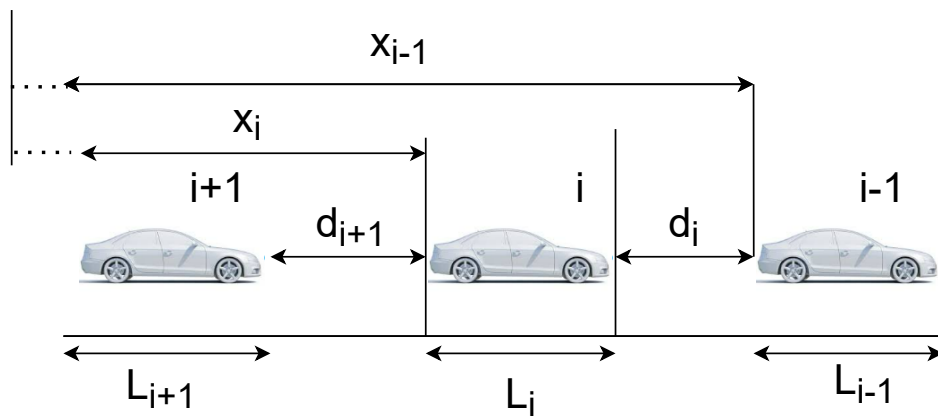
Sabit takip aralığı yöntemi incelendiğinde, mesafe yönetiminin bir alt kümesidir ve varsayılan değer $t_{ts,i} = 0$ saniyedir. Matematik denklemleri (2.1) denklemindeki gibidir:

$$d_{r,i} = x_i \quad (2.1)$$

Bu yöntemde, araç hızına göre aralığın değiştirilmesi gerektiği için gerçek uygulamalarda kullanılamaz. Bu yöntem aynı zamanda, konvoy kararlılık sorunlarına da neden olur [19].

2.4.1.2 Sabit Takip Süresi Yöntemi

Bu yöntemde araçlar arasında istenilen mesafe aracın hızına göre doğrudan değişmektedir. Araç hızlandıkça araç ile önündeki araç arasındaki mesafe artar. Basit bir yöntem olduğu için en çok tercih edilen mesafe yönetimi yöntemidir.



Şekil 2.8 Araçlar arası mesafe gösterimi

Şekil 2.8’de araçlar arası mesafeler gösterilmektedir. Burada i araç indeksini, x_i , i aracının konumunu, L_i , i aracının uzunluğunu ve d_i , $i - 1$ aracının arkası ile i aracının önü arasındaki mesafeyi göstermektedir.

Sabit takip süresi yaklaşımına göre araçlar arası istenen mesafe(2.2) denklemindeki gibi yazılabilir:

$$d_{r,i}(t) = r_i + t_{hd}v_i(t) \quad (2.2)$$

burada r_i araçlar arası istenen güvenli mesafeyi, v_i , i aracının hızını, t_{hd} takip süresini ifade etmektedir. Takip süresi, i numaralı aracın, $i - 1$ numaralı aracın bulunduğu konuma ulaşmak için gereken süredir, bu süre boyunca i numaralı araç sabit bir hızla seyir halindedir. Araçlar arası mesafe hatası $e_i(t)$, (2.3) denklemindeki gibi tanımlanabilir:

$$e_i(t) = d_i - d_{r,i}(t) \quad (2.3)$$

(2.3) denklemini açık halde (2.4) denklemindeki gibi düzenlenebilir:

$$e_i(t) = (x_{i-1}(t) - x_i(t) - L_i) - (r_i + t_{hd}v_i(t)) \quad (2.4)$$

Bu tezde kullanım kolaylığı ve kontrol sisteminin tasarımında standart olması nedeniyle araç boyutları $L_i = 0$ olarak verilmiştir.

2.4.1.3 Değişken Takip Süresi Yöntemi

Düşük hızlar için geliştirilen değişken takip aralığı, yüksek hızlar ve daha kısa boşluklar için aynı dinamik yanıtı sağlar. Değişken zaman boşluğu ve doğrusal olmayan politikalar, son yıllarda daha esnek stratejileri nedeniyle dikkat çekmektedir. İlk olanlar, farklı amaçlara göre istenen zaman boşluğunu değiştirmeyi önerirken, ikinciler ego-hızı gibi diğer değişkenler arasında doğrusal olmayan bir fonksiyon önermektedir [20].

3.1 Literatür Araştırması

Arem ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen çalışmada, kooperatif adaptif seyir kontrolü sistemlerinin trafik akışı özellikleri üzerindeki etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Bu kapsamlı çalışma, araçların birbirleriyle etkileşimde bulunarak ve işbirliği yaparak trafik akışını daha verimli ve güvenli hale getirmesinin potansiyel sonuçlarını araştırma hedefine odaklanmıştır. Kooperatif adaptif seyir kontrolü, araçların birbirleriyle iletişim kurmasını ve bir aracın diğer araçların hız ve mesafesini daha etkili bir şekilde tahmin etmesini sağlayan yenilikçi bir teknoloji olarak öne çıkmaktadır.

Bu kapsamda, çalışmanın amaçları arasında kooperatif adaptif seyir kontrol sisteminin trafik yoğunluğu, trafik akışı hızı, trafik sıkışıklığı ve güvenlik gibi trafik akışı özellikleri üzerindeki etkilerini anlamak, bu teknolojinin trafik tıkanıklığını azaltma potansiyelini değerlendirmek ve gelecekteki ulaşım sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlamak bulunmaktadır. Araştırmacılar, bu teknolojinin kullanımının trafik akışı üzerindeki olumlu ve olumsuz etkilerini ayrıntılı bir şekilde analiz ederek, toplu taşıma ve bireysel sürüş deneyimleri üzerindeki etkilerini de değerlendirebilirler [21].

Wang ve diğerleri tarafından yürütülen çalışma, literatüre KASK teknolojisinin dinamik ve deneysel bir bakış açısını sunarak, bu alandaki bilgi birikimine katkı sağlamaktadır. Çalışma, KASK teknolojisinin belirli bir konu veya açıdan nasıl ele alındığını, nasıl tasarlandığını ve deneysel olarak nasıl değerlendirildiğini detaylı bir şekilde anlamamıza yardımcı olmuştur. Bu tür çalışmalar, bilgi birikime yeni bakış açıları, yöntemler veya bulgular ekleyerek, bir teknolojinin gelişimine ve uygulanmasına daha fazla anlayış ve içgörü kazandırabilir. Wang ve diğerleri tarafından yürütülen bu çalışmanın, KASK teknolojisinin dinamik ve deneysel boyutlarına odaklanarak, alandaki mevcut bilgiye değerli bir katkı sağladığı belirtilmektedir [22].

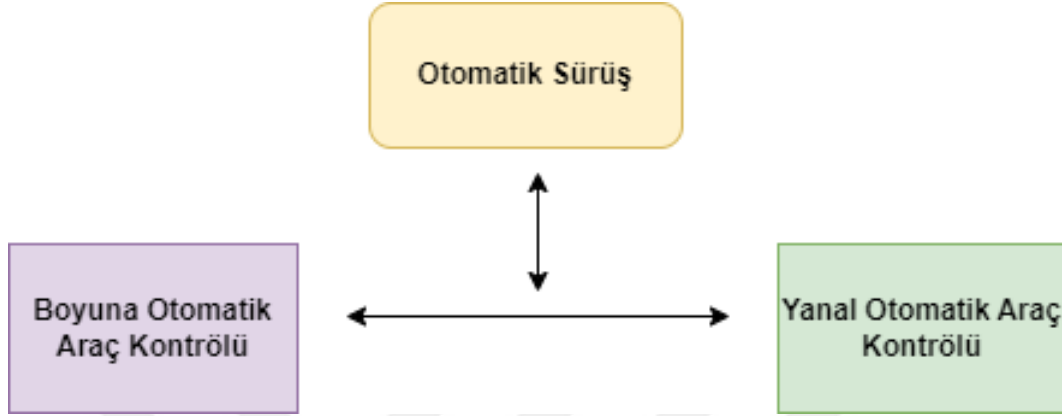
Emirler ve diğerleri tarafından yürütülen çalışmada, gürbüz kooperatif adaptif seyir kontrol sistemleri tasarlamak, parametre uzayında değerlendirmek, trafik akışını iyileştirmek, güvenlik ve verimliliği artırmak ve otomatik kontrol tekniklerini kullanarak bu tür sistemlerin değerlendirilmesi ele alınmıştır [23]. Bu çalışma, KASK sistemlerinin sağlamlığını ve güvenilirliğini artırmak amacıyla tasarlanan bir yaklaşımı temsil etmektedir. gürbüz tasarım, sistem üzerinde olası belirsizliklere ve değişkenlere karşı dirençli olma yeteneği sağlar. Parametre uzayında değerlendirme, KASK sistemlerinin farklı parametre kombinasyonlarına nasıl tepki verdiğini anlamak için önemli bir adımdır. Çalışma, trafik akışını iyileştirmeyi ve güvenlik/verimlilik dengesini optimize etmeyi hedefler. Otomatik kontrol tekniklerinin kullanımı, sistem performansını analiz etmek ve optimize etmek için gelişmiş matematiksel yöntemleri içerir. Bu tür bir yaklaşım, otomotiv sektöründe güvenli ve etkili otonom sürüş sistemlerinin geliştirilmesi açısından önemlidir.

Kakan C. Dey ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen çalışma, iletişim, sürücü özellikleri ve kontrolleri konularında kooperatif adaptif seyir kontrolü sistemini inceleyen ve özellikle kooperatif adaptif seyir kontrolü teknolojisinin farklı yönlerini ele almayı amaçlayan bir tür çalışmadır. Bu araştırmalar, KASK teknolojisinin çeşitli yönlerini derinlemesine inceleyerek, bu teknolojinin etkilerini ve potansiyelini daha iyi anlamamıza yardımcı olmayı amaçlamaktadır. Özellikle iletişim, sürücü özellikleri ve kontrol mekanizmaları bağlamında yapılan bu çalışma, KASK teknolojisinin kullanımıyla ilgili kritik unsurları ele alarak, bu teknolojinin trafik akışı, güvenlik ve verimlilik üzerindeki etkilerini anlamaya yönelik önemli bir adım atmaktadır. Bu şekilde, gelecekteki ulaşım sistemlerinin geliştirilmesine ve güvenliğinin artırılmasına katkıda bulunmayı hedeflemektedir [24].

Ploeg ve diğerleri tarafından yürütülen bu çalışma, literatüre kooperatif adaptif seyir kontrolü teknolojisinin tasarımı ve etkileri konusunda kapsamlı bir bakış sunarak, bu alanda daha fazla araştırmaya ilham kaynağı olmuştur [25]. Jeroen Ploeg ve diğerleri tarafından yürütülen çalışmada, KASK sistemini tasarlamak ve deneysel olarak değerlendirmek amaçlanmıştır. Bu çalışma, KASK teknolojisinin tasarımını ve gerçek dünya uygulamalarını ele alarak, bu yenilikçi teknolojinin potansiyelini ve etkilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Bu tür çalışmalar, KASK teknolojisinin geliştirilmesine ve uygulanmasına önemli bir katkı sağlamaktadır. Aynı zamanda, bu teknolojinin trafik akışı, güvenlik ve verimlilik gibi kilit konulardaki etkilerini anlamamıza yardımcı olabilir. Deneyler ve deneysel değerlendirmeler, KASK teknolojisinin gerçek dünya koşullarında nasıl performans gösterdiğini anlamak için kritik bir araçtır.

3.2 Araç Modellemesi

Otomatik sürüş kontrol katmanı, Şekil 3.1’de gösterildiği gibi boyuna ve yanal araç dinamik kontrolünü içerir. Genellikle, boyuna otomatik araç kontrolü kooperatif adaptif seyir kontrolüne odaklanır. Öte yandan, yanal otomatik araç kontrolü, direksiyon eyleyicisi ile otomatik yol takip kontrolünü içerir [26].



Şekil 3.1 Otomatik sürüş kontrol katmanı

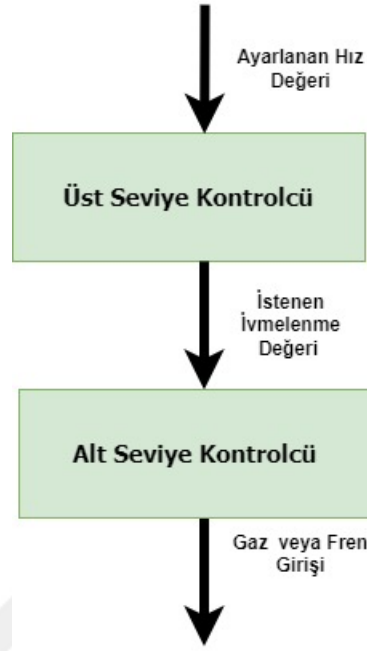
3.2.1 Boyuna Araç Modeli

Boyuna araç kontrol sistemlerinde denetleyici, araç hız kontrol mimarisini gösteren Şekil 3.2’de iki katman olarak düşünülebilecek olan üst denetleyici ve alt denetleyici olarak gösterilmektedir. Standart bir hız kontrol sisteminde aracın hızı, istenen değere ulaşmak için gaz veya fren kontrol girişi kullanılarak kontrol edilir. Bu karmaşık sistemde üst düzey denetleyici, aracın istenen ivmesini belirler, yani aracın hızını değiştirmek istediğimiz şekilde kontrol eder. Öte yandan, alt düzey denetleyiciler ise belirlenen bu hızlanmaya ulaşmak için gereken gaz ve fren müdahalelerini belirliyor.

Bir seyir kontrol sisteminde istenen ivmeye ulaşılabilmesi için alt düzey denetleyici tasarımı söz konusu olduğunda, aracın gerçek boylamsal modelini elde etmek adına çeşitli faktörler kullanılmaktadır. Bu unsurlar aracın güç aktarma organlarını, motorunu, gaz keleşini, fren dinamiklerini ve doğrusal olmayan kontrol sentezi yöntemlerini içermektedir. Bu unsurlar, alt düzey kontrol sistemlerinin daha karmaşık ve gerçekçi bir modelini oluşturarak, seyir kontrol sisteminin istenen performansı elde etmesine olanak tanır.

Üst denetleyici tasarımı, alt düzey kontrol sistemlerinin başarıyla çalıştığı durumlarda, yüksek düzeydeki kontrol tasarımı için temel bir araç modeli olarak düşünülebilir. Bu durumda, üst denetleyici, aracın genel davranışını belirleyen ve istenen hız değişimini sağlamak için alt denetleyiciye referans veren bir rol oynar.

Bu iki katmanlı denetim mimarisi, seyir kontrol sistemi tasarımında daha etkili ve güvenilir sonuçlar elde etmek için kullanılabilir.



