

## Araç Dinamiğinin Tek İzli Araç Modeli Yardımıyla Tanılanması

Kutluk Bilge Arıkan

Atılım Üniversitesi, Mekatronik  
Mühendisliği Bölümü, Ankara

Y. Samim Ünlüsoy

Prof. Dr.

Orta Doğu Teknik Üniversitesi,  
Makina Mühendisliği Bölümü,  
Ankara

*Tek izli araç modeli yapısı kullanılarak, aracın dönüş dinamiğini anlatan matematiksel modeller tanılanmıştır. ARMAX ve durum uzayı modelleri parametre kestirimlerinde kullanılmıştır. Öngörü hatası kestirimi yöntemi uygulanmıştır. Kestirilen modellerden tek izli araç modelini oluşturan fiziksel parametreler de hesaplanmıştır.*

*Anahtar Kelimeler: Sistem tanılama, parametre kestirimi, öngörü hatası kestirimi yöntemi, tek izli araç modeli, kara-kutu model, gri-kutu model, ARMAX, durum uzayı modeli*

### TERİMLENDİRME

- $C_f$  : Ön aks yan kuvvet katsayısı  
 $C_r$  : Arka aks yan kuvvet katsayısı  
 $J$  : Dönme atalet momenti  
 $m$  : Araç kütlesi  
 $a$  : Ağırlık merkezinin ön aksa olan uzaklığı  
 $b$  : Ağırlık merkezinin arka aksa olan uzaklığı  
 $L$  : Dingil açıklığı  
 $U$  : Araç hızı (sabit)  
 $v$  : Yanal hız  
 $r$  : Dönüş hızı  
 $\delta$  : Ön lastiklerin yönverme açısı  
 $A_y$  : Yanal ivme  
 $T$  : Örneklem periyodu

### GİRİŞ

Sistem tanılaması, dinamik sistemlerin girdi ve çıktılarının gözlenmesi yoluyla matematiksel modellerinin kurulması ile ilgilidir [1]. Matematiksel model yapısı seçiminin ve parametrik hale getirilmesinin ardından; sistem tanılaması, parametre kestirimi problemine dönüşür. Model yapısı seçiminde dinamik sistemi anlatan fiziksel ilişkiler, bağıntılar ve bilgiler göz önüne alınmalıdır. Parametrik model, bu bilgilerin kullanımına göre beyaz-kutu model, gri-kutu model ya da kara-kutu model şeklinde sınıflandırılabilir [2]. Beyaz-kutu modelde, tüm parametreler, sistemin fiziksel incelenmesi ve sistemle ilgili bilgiler neticesinde tamamen bilinmektedir. Gri-kutu modelde,

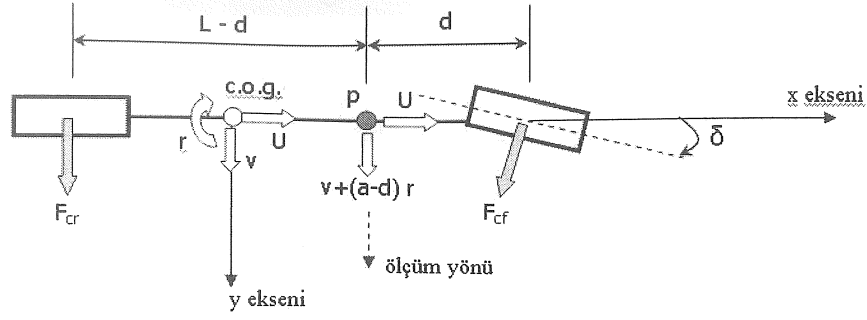
fiziksel bağıntılar ile parametrelerin bir kısmı bilinmektedir. Bilinmeyen parametreler ise toplanan girdi-çıkı verisi kullanılarak kestirilmektedir. Kara-kutu modellemede ise sistem ile ilgili fiziksel bağıntılar mevcut değildir veya kullanılmamaktadır [2]. Kullanılan matematiksel yapı, belirli bir esnekliğe sahip fonksiyonlardan seçilmektedir.

Bu çalışmada, aracın dönüş dinamiği, hareket denklemlerinden yola çıkarak oluşturulan matematiksel ifadeler yardımı ile modellenmiştir. Parametre kestirimi için kara-kutu ve gri-kutu modeller oluşturulmuş, kestirilen parametrelerden fiziksel parametrelere geçiş incelenmiştir.

### DÖNÜŞ DİNAMIĞININ TANILANMASI

Tek izli araç modeli, aracın dönüş dinamiğini incelemek için yaygın olarak kullanılan bir modeldir [4]. Aracın ilerleme hızının sabit olması, yanal ivme değerinin  $0.3 \text{ g}$  değerinin altında olması ve doğrusal bir model için lastiklerin kayma açılarının küçük değerler almaları, bu modelde yapılan varsayımlardır.

