



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN:1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



# Doğrusal karesel regülatör ve ileri beslemeli kontrol yöntemi ile otonom araçlar için kooperatif uyarlamalı hız kontrol sistemi

*Cooperative adaptive cruise control system for autonomous vehicles with linear quadratic optimal regulator and feedforward control method*

*Yazar(Author): Fatih ADIGÜZEL<sup>1</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-2161-690X*

**To cite to this article:** Adıgüzel F., “Doğrusal Karesel Regülatör ve İleri Beslemeli Kontrol Yöntemi ile Otonom Araçlar için Kooperatif Uyarlamalı Hız Kontrol Sistemi”, *Journal of Polytechnic*, 27(3): 975-984, (2024).

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz:** Adıgüzel F., “Doğrusal Karesel Regülatör ve İleri Beslemeli Kontrol Yöntemi ile Otonom Araçlar için Kooperatif Uyarlamalı Hız Kontrol Sistemi”, *Politeknik Dergisi*, 27(3): 975-984, (2024).

**Erişim linki(To link to this article):**<http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:** 10.2339/politeknik.1170311

# Doğrusal Karesel Regülatör ve İleri Beslemeli Kontrol Yöntemi ile Otonom Araçlar için Kooperatif Uyarlamalı Hız Kontrol Sistemi

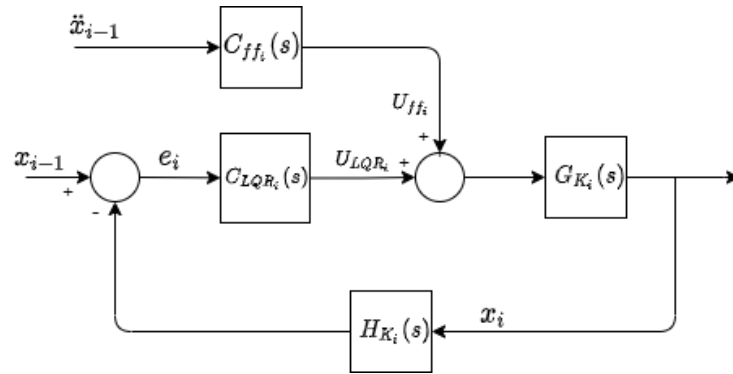
## Cooperative Adaptive Cruise Control System for Autonomous Vehicles with Linear Quadratic Optimal Regulator and Feedforward Control Method

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Araç konvoylarında uyarlamalı hız kontrol sistemleri günümüzde oldukça önemli bir teknolojidir. / Adaptive cruise control systems in the vehicle convoies are a rather important technology today.
- ❖ Uyarlamalı hız kontrol sistemlerini takviye edici kontrolcülerle desteklemek performansı artırır. / Complementing the adaptive cruise control systems with advanced controllers increases performance.
- ❖ Araç konvoyuna uygulanacak yöntemin sistematik olması uygulamada pratiklik sağlar. / Being a systematic control technic of the method to be applied to the vehicle convoy provides practicality.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışma, bir araç konvoyunda kooperatif uyarlamalı hız kontrol sistemi için ileri beslemeli bir kontrolcü ile desteklenmiş doğrusal optimal karesel kontrolcü tasarımı ele almaktadır. / This study deals with the design of a linear optimal quadratic controller supported by a feedforward controller for a cooperative adaptive cruise control system in a vehicle convoy.



Şekil. Kooperatif uyarlamalı hız kontrol sistemi için kapalı çevrim sistem gösterimi. /Figure. Representation of closed-loop system for cooperative adaptive cruise control system.

### Amaç (Aim)

Kooperatif uyarlamalı hız kontrol sisteminin optimal kontrolünü sağlamak. / To provide optimal control of the cooperative adaptive cruise control system.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Doğrusal karesel optimal kontrol ve ileri beslemeli kontrol yöntemlerinin birleştirilmesi/ Combining methods of the linear quadratic optimal control and feedforward control

### Özgünlük (Originality)

Genelleştirilmiş bir kontrol yapısının elde edilmesi. / Obtaining a generalized control structure.

### Bulgular (Findings)

Doğrusal optimal kontrolcünün başarısı ve bu kontrolcüye ileri beslemeli kontrolcü eklenmesi ile üstün performans elde edilmesi / The success of the linear optimal controller and achieving superior performance the addition of feedforward control to this controller

### Sonuç (Conclusion)

Önerilen kontrol yapısı ile bir kooperatif uyarlamalı hız kontrol sisteminin üstün performans ile kontrol edilmesi / Controlling a cooperative adaptive cruise system with superior performance with the proposed control structure.

### Etik Standartların Beyanı(Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Doğrusal Karesel Regülatör ve İleri Beslemeli Kontrol Yöntemi ile Otonom Araçlar için Kooperatif Uyarlamalı Hız Kontrol Sistemi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Fatih ADIGÜZEL<sup>1\*,2</sup>

<sup>1</sup>Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye

<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Türkiye

(Geliş/Received : 04.09.2022 ; Kabul/Accepted : 14.01.2023 ; ErkenGörünüm/Early View : 02.03.2023)

## ÖZ

Bu çalışmada, belli sayıda araç takımından oluşan uyarlamalı hız kontrol sistemlerinin kendiliğinden sürülmesi için doğrusal bir kontrolcü tasarımı ele alınmaktadır. Bunun yanında, uyarlamalı hız kontrol sisteminin performansının iyileştirilmesi için ileri beslemeli bir kontrolcü sunulmaktadır. Böylece kooperatif uyarlamalı hız kontrol sistemi elde edilmektedir.  $N$ , araç konvoyundaki araç sayısı olmak üzere, araçlar arasındaki uzunlamasına yönde matematiksel model  $N$  tane araç için elde edilmektedir. Sonrasında, doğrusal karesel optimal regülatör ve ileri beslemeli kontrol tasarımı ile araç konvoyunun hız kontrolü gerçekleştirilmektedir. Elde edilen kontrolcü sekiz araçlı bir konvoy için sayısal benzetim çalışmaları ve farklı hız yörünge profilleri ile test edilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Doğrusal karesel regülatör, kooperatif uyarlamalı hız kontrol, ileri beslemeli kontrol, otonom araç kontrol sistemleri.

## Cooperative Adaptive Cruise Control System for Autonomous Vehicles with Linear Quadratic Optimal Regulator and Feedforward Control Method

### ABSTRACT

This paper tackles the design of a linear controller for autonomous-driving adaptive cruise control systems consisting of platoons of vehicles in a given number. In addition to that, a feed-forward controller is presented in order to improve the performance of the adaptive cruise control system. The mathematical model is obtained for  $N$  vehicles in the longitudinal direction between vehicles, where  $N$  is the number of vehicles in the vehicle convoy. Afterward, the cruise control of the vehicle convoy is performed with the linear-quadratic optimal regulator and the feed-forward controller design. The devised controller has been tested with numerical simulation trajectory and different velocity profiles for an eight-vehicle convoy.

**Keywords:** Linear quadratic regulator, cooperative adaptive cruise control, feed-forward control, autonomous vehicle control systems.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otonom araç kontrol sistemleri otomatikleştirilmiş modern araçlar için bir araç kontrol sistemidir. Uyarlamalı hız kontrol sistemine sahip bir araç önündeki bir araca göre belli hız, belli aralıkta (zaman veya mesafe) takibi gerçekleştirebilmektedir [1-2]. Uyarlamalı hız kontrol sistemleri araçların uzun süreli tam otomatik sürüş hedefine ulaşması için etkili bir sürüş sağlamaktadır ve araştırmacılar bu sistemler üzerine oldukça fazla eğilimlerdir [3]. Araçlar arasındaki güvenliğin devam ettirilmesi için otonom araçlarda en genel olarak PID (proportional-integral-derivative) kontrol yöntemi araç hızlarını ve araçlar

arasındaki iç mesafeyi düzenlemek için kullanılmaktadır [3-6]. Doğrusal kontrolcülerin yanında kestirime dayalı model öngörülü kontrol yöntemleri [7-8] ve bulanık mantık kontrolcüler literatürde ilgi görmüş diğer öne çıkan yöntemlerdir [9-10]. Bu çalışmalarda model öngörülü kontrol yöntemlerinin model doğruluğuna hassasiyeti ve ağır işlem yüküne sahip olması, ve bulanık kontrol tabanlı yöntemlerde optimal sonuçların zorluğu ve çok parametrelili yapıda bir kontrolcü olması bahsedilen bu iki yöntemin PID kontrolcü yöntemine göre dezavantajlarıdır. Diğer taraftan, PID kontrolcüde de kontrol parametrelerinin belirlenmesi geçici durum cevabında zorluklar yaratmaktadır. Bunların dışında, hem uygulama kolaylığı hem de optimal sonuç verebilmesi yönüyle doğrusal karesel optimal regülatör kontrol metodu öne çıkmaktadır. Ayrıca, PID kazanç parametrelerinin belirlenmesinde de doğrusal karesel regülatör kullanılmaktadır [11]. Ayrıca, uyarlamalı hız kontrol sistemleri üzerine gerçekleştirilmiş bir araştırma

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)  
e-posta : fadiguzel@yildiz.edu.tr

çalışmasında literatürdeki diğer kontrol yaklaşımları verilmektedir [3].