Şekil 3.2 Seyir kontrol sistemi mimarisi

KASK sisteminin üst kontrol sistemi tasarlanırken, (3.1) denkleminde gösterilen temel boyuna araç dinamiği kullanılabilir:

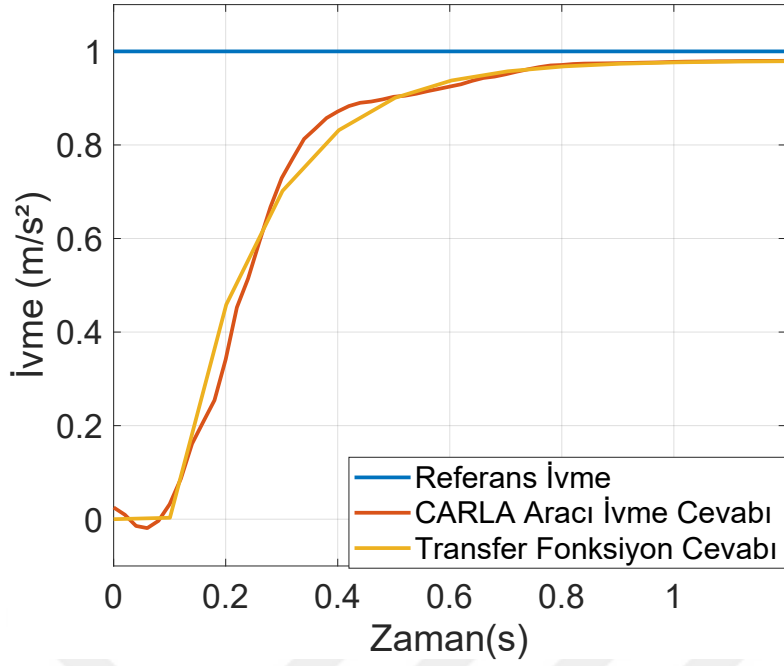
$$\tau_i \dot{a}_i + \tau_i a = k_i u_i(t - \gamma_i) \quad (3.1)$$

burada k_i model kazancını belirtir ve τ_i ve γ_i sırasıyla gaz ve fren sistemlerinin etkilerini temsil eden model zaman sabitini ve zaman gecikmesini göstermektedir.

Araç pozisyonu x_i ile kontrol girişi u_i arasındaki transfer fonksiyonu $G_i(s)$, $\ddot{x} = a_i$ olmak üzere alttaki gibi yazılabilir.

$$G_i(s) = \frac{X_i(s)}{U_i(s)} = \frac{k_i}{s^2(\tau_i s + 1)} e^{-\gamma_i s} \quad (3.2)$$

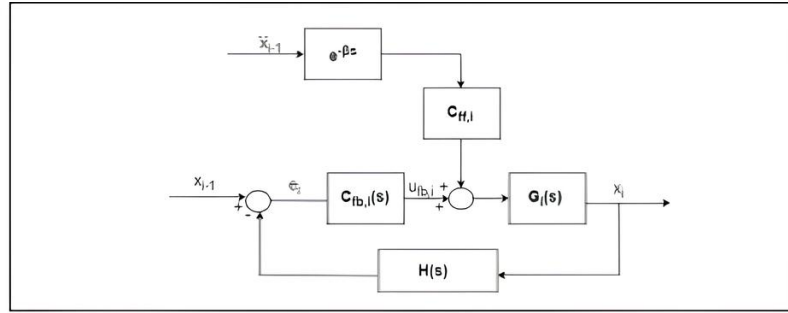
Naus vd. tarafından (3.2) denklemiyle ifade edilen transfer fonksiyonunun, aracın boylamasına dinamiği ifade edilirken elde edilen deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu gösterilmiştir [27]. Basamak ivme girişi için Şekil 3.3’de belirtilen temel araç modeli ile CARLA araç modeli sonuçları gösterilmiştir. CARLA araç modeli olarak Tesla Model 3 kullanılmıştır. Bu tezde CARLA ile uyumun sağlanması için k_i , τ_i ve γ_i sırasıyla 0.98, 0.16 ve 0.2 olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3.3 CARLA araç modeli ile model doğrulaması

3.3 Kooperatif Adaptif Seyir Kontrol Sistemi Tasarımı

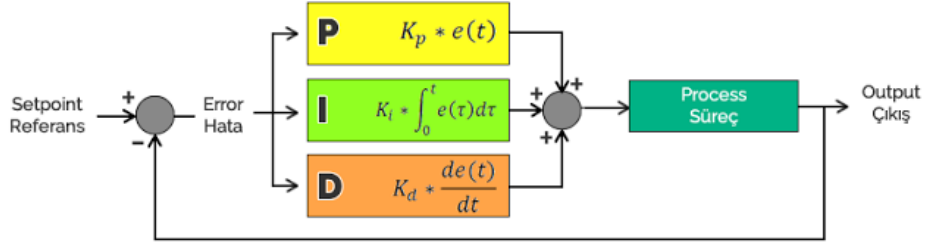
KASK sistemi tasarımı, geri beslemeli kontrol ve ileri beslemeli kontrol kısımlarından oluşmaktadır. Bölüm 2.4.1.2 Sabit Takip Süresi Yöntemi başlığı altında araçlar arası istenen mesafe ve mesafe hatası tanımlanmıştır.



Şekil 3.4 Kooperatif adaptif seyir kontrol tasarımı

3.3.1 Uygun Kontrolcü Seçimi

PID kontrol sistemi, bir kontrolcü tasarımı yöntemidir ve sistemi belirli bir referans değere getirmek veya belirli bir davranışı korumak için kullanılır. PID kontrolcüsü, oransal (P), integral (I), ve türev (D) olmak üzere üç temel terimden oluşur. Bu terimler, kontrolcünün hata sinyali üzerindeki etkilerini belirler.



Şekil 3.5 PID kontrol algoritması [12]

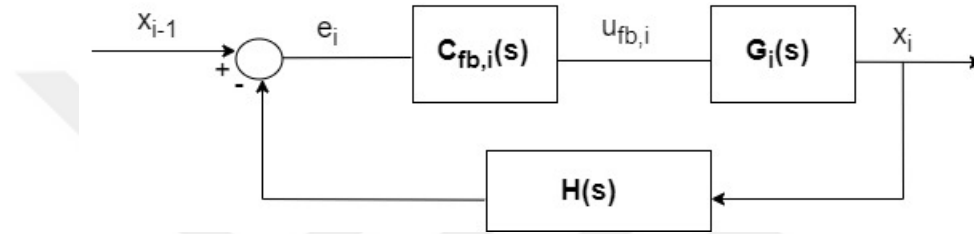
Oransal (P) Terimi , hata sinyalinin mevcut değeri ile hedef değer arasındaki farkı temsil eder. P terimi, bu farkı çarpar ve kontrol sinyali üzerinde doğrudan bir etki yapar ve oransal terim, sistemde istenen kararlılık ve tepki süresini sağlar. Integral (I) terimi, hata sinyalinin zaman içindeki değişim hızını temsil eder. Aynı zamanda sistemdeki kalıcı hataları düzeltmeye yardımcı olur ve sürekli bir hata olduğunda, integral terimi kontrol sinyalini artırır. Türev (D) terimi, hata sinyalinin zaman içindeki değişim hızını temsil eder. Aynı zamanda ani değişimlere karşı sistemde aşırı tepkiyi önlemeye yardımcı olur ve sistemde istenen kararlılık ve aşırı tepkiden kaçınma sağlar. PID kontrolcüsü, bu üç terimi kombinleyerek bir kontrol sinyali üretir. Kontrol sinyali, sistem çıkışını belirli bir referans değere getirmek veya belirli bir davranışı sürdürmek için kullanılır. PID kontrolcüsü, geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılır ve birçok endüstri alanında bulunur. (3.2) denkleminde de görüldüğü üzere araç dinamiği tip 2 bir sistemdir. Bu sebeple PID'nin integral etkisinin eklenilmesine gerek duyulmamıştır.

Kontrol sistemi olarak çoğunlukla literatürde önerilen PD kontrol yapısı seçilmiştir [23, 27, 28]. PD kontrol sistemi, aracın hızını bir hedef değere istenilen şekilde ve istenilen performans kriterleri doğrultusunda düzenlemek amacıyla kullanılır. Bu kontrol sistemi, hızdaki herhangi bir sapmayı (istenen hız ile aracın anlık hızı arasındaki farkı) ölçer ve bu sapmanın büyüklüğüne orantılı bir düzeltme uygular. Aynı zamanda, hızdaki değişimin bir türevidir, yani hızdaki değişimin ne kadar hızlı gerçekleştiğini ölçer. Bu türevsel kontrol, hızın hızlı bir şekilde istenilen değere ulaşmasını ve aynı zamanda aşırı bir aşım olmamasını sağlamak için kullanılır. Sonuç olarak PD kontrol sistemi, aracın hedef hıza hızlı bir şekilde ulaşmasını sağlarken, aşırı aşımı sınırlar.

Bu durum, aracın hızlanma ve yavaşlama süreçlerini daha düzenli ve yumuşak hale getirir. Sürücü ve yolculara daha konforlu bir sürüş deneyimi sağlanır, çünkü hız kontrolü daha dengeli ve istikrarlı bir şekilde gerçekleşir.

3.3.2 Parametre Uzayı Yöntemiyle Geri Besleme Kontrol Sistem Tasarımı

ASK ve KASK sistemlerinde ortak olarak geri beslemeli kontrol yapısı kullanılmaktadır. Araçlar arasındaki istenen konum farkının korunabilmesi için sistem, kendi aracının anlık konumu ile takip edilen aracın konumu arasındaki farkı sürekli olarak izleyerek kontrol etmektedir. Şekil 3.6’te geri beslemeli kontrol yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Geri beslemeli kontrol yapısı blok diyagramı

Şekil 3.6’te, (3.2) ile tanımlanan araç modeli $G_i(s)$ haricindeki transfer fonksiyonları alttaki gibi yazılabilir:

$$C_{fb,i}(s) = k_p + k_d s \quad (3.3)$$

$$H_i(s) = 1 + t_{hd} s \quad (3.4)$$

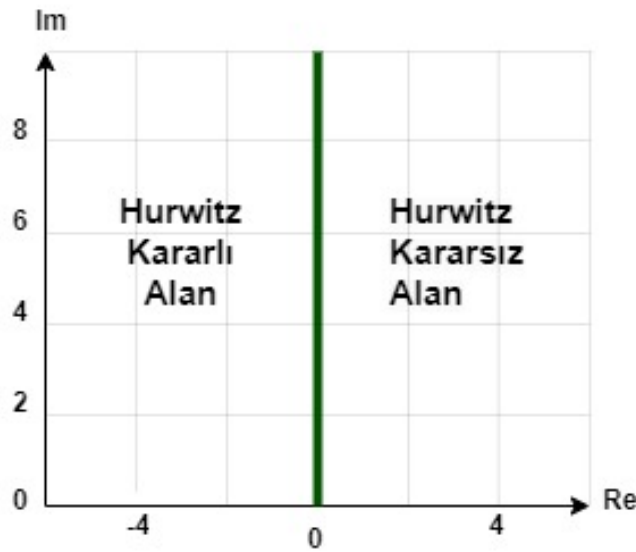
burada $C_{fb,i}$ geri beslemeli kontrolcü transfer fonksiyonunu, k_p ve k_d PD kontrol katsayılarını, $H_i(s)$ geri besleme yolu transfer fonksiyonunu ve t_{hd} takip süresini göstermektedir. PD kontrol sistemi tasarımı için parametre uzayı yöntemi kullanılmıştır. Parametre uzayı yöntemi, dayanıklı kontrol sistemi tasarımında ve parametre belirsizliklerinin kontrol sistemi analizinde sıklıkla kullanılan çok yönlü bir yöntemdir [29, 30]. Burada, alt sistemlerden kaynaklanan γ_i gecikmesi belirsiz olduğunda, PD kontrol katsayılarını bulmak için bir parametre uzayı yöntemi kullanılır.

Geri beslemeli kontrol sistemi karakteristik denklemi alttaki gibi elde edilebilir:

$$p(s, k_p, k_d, \gamma) = \tau s^3 + (k_d t_{hd} e^{-\gamma s} + 1) s^2 + (k_p t_{hd} + k_d) e^{-\gamma s} s + k_p e^{-\gamma s} \quad (3.5)$$

Hurwitz kararlılık incelenirse , kontrol modeli belirsiz parametre kümesini $q = [q_1, q_2, \dots, q_n] \in Q$ olarak tanımlanır. Benzer şekilde, tasarlanabilir veya ayarlanabilir tüm kontrolör parametrelerini içeren kümesi $k = [k_1, k_2, \dots, k_n] \in K$ olarak tanımlanır.

Belirsiz kontrolör parametreleri q kullanımı, mevcut bir kontrolörün dayanıklılık analizine karşılık gelirken, belirsiz kontrolör parametreleri k kullanımı, sağlam bir kontrolör tasarımını veya sağlamlık için kontrolör kazançlarını ayarlama işlemleriyle ilgilidir. Model ve kontrolör parametrelerinin kombinasyonu q ve k , kazanç uyarılama kontrolü için faydalıdır. Bir sistemde Hurwitz kararlı olmak için, karakteristik polinomun köklerinin karmaşık düzlemde sol yarıda yer alması yeterlidir.



Şekil 3.7 Karmaşık düzlemde Hurwitz kararlı bölgeler

Şekil 3.7’te görülen Hurwitz kararlılık alanı, tek bir sınırdan (sanal eksen) oluşmaktadır. Hurwitz kararlılığında bir kökün sol yarı düzlemde sağ yarı düzleme geçip geçmediği, sınır geçiş teorisi ile açıklanabilir.

Örneğin model ve kontrolör parametre belirsizlikleri göz önüne alındığında, karakteristik denklem:

$$p(s, q, k) = a_{n+m}(q, k)s^{n+m} + a_{n+m-1}(q, k)s^{n+m-1} + \dots + a_1(q, k)s + a_0(q, k) \quad (3.6)$$

burada n , modelin derecesini, m ise kontrolörün derecesini temsil eder.

Hurwitz kararlılığı, karakteristik denklemin $p(s, q, k) = 0$ tüm köklerinin sol yarı düzlemde yer almasını gerektirir.

Herhangi bir $q \in Q$ ve $k \in K$ için $p(s, q, k)$ polinom ailesi ancak ve ancak şu durumlarda kararlıdır:

1. Her $q \in Q$ ve $k \in K$ için en az bir kararlı polinom $p(s, q, k)$ mevcutsa,
2. Tüm $\omega \geq 0$ için $q \in Q$ ve $k \in K$ için $j\omega \notin \text{kök}\{p(s, q, k)\}$.

Hurwitz kararlı karakteristik polinom ile başlandığında, köklerin $p(s, q, k)$ polinomundaki belirsizlik nedeniyle ve kontrol katsayıları $k \in K$ değişiklikleri nedeniyle sanal eksen geçmediği sürece Hurwitz kararlılığı korunur. Eğer frekans ω tarafından parametrelenen $p(j\omega, q, k) = 0$ 'ın köklerini çözer ve çizersek, seçilen parametre uzayında kararlı ve kararsız bölgeler arasında bir sınır elde ederiz. $p(j\omega, q, k) = 0$ karmaşık bir denklem olduğundan denklemin gerçekte ve sanal kısımları ayrı ayrı sıfıra eşitlenerek alttaki gibi yazılabilir:

$$\text{Re}\{p(j\omega, q, k)\} = 0 \quad (3.7)$$

$$\text{Im}\{p(j\omega, q, k)\} = 0 \quad (3.8)$$

Zaman gecikme terimi $e^{-\gamma s}$ nedeniyle, karakteristik denklem sonsuz sayıda kök içerir [31, 32]. Bu kökler sanal eksen üç durumda geçebilir:

(i) Gerçek Kök Sınır (GKS):

Gerçek kök, sanal eksen geçebilir ($s = j\omega, \omega = 0$), bu durum parametre uzayında gerçek kök sınırını (GKS) oluşturur.

(ii) Karmaşık Kök Sınırı (KKS):

Karmaşık eşlenik kök olarak $\omega \in (0, \infty)$ için sanal eksenini geçebilir ve karmaşık kök sınırını (KKS) oluşturur.

(iii) Sonsuz Kök Sınırı (SKS):

Frekans sonsuza giderken sanal eksenini geçebilir ve sonsuz kök sınırını (SKS) oluşturur.

