

# Otonom Araçlar için Kooperatif Adaptif Seyir Kontrol Sistemi Tasarımı ve CARLA-MATLAB/Simulink Ortamında Benzetimi

## Cooperative Adaptive Cruise Control System Design and CARLA-MATLAB/Simulink Environment Simulation for Autonomous Vehicles

*Senanur Sarıhan<sup>1,2</sup>, Mustafa Fatih Yalçın<sup>2</sup>, Emre Kaynar<sup>2</sup>, Mümin Tolga Emirler<sup>1,3</sup>*

<sup>1</sup>Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü  
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

senanur.salim@std.yildiz.edu.tr, emirler@yildiz.edu.tr

<sup>2</sup>AVL Araştırma ve Mühendislik  
İstanbul

{senanur.salim, fatih.yalcin, emre.kaynar}@avl.com

<sup>3</sup>Havacılık Elektrik ve Elektronik Bölümü  
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

### Özetçe

Kooperatif adaptif seyir kontrol sistemleri, otonom ve bağlantılı araç uygulamalarını hızlandıran geleceğin otomotiv teknolojisinin önemli bir parçasıdır. Bu bildiriye, kooperatif adaptif seyir kontrol sisteminin geri beslemeli kontrol kısmı için parametre uzayı tabanlı analitik bir yöntem önerilmiştir. Bu tasarımda, alt seviye eyleyicilerde görülen saf zaman gecikmesi belirsiz bir parametre olarak ele alınmıştır. Bunun yanında, konvoydaki araçlar arasındaki konum hatasını azaltan ve kontrol performansını iyileştiren ileri beslemeli kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Önerilen tasarım, adaptif seyir kontrol sistemi ile dört araçlı bir konvoy için iki farklı senaryoda karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemin etkinliği, konvoy sürüş çalışmaları için tasarlanan ve hazırlanan CARLA-MATLAB/Simulink ortamındaki benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir.

### Abstract

Cooperative adaptive cruise control system is an important part of future automotive technologies which accelerates the application of autonomous and connected vehicles. In this paper, an analytical design methodology based on parameter space approach is proposed for the feedback control part of the cooperative adaptive cruise control. In this design, the pure time delay in the lower part of actuation systems is considered as an uncertain parameter. Besides that, a feedforward controller is designed to minimize the position error between vehicles and to improve control performance in the convoy. The proposed design is compared with the adaptive cruise control system for

four vehicle convoy in two different scenarios. The effectiveness of the proposed method is shown by the simulation studies in the CARLA-MATLAB/Simulink co-simulation environment which is designed and prepared for convoy driving studies.

### 1. Giriş

Ulaşım, toplum yaşamını etkileyen önemli bir faktördür. Ulaşım teknolojisindeki ilerlemeler insanı ve çevreyi doğrudan etkiler. Artan trafik sıkışıklığı ve trafik kazalarının çoğalması nedeniyle bu durumu azaltmak, sürücü ve yolcuların konforlu seyahatini sağlamak amacıyla otonom sistemler geliştirilmektedir. Günümüzde üretilen araçlardaki seyir kontrol sistemleri, sürücünün ve yolcuların konforuna ve güvenliğine katkı sağlamaktadır.

Günümüzde seyir kontrol sistemleri; geleneksel seyir kontrol (GSK) sistemleri, adaptif seyir kontrol (ASK) sistemleri ve kooperatif adaptif seyir kontrol (KASK) sistemleri olarak incelenmektedir. GSK sistemlerinde araç hızı, sürücünün belirlediği hız seviyesinde gaz kontrolü ile kontrol edilmektedir. Bu sistem, diğer sistemlerin öncülü ve temel uygulamasıdır. ASK sistemlerinde araç hızı, öndeki araç ile arasındaki mesafeyi veya takip süresini koruyacak şekilde gaz ve fren yoluyla otomatik olarak kontrol edilir. Bu sistemde hem gaz, hem fren sistemi kullanılır ve geleneksel seyir kontrol sisteminden farklı olarak genellikle radar sensörü kullanılır. KASK sistemleri, ASK sistemlerinin gelişmiş halidir ve bu sistemlerde radar yanında araçlar arası haberleşme teknolojilerinden de yararlanır. Ayrıca KASK sistemi araçlar arası haberleşmenin getirdiği avantaj ile trafikte araçların konvoylar halinde gitmesini sağlayan sistemlerdir [1, 2].

KASK sistemlerinde öndeki aracın ivme bilgisi modem iletişimiyle arkadaki araca aktarılmakta ve aktarılan ivme bilgisi

kontrol sisteminde ileri besleme yolunda kullanılmaktadır. Bu ilave bilgi ile ASK'ye göre daha kısa takip süreleri elde edilmektedir. Daha kısa takip süreleri trafik akışını hızlandırmakta ve yolların kullanım kapasitesini artırmaktadır [3].