Otonom araçlar için uyarlamalı hız kontrol sistemlerinde kontrol yapılarının ilerletilmesinin yanında araçların kendi aralarında haberleşmesi ile araçlar arası takip çok daha iyi seviyelere çıkmaktadır. Araçlara kablosuz kısa menzilli özel modemlerin dahil edilmesi ile sağlanan performans iyileştirilmesi sonucunda kooperatif hız kontrol sistemleri ortaya çıkmaktadır. Kooperatif yapıdaki bu sistemler daha önce bahsedilmiş olan uyarlamalı hız kontrol sistemlerinin ilerletilmiş bir modelidir ve böylece elde edilen kontrolcü yapısı uyarlamalı kontrol sistemi üzerine ileri beslemeli bir filtre tasarımı ile elde edilmektedir [12]. Bu modelde en önemli yenilikler arkadaki araca öndeki aracın hız bilgisinin iletilmesidir ve böylece konvoy düzeninde olan araçlar arasındaki özel takip anlayışının sıfır takip hatalı sistem performansının elde edilmesidir. Lider ve onu takip eden araçlardan oluşan konvoy sistemlerinin manevra kontrolü üzerine literatürde birçok çalışma mevcuttur [13-14]. [13] çalışmasında yazarlar, bir araç konvoyunda boyuna hareket ve yanıl hareket için PID kontrolcü, kayan kipli kontrolcü, model öngörülü kontrolcü,  $H_\infty$  kontrolcü, bulanık mantık kontrolcü, sinir ağlanır tabanlı kontrolcü ve doğrusal karesel regülatör kontrolcü stratejilerinden bahsetmektedirler. Bunların yanında [14] çalışması uyarlamalı hız kontrol sistemlerinin kooperatif anlayışla sürülmesine olanak sağlayan ileri beslemeli kontrolcü yöntemlerini ve stratejilerini ele almaktadır.

Bu çalışmada  $N$  tane otonom araçtan oluşan bir heterojen araç konvoyunda araçların sabit zaman aralığı takibi için bir geri beslemeli doğrusal kontrol yöntemi (doğrusal karesel optimal regülatör) tasarımı gerçekleştirilmektedir. Bunun yanında, araç takip performansını üst seviyelere çıkarmak için kablosuz haberleşme ağlarından faydalanan ileri beslemeli bir kontrolcü ile kontrol yapısı desteklenmektedir. Araç konvoyu için doğrusal model dinamiği durum uzay gösteriminde elde edildikten sonra doğrusal kontrol yöntemi tasarımı ve ileri beslemeli kontrol yapısı verilmektedir. Ayrıca, sayısal benzetim sonuçları ile kontrolcü performansı test edilmektedir. Sayısal benzetim çalışmalarında kooperatif hız kontrol sistemi, kablosuz haberleşmenin olmadığı hız kontrol sistemi ile karşılaştırılmaktadır ve kablosuz haberleşme varlığında (yani ileri beslemeli kontrol yapısı varlığında) araçların takiplerinin daha başarılı olduğu gözlenmektedir. Bahsedilenlerin yanında, bu çalışmanın literatüre katkıları:

- $N$  tane araçtan oluşan bir araç konvoy sistemi için sistem dinamik modelinin sistematik olarak elde edilmesi,
- Çok boyutlu dinamik sistem denkleminde göre kontrolcünün tasarlanması ve tasarlanan kontrolcünün konvoyda değişen araç sayısına göre kolaylıkla uygulanması,

- Tasarlanan sistematik kontrol yöntemi, ileri beslemeli bir kontrol yöntemi ile desteklenmesi ve böylece kooperatif uyarlamalı hız kontrol sisteminin elde edilmesi

şeklinde sıralanmıştır.

Bu çalışmanın devamı şu şekilde organize edilmektedir. Bir sonraki başlıkta araç üst seviyeli kontrolü için dinamik model verilmektedir ve sonrasında buna uygun olarak doğrusal karesel kontrolcü inşası sunulmaktadır. Devamında, ileri beslemeli kontrol yapısı tanıtılmaktadır. Sonraki başlıkta, sekiz araca sahip bir konvoy için gerçekleştirilen bilgisayar tabanlı benzetim çalışmaları verilmektedir ve kontrolcü başarısı gösterilmektedir. Son olarak, bu çalışmanın öne çıkan sonuçlarından bahsedilmektedir.

## 2. ARAÇ DİNAMİĞİ ve MODELLEMESİ (VEHICLE DYNAMICS and MODELLING)

Araç hız kontrol sistemlerinde üst seviyeli ve alt seviyeli iki kontrolcü yapısı bulunmaktadır [6], [14]. Üst seviyeli kontrolcü yapısı araç konvoyundaki araçlar için istenilen ivmelenmenin hesaplanmasında devredeyken, alt seviyeli kontrolcü yapısı istenilen ivmelenmenin veya yavaşlamanın gerçekleştirilmesi/ takip edilmesi için gerekli gaz ve fren durumlarının ayarlanmasında kullanılmaktadır. Bu çalışmada üst seviyeli bir kontrol yapısı ele alındığından, alt seviyeli kontrol yapısının iyi tasarlandığı ve gerekli isterleri yüksek oranda yerine getirdiği varsayılmaktadır. Bunun sebebi, alt seviye kontrolcünün sınırlı bant genişliğine sahip olması nedeniyle konvoydaki araçların arzulanan ivmeyi tam olarak takip edememesinin kaçınılmaz olmasıdır. Üst seviyeli bir kontrol yapısı tasarlayabilmek için temel bir araç dinamiği

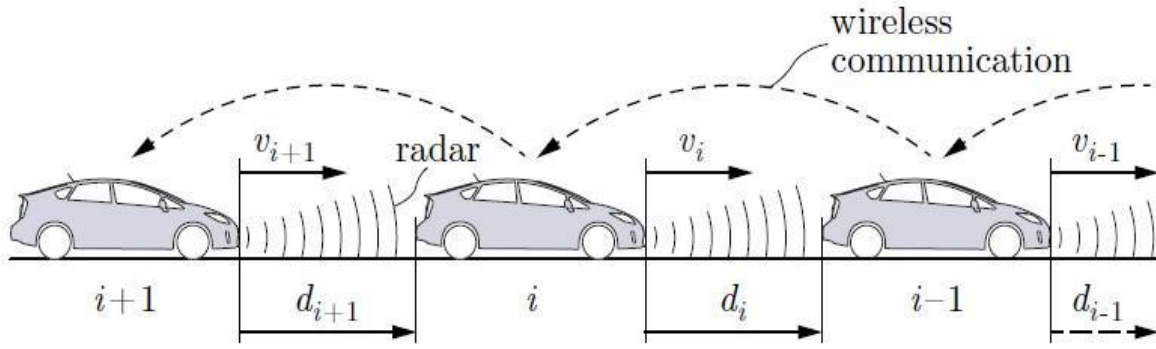
$$\alpha_i(t) = \ddot{x}_i(t) \quad (1)$$

$$\tau_i \dot{\alpha}_i(t) + \alpha_i(t) = u_i(t) \quad (2)$$

şeklinde elde edilmektedir ki burada  $\alpha_i$  araç konvoyundaki  $i$ . aracın ivmesini,  $x_i$  araç konvoyundaki  $i$ . aracın konumunu,  $\tau_i$  alt seviyeli kontrolcünün sonlu bant genişliğine denk gelen zaman gecikmesini farklı bir ifadeyle iç eyleyici dinamiğine ait parametreyi,  $u_i$  üst seviyeli kontrolcü tarafından üretilen ivmelendirme giriş sinyali yani kontrol sinyali girişini göstermektedir. Bu durumda, (1) ve (2) denklemleri kullanılarak, araç dinamiğinin transfer fonksiyonu

$$G_i(s) = \frac{X_i(s)}{U_i(s)} = \frac{1}{s^2(\tau_i s + 1)} \quad (3)$$

biçiminde elde edilmektedir [5], [14].