Zaman gecikmeli karakteristik denklem (3.5) kullanılarak sabit zaman gecikmesi değeri γ_i için k_p, k_d sınırları çizdirilerek parametre uzayında çözüm elde edilebilir. Buna göre GKS denklemi $s = 0$ için alttaki gibi elde edilir:

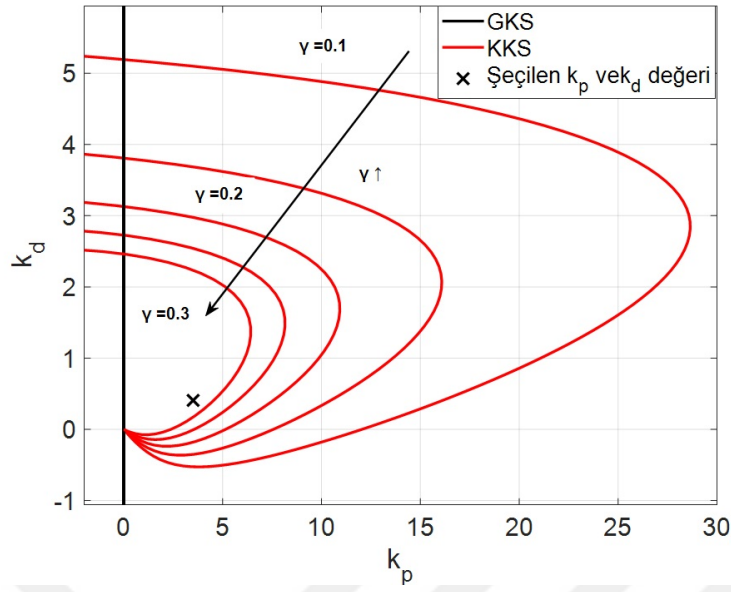
$$k_p = 0 \quad (3.9)$$

(3.9) denklemi k_d eksenini temsil eder ve zaman gecikmesinden bağımsızdır. KKS denklemi için (3.5) denklemi kullanılarak elde edilir. KKS denklemi gerçek ve sanal kısımlarına göre ayrılarak bilinmeyen iki kontrol kazancı için çözdürüldüğünde frekansın bir fonksiyonu olarak kontrol katsayısı denklemleri alttaki gibi elde edilir:

$$k_p(\omega) = \frac{\omega^2(\cos(\gamma\omega) + t_{hd}\omega \sin(\gamma\omega) - \tau\omega \sin(\gamma\omega) + t_{hd}\omega^2 \cos(\gamma\omega))}{k_i(t_{hd}^2\omega^2 + 1)} \quad (3.10)$$

$$k_d(\omega) = \frac{\omega(\sin(\gamma\omega) - t_{hd}\omega^2 \cos(\gamma\omega) + \tau\omega^2 \cos(\gamma\omega) + t_{hd}\omega^3 \sin(\gamma\omega))}{k_i(t_{hd}^2\omega^2 + 1)} \quad (3.11)$$

(3.10) ve (3.11) denklemleri elde edilirken zaman gecikmesi üstel fonksiyonu Euler formülü kullanılarak trigonometrik sinüs ve kosinüs fonksiyonu cinsinden yazılmıştır. Görüldüğü gibi KKS zaman gecikmesine, takip süresine, araç modeli zaman sabitine göre değişmektedir. Bu problem için SKS'den parametre uzayını etkilenen bir denklem gelmemektedir. (3.9) ve (3.11) denklemleri kullanılarak Hurwitz kararlı ve kararsız bölgeler, 0.1s ile 0.3s arasında 0.05s'lik adımlarla değişen γ_i zaman gecikmesi değerleri için Şekil 3.8'teki gibi elde edilmiştir.

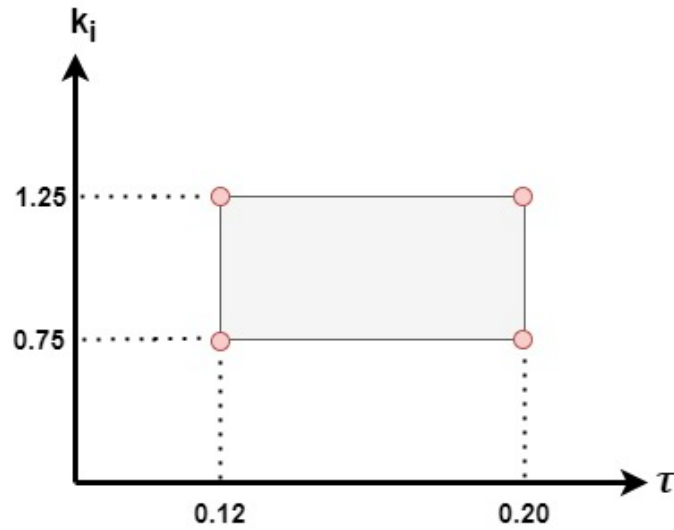


Şekil 3.8 Geri beslemeli kontrol sistemi için parametre uzayı çözüm alanı

Zaman gecikmesi değeri artıkcı Hurwitz kararlı bölgesinin alanının azaldığı görülmektedir. Benzetim çalışmalarında kullanılmak üzere Hurwitz kararlı bölgesinden k_p ve k_d değeri sırasıyla 3.506 ve 0.407 olarak seçilmiştir.

3.3.3 Dayanıklı Geri Besleme Kontrol Sistem Tasarımı

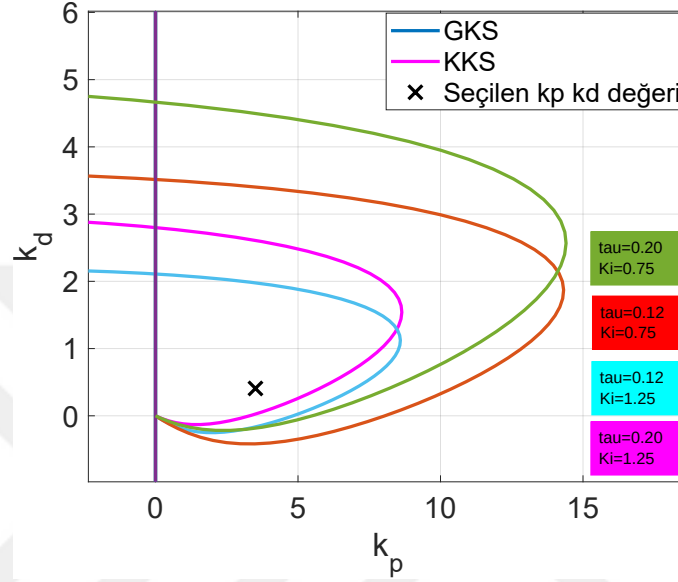
Denklem (3.10) ve denklem (3.11) kullanılarak elde edilen τ ve k_i değeri, nominal değeriinin $\pm\%20$ sinini alınarak Şekil 3.9’da gösterilen dört farklı bölge oluşturmuştur. Bu dört köşeli parametre uzayı, Şekil 3.10’nda görsel olarak ifade edilmiştir.



Şekil 3.9 Belirsiz parametre kutusu

Elde edilen bu çözüm alanı, kontrol sistemi parametrelerinin belirli bir aralık içinde değişebileceği ve sistem performansının bu değişikliklere nasıl tepki verebileceğini anlamak açısından önemlidir. Ayrıca, k_p değerinin 3.506 ve k_d değerinin 0.407 verildiğinde uygunluğu gözlemlenmiştir.

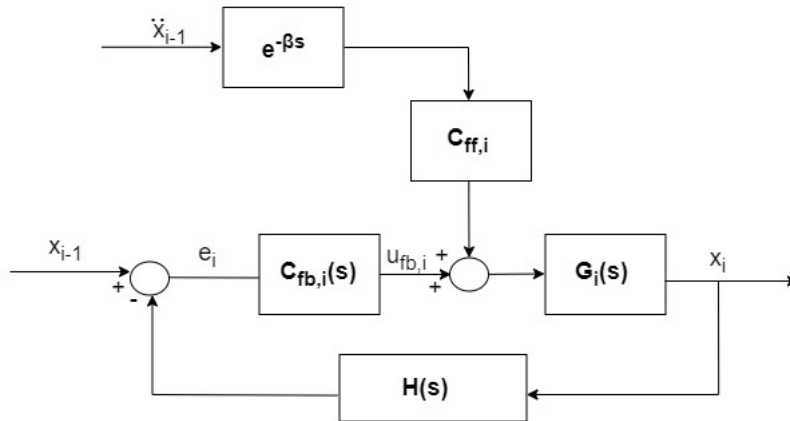
Bu çözüm alanında zaman gecikmesi γ_i değeri 0.2, araç modemleri arasındaki zaman gecikmesini gösteren β değeri 0.02 alınmıştır.



Şekil 3.10 Dört köşe parametre uzayı çözüm alanı

3.3.4 Kooperatif Adaptif Seyir Sistemi Tasarımı

İleri beslemeli kontrol sisteminin amacı, geri beslemeli kontrolcüye ek olarak öndeki aracın ivme bilgisini de kullanarak kontrol performansında iyileşme sağlamaktır. Şekil 3.11'te ileri besleme kontrolünde dahil olduğu tüm kooperatif adaptif seyir kontrol sistem blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 3.11 Kooperatif adaptif seyir kontrol sistemi blok diyagramı

İleri besleme kontrol tasarımında mesafe hatasını e_i 'yi teorik olarak sıfır yapacak bir yaklaşım kullanılabilir[23].

Bunu sağlayabilmek için öncelikle, e_i ve x_{i-1} arasındaki transfer fonksiyonu Şekil 3.11'teki blok diyagramı göz önüne alınarak (3.12) denklemindeki gibi yazılabilir:

$$\frac{E_i}{X_{i-1}} = \frac{1 - s^2 C_{ff,i} G_i(s) H_i(s) e^{-\beta s}}{1 + C_{fb,i}(s) G_i(s) H_i(s)} \quad (3.12)$$

burada $C_{ff,i}$ ileri beslemeli kontrolcüyü, β araç modelleri arasındaki zaman gecikmesini göstermektedir. Tasarım esnasında sistem üzerindeki zaman gecikmesinin etkisi $e^{-\beta s}$ değeri dikkate alınmazsa, sıfır mesafe hatası için (3.12) transfer fonksiyonu dikkate alınarak (3.13) denklemindeki eşitlik yazılabilir:

$$1 - s^2 C_{ff,i} G_i(s) H_i(s) = 0 \quad (3.13)$$

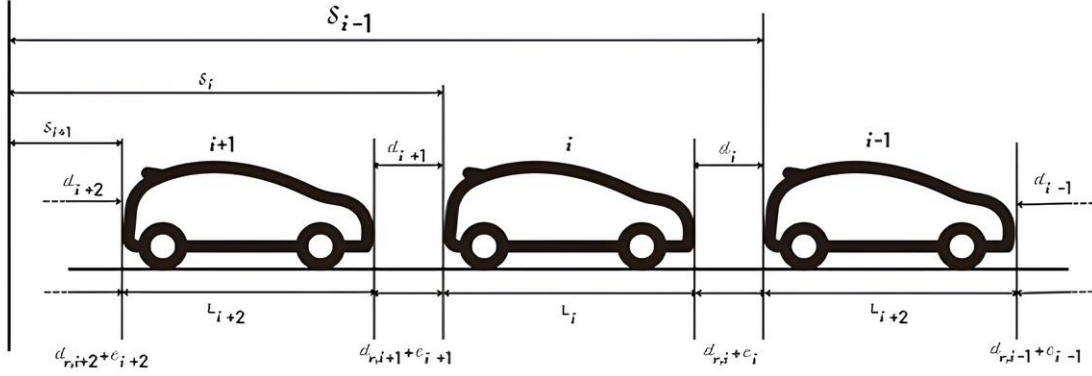
Buradan ileri beslemeli kontrolcü (3.14) denklemindeki gibi tespit edilebilir:

$$C_{ff,i} = \frac{1}{s^2 G_i(s) H_i(s)} \quad (3.14)$$

3.4 Konvoy Kararlılığı

Konvoy kararlılığı, ardışık araç konvoylarının kararlılığıyla ilgilenir. Bir konvoyun kararlılığı, konvoy liderinin hızlanması ve yavaşlaması nedeniyle oluşan mesafe hatalarının, trafik akışı yönünde diğer konvoy araçlarına aktarıldığında büyümemesi anlamına gelir. Sistem, konvoy kararlılığına sahip olduğunda, trafikte meydana gelebilecek ani etkilerin önüne geçilmesine katkı sağlar. Bu durum, sistem tarafından mesafe yönetiminin etkili bir şekilde gerçekleştirilememesi nedeniyle ortaya çıkabilecek trafik yoğunluğunu azaltır. Homojen ve heterojen olmak üzere, konvoy kararlılığı iki farklı elden incelenebilir. Homojen olan konvoy kararlılığı, aynı tipteki araçların oluşturduğu konvoyun kararlılığını ifade eder. Başka bir deyişle, konvoyda bulunan tüm araç dinamikleri, mesafe yönetim yöntemleri, kontrolcüler vb. aynıdır. Bu sebepten dolayı, takip davranışını tanımlayan bir transfer fonksiyonu bütün araçlar için aynı olacaktır [33].

Heterojen konvoy kararlılığında, isminden de anlaşılacağı üzere araçlar aynı değildir. Diğer bir deyişle, araçlarda kullanılan takip mesafe yönetim yöntemleri, dinamikleri, kontrolcüler ve karar algoritması birbirinden farklıdır.



Şekil 3.12 Konvoy kararlılığı gösterimi

Bu farklar, gerçek trafik koşullarında heterojen bir konvoyun kararlılığının daha iyi bir şekilde gösterilmesine olanak tanır [34]. Adaptif seyir kontrol ve kooperatif adaptif seyir kontrol sistemli araçlarda konvoy kararlılığına ilişkin bazı ana konular şunlardır [35]:

- Araç iletişimi ve sensör paylaşımı ile konvoy içindeki araçlar; kendi konumlarını, hızlarını, ivmelerini ve diğer önemli bilgileri birbirleriyle paylaşabilir. Bu bilgi paylaşımı, diğer araçların çevresel durumları hakkında bilgi sahibi olmayı ve buna göre tepki vererek konvoyun kararlılığını artırmayı sağlar.
- Araçlar arasındaki güvenli mesafeyi korumak ve konvoy içindeki araçların hızlarını uyumlu bir şekilde ayarlamak için adaptif hız ve mesafe kontrolü kullanılır. Bu, ani frenlemeleri veya hızlanmaları önleyerek konvoyun kararlılığını artırır.
- Konvoy içindeki araçlar, rota bilgilerini ve yol durumuyla ilgili bilgileri paylaşarak daha etkili, koordineli bir şekilde seyahat edebilirler. Bu, trafik akışını daha iyi tahmin etmeyi ve yol koordinasyonunu sağlamayı amaçlar.
- Konvoyun kararlılığını artırmak için dağıtılmış kontrol stratejileri kullanılabilir. Bu durum, her aracın kendi kararlarını almasına ve diğer araçlarla koordineli bir şekilde çalışmasına izin verir.
- ASK ve KASK sistemler, çevresel koşullara (örneğin, yol durumu, hava koşulları) duyarlı olabilir ve bu koşullara uygun tepkiler verebilir.

- Konvoy içindeki bir aracın aniden durması veya bir hata yapması durumunda, diğer araçlar buna uygun bir şekilde tepki verebilir ve güvenli bir duruma geçebilir.
- Konvoy kararlılığı sağlayan ASK ve KASK sistemler, gelecekteki otonom araçlar ve akıllı ulaşım sistemleri için önemli bir alanı temsil etmektedir. Bu sistemler, trafik akışını iyileştirmek, güvenliğini artırmak ve enerji verimliliğini optimize etmek gibi çeşitli avantajlar sunabilir.