KASK sistemlerinin tasarımı ve uygulanması açısından literatürde çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Naus vd. tarafından yapılan çalışmada frekans tanım bölgesinde konvoy kararlılığını sağlayan kontrol sistemi tasarımı yapılmış, benzetim ortamında ve araç yol testlerinde başarıyla test edilmiştir [4]. Uygulama ağırlıklı başka bir yayında altı araçlık konvoy için KASK sistemi başarıyla test edilmiştir [5]. Güvenç vd. çalışmasında KASK sistemi tasarımı ve gerçekleştirimi üzerinde durulmuş ve önerilen kontrol yapısı benzetim ortamında ve yol testlerinde başarıyla test edilmiştir [6]. Emirler vd. çalışmasında, KASK sisteminin geri beslemeli kontrol kısmı için parametre uzayı yöntemi ile tasarlanmış D-kararlılığı sağlayan PD kontrol yapısı önerilmiştir. İleri yol kontrol sistemi ile birlikte tüm yapı homojen ve heterojen trafik ortamında konvoy kararlılığı açısından benzetim ortamında başarıyla test edilmiştir [7].

Bu yayında literatüre katkı bakımından KASK sisteminin geri beslemeli PD kontrol yapısı, alt eyleyici (fren ve gaz) sistemlerinden kaynaklanan belirsiz saf zaman gecikmesi dikkate alınarak, parametre uzayı yöntemi ile Hurwitz kararlılığını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. PD kontrol katsayıları tasarımı için kullanılacak analitik denklemler çıkarılmış ve zaman gecikmesinin parametre uzayı çözüm alanını küçülten etkisi gösterilmiştir. Bunun haricinde önerilen yöntem, ASK sistemi ile dört araçlı bir konvoyda, konvoya dışarıdan araç dahil olduğu ve olmadığı durumlar için CARLA-MATLAB/Simulink benzetim ortamında karşılaştırılmıştır.

Bildirinin bundan sonraki bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir. Bölüm 2'de kontrol sistemi tasarımında kullanılan araç modeli verilmiştir. Bölüm 3'te KASK sistemi tasarımı anlatılmıştır. Parametre uzayı yöntemiyle geri beslemeli kontrolcü tasarımının ve ileri beslemeli kontrolcü tasarımının detayları verilmiştir. Bölüm 4'te CARLA-MATLAB/Simulink benzetim ortamının oluşturulması ve iki farklı senaryo için karşılaştırmalı benzetim sonuçları verilmiştir. Bildiri Bölüm 5'te verilen sonuçlarla sonlandırılmıştır.

## 2. Kontrol Sistemi Tasarımında Kullanılan Araç Modeli

KASK sistemi için üst kontrol sistemi tasarımında (1) denklemindeki temel boyuna araç dinamiği kullanılabilir:

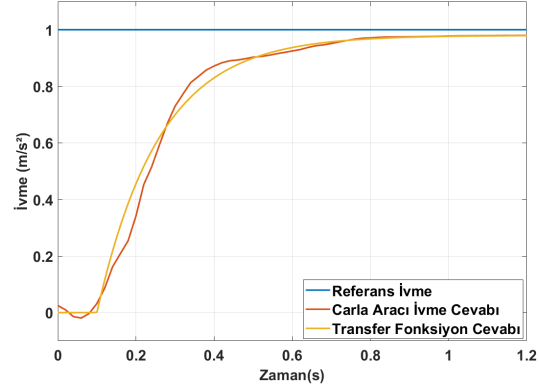
$$\tau_i \dot{a}_i + \tau_i a_i = k_i u_i(t - \gamma_i) \quad (1)$$

burada  $k_i$  model kazancını,  $\tau_i$  ve  $\gamma_i$  gaz ve fren alt kontrol sistemlerinin etkilerini ifade etmek için sırasıyla model zaman sabitini ve zaman gecikmesini göstermektedir. Araç pozisyonu  $x_i$  ile kontrol girişi  $u_i$  arasındaki transfer fonksiyonu  $G_i(s)$ ,  $\dot{x} = a_i$  olmak üzere (2) denklemindeki gibi yazılabilir.

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

Naus vd. tarafından (2) denkleminde gösterilen transfer fonksiyonunun, araç boyuna dinamiğinin ifade edilmesinde deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu gösterilmiştir [4]. Şekil 1'de basamak ivme girişi için üstte belirtilen temel araç modeli ile

CARLA araç modeli sonuçları gösterilmiştir. CARLA araç modeli ile uyumun sağlanması için  $k_i$ ,  $\tau_i$  ve  $\gamma_i$  sırasıyla 0.98, 0.16 ve 0.1 olarak tespit edilmiştir.