Şekil 1. Araç Konvoyundaki Sıralı Araçların Gösterimi [15] (Representation of the Vehicles in the Vehicle Convoy [15])

### 3. DOĞRUSAL KARESEL REGÜLATÖR (DKR) TASARIMI (LINEAR QUADRATIC REGULATOR (LQR) DESIGN)

Bu başlıkta  $N$  tane araçtan oluşan bir otonom konvoy sisteminin kontrolü için doğrusal karesel optimal regülatör tasarımı ve analizleri verilmektedir.  $N$  tane araç için bahsedilen tasarım ve analizlerin genelleştirilmiş halde elde edilmesi için araçlar arasındaki uzaklık hesaplama felsefesinin, araçlar arasındaki mesafe hesaplamalarının ve araç konvoy modelinin oluşturulması gerekmektedir.

Literatürde otonom araç konvoylarındaki araçların uzaklıkları üzerine üç farklı yakınlık/uzaklık yöntemi bulunmaktadır [2]. Sabit uzaklık, sabit zaman aralığı ve değişken zaman aralığı bu yöntemlerdir. Sabit zaman aralığı yöntemi daha iyi performans elde edilmesi ve kolay uygulanabilirlik özelliklerinden dolayı uygulamada fazlaca tercih edilmektedir. Araç konvoyunu temsili gösterimi Şekil 1'de sunulmaktadır. Şekil 1'de  $N$  tane araçtan oluşan konvoydaki  $i$ . araç için araç hızları ( $v_{i+1}$ ,  $v_i$ ,  $v_{i-1}$ ) ve herhangi iki araç arasındaki uzaklık ( $d_{i+1}$ ,  $d_i$ ,  $d_{i-1}$ ) gösterilmektedir. Araçlar arasında sabit zaman aralığı politikası düşünülerek,  $i$ . araç için istenilen görece konum farkı ( $d_{d,i}$ ):

$$d_{d,i} = p_i + \dot{x}_i t_{hd,i} \quad (4)$$

biçiminde yazılabilmektedir ki burada  $p_i$  durma mesafesini,  $\dot{x}_i$  ifadesi  $i$ . aracın hızını,  $t_{hd,i}$  ifadesi  $i$ . aracın istenilen zaman aralığını göstermektedir. Tasarımların basitliği için durma mesafesi sıfır olarak ayarlanabilmektedir [6]. İki araç arasındaki görece gerçek uzaklık

$$d_i = x_{i-1} - x_i \quad (5)$$

olarak yazılmaktadır. (4) ve (5) kullanılarak gerçek ve istenilen görece uzaklık hata tanımı ve hata dinamiği,  $e_i$  ifadesi,  $i$ . araç için hata değişkenini ve  $d_{d,i}$  araç için istenilen görece konum farkını göstermek üzere

$$\begin{aligned} e_i &= d_i - d_{d,i} \\ e_i &= x_{i-1} - x_i - \dot{x}_i t_{hd,i} \end{aligned} \quad (6)$$

olarak elde edilmektedir.  $N$  tane araçtan oluşan konvoydaki tüm araçlar ve araçlar arasındaki uzaklıkların doğrusal modeli uygun derecelere ifade edilmiş  $A$ ,  $B$  ve  $C$  matrisleri ile

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) \quad (7)$$

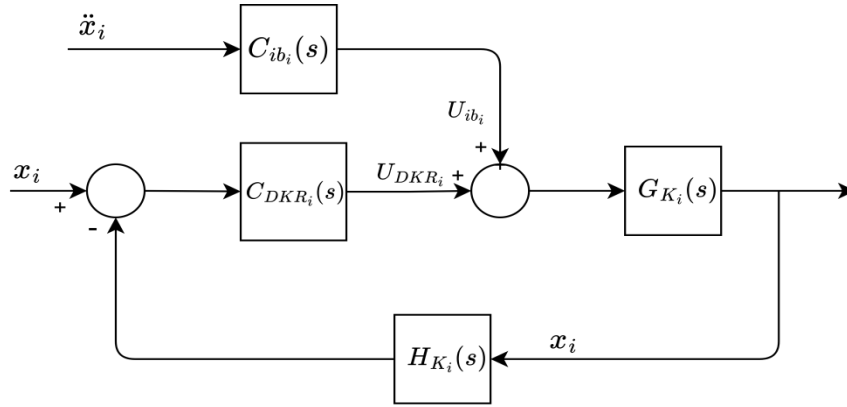
$$Y(t) = CX(t) \quad (8)$$

olarak yazılabilmektedir. Burada  $x_d$  konvoyun takip ettiği araç konumunu,  $v_d$  konvoyun takip ettiği aracın hızını,  $\alpha_d$  konvoyun takip ettiği aracın ivmesini göstermek üzere

$$\begin{aligned} X(t) &= \begin{bmatrix} x_d(t) - x_1(t) \\ x_1(t) - x_2(t) \\ \vdots \\ x_{N-2}(t) - x_{N-1}(t) \\ v_d(t) - v_1(t) \\ v_1(t) - v_2(t) \\ \vdots \\ v_{N-2}(t) - v_{N-1}(t) \end{bmatrix} \\ U(t) &= [\alpha_d(t) \quad \alpha_1(t) \quad \cdots \quad \alpha_{N-1}(t)] \\ Y(t) &= \begin{bmatrix} x_d(t) - x_1(t) \\ x_1(t) - x_2(t) \\ \vdots \\ x_{N-2}(t) - x_{N-1}(t) \end{bmatrix} \\ A &= \begin{bmatrix} 0_{(N-1 \times N-1)} & I_{(N-1 \times N-1)} \\ 0_{(N-1 \times N-1)} & 0_{(N-1 \times N-1)} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B &= \begin{bmatrix} 0_{(N-1 \times 1)} & -t_{hd} I_{(N-1 \times N-1)} \\ [I_{(N-1 \times N-1)} & 0_{(N-1 \times 1)}] + [0_{(1 \times N-1)} & -I_{(N-1 \times N-1)}] \end{bmatrix} \\ C &= [-I_{(N-1 \times N-1)} \quad 0_{(N-1 \times N-1)}] \end{aligned}$$

biçiminde yazılabilmektedir ki  $0_{(* \times *)}$  ve  $I_{(* \times *)}$  sırasıyla sıfır ve birim matrisleri ve bu matrislere ait alt indisler ise bu matrislerin boyutlarını göstermektedir. Böylece  $N$  tane araçtan oluşan bir konvoy sistemi için doğrusal bir model oluşturulmuştur. Bu noktada, oluşturulan doğrusal modelde ((7)-(8)) kontrol edilebilirlik ve gözlenebilirlik testlerinin yapılması [16] sonrasında sistem her iki test için tam ranklı olarak elde edilmektedir. Devamında DKR kontrolcüsü tasarımına geçilebilmektedir. DKR kontrolcüsü maliyet fonksiyoneli  $J$ :



**Şekil 2.** Kooperatif uyarlamalı hız kontrol sistemi için kapalı çevrim sistem gösterimi. (Representation of closed-loop system for cooperative adaptive cruise control system.)