Kooperatif Adaptif Seyir Kontrol Sistemi Tasarımının CARLA-MATLAB/Simulink Ortamında Benzetimi

CARLA otonom sürüş sistemlerinin geliştirilmesini, eğitimi ve onaylanmasını desteklemek için geliştirilen açık kaynaklı bir benzetim ortamıdır [36]. Bu tezde MATLAB/Simulink kullanılarak geliştirilen ASK ve KASK sistemleri CARLA benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir.

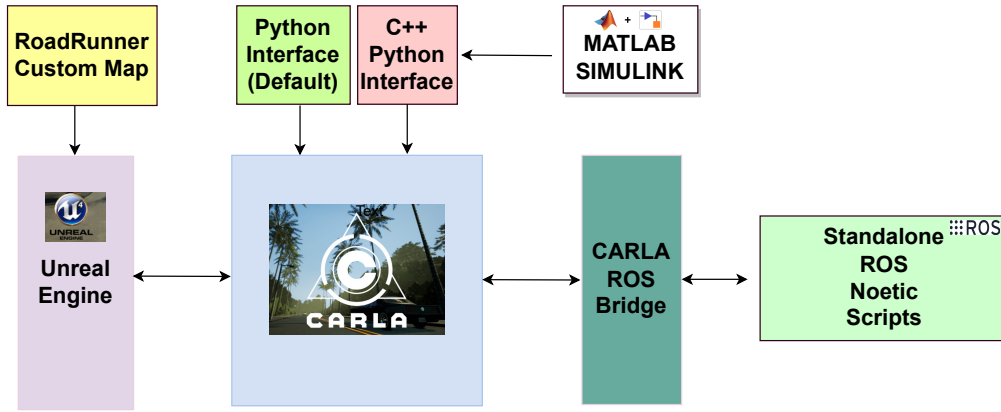
4.1 Kontrol Sistemi Testleri için CARLA MATLAB/Simulink Benzetim Ortamının Hazırlanması

CARLA, görsel oluşturma ve fiziksel benzetim senaryolarında esneklik ve gerçekçilik için inşa edilmiştir. Görselleştirme için Unreal Engine 4 (UE4) grafik motorunu kullanır. Açık kaynak koduna ve protokollere ek olarak, CARLA açık dijital varlıklar (kentsel düzenler, binalar, araçlar) sağlar ve bunlar serbestçe kullanılabilir. CARLA dinamik bir dünyayı simüle eder ve bu dünya ile onunla etkileşime giren aracı arasında basit bir arayüz sağlar. Bu özelliği desteklemek için CARLA, sunucunun benzetimi çalıştırdığı ve sahneyi oluşturduğu bir sunucu-istemci sistemi olarak tasarlanmıştır. CARLA programı hakkında bazı temel bilgiler şunlardır:

- CARLA, açık kaynaklı bir projedir ve kullanıcılar tarafından ücretsiz olarak indirilebilir ve kullanılabilir.
- CARLA, otonom araçların benzetimini gerçekleştirmek için tasarlanmıştır. Otonom sürüş algoritmalarının nesne algılama, yol takibi ve karar verme gibi yeteneklerini test etmek ve geliştirmek için kullanılabilir.
- CARLA, yapay zeka ve makine öğrenimi araştırmaları için uygun bir platform sağlar. Özellikle, benzetim ortamı üzerinde çeşitli görevler üzerinde çalışma ve algoritmaları test etme olanağı sunar.

- CARLA, esnek ve genişletilebilir bir yapıya sahiptir. Bu, kullanıcıların kendi senaryolarını oluşturmalarını, özel haritalar eklemesini ve benzetim ortamını ihtiyaçlarına göre özelleştirmesini sağlar.
- CARLA, aktif bir geliştirici topluluğuna sahiptir. Kullanıcılar, forumlar ve diğer platformlar aracılığıyla sorularını sorabilir, bilgi alışverişinde bulunabilir ve projeye katkıda bulunabilirler.

CARLA benzetim ortamı, ROS tabanlı kontrol mimarilerini ile etkileşim sağlamak için CARLA ROS Bridge adı verilen bir arabirim bulundurmaktadır. Benzer çalışmalarda da bu yapının kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu tezde CARLA'da mevcut olan TESLA Model 3 aracının ilgili parametreleri kullanılmıştır[37, 38]. Şekil 4.1'da Unreal Engine tabanlı CARLA ortamı ile bu çalışmada geliştirilen ROS tabanlı araç kontrol mimarisinin haberleşme yapısı gösterilmiştir.



Şekil 4.1 CARLA ortamı sinyal akışı

RoadRunner yazılımı, otonom sürüş sistemlerini sanal ortamlarda test etmek için kullanılan interaktif bir editördür. Bu yazılım, 3 boyutlu sahnelerin tasarlanmasına olanak tanır ve gerçekçi, karmaşık ve bağlantıları olan yol ağları oluşturmanızı sağlar. Yolların özelinde kavşak, köprü, otoyol gibi unsurlar eklenebilirken ayrıca işaretler, sinyaller, koruma bariyerleri ve yol hasarı gibi detaylar da eklenebilir. Bitki örtüsü, binalar ve diğer 3D modelleri de kolaylıkla yerleştirmek mümkündür.

RoadRunner, lidar nokta bulutu, hava görüntüsü ve GIS verilerini görselleştirmeyi destekler. Ayrıca, yol ağlarını içe ve dışa aktarabilme özelliği sayesinde OpenDRIVE® formatını kullanarak verileri entegre edebilirsiniz. Oluşturulan 3D sahneler, FBX®, OpenSceneGraph, OBJ formatlarında dışa aktarılabilir. Bu dışa aktarılan sahneler, birçok otonom sürüş simülatörü ve oyun motorunda kullanılabilir, örneğin CARLA, Vires VTD, NVIDIA DRIVE Sim®, Baidu

Apollo®, Unity®, ve Unreal® Engine gibi. Bu sayede, RoadRunner ile tasarlanan sanal ortamlar farklı simülasyon ve test platformlarında kullanılabilir [39].

Unreal Engine, CARLA'nın temelini oluşturan grafik motorudur. Bu motor, gerçekçi 3D grafikler ve detaylı fizik simülasyonları gibi özelliklerle bilinir. CARLA, Unreal Engine'in bu özelliklerini kullanarak gerçek dünya senaryolarını simüle etme kabiliyetine sahiptir. Bu sayede, otonom araçlar için geliştirilen yazılımların, algoritmaların ve sensörlerin çeşitli koşullarda test edilmesi mümkün olur.

CARLA Simulator, ROS ile etkileşimde bulunmak için önceden tasarlanmış bir ROS köprüsü sağlar. Bu köprü, CARLA tarafından simüle edilen ortamda bulunan bilgileri ROS üzerinden yayınlamasına ve ROS üzerinden CARLA'ya komutlar gönderilmesine olanak tanır. Otonom araçların ve diğer robotik sistemlerin CARLA tarafından oluşturulan benzetim ortamında etkili bir şekilde çalışmasını sağlar.

4.2 Tustin Metodu Kullanılması

Tustin metodu (ya da Bilineer dönüşüm), sürekli zamanlı sistem modelini ayrık sistem modeline dönüştürmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, sürekli zamanlı diferansiyel denklemleri, sayısal birleşik kontrol sistemlerinin tasarımında kullanılan fark denklemlerine dönüştürmeyi amaçlar.

Genellikle, sürekli zamanlı bir sistemi sayısal bir sistem modeline çevirmek amacıyla Laplace dönüşümü kullanılır. Tustin metodu, Laplace dönüşümündeki s değişkenini zamanda gerçekleşen bir değişken olan z 'ye dönüştürür. Tustin metodunu kullanarak bir sürekli zamanlı aktarım fonksiyonunu sayısal bir sistem aktarım fonksiyonuna dönüştürmek için şu adımlar takip edilir:

1. Sürekli zamanlı aktarım fonksiyonunu Laplace dönüşümü ile alınır.
2. Laplace dönüşümündeki s 'yi Tustin dönüşümü ile z değişkenine dönüştürülür.
3. Tustin dönüşümü sonucunda elde edilen sayısal sistem modelini ifade eden fark denklemlerini yazılır.

Tustin dönüşümü aşağıdaki 4.1 denklemindeki formülle ifade edilir:

$$s = \frac{2}{T_s} \frac{z - 1}{z + 1} \quad (4.1)$$

burada, T_s örnekleme periyodu (sampling period) olarak bilinir.

Tustin metodu, özellikle PID kontrolcüsü gibi sayısal kontroller tasarlanırken kullanılır. Ancak, bu metotla elde edilen sayısal modelin bazı özellikleri dikkate alınmalıdır, çünkü bu dönüşüm sistem özelliklerini etkileyebilir.

4.3 Benzetim Çalışmaları

Benzetim çalışması, genellikle gerçek dünyadaki bir durumu veya sistemi taklit etmek veya modellemek amacıyla yapılan simülasyon veya analiz çalışmalarını ifade eder. Bu tür çalışmalar genellikle matematiksel modeller veya bilgisayar tabanlı simülasyonlar kullanılarak yapılır. Bu tezde Adaptif seyir kontrol ve kooperatif adaptif seyir kontrol sistemlerinin benzetim sonuçları birbiri ile karşılaştırılmıştır.

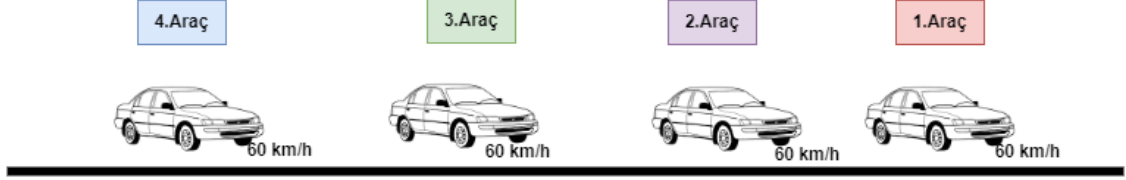
Benzetim çalışmalarında şu senaryolar ele alınmıştır.

- Benzetim Senaryosu 1: ASK ve KASK sistemlerinin konvoy dışarıdan araç dahil olmadığına karşılaştırılması
- Benzetim Senaryosu 2: ASK ve KASK sistemlerinin konvoy dışarıdan araç dahil olduğunda karşılaştırılması
- Benzetim Senaryosu 3: ASK ve KASK sistemli konvoy düzeni
- Benzetim Senaryosu 4: KASK sistemli üç araçtan oluşan konvoyun Benzetim Senaryosu 3 ile karşılaştırılması

CARLA ortamında gerçekleştirilen testler sırasında gerekli veriler toplanarak MATLAB ortamında grafik haline getirilmiştir. Benzetimlerde yolcuların konforu göz önüne alınarak ivme değerleri değerleri -4 ve $+4 \text{ m/s}^2$ arasında sınırlandırılmıştır.

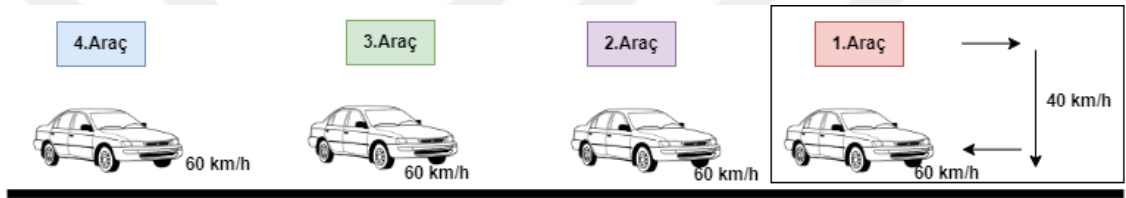
4.3.1 Benzetim Senaryosu 1: ASK ve KASK sistemlerinin konvoya dışarıdan araç dahil olmadığında karşılaştırılması

İlk benzetim senaryosunda Şekil 4.2'deki gibi dört araç aynı şeritte konvoy halinde sıralı şekilde hareket etmektedir.



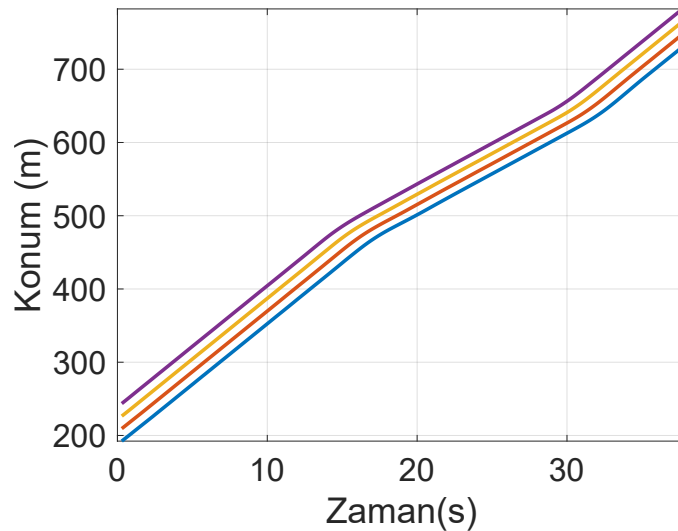
Şekil 4.2 Benzetim senaryosu 1: Lider araç hızı düşürülmeden önce

Araç başlangıç hızları 60 km/s olup, Şekil 4.3'deki gibi lider araç (1. araç) hızı 40 km/s'e düşürülmüştür. Ardından lider araç hızı, tekrar 60 km/s hıza çıkarılmıştır.



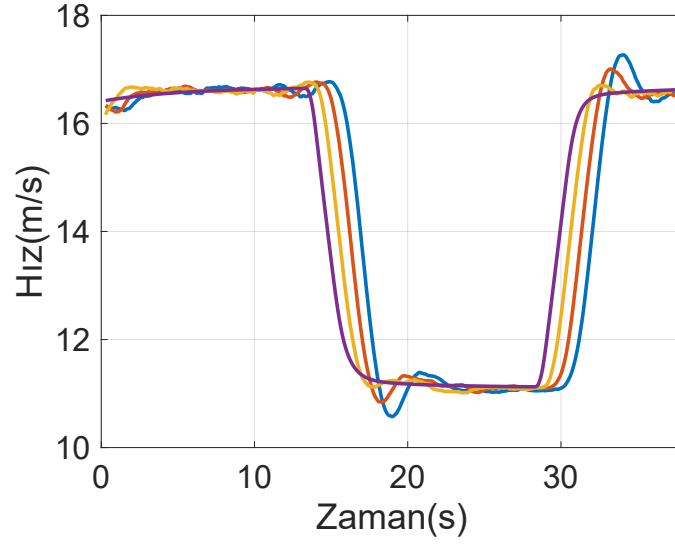
Şekil 4.3 Benzetim senaryosu 1: Lider araç hızı düşürüldükten sonra

Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 ASK sistemi kullanıldığı durumda ivme-zaman, hız-zaman, konum-zaman ve takip süresi-zaman grafikleri gösterilmiştir.