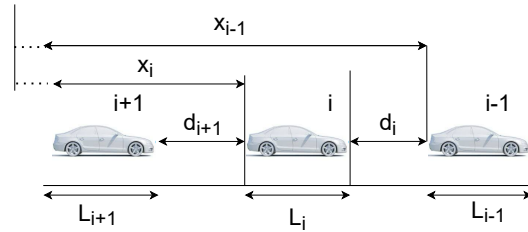


Şekil 1: CARLA araç modeli ile model doğrulaması.

## 3. Kooperatif Adaptif Seyir Kontrol Sistemi Tasarımı

KASK sistemi tasarımı, geri beslemeli kontrol ve ileri beslemeli kontrol kısımlarından oluşmaktadır. Bu kısımda öncelikle kontrol sisteminde kullanılacak olan araçlar arası istenen mesafe ve mesafe hatası tanımlanmıştır.

Şekil 2'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.



Şekil 2: Araçlar arası mesafe gösterimi.

Sabit takip süresi yaklaşımına göre araçlar arası istenen mesafe (3) denklemindeki gibi yazılabilir:

$$d_{r,i}(t) = r_i + t_{hd} v_i(t) \quad (3)$$

burada  $r_i$  araçlar arası istenen güvenli mesafeyi,  $v_i$ ,  $i$  aracının hızını,  $t_{hd}$  takip süresini göstermektedir. Takip süresi,  $i$  aracının sabit hızla giderken  $i - 1$  aracının bulunduğu konuma gelmesi için gereken süre olarak tanımlanır. Araçlar arası mesafe hatası  $e_i(t)$ , (4) denklemindeki gibi tanımlanabilir:

$$e_i(t) = d_i - d_{r,i}(t) \quad (4)$$

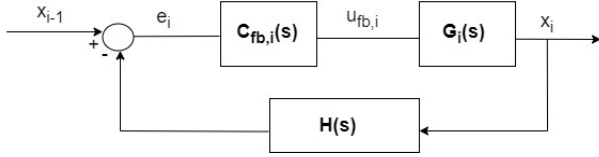
(4) denklemini açık halde (5) denklemindeki gibi düzenlenebilir:

$$e_i(t) = (x_{i-1}(t) - x_i(t) - L_i) - (r_i + t_{hd} v_i(t)) \quad (5)$$

Kontrol sistemi tasarımında işlem kolaylığı açısından ve sabit olduğundan bu yayında araç boyutları  $L_i = 0$  olarak alınmıştır.

### 3.1. Parametre Uzayı Yöntemi ile Geri Beslemeli Kontrolcü Tasarımı

KASK ve ASK sistemlerinde ortak olarak geri beslemeli kontrol yapısı kullanılmaktadır. Araçlar arasındaki istenen konum farkının korunabilmesi için sistem, kendi aracının mevcut konumu ile takip edilen aracın konumunun farkını alarak sürekli olarak bu fark değerini kontrol etmektedir. Şekil 3'te geri beslemeli kontrol yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3: Geri beslemeli kontrol yapısı blok diyagramı.

Kontrol sistemi olarak literatürde sıklıkla tercih edilen PD kontrol yapısı seçilmiştir [4, 6, 7]. Bu seçimde (2)'de gösterilen araç modelindeki serbest integratörlerin yer alması etkili olmuştur. PD kontrol sistemi ile istenilen değere az aşım ile hızlı bir şekilde ulaşılması sağlanmaktadır. Böylece aracın hızlanması ve yavaşlaması sistem tarafından daha yumuşak bir şekilde yapılabilmekte, sürücü ve yolcular için daha konforlu bir sürüş sağlanmaktadır. Şekil 3'te, (2) ile tanımlanan araç modeli  $G_i(s)$  haricindeki transfer fonksiyonları (6) ve (7) denklemlerindeki gibi yazılabilir:

$$C_{fb,i}(s) = k_p + k_d s \quad (6)$$

$$H_i(s) = 1 + t_{hd} s \quad (7)$$

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, genel olarak dayanıklı kontrol sistemi tasarımı ve parametrik belirsizliklere karşı kontrol sistemi analizinde kullanılan çok amaçlı bir yöntemdir [8, 9]. Burada alt sistemlerden kaynaklanan zaman gecikmesi  $\gamma_i$ 'nin belirsiz olduğu durumda, PD kontrol katsayılarının bulunması için parametre uzayı yöntemi kullanılmıştır. Geri beslemeli kontrol sistemi karakteristik denklem, (8) denklemindeki gibi elde edilebilir:

$$p(s, k_p, k_d, \gamma) = \tau s^3 + (k_d t_{hd} e^{-\gamma s} + 1) s^2 + (k_p t_{hd} + k_d) e^{-\gamma s} s + k_p e^{-\gamma s} \quad (8)$$