$$J = \int_{t_0}^{\infty} (X^T(t)QX(t) + U^T(t)RU(t))dt \quad (9)$$

şeklinde yazıldığında  $Q = C^T C$  ve  $R$  sırasıyla durumlar üzerinde ve kontrol girişleri üzerinde ceza katsayı matrisleri olmak üzere yazılmaktadır. Ayrıca, DKR kontrolcü maliyet fonksiyonunda kontrol sinyallerini cezalandıran  $R$  ceza matrisi

$$R = \gamma \begin{bmatrix} \frac{1}{\epsilon} & 0_{(1 \times N-1)} \\ 0_{(N-1 \times 1)} & I_{(N-1 \times N-1)} \end{bmatrix}$$

olarak tasarlanmaktadır ki  $\gamma$  sistem çıkışını ayarlayabilmek için bir kontrolcü kazancı,  $\epsilon$  oldukça küçük pozitif bir sayıyı göstermektedir. Bu sabit parametrelerin değerleri mevcut hesaplama yüküne bağlı olarak ayarlanabilmektedir. Geri beslemeli kontrolcü

$$U(t) = -R^{-1}B^T P X(t) = -KX(t) \quad (10)$$

sinyali,  $P$  pozitif sabit değerlere sahip bir matris olmak üzere,

$$0 = PA + AP^T - PBR^{-1}B^T P + Q \quad (11)$$

biçiminde tanımlanan matematiksel bir diferansiyel denklemin çözümü sonucunda elde edilmektedir. Burada elde edilen kontrolcü tasarımı  $N$  tane araçtan oluşan konvoyda uyarlamalı hız kontrol sistemini için önerilmektedir. Kooperatif uyarlamalı hız kontrol sistemi elde edilmesi araçlar arasındaki haberleşme ağının aktif kullanılması ile sağlanabilmektedir. Bu çalışmada, kablosuz haberleşme ağı öndeki aracın ivmelenme verilerini sağlamaktadır ve ileri beslemeli bir kontrolcü ile kooperatif uyarlamalı hız kontrol sistemi elde edilmektedir. Bahsedilen kontrolcü yapısı Şekil 2'de şematik olarak gösterilmektedir.

Yukarıda verilen blok diyagramında  $x_i$  ve  $\ddot{x}_i$  değişkenleri sırasıyla  $N$  araçlı bir konvoyda  $i$ . aracın konumunu ve ivmesini,  $G_{K_i}(s)$  ve  $H_{K_i}(s)$  sırasıyla  $N$  araçlı bir konvoyda  $i$ . aracın transfer fonksiyonunu ve geri besleme yolundaki transfer fonksiyonunu,  $C_{DKR_i}(s)$  ve  $C_{ib_i}(s)$  sırasıyla geri besleme kontrolcüsü

ve ileri besleme kontrolcüsünü,  $U_{DKR_i}(s)$  ve  $U_{ib_i}(s)$  ifadeleri sırasıyla geri besleme kontrolcü sinyali ve ileri besleme kontrolcü sinyalini göstermektedir.

#### 4. İLERİ BESLEMELİ KONTROLÇÜ TASARIMI (DESIGN OF FEEDFORWARD CONTROLLER)

Kooperatif uyarlamalı hız kontrol sisteminde her bir araç önündeki aracın ivmelenme bilgisi almaktadır ve böylece bu yöntem klasik uyarlamalı hız kontrol sisteminden farklı olarak ileri beslemeli bir kontrol yapısı ile desteklenmektedir. Ayrıca bu şekilde bir kontrol yapısı araç takip sistemindeki gecikmeleri azaltmaktadır. Şekil 2'deki kontrolcü diyagramında kablosuz haberleşme ağında zaman gecikmelerinin olmadığı varsayılarak,  $x_{i-1}$  ve  $e_i$  sinyalleri ile ilişkili transfer fonksiyonu

$$\frac{E_i(s)}{X_{i-1}(s)} = \frac{1-s^2 C_{ib_i}(s) G_{K_i}(s) H_{K_i}(s)}{1+C_{DKR_i}(s) G_{K_i}(s) H_{K_i}(s)} \quad (12)$$

şeklinde yazılabilmektedir. Burada, ileri beslemeli kontrolcü hata sinyalini sıfırlayacak şekilde tasarlanması istendiğinden, (12) transfer fonksiyonundaki ileri beslemeli kontrolcü

$$1 - s^2 C_{ib_i}(s) G_{K_i}(s) H_{K_i}(s) = 0 \quad (13)$$

denklemini dikkate alınarak

$$C_{ib_i}(s) = \frac{1}{s^2 G_{K_i}(s) H_{K_i}(s)} \quad (14)$$

biçiminde tasarlanmaktadır [6], [14]. Burada belirtmelidir ki ileri beslemeli kontrol yapısındaki kablosuz haberleşme gecikmelerinin olmadığı varsayımı kontrolcü sinyalinin basitleştirilmesi için yapılmıştır, ancak benzetim çalışmalarında kablosuz haberleşme gecikme zamanı 0.3 s olarak ayarlanmıştır.

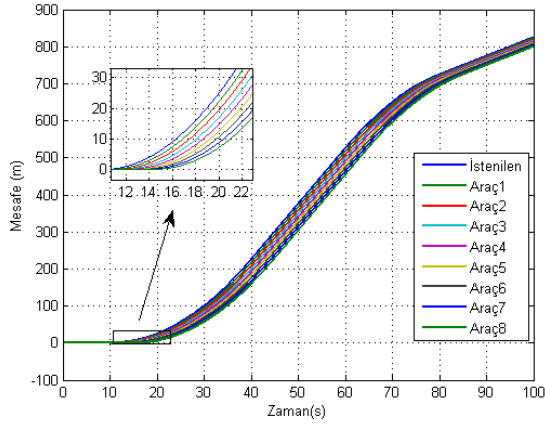
#### 5. BENZETİM ÇALIŞMALARI (SIMULATION STUDIES)

Bu alt başlıkta otonom araç konvoyu için tasarlanan doğrusal karesel regülatör ve ileri beslemeli kontrolcülerden oluşan kontrol yapısının uygulanabilirliğinin gösterilmesi için MATLAB ortamında gerçekleştirilen sayısal benzetimler

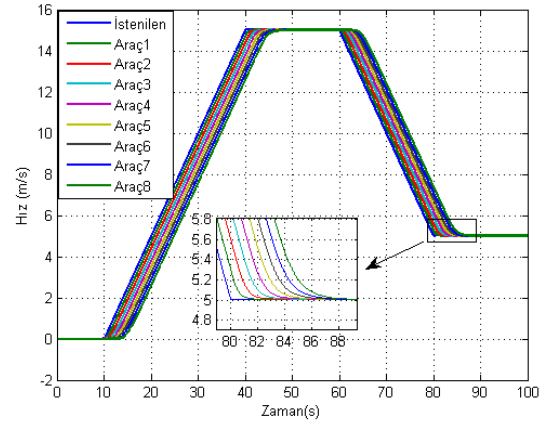
sunulmaktadır. N tane araç için gerçekleştirilen tasarımda  $N = 9$  ve  $\tau_i = \{0.3, 0.4, 0.6, 0.35, 0.7, 0.65, 0.55, 0.65\}$ ,  $i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$  için benzetimler sunulmaktadır.  $t_{hd_i}$  ifadesi istenilen takip zaman aralığı tüm araçlar için aynı değerde ve 0.6 s olarak alınmıştır. Bu çalışmada sabit zaman aralığı stratejisi ile gerçekleştirilen kooperatif uyarlamalı hız kontrol sistemi için istenilen zaman aralığı, konvoy sisteminin kararsız olmamasını sağlayacak şekilde seçilmektedir. Ayrıca, lider araç aniden durduğunda veya hızını koruduğunda, arkadaki aracın öndeki araca çarpmaması için hesaplanan bu süre değeri, yol durumuna, sürücü tercihin ve tecrübesine göre değişebilmektedir. Bu noktada bu değer literatürdeki çalışmalara bakıldığında 0.6 s ile 0.7 s arasında ele alınmaktadır [14]. Kontrolcü kazançları  $\gamma = 0.02$ ,  $\epsilon = 1e - 5$  olarak atanmaktadır.  $\gamma$  ve  $\epsilon$  kontrolcü kazanç değerleri, DKR kontrolcü maliyet fonksiyoneli kontrol sinyallerini cezalandıran R matrisini şekillendirmektedir. R matrisi için büyük bir değer seçmek, sistemi daha az enerji ile kararlı kılmaya çalıştığımız anlamına gelmektedir. Bu çalışmada ele alınan kooperatif uyarlamalı hız kontrol sistemi, agresif sistem yanıtı ve ani frenleme gibi özellikleri barındırdığı için R değeri küçük seçilmelidir. Ayrıca, bu değerler ampirik olarak atanmıştır. Benzetim sonuçları iki farklı istenilen hız profili için sunulmaktadır. Her iki hız profili için de kontrolcü kazançları aynı seçilmektedir. Hesaplanan kontrolcü kazancı sayfa sonunda verilmiştir. Burada belirtmek gerekir ki kontrol kazancının ilk satırı istenilen araç ivmesi, konvoyun kontrolü için gerekli değildir, ilk satır değerleri sıfıra yuvarlanmaktadır. Gerçekleştirilen benzetim çalışmaları iki farklı hız profili için sunulmaktadır (Şekil 3(b) ve Şekil 5(b)). Benzetim çalışmaları ile sunulan sonuçlarda, araç konumları (Şekil 3(a) ve Şekil 5(a)), araç hızları (Şekil 3(b) ve Şekil 5(b)), araç ivmeleri (Şekil 4(a) ve Şekil 6(a)) ve son olarak 0.6 olarak ayarlanan sabit zaman aralığının takibini göstermek için araç ilerleme zamanları (Şekil 4(b) ve Şekil 6(b)) verilmektedir.