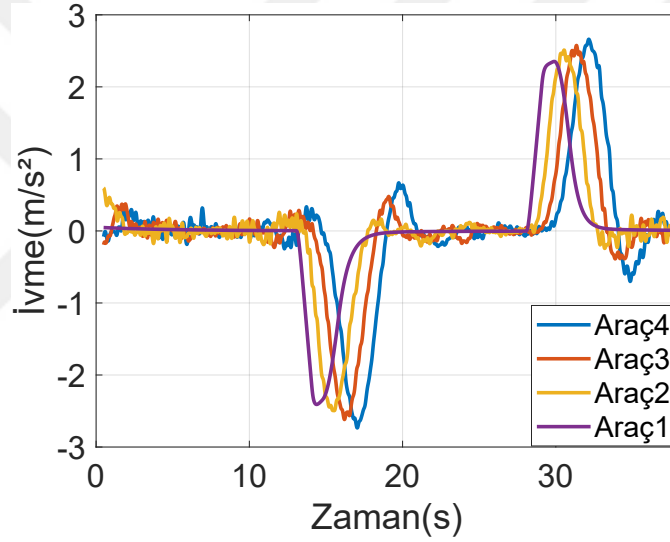


Şekil 4.4 Benzetim senaryosu 1: ASK sistem konum-zaman grafiği

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 grafiklerinde sunulan sonuçları değerlendirdiğimizde, ASK sistemindeki mutlak hız ve ivme değerlerinin konvoydaki araçlardan liderden başlayarak arkaya doğru gidildikçe arttığı gözlemlenmektedir.

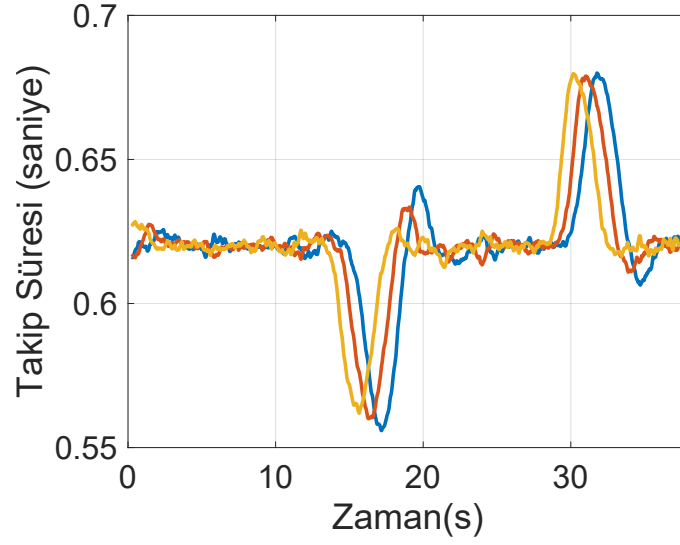


Şekil 4.5 Benzetim senaryosu 1: ASK sistem hız-zaman grafiği



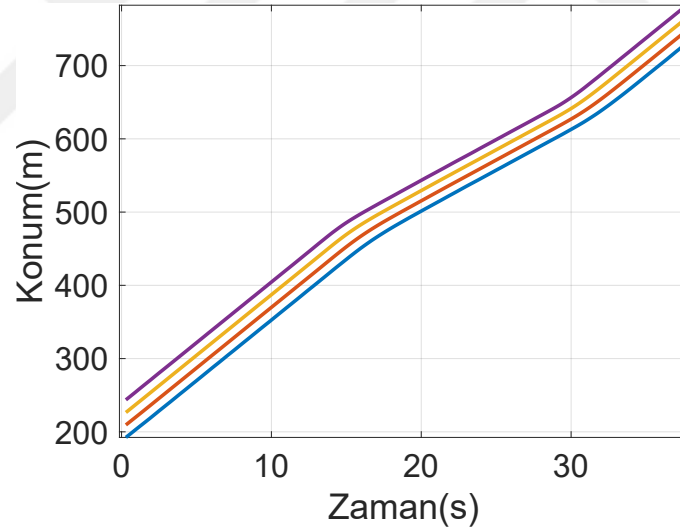
Şekil 4.6 Benzetim senaryosu 1: ASK sistem ivme-zaman grafiği

Bu durum, trafikte şok dalgalarının oluşmasına ve konvoyun kararlılığının sağlanamamasına neden olabilir. Özellikle konvoyun sonlarına doğru artan hız ve ivme değerleri, araçların birbirlerine olan mesafeleri üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir. Konvoy kararlılığını artırmak ve trafik akışını optimize etmek adına yapılan bu gözlemler, ASK sisteminin performansının daha dikkatli bir şekilde incelenmesi gerektiğini göstermektedir.



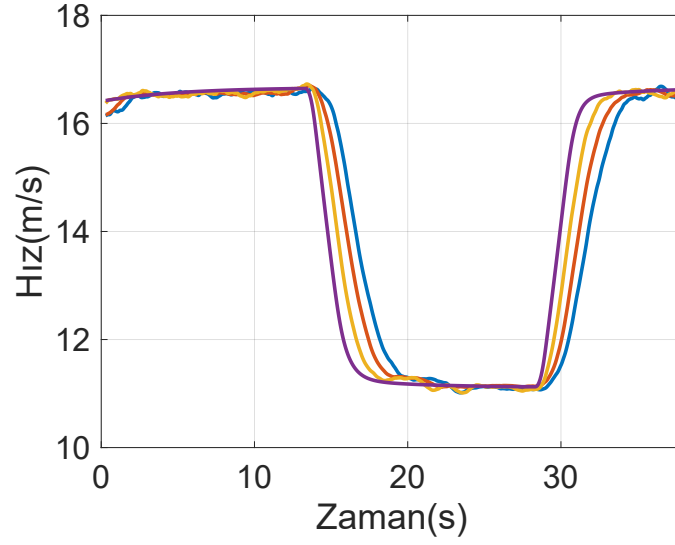
Şekil 4.7 Benzetim senaryosu 1: ASK sistem takip süresi-zaman grafiği

Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11 grafiklerde Senaryo 1 durumu için KASK sisteminin kullanıldığı durumdaki ivme-zaman, hız-zaman, konum-zaman ve takip süresi-zaman grafikleri gösterilmiştir.

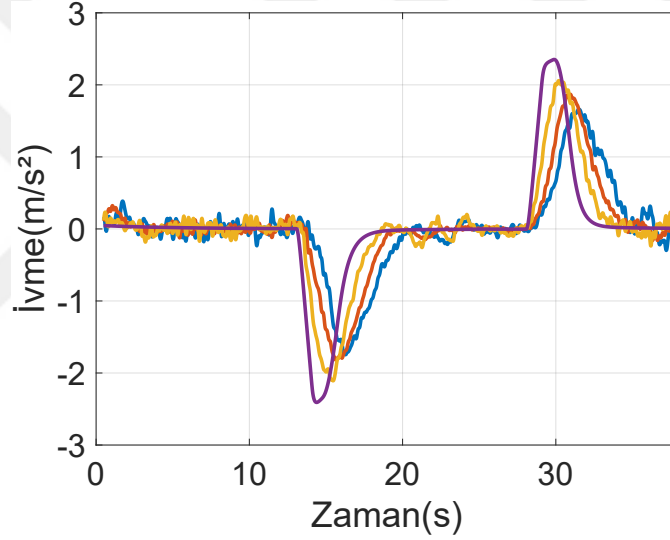


Şekil 4.8 Benzetim senaryosu 1: KASK sistem konum-zaman grafiği

Şekil 4.9 ve Şekil 4.10 grafiklerindeki KASK sistemi sonuçlarını incelediğimizde, konvoyun arkasından öne doğru gidildikçe mutlak ivme ve hız değerlerinde belirgin bir artış görülmemekte, bu durum konvoyun kararlılığının başarıyla sağlandığını göstermektedir. Bu önemli gözlem, KASK sisteminin konvoy içindeki araçların uyumlu bir şekilde hareket etmesini desteklediğini ve olası şok dalgalarını engellediğini göstermektedir. Konvoyun arkasındaki araçlar, lider aracın hızına ve ivmesine hızlı ve etkili bir şekilde uyum sağlayarak, trafik akışında homojen ve kararlı bir şekilde ilerlemeyi sürdürmektedir.



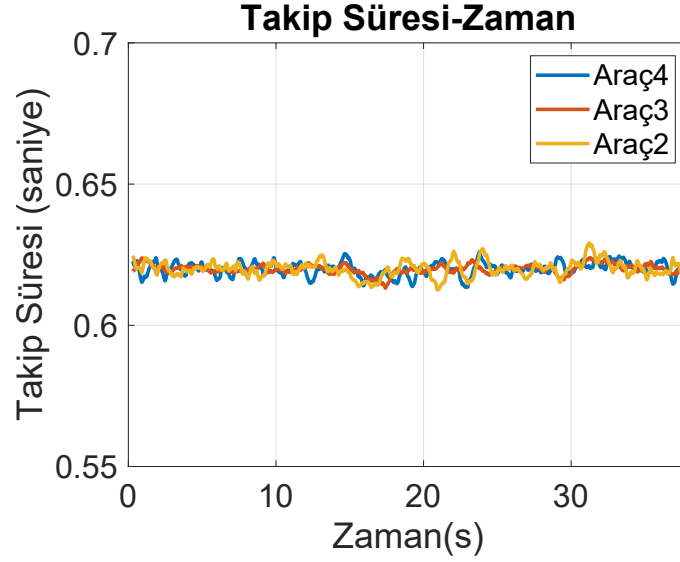
Şekil 4.9 Benzetim senaryosu 1: KASK sistem hız-zaman grafiği



Şekil 4.10 Benzetim senaryosu 1: KASK sistem ivme-zaman grafiği

KASK sisteminin konvoy tabanlı otonom araç sistemlerindeki kararlılık ve performans açısından önemli bir etki sağlayabileceğini düşündürmektedir. Konvoy içindeki araçların birbirleriyle uyumlu bir şekilde hareket etmesi, potansiyel şok dalgalarını engelleyerek konvoyun güvenli ve düzenli bir şekilde ilerlemesine katkıda bulunabilir. Bu durum, KASK sisteminin gelecekteki otonom taşıma uygulamalarında etkili bir çözüm olabileceğini işaret etmektedir.

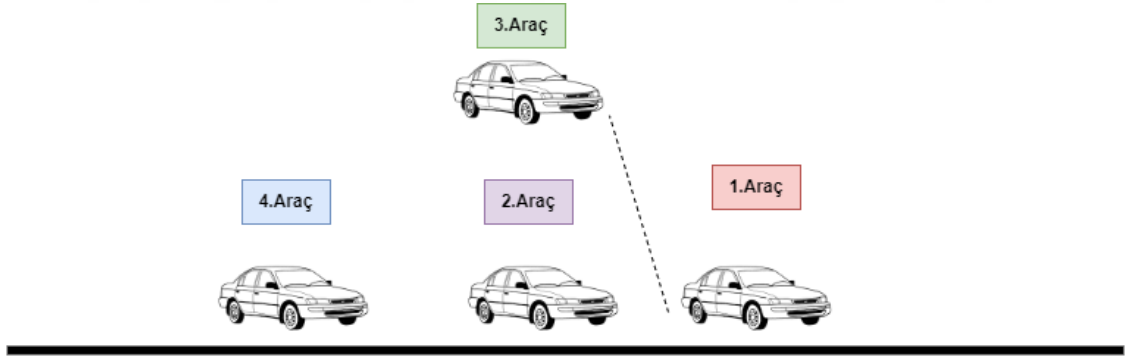
Şekil 4.11 Takip süreleri karşılaştırıldığında KASK sistemi ile hedeflenen takip süresi değerinin etrafında sabit kalındığı, ASK sisteminde ise takip süresi için hedeflenen değerden özellikle hız değişimlerinde sapmalar olduğu görülmektedir.



Şekil 4.11 Benzetim senaryosu 1: KASK sistem takip süresi-zaman grafiği

4.3.2 Benzetim Senaryosu 2: ASK ve KASK sistemlerinin konvoyla dışarıdan araç dahil olduğunda karşılaştırılması

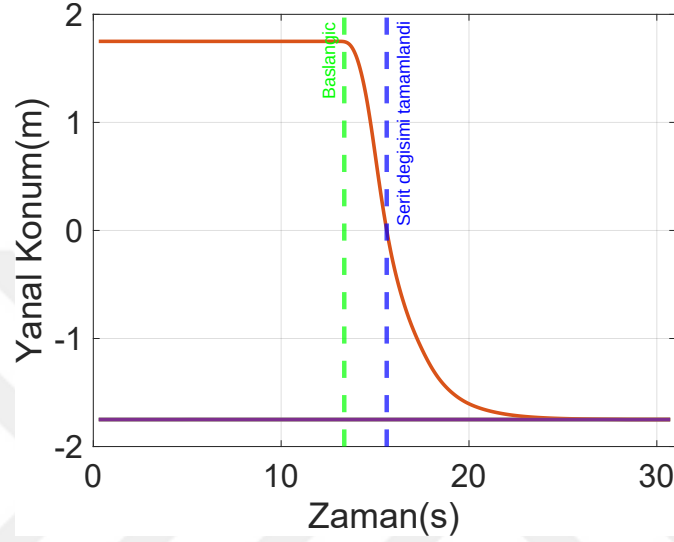
Şekil 4.12'deki ikinci benzetim senaryosunda, 1., 2. ve 4. araçlar sıralı şekilde sağ şeritte konvoy halinde giderken, 3. araç sol şeritte seyir halindedir. Sağ şeritte konvoy halindeki araçların hızları 60 km/s olup, 3. araç konvoy halindeki araçların hızından 1 m/s daha hızlı hareket etmektedir.



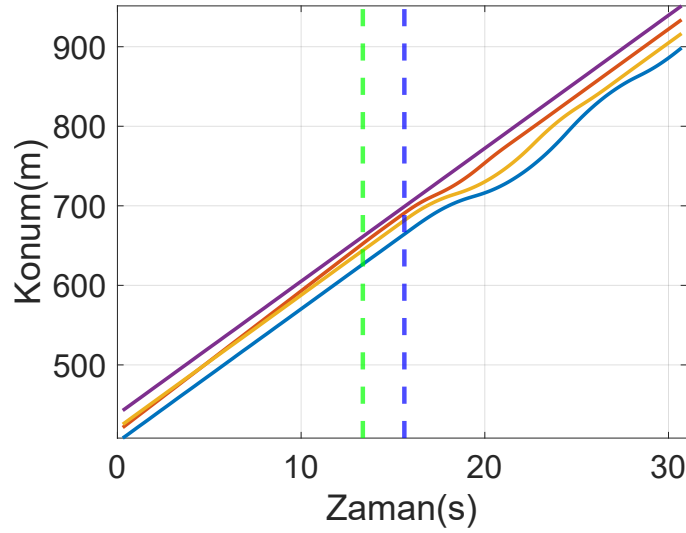
Şekil 4.12 Benzetim senaryosu 2: Şerit değişikliği öncesi araç konumları

3 numaralı aracın x eksenindeki konumu, 1 ve 2 numaralı araçların x eksenindeki konumlarının orta noktasına ulaştığında, 3 numaralı konvoy halindeki araçların şeridine geçiş yapmakta ve hareketlerine konvoy halinde 1-3-2-4 sıralı şekilde devam etmektedirler.

Şekil 4.13'te şerit değişikliğinin öncesi, şerit değişikliğinin yapıldığı an ve sonrası yanal konum - zaman ekseninde gösterilmiştir. Burada yeşil çizgi şerit değişikliği başlangıcını, lacivert çizgi ise şerit değişikliği bitişini (ilgili şeride teker basma anını) temsil etmektedir. Benzetim senaryosu 2 için ASK ve KASK sistemleri kullanıldığında ivme-zaman, hız-zaman, konum-zaman ve takip süresi-zaman grafikleri ASK ve KASK sistemler için sırasıyla Şekil 4.14, Şekil 4.15 , Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19 , Şekil 4.20 ve Şekil 4.21 'te gösterilmiştir.