Zaman gecikmesi teriminden dolayı  $e^{-\gamma s}$ , karakteristik denklem sonsuz sayıda kök içermektedir [10, 11]. Bu kökler sanal eksenini üç durumda geçebilir: (i) Gerçek kök olarak sanal eksenini geçebilir ( $s = j\omega = 0, \omega = 0$ ) ve parametre uzayında gerçek kök sınırını (GKS) oluşturur. (ii) Karmaşık eşlenik kök olarak  $\omega \in (0, \infty)$  için sanal eksenini geçebilir ve karmaşık kök sınırını

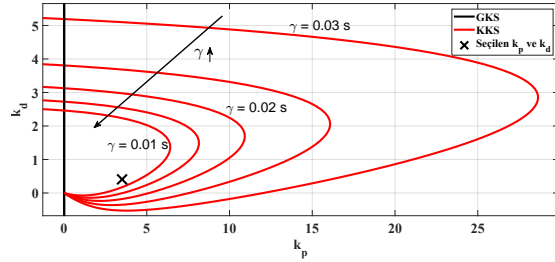
(KKS) oluşturur. (iii) Frekans sonsuza giderken sanal eksenini geçebilir ve sonsuz kök sınırını (SKS) oluşturur. Zaman gecikmeli karakteristik denklem (8) kullanılarak sabit zaman gecikmesi değeri  $\gamma_i$  için  $k_p, k_d$  sınırları çizdirilerek parametre uzayında çözüm elde edilebilir. Buna göre GKS,  $s = 0$  için (9) denklemindeki gibi elde edilir:

$$k_p = 0 \quad (9)$$

(9) denklemini  $k_d$  eksenini göstermektedir ve zaman gecikmesinden bağımsızdır. KKS denklemini için (8) denklemini kullanılarak elde edilir. KKS denklemini gerçek ve sanal kısımlarına göre ayrı ayrı bilinmeyen iki kontrol kazancı için çözdürüldüğünde frekansın bir fonksiyonu olarak kontrol katsayısı (10) ve (11) denklemlerindeki gibi elde edilir:

$$k_p(\omega) = \frac{\omega^2 (\cos(\gamma\omega) + t_{hd}\omega \sin(\gamma\omega) - \tau\omega \sin(\gamma\omega) + t_{hd}\omega^2 \cos(\gamma\omega))}{t_{hd}^2 \omega^2 + 1} \quad (10)$$

$$k_d(\omega) = \frac{\omega (\sin(\gamma\omega) - t_{hd}\omega^2 \cos(\gamma\omega) + \tau\omega^2 \cos(\gamma\omega) + t_{hd}\omega^3 \sin(\gamma\omega))}{t_{hd}^2 \omega^2 + 1} \quad (11)$$

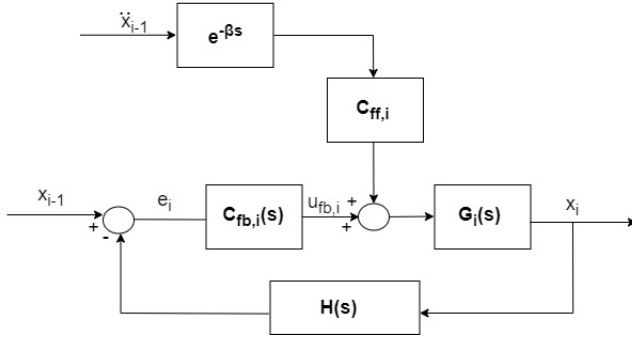


Şekil 4: Geri beslemeli kontrol sistemi için parametre uzayı çözüm alanı.

(10) ve (11) denklemini elde edilirken zaman gecikmesi eksponansiyel 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. (9) ve (11) denklemleri kullanılarak Hurwitz kararlı ve kararsız bölgeler, 0.1 s ile 0.3 s arasında 0.05 s'lik adımlarla değişen  $\gamma_i$  zaman gecikmesi değerleri için Şekil 4'teki gibi elde edilmiştir. Zaman gecikmesi değeri arttıkça Hurwitz kararlı bölgenin alanının azaldığı görülmektedir. Benzetim çalışmalarında kullanılmak üzere Hurwitz kararlı bölgeden  $k_p$  ve  $k_d$  değerleri sırasıyla 3.506 ve 0.407 olarak seçilmiştir.

### 3.2. İleri Beslemeli Kontrolcü Tasarım

İleri beslemeli kontrol sisteminin amacı, geri beslemeli kontrolcüye ek olarak öndeki aracın ivme bilgisini de kullanarak kontrol performansında iyileşme sağlamaktır. Şekil 5'te ileri besleme kontrolünde dahil olduğu tüm kooperatif adaptif seyir kontrol sistemi yapısı gösterilmiştir. İleri besleme kontrol tasarımında mesafe hatasını  $e_i$ 'yi teorik olarak sıfır yapacak bir yaklaşım kullanılabilir [7].