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -7.0026 & 0.9698 & 0.1500 & 0.0325 & 0.0011 & -0.0075 & -0.0072 & -0.0034 \\ -0.9390 & -6.9676 & 0.9820 & 0.1502 & 0.0288 & -0.0029 & -0.0094 & -0.0058 \\ -0.2718 & -0.9230 & -6.9348 & 0.9801 & 0.1455 & 0.0232 & -0.0067 & -0.0084 \\ -0.0885 & -0.2645 & -0.9206 & -6.9357 & 0.9756 & 0.1378 & 0.0152 & -0.0091 \\ -0.0236 & -0.0829 & -0.2603 & -0.9184 & -6.9376 & 0.9673 & 0.1239 & 0.0037 \\ 0.0009 & -0.0187 & -0.0768 & -0.2537 & -0.9142 & -6.9415 & 0.9487 & 0.0927 \\ 0.0076 & 0.0038 & -0.0127 & -0.0668 & -0.2405 & -0.9041 & -6.9525 & 0.8845 \\ 0.0056 & 0.0069 & 0.0059 & -0.0046 & -0.0475 & -0.2054 & -0.8640 & -7.0149 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.5364 & 0.0568 & 0.0428 & 0.0333 & 0.0237 & 0.0143 & 0.0066 & 0.0017 \\ -0.3662 & -1.5255 & 0.0656 & 0.0491 & 0.0365 & 0.0236 & 0.0118 & 0.0035 \\ -0.0971 & -0.3597 & -1.5192 & 0.0708 & 0.0519 & 0.0359 & 0.0198 & 0.0066 \\ -0.0097 & -0.0918 & -0.3533 & -1.5126 & 0.0759 & 0.0534 & 0.0324 & 0.0124 \\ 0.0182 & -0.0060 & -0.0858 & -0.3453 & -1.5042 & 0.0818 & 0.0529 & 0.0235 \\ 0.0221 & 0.0194 & -0.0018 & -0.0779 & -0.3338 & -1.4916 & 0.0891 & 0.0456 \\ 0.0160 & 0.0200 & 0.0196 & 0.0029 & -0.0664 & -0.3145 & -1.4696 & 0.0944 \\ 0.0072 & 0.0108 & 0.0149 & 0.0169 & 0.0072 & -0.0471 & -0.2715 & -1.4149 \end{bmatrix}$$

Benzetim sonuçları incelendiğinde her iki hızlanma profilinde de konvoydaki araçların başarılı takipleri görülmektedir. Bu sonuçlara bakıldığında sabit zaman aralığı düşünülerek tasarlanan ileri beslemeli kontrolcü ile doğrusal karesel optimal regülatör kontrolcüsünün otonom araçlardan oluşan bir heterojen araç konvoyunda takip başarısı gözlenmektedir. Bunun yanında, araç sayısı 8 olarak alınmasına rağmen, kooperatif uyarlamalı hız kontrol sisteminde hız ve ivme açısından konvoyda arkaya gidildikçe artış olmadığı gözlenmiştir. Ayrıca burada belirtmelidir ki doğrusal karesel regülatör kontrolcüsü ileri beslemeli kontrol yapısı ile birleştirildiğinde araç takiplerinde gecikmeler oldukça azaltılabilmektedir. Hem bunu göstermek hem de önerilen yapının etkinliğini daha iyi anlamak için yukarıdaki benzetimlere ek olarak, aynı hız profilleri ve aynı doğrusal karesel regülatör tasarımı kullanılarak, iki benzetim çalışması daha gerçekleştirilmiştir. Bu benzetimler, sunulan iki benzetim ile aynı açıklama sıralarıyla verilmektedir ve sadece doğrusal karesel regülatör kontrolcüsünün başarısı gösterilmektedir. Böylece, doğrusal karesel regülatör kontrolcüsünün başarısı tek başına incelenmektedir ve ayrıca ileri beslemeli kontrol yapısının sistem performansına olan iyileştirmeleri görülmektedir. Uyarlamalı hız kontrol sistemi için gerçekleştirilen benzetim sonuçları Şekil 7, Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10'da sunulmaktadır. Kooperatif hız kontrol sisteminden alınan sonuçlar ile karşılaştırıldığında her iki hız profilinde de araçların hızlarında ve ivmelerinde aşımaların olduğu görülmektedir ( Şekil 3(b) – Şekil 7(b), Şekil 4(a) - Şekil 8(a) ve Şekil 5(b) - Şekil 9(b), Şekil 6(a) - Şekil 10(a)). Bunun yanında araçların ilerleme zamanları üçte bir oranında iyileşmektedir ( Şekil 4(b) - Şekil 8(b) ve Şekil 6(b) - Şekil 10(b)). Buradan anlaşılmaktadır ki uyarlamalı hız kontrol sistemi tek başına başarılı bir takibi sağlamaktadır ancak kablosuz haberleşme ağının kullanan ileri beslemeli bir kontrolcü yapısı ile çok daha üstün bir performans elde edilebilmektedir.

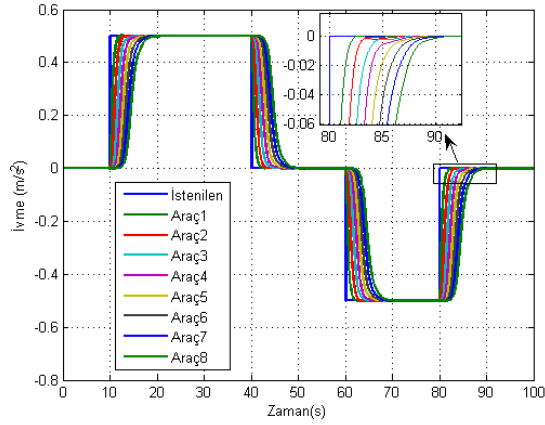


(a)

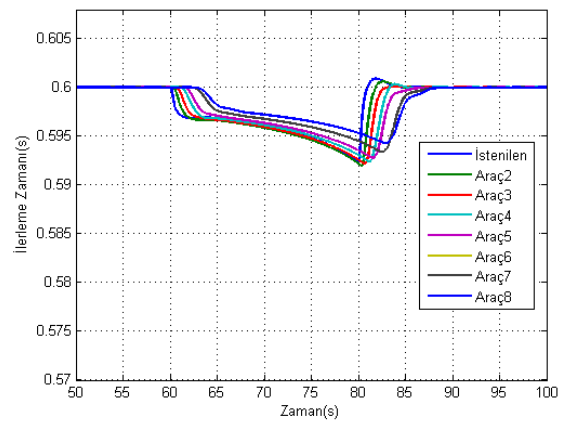


(b)

**Şekil 3.** Kooperatif uyarlamalı hız kontrol sistemi: benzetim sonuçları hız profili 1: araç konumları (a), araç hızları (b) (Cooperative adaptive cruise control system: simulation results speed profile 1: vehicle positions (a), vehicle speeds (b))