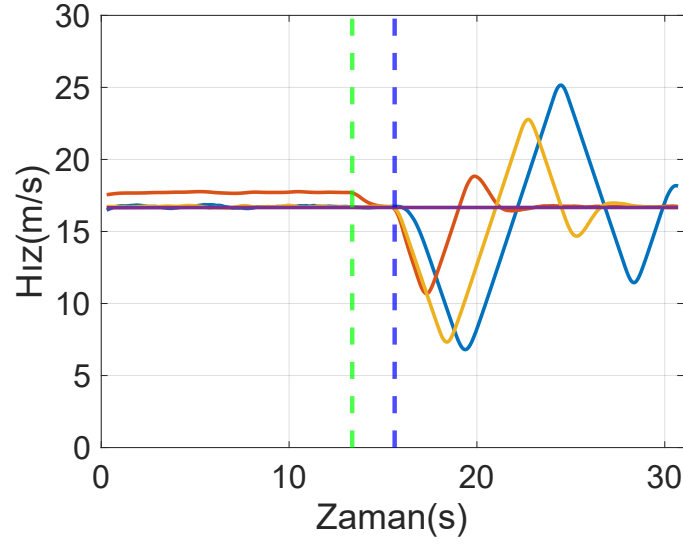


Şekil 4.13 Benzetim senaryosu 2: Yanal konum-zaman grafiği

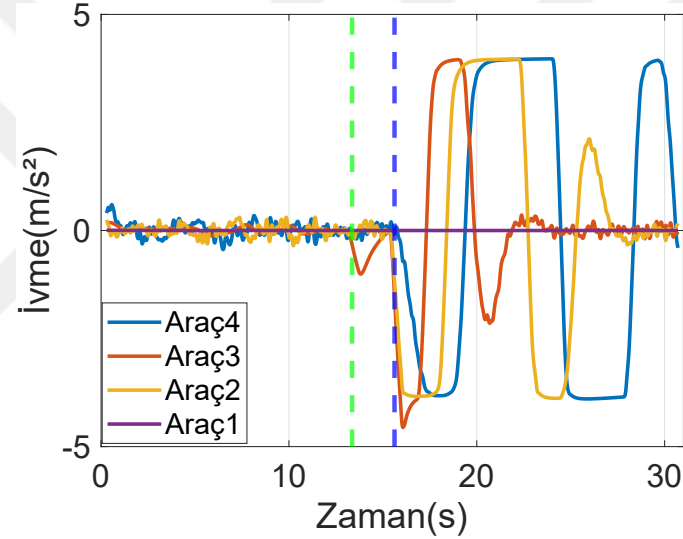


Şekil 4.14 Benzetim senaryosu 2: ASK sistem konum-zaman grafiği

Şekil 4.14 ve Şekil 4.18'teki sonuçlar karşılaştırıldığında, ASK sisteminde 26. saniyede 4. aracın önündeki 2 numaralı araç ile çarpışma riski olduğu, ancak iki aracın çok yaklaşmasına rağmen çarpışmamış olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, ASK sisteminin çarpışma riskini azaltmak adına etkili bir performans sergilediğini ancak tam anlamıyla engelleyemediğini göstermektedir.

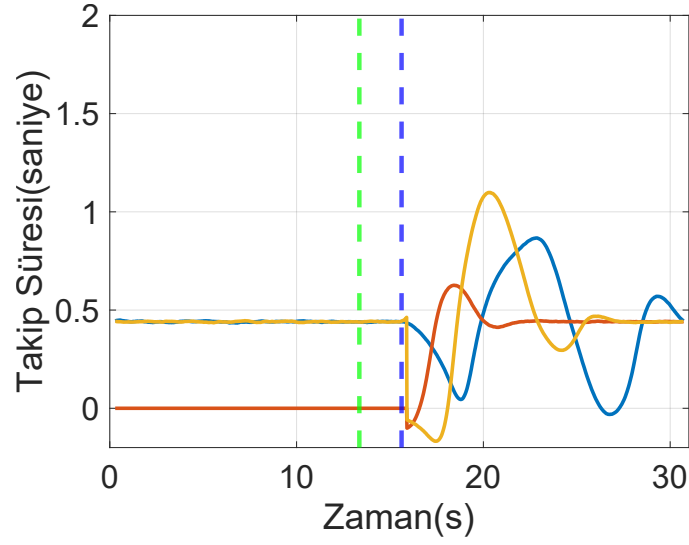


Şekil 4.15 Benzetim senaryosu 2: ASK sistem hız-zaman grafiği

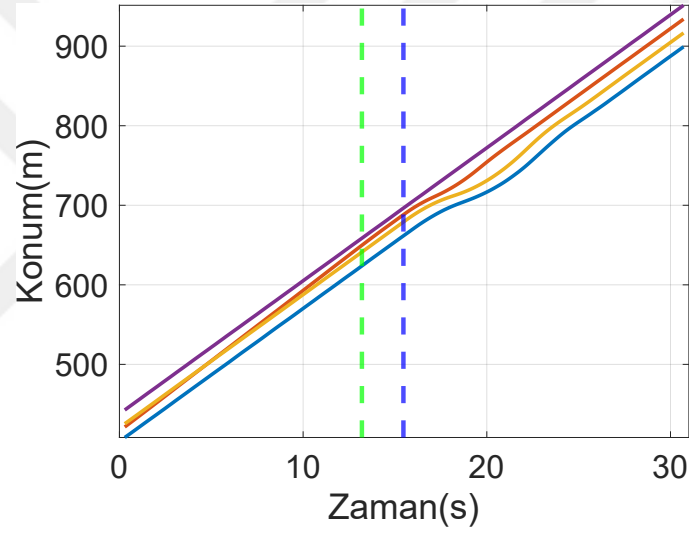


Şekil 4.16 Benzetim senaryosu 2: ASK sistem ivme-zaman grafiği

KASK sisteminde benzer bir çarpma durum gözlenmemekte ve araçlar güvenli bir şekilde konvoydaki sürüşüne devam etmektedir. KASK sisteminin olduğu durumda, araç girişi sonrasında meydana gelen son iki araç durumunda, 2. ve 4. araçların ivme ve hız değişimlerinin daha yumuşak olduğu gözlemlenmektedir. Konvoydaki ivme ve hız dalgalanmalarının ASK'li konvoyla göre daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum, KASK sisteminin araçlar arası modem iletişimi ve ivme bilgisinin etkili bir şekilde aktarılması sayesinde konvoy içinde daha stabil bir sürüş sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, özellikle 2. araç ve 4. araç üzerinden takip sürelerindeki değişimler incelendiğinde, istenen takip süresinden sapma miktarının ASK'li sisteme göre karşılaştırıldığında önemli ölçüde azaldığı görülmektedir. Bu durum, KASK sisteminin konvoy sürüşlerinde daha güvenli ve düzenli bir takip mesafesi sağladığını göstermektedir.

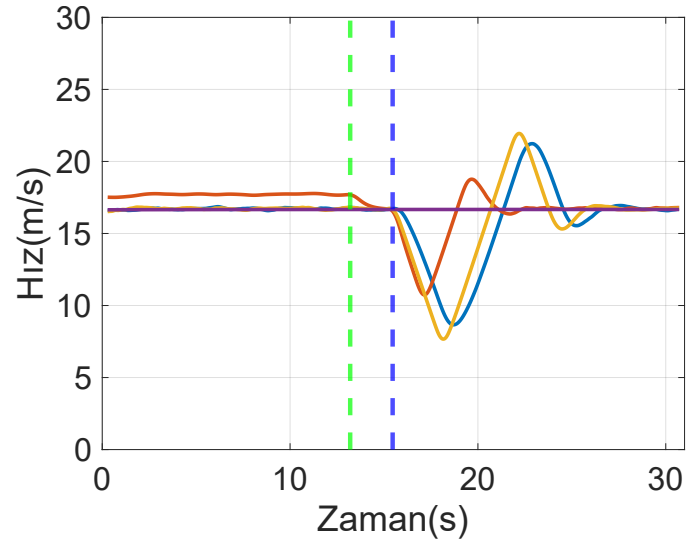


Şekil 4.17 Benzetim senaryosu 2: ASK sistem takip süresi-zaman grafiği

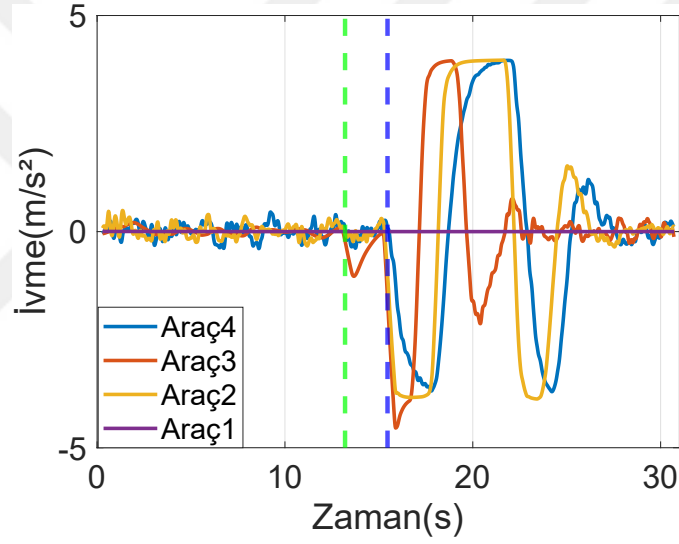


Şekil 4.18 Benzetim senaryosu 2: KASK sistem konum-zaman grafiği

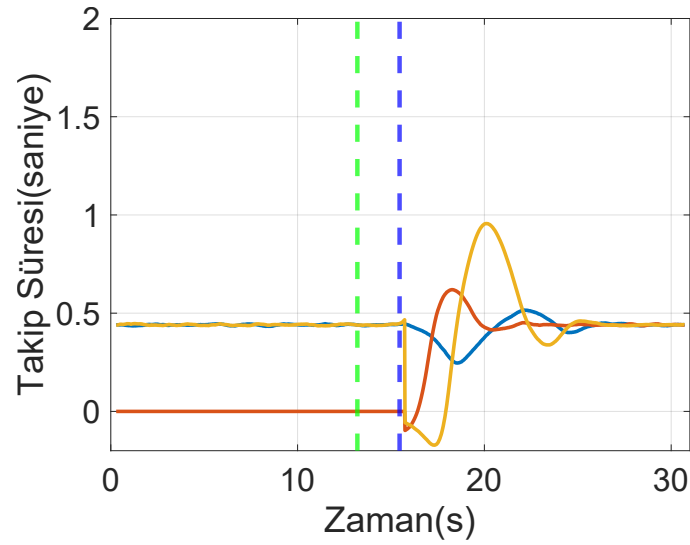
Bu gözlemler, KASK sisteminin araçlar arası iletişim ve koordinasyonunun, konvoy tabanlı otonom araç sistemlerinde güvenlik ve performans açısından olumlu bir etki yaratabileceğini vurgulamaktadır.



Şekil 4.19 Benzetim senaryosu 2: KASK sistem hız-zaman grafiği



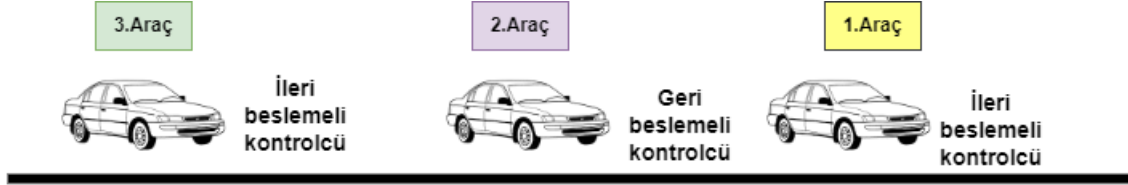
Şekil 4.20 Benzetim senaryosu 2: KASK sistem ivme-zaman grafiği



Şekil 4.21 Benzetim senaryosu 2: KASK sistem takip süresi-zaman grafiği

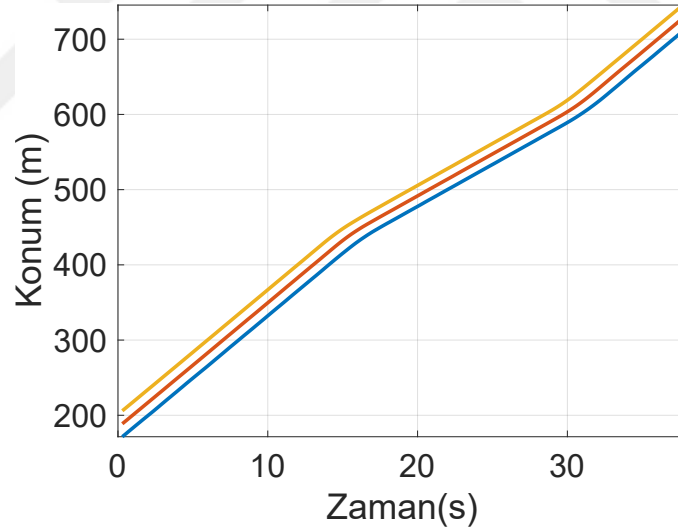
4.3.3 Benzetim Senaryosu 3: ASK ve KASK sistemli konvoy düzeni

Benzetim Senaryosu 3'te, Şekil 4.22'te gösterildiği gibi iki araç arasında dahil olan adaptif seyir kontrol sistemine sahip bir aracın etkileşimleri incelenmektedir. Bu benzetim senaryosunda, konvoyun iki ileri beslemeli kontrolcü arasında bir geri beslemeli kontrolcüyle başlaması ele alınmıştır .



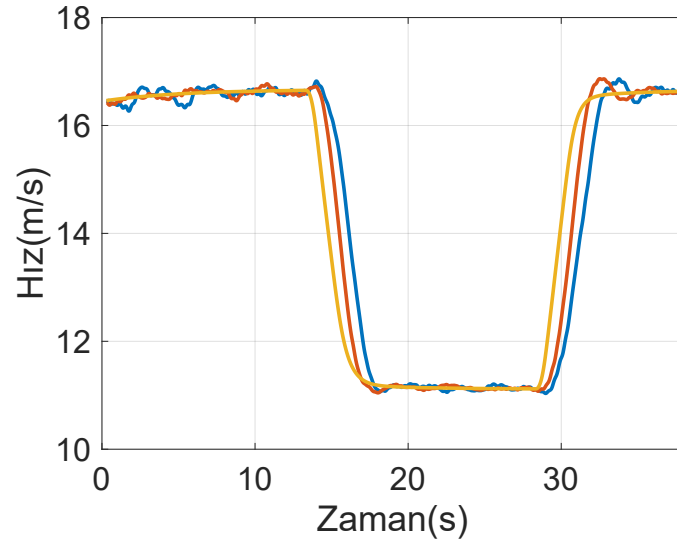
Şekil 4.22 ASK ve KASK sistemli araç konvoyu

Şekil 4.23 , Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26 grafikleri gösterilmiştir. Bu senaryo, ASK sisteminin bir konvoy içine hızlı bir şekilde dahil olma ve mevcut konvoydaki araçlarla koordineli bir şekilde hareket etme yeteneğini değerlendirir. Aynı zamanda, ASK ve diğer seyir kontrol sistemleri arasındaki etkileşimleri anlamak için değerli bilgiler sağlar.