Şekil 5: Kooperatif adaptif seyir kontrol sistemi blok diyagramı.

Bunu sağlayabilmek için öncelikle,  $e_i$  ve  $x_{i-1}$  arasındaki transfer fonksiyonu Şekil 5'teki blok diyagramı göz önüne alınarak (12) denklemindeki gibi yazılabilir:

$$\frac{E_i}{X_{i-1}} = \frac{1 - s^2 C_{ff,i} G_i(s) H_i(s) e^{-\beta s}}{1 + C_{fb,i}(s) G_i(s) H_i(s)} \quad (12)$$

burada  $C_{ff,i}$  ileri beslemeli kontrolcüyü,  $\beta$  araç modemleri arasındaki zaman gecikmesini göstermektedir. Tasarım esnasında sistem üzerindeki zaman gecikmesinin etkisi  $e^{-\beta s}$  değeri dikkate alınmazsa, sıfır mesafe hatası için (12) transfer fonksiyonu dikkate alınarak (13) denklemindeki eşitlik yazılabilir:

$$1 - s^2 C_{ff,i} G_i(s) H_i(s) = 0 \quad (13)$$

Buradan ileri beslemeli kontrolcü (14) denklemindeki gibi tespit edilebilir:

$$C_{ff,i} = \frac{1}{s^2 G_i(s) H_i(s)} \quad (14)$$

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

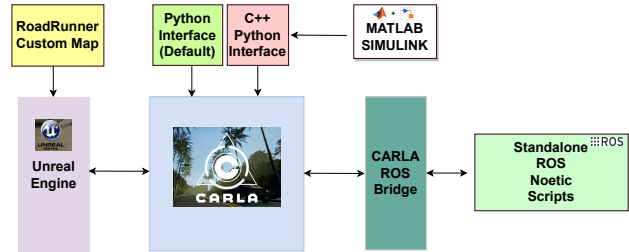
CARLA otonom sürüş sistemlerinin geliştirilmesini, eğitimi ve onaylanmasını desteklemek için geliştirilen açık kaynaklı bir benzetim ortamıdır [12]. Bu bildiride MATLAB/Simulink kullanılarak geliştirilen ASK ve KASK sistemleri CARLA benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir.

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

CARLA, görsel kaplama ve fizik benzetiminde 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 benzetir ve bu dünya ile etkileşime giren bir ajan arasında basit bir arayüz sağlar. Bu işlevi desteklemek için CARLA, sunucunun benzetimi çalıştırdığı ve sahneyi oluşturduğu bir sunucu-istemci sistemi olarak tasarlanmıştır.

CARLA benzetim ortamı, ROS tabanlı kontrol mimarilerini ile etkileşim sağlamak için CARLA ROS Bridge adı verilen

bir arabirim bulundurmaktadır. Benzer çalışmalarda da bu yapının kullandığı gözlemlenmiştir. Bu bildiriye CARLA'da mevcut olan TESLA model 3 aracının ilgili parametreleri kullanılmıştır. [13, 14]. Şekil 6'da Unreal Engine Tabanlı CARLA ortamı ile bu çalışmada geliştirilen ROS Tabanlı araç kontrol mimarisinin haberleşme yapısı gösterilmiştir.



Şekil 6: CARLA ortamı sinyal akışı.

Algoritmanın doğrulanmasında kullanılan yol, Road Runner yazılımı üzerinden oluşturulup Unreal Engine üzerinden derlenerek CARLA benzetim ortamına aktarılmıştır.

Algoritma çalışmaları, öncelikle MATLAB/Simulink ortamında geliştirilmiştir. Daha sonra ROS Bridge ile iletilen bilgiler MATLAB ROS araç kutusu kullanılarak alınmış ve CARLA ortamı ile iletişim kurulmuştur. Algoritma üzerindeki ilk testler bu şekilde yapıldıktan sonra geliştirilen Simulink blok diyagramları, Tustin metodu kullanılarak ayrıştırılmış, daha kararlı ve hızlı çalışabilmesi için C++ kodlarına dönüştürülerek CARLA ortamına entegre edilmiştir. Şekil 7'de CARLA canlandırma ekranı gösterilmiştir.



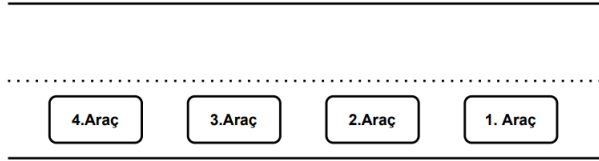
Şekil 7: CARLA canlandırma ekranı.