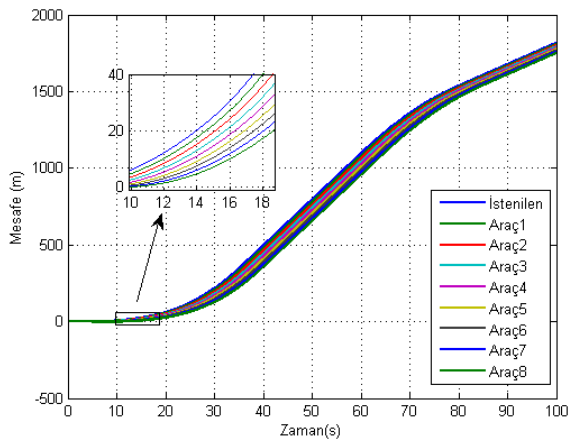


(a)

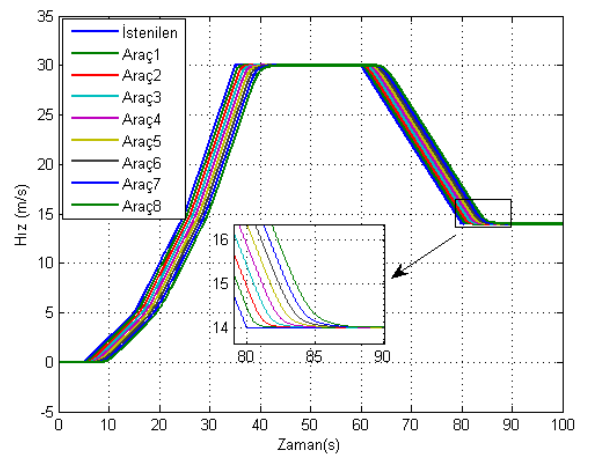


(b)

**Şekil 4.** Kooperatif uyarlamalı hız kontrol sistemi: benzetim sonuçları hız profili 1: araç ivmeleri (a), 50 s -60 s için araç ilerleme zamanları (b) (Cooperative adaptive cruise control system: simulation results speed profile 1, vehicle accelerations (a),



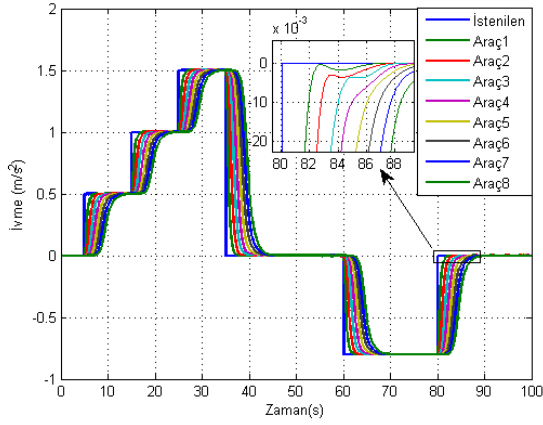
(a)



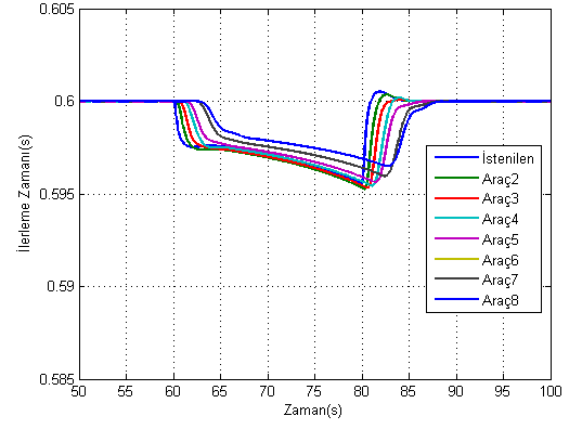
(b)

**Şekil 5.** Kooperatif uyarlamalı hız kontrol sistemi: benzetim sonuçları hız profili 2: araç konumları (a), araç hızları (b) (Cooperative adaptive cruise control system: simulation results speed profile 2: vehicle positions (a), vehicle speeds (b))



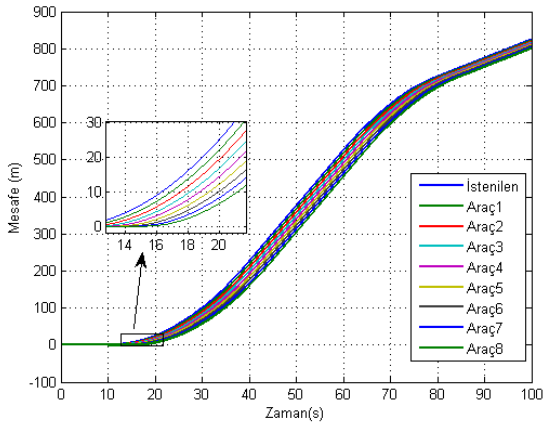


(a)

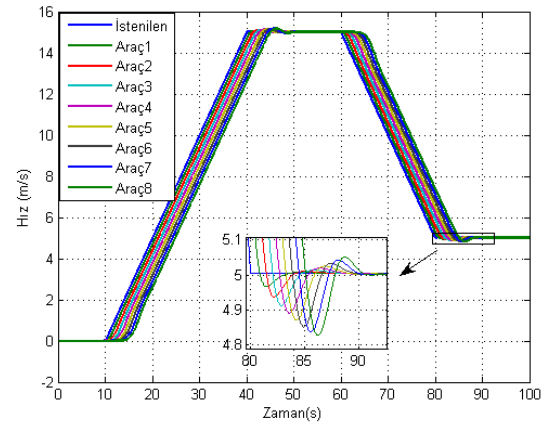


(b)

**Şekil 6.** Kooperatif uyarlamalı hız kontrol sistemi: benzetim sonuçları hız profili 2: araç ivmeleri (a), 50 s -60 s için araç ilerleme zamanları (b) (Cooperative adaptive cruise control system: simulation results speed profile 2: vehicle accelerations (a), vehicle headway time for 50 -60 sec (b))

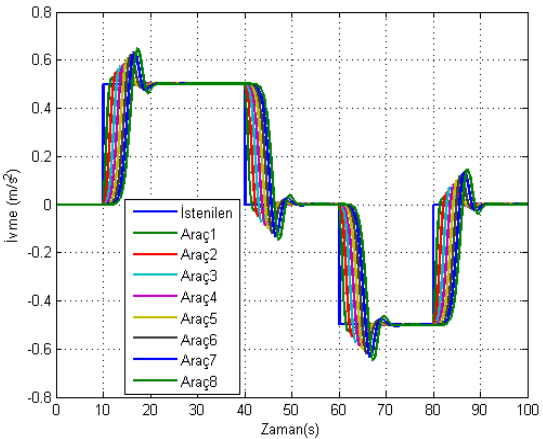


(a)

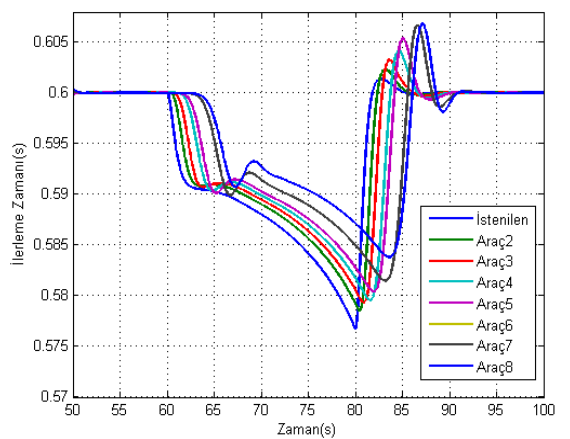


(b)

**Şekil 7.** Uyarlamalı hız kontrol sistemi: benzetim sonuçları hız profili 1: araç konumları (a), araç hızları (b) (Adaptive cruise control system: simulation results speed profile 1: vehicle positions (a), vehicle speeds (b))