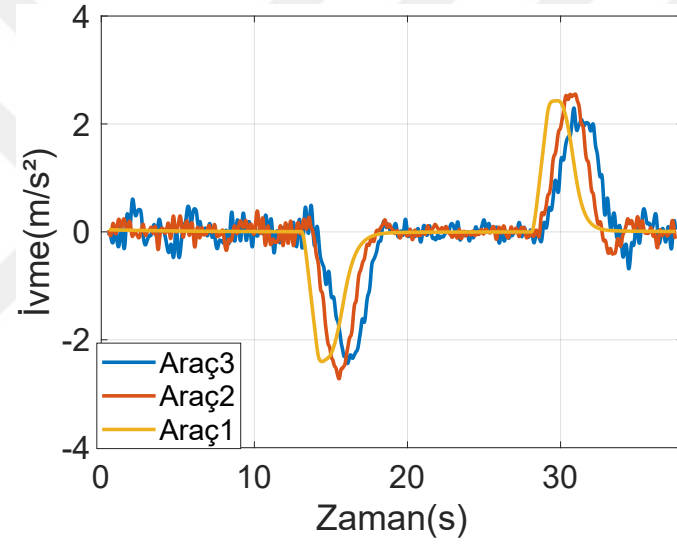


Şekil 4.23 Benzetim senaryosu 3: Konum-zaman grafiği

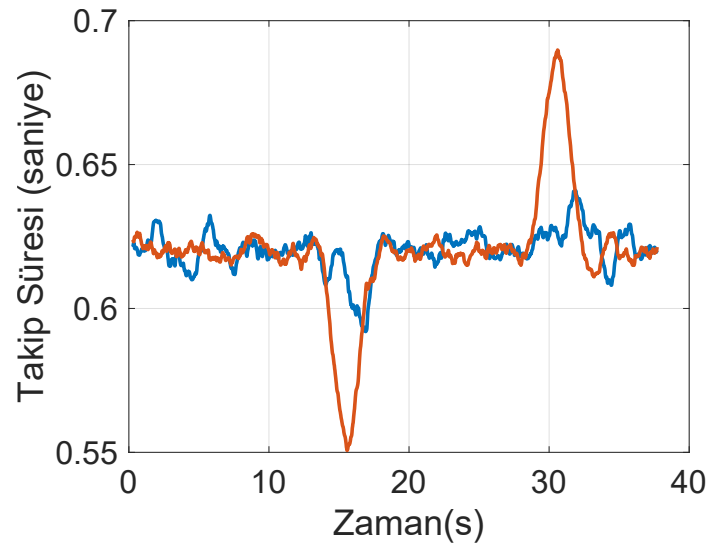
1. ve 3. araçlar ileri beslemesinde dahil olan KASK sisteme ait, 2. araçta yalnızca geri besleme olan ASK sisteme aittir. İvme bilgisinin 3. araca iletilmediği açık bir şekilde görülmektedir. Sisteme dahil olan ASK'li araç, konvoydaki diğer araçlarla uyumlu bir şekilde seyretmeye çalışır. Bu süreçte, ASK sistemi ile diğer araçlar arasında hız uyumu, güvenli takip mesafesi ve konvoy içindeki hareket koordinasyonu sağlanmaya çalışılır.



Şekil 4.24 Benzetim senaryosu 3: Hız-zaman grafiği



Şekil 4.25 Benzetim senaryosu 3: İvme-zaman grafiği



Şekil 4.26 Benzetim senaryosu 3: Takip Süresi-zaman grafiği

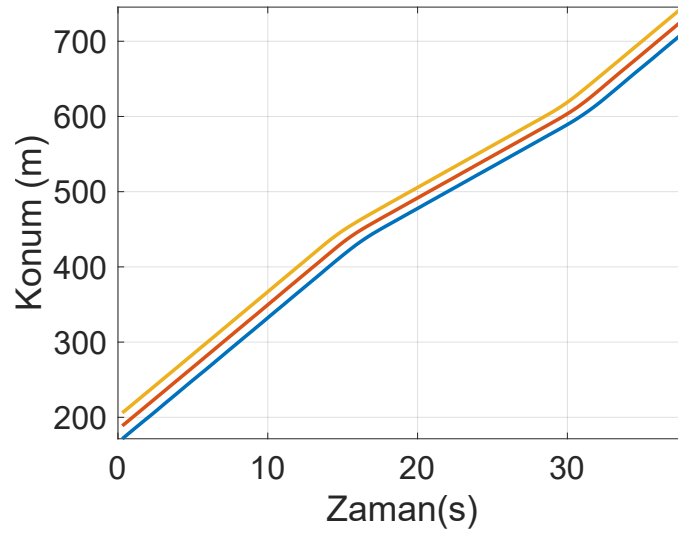
4.3.4 Benzetim Senaryosu 4: KASK sistemli üç araçtan oluşan konvoyun Benzetim Senaryosu 3 ile karşılaştırılması

Benzetim Senaryosu 4'te Şekil 4.27'te gösterildiği gibi tüm kontrolcü değerleri $k_p=3.506$, $k_d=0.407$ olan ve tamamı KASK sisteminden oluşan konvoyun; konum, hız, ivme ve takip süreleri Benzetim Senaryosu 3 ile karşılaştırılmıştır.

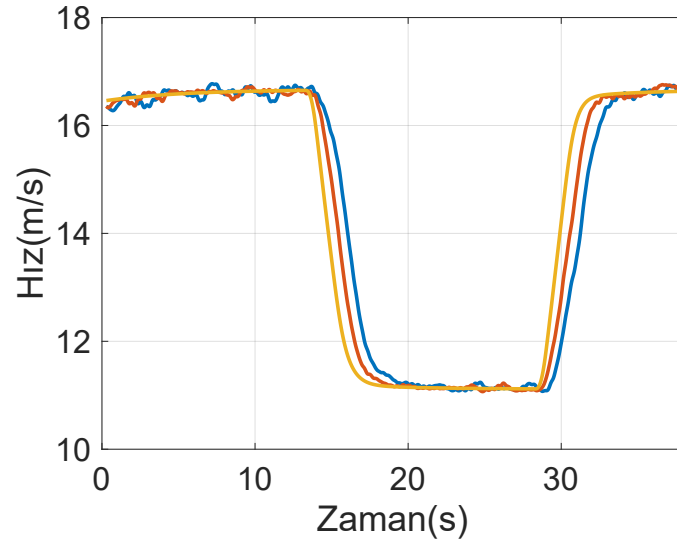


Şekil 4.27 KASK sistemli araç konvoyu

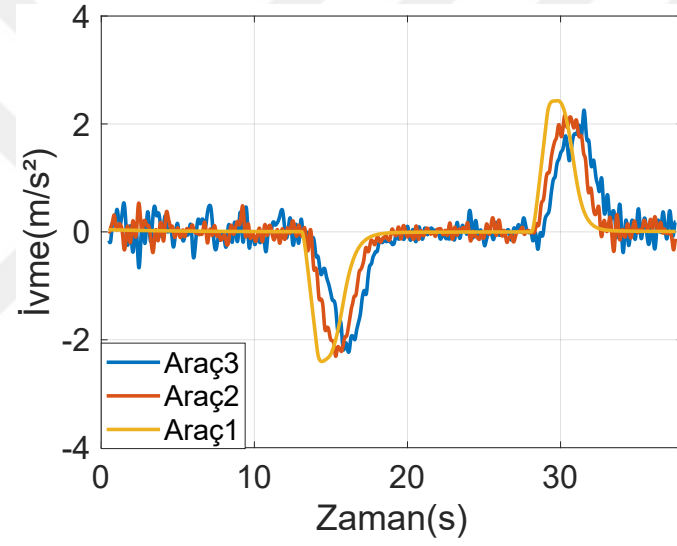
Şekil 4.28, Şekil 4.29 , Şekil 4.30 ve Şekil 4.31 sırasıyla konum, hız, ivme ve takip süreleri gösterilmiştir. Tüm grafiklerde ivme verilerinin çok hızlı hareket ettiği görülmektedir. Bunun sebebi CARLA'da simülasyon yaparken ivmenin gerçek hayattaki gibi anlık olarak sürekli değişmesidir. Benzetim senaryosu 3'teki grafikler karşılaştırıldığında, konum olarak 2. aracın kontrolcüsünden dolayı daha fazla yol gittiği ve 2. ve 3. araçta ani hız artışları olduğu görülür. Benzetim Senaryosu 3'te ivme aktarımındaki ani değişiklikler daha fazla hissedilmiştir ayrıca takip süresi korunmaya çalışılsa da 0.64'ü geçtiği görülmüştür.



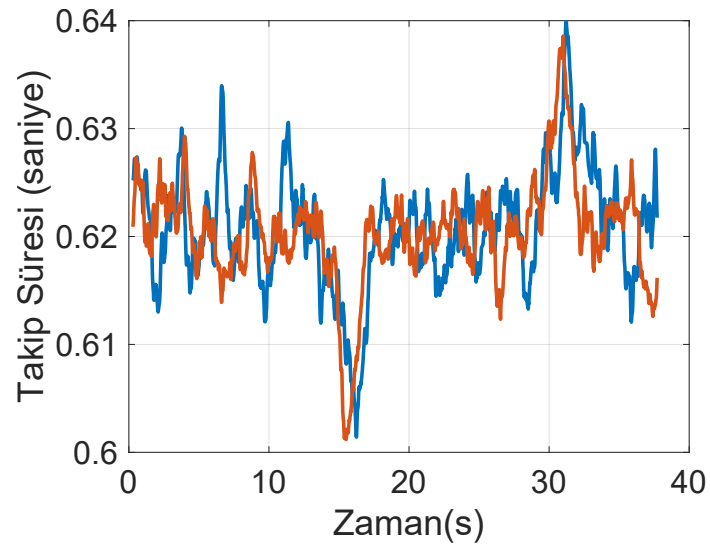
Şekil 4.28 Benzetim senaryosu 4: Konum-zaman grafiği



Şekil 4.29 Benzetim senaryosu 4: Hız-zaman grafiği



Şekil 4.30 Benzetim senaryosu 4: İvme-zaman grafiği



Şekil 4.31 Benzetim senaryosu 4: Takip Süresi-zaman grafiği

4.4 Konvoy Kararlılığı

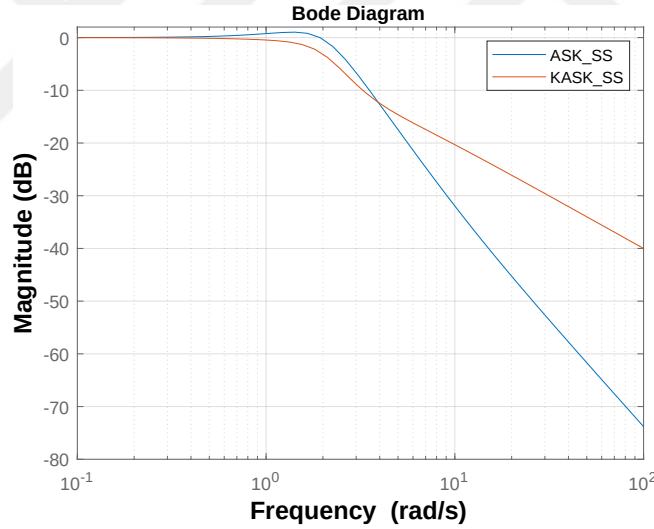
Konvoy kararlılığı, bir araç konvoyunun belirli bir düzen içinde hareket etme ve bu düzeni koruma yeteneğini ifade eder. Konvoy kararlılığı matematiksel olarak ifade edilmek istenirse:

$$|SS_i(s)|_\infty \leq 1 \iff \left| \frac{X_i(j\omega)}{X_{i-1}(j\omega)} \right| \leq 1, \quad \forall \omega \quad (4.2)$$

Adaptif Seyir Kontrol Sistemi ve Kooperatif Adaptif Seyir Kontrol Sistemi için konvoy kararlılığı denklemleri:

$$SS_{ASK,i}(s) = \frac{C_{fb,i}(s)G_i(s)}{1 + C_{fb,i}(s)G_i(s)H_i(s)} \quad (4.3)$$

$$SS_{KASK,i}(s) = \frac{(C_{fb,i}(s) + s^2 e^{-\beta s} C_{ff,i}(s))G_i(s)}{1 + C_{fb,i}(s)G_i(s)H_i(s)} \quad (4.4)$$



Şekil 4.32 Konvoy kararlılığı grafiği

Şekil 4.32 sırasıyla $k_p = 3.506$ ve $k_d = 0.407$ olduğundaki konvoy kararlılığı grafikleri gösterilmiştir.

Adaptif seyir kontrolü ile yapılan konvoylarda konvoy kararlılığı sağlanamamıştır. ASK için Bode Magnitude değerleri 0 dB'de 1'in üzerinde görünmektedir. KASK durumunda ise 0 dB'de 1'in altında kalmaktadır.

Benzetim Senaryoları Sonuçlarının Sayısal Olarak Karşılaştırılması

5.1 Senaryoların Karşılaştırılması

Bu bölümde , benzetim senaryolarındaki sonuçlar sayısal olarak incelenmiştir. ASK ve KASK sistemlerinin konvoydaki etkileri gözlenmiştir.

Tablo5.1’de, ASK ve KASK sistemlerinde konvoy dışarıdan araç dahil olmadığı Benzetim Senaryosu 1’in tüm konvoydaki maksimum taşıtlar arası mesafe $\max(|d_i|)$, maksimum hız $\max(|V_i|)$, tüm konvoydaki minimum ve maksimum ivme $\max(|V_i|)$, $\min(a_i)$ takip süresinden maksimum olarak ne kadar uzaklaştığı $\max(|t_{hd} - t_{hd,desired}|)$ değerlerinin sonuçları karşılaştırılmıştır.

Tablo5.2’de , ASK ve KASK sistemlerinde konvoy dışarıdan araç dahil olduğu Benzetim Senaryosu 2’nin tüm konvoydaki maksimum taşıtlar arası mesafe $\max(|d_i|)$,maksimum hız $\max(|V_i|)$, tüm konvoydaki minimum ve maksimum ivme $\max(|V_i|)$, $\min(a_i)$ takip süresinden maksimum olarak ne kadar uzaklaştığı $\max(|t_{hd} - t_{hd,desired}|)$ değerlerinin sonuçları karşılaştırılmıştır.

Tablo5.3’de, KASK sistemdeki kontrolcü değerleri $K_p=3.507$, $K_d=0.407$ olduğu Benzetim Senaryosu 3 ve KASK sistemli iki aracın arasına ASK sistemli aracın dahil olduğu Benzetim Senaryosu 4’ün tüm konvoydaki maksimum taşıtlar arası mesafe $\max(|d_i|)$, maksimum hız $\max(|V_i|)$, tüm konvoydaki minimum ve maksimum ivme $\max(|V_i|)$, $\min(a_i)$ takip süresinden maksimum olarak ne kadar uzaklaştığı $\max(|t_{hd} - t_{hd,desired}|)$ değerlerinin sonuçları karşılaştırılmıştır.