##### 4.2. Benzetim çalışmaları

Benzetim çalışmalarında, iki farklı senaryo ele alınmıştır. Testler ASK ve KASK sistemleri için gerçekleştirilmiştir ve iki sistemin sonuçları birbiri ile karşılaştırılmıştır. Testler sırasında gerekli veriler toplanmış ve MATLAB ortamında grafik haline getirilmiştir. Benzetimlerde yolcu konforu düşünülerek ivme değerleri değerleri  $-4$  ve  $+4 \text{ m/s}^2$  arasında sınırlandırılmıştır.

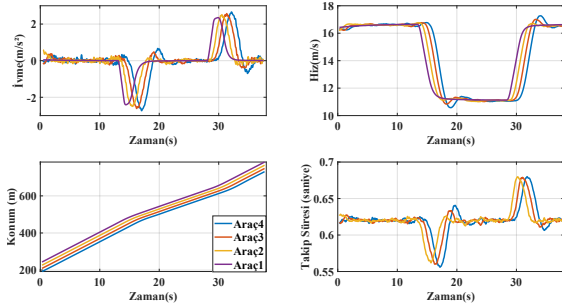
#### 4.2.1. Benzetim Senaryosu 1: ASK ve KASK sistemlerinin konvoy dışarıdan araç dahil olmadığında karşılaştırılması

İlk benzetim senaryosunda Şekil 8'deki gibi dört araç aynı şeritte konvoy halinde sıralı şekilde hareket etmektedir. Araç başlangıç hızları 60 km/s olup, lider araç (1. araç) hızı 40 km/s'e düşürülmüştür. Ardından lider araç hızı, tekrar 60 km/s hıza çıkarılmıştır.



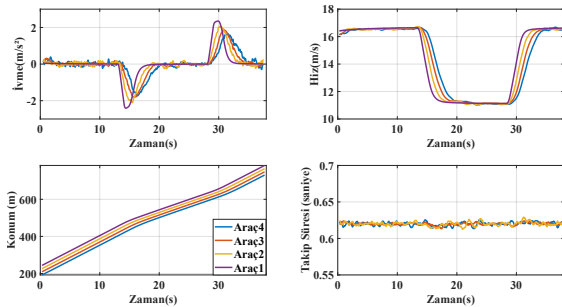
Şekil 8: Benzetim senaryosu 1: araç konumları.

Şekil 9'da ASK sistemi kullanıldığı durumda ivme-zaman, hız-zaman, konum-zaman ve takip süresi-zaman grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 9: Benzetim senaryosu 1: ASK sistemi için araçların konum, hız, ivme ve takip süresi grafiği.

Şekil 10'daki grafiklerde KASK kullanıldığı durumda ivme-zaman, hız-zaman, konum-zaman ve takip süresi-zaman grafikleri gösterilmiştir.



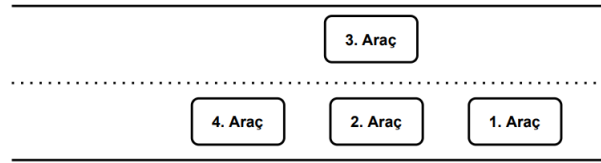
Şekil 10: Benzetim senaryosu 1: KASK sistemi için araçların konum, hız, ivme ve takip süresi grafiği.

Şekil 9 verilen sonuçlar incelendiğinde ASK sisteminde mutlak değerler açısından ivme ve hız değerlerinin, konvoyda lider araçtan arkaya doğru gidildikçe arttığı görülmektedir. Bu durum trafikte şok dalgalarına sebep olup konvoy kararlılığının

sağlanamamasına neden olmaktadır. Şekil 10'daki KASK sistemi sonuçlarında ise konvoyda arkaya gidildikçe mutlak ivme ve hız değerlerinde artış görülmeyip konvoy kararlılığı sağlanmaktadır. Takip süreleri karşılaştırıldığında KASK sistemi ile hedeflenen takip süresi değerinin etrafında sabit kaldığı, ASK sisteminde ise takip süresi için hedeflenen değerden özellikle hız değişimlerinde sapmalar olduğu görülmektedir.

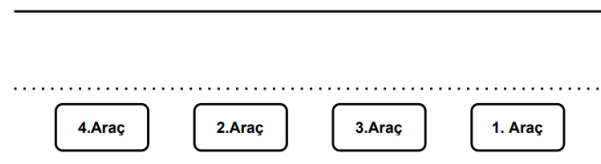
#### 4.2.2. Benzetim Senaryosu 2: ASK ve KASK sistemlerinin konvoy dışarıdan araç dahil olduğunda karşılaştırılması

Şekil 11'deki ikinci benzetim senaryosunda, 1., 2. ve 4. araçlar sıralı şekilde sağ şeritte konvoy halinde giderken, 3. araç sol şeritte seyir halindedir.