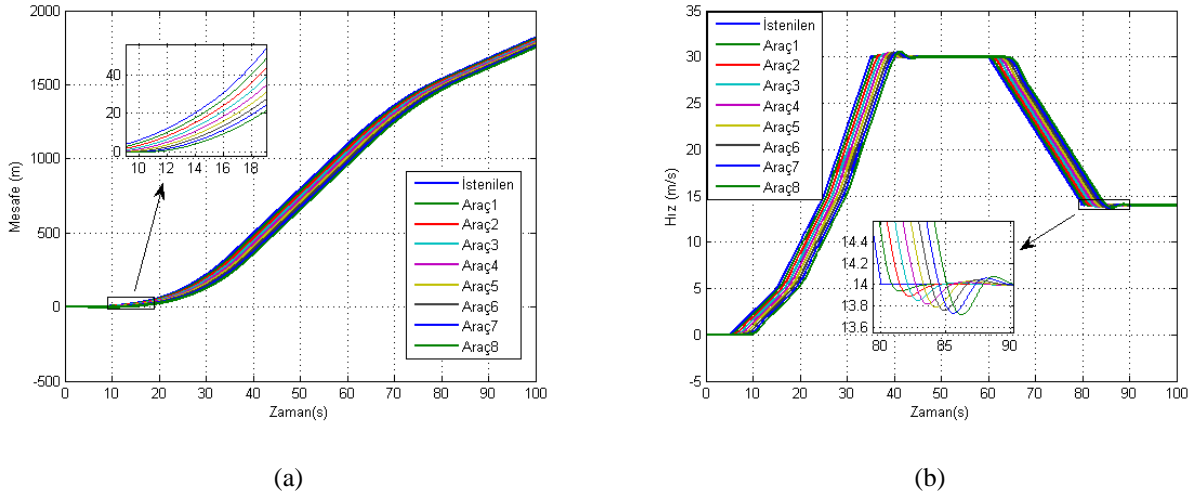


(a)

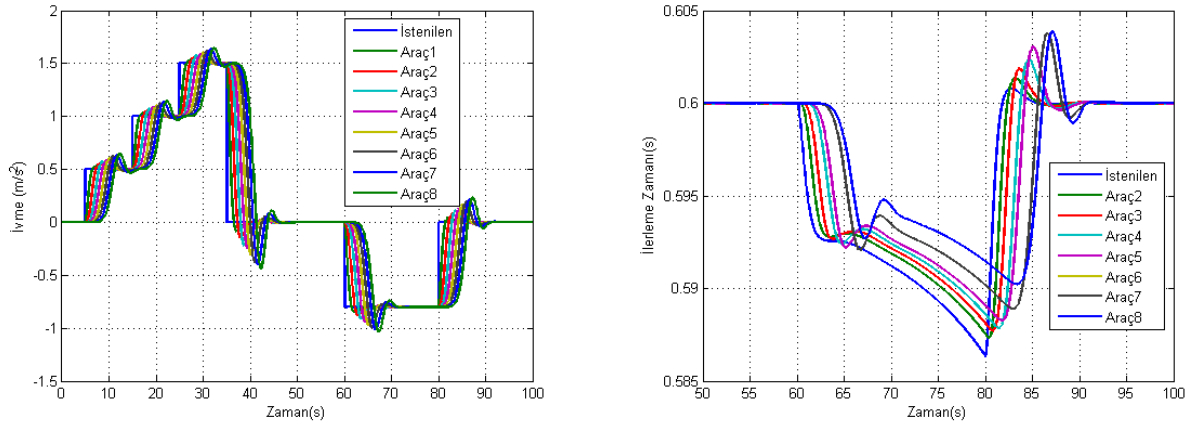


(b)

**Şekil 8.** Uyarlamalı hız kontrol sistemi: benzetim sonuçları hız profili 1: araç ivmeleri (a), 50 s -60 s için araç ilerleme zamanları (b) (Adaptive cruise control system: simulation results speed profile 1: vehicle accelerations (a), vehicle headway time for 50 -60 sec (b))



Şekil 9. Uyarlamalı hız kontrol sistemi: benzetim sonuçları hız profili 2: araç konumları (a), araç hızları (b) (Adaptive cruise control system: simulation results speed profile 2: vehicle positions (a), vehicle speeds (b))



Şekil 10. Uyarlamalı hız kontrol sistemi: benzetim sonuçları hız profili 2: araç ivmeleri (a), 50 s -60 s için araç ilerleme zamanları (b) (Adaptive cruise control system: simulation results speed profile 2: vehicle accelerations (a), vehicle headway time for 50 -60 sec (b))

Çizelge 1. Kooperatif uyarlamalı hız kontrol (KUHK) sistemi ve uyarlamalı hız kontrol (UHK) sistemi için takip zaman değerlerinin karşılaştırılması (istenilen takip zamanı  $t_{hd_i}$ : 0.6 s) (Comparison of the headway time values for the cooperative adaptive cruise control system (CACC) and adaptive cruise control system (ACC) (desired headway time  $t_{hd_i}$ : 0.6 s))

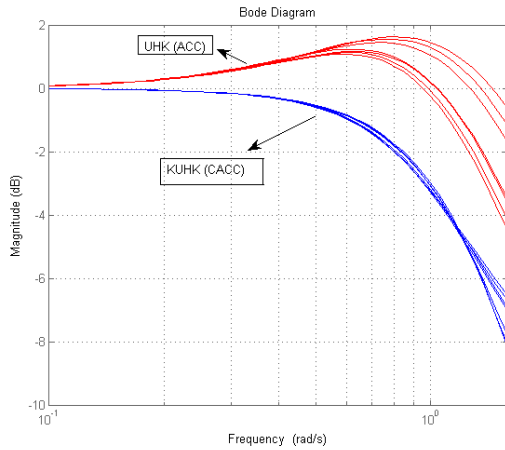
Karşılaştırma Kriterleri	Hız Profili 1		Hız Profili 2	
	UHK(ACC)	KUHK(CACC)	UHK(ACC)	KUHK(CACC)
Min. $t_{hd_i}$ (s)	0.5767	0.5919	0.5767	0.5919
Mak. $t_{hd_i}$ (s)	0.6070	0.6009	0.6070	0.6009
Ortalama $t_{hd_i}$ (s)	0.5951	0.5982	0.5951	0.5982
$t_{hd_i}$ takip hatası RMS değeri	0.0082	0.0029	0.0082	0.0029

Optimal doğrusal kontrol stratejisine ve ileri beslemeli kontrol yöntemine dayalı kooperatif uyarlamalı hız kontrol sistemine ve sadece optimal kontrol yöntemi ile ele alınan uyarlamalı hız kontrol sistemine ait performans sonuçları hem grafik olarak hem de sayısal

analitik hesaplamalarla karşılaştırılmıştır. Çizelge 1'de konvoy araç takip süresi baz alınarak hem hız profili 1 hem de hız profili 2 için bazı hesaplamalar sunulmaktadır. Bu sonuçlarda, minimum araç takip süresi, maksimum araç takip süresi, ortalama araç takip süresi ve araç takip hatasının RMS değerleri sunulmaktadır. Çizelge 1 sonuçları kooperatif uyarlamalı hız kontrol sisteminin başarısını analiz etmemize yardımcı olmaktadır. Örneğin, hız profili 2'de araç takip

hata RMS değeri 2.5 katına kadar iyileştiği görülmektedir. Ayrıca, hız profili l'de ise bu değer 4 katına kadar ilerletilmektedir. Diğer taraftan sunulan her bir karşılaştırma kriterinde önerilen bütünlük kontrol stratejisinin başarısı görülmektedir.

Uyarlamalı hız kontrol sistemlerinde bir diğer başarı analiz yöntemi frekans alanında yapılmaktadır. Bu analiz yöntemi, konvoy araç takip sisteminde takip hatasının konvoyda arkaya doğru azaldığını gösteren bir özelliktir ve bu özellik dizi/konvoy kararlılık (string stability) olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemde, konvoyu oluşturan her araç için dizi kararlılık transfer fonksiyonu elde edilebilmektedir [15], [17-19]. Dizi kararlılık transfer fonksiyonlarının genlik frekans cevaplarının aşısız olması durumunda kesin dizi kararlılığı (strict string stability) elde edilmektedir. Özellikle heterojen araç konvoylarında başarı analizinin yapılmasında ve pratikte dizi kararlılığının elde edilmesinde bu yöntem önem arz etmektedir. Bu çalışmada kooperatif uyarlamalı hız kontrol sistemi için önerilen bütünlük kontrol stratejisi sonucunda her araca ait genlik frekans cevapları Şekil 11'de çizdirilmiştir. Ayrıca, uyarlamalı hız kontrol sisteminde elde edilen genlik frekans cevapları da Şekil 11 üzerine eklenmiştir. Şekil 11'de görülmektedir ki kooperatif uyarlamalı hız kontrol sisteminde aşısız bir frekans tepkisi elde edilirken, uyarlamalı hız kontrol sisteminde aşım görülmektedir. Bu sonuç, kooperatif uyarlamalı hız kontrol sisteminin kesin dizi kararlılığını ve başarısını göstermektedir.