Tablo 5.1 Benzetim Senaryosu 1 : ASK ve KASK sistem karşılaştırılması

Sistem	$\max(d_i)$	$\max(V_i)$	$\max(a_i)$	$\min(a_i)$	$\max(t_{hd} - t_{hd,desired})$
ASK	52.69	17.39	2.66	-2.73	0.028
KASK	52.23	16.78	2.35	-2.40	0.024

Tablo 5.2 Benzetim Senaryosu 2 : ASK ve KASK sistem karşılaştırılması

Sistem	$\max(d_i)$	$\max(V_i)$	$\max(a_i)$	$\min(a_i)$	$\max(t_{hd} - t_{hd,desired})$
ASK	65.71	25.50	3.97	-4.56	0.769
KASK	59.51	22.20	3.96	-4.54	0.767

Tablo 5.3 Benzetim Senaryosu 3 ve Benzetim Senaryosu 4'teki Konvoyların değerlerinin karşılaştırılması

Sistem	$\max(d_i)$	$\max(V_i)$	$\max(a_i)$	$\min(a_i)$	$\max(t_{hd} - t_{hd,desired})$
Senaryo 3	35.10	17.00	2.55	-2.72	0.0238
Senaryo 4	35.07	16.94	2.42	-2.40	0.0252

Tablo5.1'de, Benzetim Senaryosu 1 için ASK ve KASK sistemlerinin performansını karşılaştırıldığında, ASK'nin maksimum taşıtlar arası mesafe, maksimum hız, minimum ve maksimum ivme değerlerinde ve takip süresinden maksimum sapma değeri KASK'ye kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu senaryo da KASK sistemin daha iyi çalıştığı görülmektedir.

Tablo5.2'de, Benzetim Senaryosu 2 için ASK ve KASK sistemlerinin performansını karşılaştırıldığında, ASK'nin maksimum taşıtlar arası mesafe, maksimum hız, minimum ve maksimum ivme değerlerinde ve takip süresinden maksimum sapma değeri KASK'ye kıyasla daha yüksek olduğu burda da görülmektedir. Bu senaryo da konvoyun arasına sonradan bir araç daha katıldığı için $\max(|t_{hd} - t_{hd,desired}|)$ değerinin fazla olduğu görülmektedir.

Tablo5.3'de, KASK sistemli iki aracın arasına ASK sistemli aracın dahil olduğu Senaryo 3, KASK sistemli 3 aracın olduğu Benzetim Senaryosu 4'teki sonuçlar karşılaştırıldığında, ASK sistemli aracın eklenmesiyle konvoydaki maksimum hız, maksimum ivme ve minimum ivmede artışlar sağlandığı görülmektedir. Takip süresinde, maksimum sapma değeri de bir miktar düşmüştür ancak sayılar birbirine çok yakın ve fark çok az düzeydedir.

Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde kooperatif adaptif seyir kontrol sisteminin adaptif seyir kontrol sistemine göre daha iyi sonuç verdiği görülür.

5.2 Konvoy Kararlılığının Karşılaştırılması

Şekil 4.32’da gösterilen sistemlerin frekans cevapları incelenmiş ve MATLAB’te $hinfnorm$ fonksiyonu kullanılarak H_∞ normu hesaplanmıştır. Tablo 5.4’teki sonuçlar elde edilen sonuçlar gösterilmiştir.

Tablo 5.4 KASK ve ASK sistemlerde konvoy kararlılığı karşılaştırılması

Sistem	$ SS_i(s)_\infty $
ASK	1.1268
KASK	1.0000

H_∞ normu, bir kontrol sisteminin belirli bir performans ölçütüne göre kararlılığını ölçen bir parametredir. ASK sistemi için hesaplanan H_∞ normu 1.1268 ve KASK sistemi için hesaplanan H_∞ normu ise 1.0000’dır. H_∞ normu, 1’e yaklaştıkça sistem daha kararlı kabul edilir. Bu durumda, KASK sisteminin H_∞ normu 1’e daha yakın olduğu için, bu ölçüte göre ASK sisteminden daha kararlı kabul edilmektedir.

Konvoy kararlılığının sağlanamadığı durumlarda, konvoy içindeki araçların arasındaki düzen bozulabilir ve istenmeyen durumlar ortaya çıkabilir. Örneğin, konvoy kararlılığının sağlanmaması durumunda, araçlar arasındaki mesafe ve hızlarda dalgalanmalar meydana gelebilir. Bu, konvoyun düzenli bir şekilde ilerlemesini engelleyebilir veya konvoy kararlılığı olmadığında, araçlar arasında ani frenleme veya hızlanma durumları ortaya çıkabilir. Bu durumlar, konvoy içindeki araçların birbirine uyumsuz bir şekilde tepki vermesine neden olabilir. Konvoy kararlılığının sağlanamadığı durumlarda, araçların birbirine çarpma riski artabilir. Özellikle konvoy içindeki araçlar arasındaki mesafe kontrol edilemezse, çarpışmaların olasılığı yükselebilir. Konvoyun kararlı bir şekilde ilerlememesi durumunda, araçların sürekli olarak frenleme ve hızlanma yapması yakıt tüketimini artırabilir. Bu durum, enerji verimliliği ve konvoyun ekonomik performansı üzerinde olumsuz etkilere yol açabilir. Konvoy kararlılığının sağlanamaması, güvenlik risklerini artırabilir. Özellikle otomatik konvoy sistemlerinde, bir aracın diğerine müdahale etmesi gereken durumlar olabilir ve bu durum da güvenlik açısından risk oluşturabilir.

6 SONUÇ

Bu tez kapsamında, otonom araçlar için bir kooperatif adaptif kontrol sistemi tasarımı yapılmıştır. Tasarım sürecinde, transfer fonksiyonundaki integral etkisinden de dolayı PD kontrol sistemi esas alınmış, sistemde bulunan fren ve gaz alt sistemlerinden kaynaklı saf zaman gecikmesi dikkate alınarak parametre uzayı yöntemi kullanılmış ve başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem, Hurwitz kararlı PD katsayıları için analitik denklemlerin elde edilmesini mümkün kılmıştır. Bu denklemler, kontrol sisteminin istikrarını sağlamak için gerekli olan parametreleri belirlemede önemli bir rol oynar. Bu sayede, kooperatif adaptif kontrol sistemi tasarımı otonom araçlar için daha sağlam ve istikrarlı hale gelir.

Önerilen kooperatif adaptif seyir kontrol sistemi, CARLA-MATLAB/Simulink ortamındaki benzetim çalışmalarında iki farklı senaryoda test edilmiştir: birinde konvoy dışarıdan araç dahil değilken, diğerinde konvoy dışarıdan araç dahilken. Bu çalışmalarda dört araçlı bir konvoy için adaptif seyir kontrol sistemi ile kooperatif adaptif seyir kontrol sistemi karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, kooperatif adaptif seyir kontrol sisteminin adaptif seyir kontrol sistemine göre otonom konvoy sürüşlerinde daha başarılı olduğunu göstermektedir. Ayrıca, üç araçlı bir konvoy senaryosu ele alınarak, konvoy adaptif seyir kontrol sistemi dahil edildiğinde elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Bu çalışmaların sonuçları, kooperatif adaptif seyir kontrolünün konvoydaki araçların etkileşimini daha iyi yönetebildiğini ve bu şekilde daha güvenli ve verimli bir sürüş deneyimi sağladığını ortaya koymaktadır.

Gelecekte yapılması planlanan çalışmalar arasında, konvoydaki araç sayısının artırılması ve bu artan karmaşıklığın kontrol edilmesi, farklı hava koşullarında ve yol tiplerinde sistemin performansının test edilmesi, acil durum senaryolarının simülasyonlarla değerlendirilmesi gibi daha detaylı ve kapsamlı araştırmalar yer almaktadır. Ayrıca, mevcut sistemdeki optimizasyon potansiyelinin daha fazla araştırılması ve konvoy dinamiklerinin daha derinlemesine analiz edilmesi de önemli hedefler arasındadır.

Bu çalışmaların sonuçları, kooperatif adaptif seyir kontrolünün gerçek dünya koşullarında ne kadar etkili ve güvenilir olduğunu daha iyi anlamamıza yardımcı olacaktır. Bu tez, otomatik konvoylar için geliştirilen adaptif kontrol sistemlerine dair kapsamlı bir bakış sunarak, gelecekteki araştırmalara önemli bir rehberlik sağlamayı amaçlamaktadır.



KAYNAKÇA

- [1] M. C. Turan, “Akıllı ulaşım sistemleri ve araçsal ağların kullanıldığı adaptif seyir kontrol sistemi benzetimi,” Yüksek Lisans Tezi, Mekatronik Müh., İTÜ, İstanbul, 2011.
- [2] E. Kural, “Adaptif seyir sistemleri,” Yüksek Lisans Tezi, Mak. Müh., İTÜ, İstanbul, 2015.
- [3] E. Commission, *Eurostat news - new record for global greenhouse gas concentrations*, <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/edn-20171119-1>, 25.12.2023.
- [4] E. Yiğit, A. E. Oner, O. Yöntem, “Otonom araçların otomotiv sektörüne etkileri ve beraberinde getirdiği yenilikler,” *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, pp. 181–186, 2020.
- [5] C. Bettisworth *et al.*, “Status of the dedicated short-range communications technology and applications: Report to congress,” United States. Department of Transportation. Intelligent Transportation Systems Joint Program Office, Washington, DC, Final Report FHWA-JPO-15-218, 2015.
- [6] M. Eren, M. Özdemir, “Doğrusal ve doğrusal olmayan araç modeli tasarımı ile otonom araçlar için kooperatif adaptif seyir kontrol sistemi tasarımı,” Lisans Tezi, Kontrol Otomasyon Müh., YTÜ, İstanbul, 2020.
- [7] A. Danışman, *Radar sensor nedir? çeşitleri nelerdir?* <https://www.arabam.com/blog/danisman/radar-sensor-nedir-cesitleri-nelerdir/>, 25.12.2023.
- [8] V. A. Kovalev, W. E. Eichinger, *Elastic lidar: theory, practice, and analysis methods*. John Wiley & Sons, 2004.
- [9] W. D. Jones, “Keeping cars from crashing,” *IEEE spectrum*, vol. 38, no. 9, pp. 40–45, 2001.
- [10] C. Woodford, *How does lidar work?* <https://www.explainthatstuff.com/lidar.html>, 25.12.2023.
- [11] iTransition, *Autonomous vehicle sensors: Types, challenges, and use cases*, <https://www.itransition.com/blog/autonomous-vehicle-sensors>, 25.12.2023.
- [12] ListeList, *En iyi araç içi kamera sistemleri*, <https://listelist.com/en-iyi-arac-ici-kamera-sistemi/>, 25.12.2023, 2024.
- [13] Hyundai, *Hyundai’s smartsense safety technology*, <https://www.hyundai.news/eu.html>, 25.12.2023.

- [14] A. Çavdar, A. Demir, “Seyir kontrol sistemlerinin (cc–acc) frenleme performansına olan etkilerinin incelenmesi,” *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, vol. 3, pp. 33–39, 2005.
- [15] W. Pananurak, S. Thanok, M. Parnichkun, “Adaptive cruise control for an intelligent vehicle,” in *International Conference on Robotics and Biomimetics*, Guilin, Dec. 2009.
- [16] *My car does what*, <https://mycardoeswhat.org/>, 25.12.2023.
- [17] W. K. Wolterink, G. Heijenk, G. Karagiannis, “Automated merging in a cooperative adaptive cruise control (cacc) system,” in *Fifth ERCIM workshop on eMobility*, Citeseer, 2011, p. 23.
- [18] D. Swaroop, R. Huandra, “Intelligent cruise control system design based on a traffic flow specification,” *Vehicle system dynamics*, vol. 30, no. 5, pp. 319–344, 1998.
- [19] D. Swaroop, J. K. Hedrick, “Constant spacing strategies for platooning in automated highway systems,” *J. Dyn. Sys., Meas., Control*, vol. 121, no. 3, pp. 462–470, 1999.
- [20] C. Flores, V. Milanés, F. Nashashibi, “A time gap-based spacing policy for full-range car-following,” in *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [21] B. v. Arem, C. J. G. v. Driel, R. Visse, “The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 2, pp. 491–509, 2015.
- [22] Z. Wang, X. Zhao, Z. Chen, X. Li, “A dynamic cooperative lane-changing model for connected and autonomous vehicles with possible accelerations of a preceding vehicle,” *Expert Systems with Applications*, vol. 173, p. 114 675, 2021.
- [23] M. T. Emirler, L. Güvenç, B. A. Güvenç, “Design and evaluation of robust cooperative adaptive cruise control systems in parameter space,” *International Journal of Automotive Technology*, vol. 19, pp. 359–367, 2018.
- [24] K. C. Dey *et al.*, “A review of communication, driver characteristics, and controls aspects of cooperative adaptive cruise control (cacc),” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 2, pp. 491–509, 2015.
- [25] J. Ploeg, B. T. Scheepers, E. Van Nunen, N. Van de Wouw, H. Nijmeijer, “Design and experimental evaluation of cooperative adaptive cruise control,” in *2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, IEEE, 2011, pp. 260–265.
- [26] M. T. Emirler, *Automated Driving Control Systems Lecture Notes.*, YTÜ, İstanbul, 2020.
- [27] G. J. Naus, R. P. Vugts, J. Ploeg, M. J. van De Molengraft, M. Steinbuch, “String-stable cacc design and experimental validation: A frequency-domain approach,” *IEEE Transactions on vehicular technology*, vol. 59, no. 9, pp. 4268–4279, 2010.

- [28] L. Güvenç *et al.*, “Cooperative adaptive cruise control implementation of team mekar at the grand cooperative driving challenge,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 13, no. 3, pp. 1062–1074, 2012.
- [29] J. Ackermann *et al.*, *Robust Control: The Parameter Space Approach*. Springer Science & Business Media, 2002.
- [30] L. Güvenç, B. Aksun Güvenç, B. Demirel, M. T. Emirler, *Control of Mechatronic Systems*. The IET, London, 2017.
- [31] D. Hajdu, I. G. Jin, T. Insperger, G. Orosz, “Robust stability of connected cruise controllers,” in *Stability, Control and Application of Time-delay Systems*, Elsevier, 2019, pp. 163–184.
- [32] I. Vörös, D. Takács, “Stability analysis of a hierarchical lane-keeping controller with feedback delay,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 36, pp. 300–305, 2022.
- [33] S. Klinge, R. Middleton, “String stability analysis of homogeneous linear unidirectionally connected systems with nonzero initial conditions,” in *IET Irish Signals and Systems Conference (ISSC 2009)*, 2009, pp. 17–23.
- [34] E. Shaw, J. Hedrick, “String stability analysis for heterogeneous vehicle strings,” in *Proceedings of the ACC’07*, 2007, pp. 3118–3125.
- [35] S. Feng, Y. Zhang, S. E. Li, Z. Cao, H. X. Liu, L. Li, “String stability for vehicular platoon control: Definitions and analysis methods,” *Annual Reviews in Control*, vol. 47, pp. 81–97, 2019.
- [36] A. Dosovitskiy, G. Ros, F. Codevilla, A. Lopez, V. Koltun, “CARLA: An open urban driving simulator,” in *Proceedings of the 1st Annual Conference on Robot Learning*, 2017, pp. 1–16.
- [37] S. Stević, M. Krunić, M. Dragojević, N. Kaprocki, “Development and validation of adas perception application in ros environment integrated with carla simulator,” in *2019 27th Telecommunications Forum (TELFOR)*, IEEE, 2019, pp. 1–4.
- [38] M. R. Cantas, L. Güvenç, “Customized co-simulation environment for autonomous driving algorithm development and evaluation,” *SAE Technical Paper 2021-01-0111*, 2021.
- [39] C. Flanagan, S. N. Freund, “The roadrunner dynamic analysis framework for concurrent programs,” in *Proceedings of the 9th ACM SIGPLAN-SIGSOFT workshop on Program analysis for software tools and engineering*, 2010, pp. 1–8.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirisi

1. S. Sarıhan, M. F. Yalçın , E. Kaynar , M. T. Emirler , "Otonom Araçlar için Kooperatif Seyir Kontrol Sistemi Tasarımı ve CARLA-MATLAB/Simulink Ortamında Benzetimi," TOK 2023 Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Ulusal Kongresi, İstanbul Technical University, İstanbul. 2023; 93-99.