Şekil 11: Benzetim senaryosu 2: şerit değişikliği öncesi araç konumları.

Sağ şeritte konvoy halindeki araçların hızları 60 km/s olup, 3. araç konvoy halindeki araçların hızından 1 m/s daha hızlı hareket etmektedir. 3. aracın x eksenindeki konumu 1 ve 2 numaralı araçların x eksenindeki konumunun orta noktasına vardığında, 3. araç konvoy halindeki araçların şeridine geçiş yapmakta ve hareketlerine konvoy halinde 1-3-2-4 sıralı şekilde devam etmektedirler. Şekil 12'de şerit değişikliği sonrası araç konumları görülmektedir.

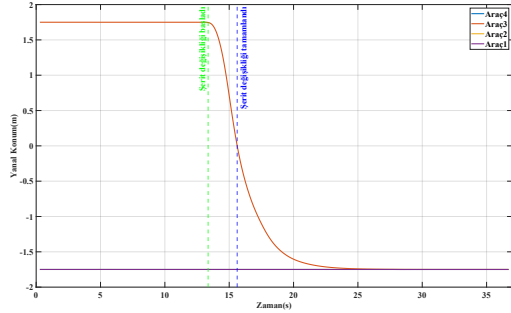


Şekil 12: Benzetim senaryosu 2: şerit değişikliği sonrası araç konumları.

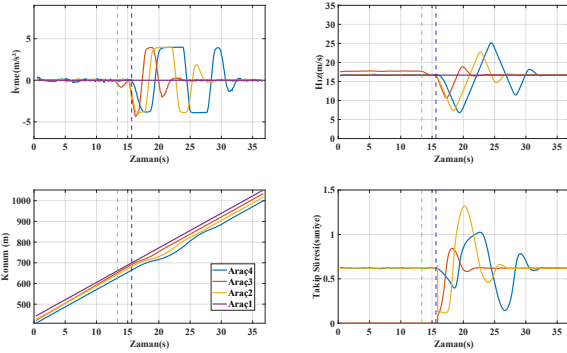
Şekil 13'te şerit değişikliği öncesi, şerit değişikliği yapıldığı an ve sonrası yanal konum - zaman ekseninde gösterilmiştir. Burada yeşil çizgi şerit değişikliği başlangıcını, lacivert çizgi ise şerit değişikliği bitişini (ilgili şeride teker basma anını) temsil etmektedir. Benzetim senaryosu 2 için ASK ve KASK sistemleri kullanıldığında ivme-zaman, hız-zaman, konum-zaman ve takip süresi-zaman grafikleri sırasıyla Şekil 14 ve Şekil 15'te gösterilmiştir.

Şekil 14 ve Şekil 15'teki sonuçlar karşılaştırıldığında ASK sisteminde 26. saniyede 4. aracın önündeki araç olan 2 numaralı araç ile çarpışma riski olduğu görülmektedir. İki araç çok yakınlaşmış fakat çarpışmamıştır. Bu durum KASK sisteminde

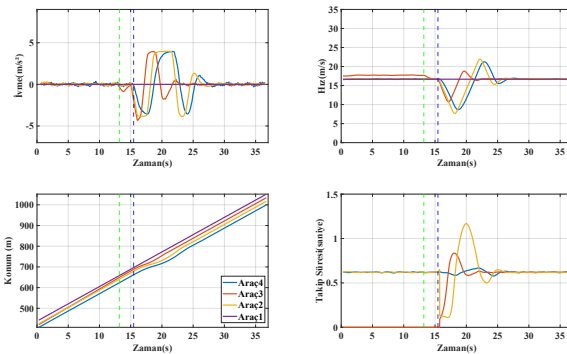
oluşmamakta ve araçlar güvenli şekilde konvoy sürüşüne devam etmektedir. KASK sisteminin olduğu durumda araç girişi sonrası son iki araç haline gelen 2. aracın ve 4. aracın ivme ve hız değişimlerinin daha yumuşak olduğu ve konvoydaki ivme ve hız dalgalanmasının ASK'li konvoya göre daha iyi olduğu görülmektedir. Benzer durum takip sürelerindeki değişimden de anlaşılabilir. Özellikle 2. araç ve 4. araç incelendiğinde istenen takip süresi değerinden sapma miktarı ASK'li sisteme göre önemli ölçüde azalmıştır. Bu durum konvoy sürüşlerinde araçlar arası modem iletişiminin ve ivme bilgisinin aktarılmasının önemini göstermektedir.



Şekil 13: Yanal konum zaman grafiği.



Şekil 14: Benzetim senaryosu 2: ASK sistemi için araçların konum, hız, ivme ve takip süresi grafiği.



Şekil 15: Benzetim senaryosu 2: KASK sistemi için araçların konum, hız, ivme ve takip süresi grafiği.