**Şekil 11.** Kooperatif uyarlamalı hız kontrol (KUHK) sisteminde ve uyarlamalı hız kontrol (UHK) sisteminde dizi kararlılığın karşılaştırılması (Comparison of the string stability in the cooperative adaptive cruise control system (CACC) and in the adaptive cruise control system (ACC))

Bu çalışmada gerçekleştirilen kontrolcü stratejisinin geçerliğinin doğrulanması için [6] çalışmasında sunulan sonuçlar bu çalışmada sunulan sonuçlar ile kıyaslanabilir. Örnek alınan çalışmada UHK ve KUHK sistemi sonuçları (örn. UHK için mak.  $t_{hd_i}$  (s): 0.6089, KUHK için  $t_{hd_i}$  (s): 0.6012) ile bu çalışmada elde edilen

UHK ve KUHK sonuçları (örn. UHK için mak.  $t_{hd_i}$  (s): 0.6070, KUHK için mak.  $t_{hd_i}$  (s): 0.6009) örtüşmektedir. Bu örtüşme düşünüldüğünde örnek çalışmada maksimum araç takip süresinde yaklaşık 8 kat kadar iyileştirme olduğu, bu çalışmada ise her iki hız profilinde de maksimum araç takip süresinde yaklaşık 7.8 kat kadar istenilen değere yaklaştığı görülmektedir. Bu sonuçlar göstermektedir ki bu çalışmada önerilen bütünlük kontrolcü stratejisi amacına ulaşmaktadır.

## 6. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada otonom bir araç konvoyunda araçların sabit zaman aralığında birbirlerini takip edebilme problemi doğrusal karesel optimal regülatör ve ileri beslemeli bir kontrol yapısı ile incelenmektedir. Araç konvoyundaki araç sayısının değişebilir olduğu düşünülerek genelleştirilmiş bir doğrusal durum uzay modeli elde edilmiştir. Sonrasında, doğrusal karesel regülatör tasarımı gerçekleştirilmiştir ve devamında ileri beslemeli bir kontrolcü ile araçların için kooperatif uyarlamalı hız sistemi oluşturulmuştur. Genel tasarım prosedürü sunulduktan sonra sekiz araçtan oluşan bir konvoy için elde edilen yöntem benzetim sonuçları ile desteklenmiştir. Sayısal benzetimlerde iki farklı hız profili için sonuçlar verilmektedir. İki farklı hız profili için gerçekleştirilen benzetim sonuçlarında kooperatif uyarlamalı hız kontrol sisteminin uyarlamalı kontrol sistemine göre araç takibinde aşısız bir cevap verdiği görülmektedir ve böylece dizi kararlılığı sağlamaktadır. Ayrıca, istenilen takip zamanı üzerine verilen hesaplamalar (Çizelge 1) sonrasında minimum araç takip süresinde yaklaşık en az 2.5 kat iyileşmenin, maksimum araç takip süresinde en az 7.8 kat iyileşmenin, ortalama araç takip süresinde en az 2.5 kat ilerlemenin ve araç takip hatasının RMS değerlerinde en az 2 kat güçlendirmenin olduğu görülmektedir. Bu veriler öncesinde de önerilen kooperatif uyarlamalı hız sistemi, ileri beslemeli kontrolcü yapısı olmaksızın yani uyarlamalı hız sistemi performansı ile karşılaştırmıştır ve sunulan sonuçlar önerilen bütünlük kontrolcü yapısının uygulanabilirliği ve başarısını göstermektedir.

## ETİK STANDARTLARIN

### BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

## YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

### Fatih ADIGÜZEL:

Makalenin yazım, tasarım, düzeltme ve kontrol işlemlerini yapmıştır. Ayrıca, benzetim çalışmalarını yapmış ve sonuçlarını analiz etmiştir. / He carried out the writing, designing, editing and control of the article. He

also conducted simulation studies and analyzes the results.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur. / There is no conflict of interest in this study.

#### KAYNAKLAR(REFERENCES)

- [1] Şahin, H., “Adaptif Hız Kontrol (AHK) Sistemindeki Mesafe Kontrol Sisteminin Sabit Mesafe Ve Sabit Zaman Yöntemleriyle Uygulamalı Olarak Karşılaştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 20(1), 205-210, (2017).
- [2] Jiang R., Wu, Q. S., “The adaptive cruise control vehicles in the cellular automata model”, *Physics Letters A*, 359(2): 99-102, (2006).
- [3] He Y., Ciuffo B., Zhou Q., Makridis M., Mattas K., Li J.,..., Xu J., “Adaptive cruise control strategies implemented on experimental vehicles: A review”, *IFAC-PapersOnLine*, 52(5): 21-27, (2019).
- [4] Shladover S. E., Nowakowski C., Lu X. Y., Ferlis R., “Cooperative adaptive cruise control: Definitions and operating concepts”, *Transportation Research Record*, 2489(1): 145-152, (2015).
- [5] Güvenç L., Uygan I.M.C., Kahraman K., Karaahmetoglu R., Altay I., Sentürk M., ..., Efendioğlu B., “Cooperative adaptive cruise control implementation of team mekar at the grand cooperative driving challenge”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(3): 1062-1074, (2012).
- [6] Emirler M.T., Güvenç L., Güvenç B. A., “Design and evaluation of robust cooperative adaptive cruise control systems in parameter space”, *International Journal of Automotive Technology*, 19(2): 359-367, (2018).
- [7] Geiger A., Lauer M., Moosmann F., Ranft B., Rapp H., Stiller C., Ziegler J., “Team AnnieWAY's entry to the 2011 grand cooperative driving challenge”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(3): 1008-1017, (2012).
- [8] Weißmann A., Görges D., Lin X., “Energy-optimal adaptive cruise control combining model predictive control and dynamic programming”, *Control Engineering Practice*, 72: 125-137, (2018).
- [9] Prabhakar G., Selvaperumal S., Nedumal Pugazhenth P., “Fuzzy PD plus I control-based adaptive cruise control system in simulation and real-time environment”, *IETE Journal of Research*, 65(1): 69-79, (2019).
- [10] Mao J., Yang L., Hu Y., Liu K., Du J., “Research on Vehicle Adaptive Cruise Control Method Based on Fuzzy Model Predictive Control”, *Machines*, 9(8): 160, (2021).
- [11] Kim, S. “Design of the adaptive cruise control systems: An optimal control approach.” *University of California, Berkeley*, (2012).
- [12] Öncü, S, Ploeg, J., Van de Wouw, N., Nijmeijer, H., “Cooperative adaptive cruise control: Network-aware analysis of string stability”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(4): 1527-1537, (2014).
- [13] Badnava, S., Meskin, N., Gastli, A., Al-Hitmi, M. A., Ghommam, J., Mesbah, M., Mnif, F., “Platoon transitional maneuver control system: A review”, *IEEE Access*, 9: 88327-88347, (2021).
- [14] Al-Jhayyish, A. M., Schmidt, K. W.. “Feedforward strategies for cooperative adaptive cruise control in heterogeneous vehicle strings”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(1), 113-122, (2018).
- [15] Ploeg J., Semsar-Kazerooni E., Lijster G., van de Wouw N., Nijmeijer H., “Graceful degradation of cooperative adaptive cruise control”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 16(1), 488-497, (2015).
- [16] Gruyitch L. T., “Control of Linear Systems: Observability and Controllability of General Linear Systems”, *CRC Press*, (2018).
- [17] Ploeg, J., Shukla, D. P., Van De Wouw, N., Nijmeijer, H. “Controller synthesis for string stability of vehicle platoons”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(2), 854-865, (2014).
- [18] Swaroop, D., Hedrick, J. K. “String stability of interconnected systems”, *IEEE transactions on automatic control*, 41(3), 349-357, (1996).
- [19] Dey, K. C., Yan, L., Wang, X., Wang, Y., Shen, H., Chowdhury, M., ..., Soundararaj, V. “A review of communication, driver characteristics, and controls aspects of cooperative adaptive cruise control (CACC)”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(2), 491-509, (2015).