## 5. Sonuçlar

Bu bildiride, otonom araçlar için kooperatif adaptif kontrol sistemi tasarımı yapılmıştır. Geri beslemeli PD kontrol sistemi, fren ve gaz alt sistemlerinden kaynaklı saf zaman gecikmesi dikkate alınarak parametre uzayı yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde, Hurwitz kararlı PD katsayıları için analitik denklemler elde edilmiştir. Bunun yanında, mesafe hatasını sıfırlayacak şekilde ileri beslemeli kontrol sistemi tasarımı yapılmıştır. Önerilen kooperatif adaptif seyir kontrol sistemi, CARLA-MATLAB/Simulink ortamında konvoya araç dahil olduğu ve olmadığı iki farklı senaryoda adaptif seyir kontrol sistemi ile dört araçlı bir konvoy için karşılaştırılmıştır. Her iki senaryo sonucuyla kooperatif adaptif seyir kontrol sisteminin adaptif seyir kontrol sistemine göre otonom konvoy sürüşlerindeki başarısı ortaya konulmuştur. İlerleyen çalışmalarda konvoydaki araç sayısı artırılarak; hem sağ, hem de sol şeritten araçların konvoya dahil olması, konvoydaki bir aracın konvoydan çıkarak şerit değiştirmesi gibi senaryoların incelenmesi planlanmaktadır.

## 6. Teşekkür

İlk üç yazar, AVL Araştırma ve Mühendislik şirketine bu çalışmayı yaparken sundukları maddi ve manevi desteklerinden dolayı çok teşekkür etmektedir.

## 7. Kaynakça

- [1] Kakan C Dey, Li Yan, Xujie Wang, Yue Wang, Haiying Shen, Mashrur Chowdhury, Lei Yu, Chenxi Qiu, and Vivekgautham Soundararaj, "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.
- [2] Ziran Wang, Guoyuan Wu, and Matthew J Barth, "A review on cooperative adaptive cruise control (cacc) systems: Architectures, controls, and applications," in *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE, 2018, pp. 2884–2891.
- [3] Bart Van Arem, Cornelia JG Van Driel, and Ruben Visser, "The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics," *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, vol. 7, no. 4, pp. 429–436, 2006.
- [4] Gerrit JL Naus, Rene PA Vugts, Jeroen Ploeg, Marinus JG van De Molengraft, and Maarten 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.
- [5] Jeroen Ploeg, Bart TM Scheepers, Ellen Van Nunen, Nathan Van de Wouw, and Henk 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.
- [6] Levent Güvenç, İsmail Meriç Can Uygan, Kerim Kahraman, Raif Karahmetoglu, İlker Altay, Mutlu Şentürk,



Mümin Tolga Emirler, Ahu Ece Hartavi Karçı, Bilin Aksun Güvenç, Erdiñç Altuğ, Murat Can Turan, Ömer Şahin Taş, Eray Bozkurt, Ümit Özgüner, Keith Redmill, Arda Kurt, and Barış Efendioğlu, “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.

- [7] Mümin Tolga Emirler, Levent Güvenç, and Bilin Aksun Güvenç, “Design and evaluation of robust cooperative adaptive cruise control systems in parameter space,” *International Journal of Automotive Technology*, vol. 19, no. 2, pp. 359–367, 2018.
- [8] Jürgen Ackermann, Paul Blue, Tilman Bünte, Levent Güvenç, Dieter Kaesbauer, Michael Kordt, Micheal Muhler, and Dirk Odenthal, *Robust Control: The Parameter Space Approach*, Springer Science & Business Media, 2002.
- [9] Levent Güvenç, Bilin Aksun Güvenç, Burak Demirel, and Mümin Tolga Emirler, *Control of Mechatronic Systems*, The IET, London, 2017.
- [10] Dávid Hajdu, I Ge Jin, Tamás Insperger, and Gábor Orosz, “Robust stability of connected cruise controllers,” in *Stability, Control and Application of Time-delay Systems*, pp. 163–184. Elsevier, 2019.
- [11] Illés Vörös and Dénes Takács, “Stability analysis of a hierarchical lane-keeping controller with feedback delay,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, no. 36, pp. 300–305, 2022.
- [12] Alexey Dosovitskiy, German Ros, Felipe Codevilla, Antonio Lopez, and Vladlen Koltun, “CARLA: An open urban driving simulator,” in *Proceedings of the 1st Annual Conference on Robot Learning*, 2017, pp. 1–16.
- [13] Stevan Stević, Momčilo Krunic, Marko Dragojević, and Nives 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.
- [14] Mustafa Rıdvan Cantaş and Levent Güvenç, “Customized co-simulation environment for autonomous driving algorithm development and evaluation,” *SAE Technical Paper 2021-01-0111*, 2021.