Varsayımlar neticesinde ön lastikler, aynı kayma açılarına sahip olduklarından önde tek bir lastik gibi düşünülebilir. Aynı şekilde, arka lastikler de arkada tek bir lastik gibi kabul edilebilir. Bunlara ilave olarak, yukarıda belirtilen şartlar altında, aracın süspansiyonları esneklik göstermezler. Başka bir ifadeyle, asılı gövde ve asılı olmayan gövde arasında göreceli bir hareket oluşmaz. Yukarıda belirtilenler neticesinde aracın basitleştirilmiş fiziksel modeli Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Fiziksel model, parametreler ve değişkenler

Bu şartlar altında ön ve arka akslarda oluşan yanal lastik kuvvetleri, lastik kayma açıları  $\alpha_f$  ve  $\alpha_r$  cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir [4]:

$$\begin{aligned} F_{cf} &= C_f \alpha_f \\ F_{cr} &= C_r \alpha_r \end{aligned} \quad (1)$$

#### Matematiksel Model

Bu çalışmada tek izli araç modeli, parametre kestiriminde kullanılacak modeller için temel yapı olarak kullanılmıştır. Bu modelde, aracın dönüş dinamiği, Newton'un hareket denklemleri kullanılarak modellenmiştir. Hız bileşenleri, ağırlık merkezine yerleştirilen ve araçla birlikte hareket eden eksen takımına göre tanımlanmıştır. Durum değişkenleri olarak yanal kayma hızı ve dönme hızı seçilmiştir. Sürekli zaman durum denklemleri, fiziksel parametreler kullanılarak aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{C_f + C_r}{mU} & \frac{aC_f - bC_r - U}{mU} \\ \frac{aC_f - bC_r}{JU} & \frac{a^2C_f + b^2C_r}{JU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} -\frac{C_f}{m} \\ -\frac{aC_f}{J} \end{bmatrix} \delta \end{aligned} \quad (2)$$

Durum denklemlerinin tamamlanabilmesi için, sistemin çıktılarının da tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada, yanal ivmeyi ölçmek için ivme ölçer ve dönme hızını ölçmek için jiroskop kullanıldığı varsayılmıştır. Araç hızı sabit olduğundan ve durum denklemlerinde bir parametre olarak kullanıldığından, değerinin bilindiği varsayılmıştır. Sürücünün uyguladığı direksiyon girdisi, ön

lastiklerin yönverme açısı olarak sistemin tek girdisidir.

İvme ölçer, aracın ağırlık merkezine yerleştirilirse okuduğu değer aşağıdaki şekilde ifade edilebilir. (1)

$$\begin{aligned} A_y &= \dot{v} + U r + w_a = \left( \frac{C_f + C_r}{mU} \right) v \\ &+ \left( \frac{aC_f - bC_r}{mU} \right) r + \left( -\frac{C_f}{m} \right) \delta + w_a \end{aligned} \quad (3)$$

İvme ölçer, ağırlık merkezine değil de, x-ekseni üzerindeki herhangi bir  $p$  noktasına (Şekil-1) yerleştirilirse, algılayıcı çıktısı parametrik olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} A_y^p &= \dot{v} + (a-d)\dot{r} + U r + w_a \\ &= \left( \frac{C_f + C_r}{mU} + (a-d)\frac{(aC_f - bC_r)}{JU} \right) v \\ &+ \left( \frac{aC_f - bC_r}{mU} + (a-d)\frac{(a^2C_f + b^2C_r)}{JU} \right) r \\ &+ \left( -\frac{C_f}{m} - (d-a)\frac{aC_f}{J} \right) \delta + w_a \end{aligned} \quad (4)$$

Bu çalışmada, ağırlık merkezinin konumunun bilinmediği varsayımı sonucunda, ivme ölçerin,  $p$  noktasına yerleştirildiği kabul edilmiştir. Durum denklemleri, aşağıda verilen çıktı denklemi ile tamamlanmıştır.

$$\begin{bmatrix} A_y^p \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{C_f + C_r}{mU} + (a-d) & \frac{aC_f - bC_r}{mU} + (a-d) \frac{(a^2 C_f + b^2 C_r)}{JU} \\ \frac{(aC_f - bC_r)}{JU} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{C_f}{m} - (d-a) \frac{aC_f}{J} \\ 0 \end{bmatrix} \delta + \begin{bmatrix} w_a \\ w_g \end{bmatrix} \quad (5)$$

Bu denklemde  $w_a$  ve  $w_g$ , algılayıcılardaki (sırasıyla ivme ölçer ve jiroskoptaki) gürültüyü temsil etmektedir. Gerçek sistemden geldiği varsayılan algılayıcı çıktıları, gürültü sinyellerinin de eklendiği, doğrusal bir matematiksel modelin kullanıldığı benzetimden elde edilmiştir.

### Parametre Kümeleri

Kestirilecek parametreler için çeşitli seçenekler düşünülebilir. Bilinmeyen fiziksel parametrelerin oluşturduğu küme aşağıda verilmiştir.

$$\Theta_f = [C_f \quad C_r \quad J \quad a]^T \quad (6)$$

Aracın kütesinin ve ivme ölçerin konumunu belirten  $d$  uzaklığının bilindiği varsayılmıştır. Alternatif parametre kümeleri de düşünülebilir. Toplanan veri, girdi ve çıktılardan oluştuğu için sistemin aktarım işlevini kullanmak, girdi ve çıktı arasında doğrudan bir matematiksel yapı tanımlamak için daha uygundur. Denklem (7) aktarım işlevi ifadelerini sunmaktadır.

$$G_1(s) = \frac{A_y^p(s)}{\Delta(s)} = \frac{c_1 s^2 + c_2 s + c_3}{s^2 + c_4 s + c_5} \quad (7a)$$

$$G_2(s) = \frac{R(s)}{\Delta(s)} = \frac{c_6 s + c_7}{s^2 + c_4 s + c_5} \quad (7b)$$

Aktarım işlevlerinde kullanılan parametreler de kestirilecek parametre kümesi olarak düşünülebilir. Aktarım işlevi parametrelerinin, fiziksel parametreler cinsinden ifadeleri aşağıda sunulmuştur.

$$c_1 = C_f \left[ \frac{m a (d - a) - J}{m J} \right] \quad (8a)$$

$$c_2 = \frac{C_f C_r L (L - d)}{m U J} \quad (8b)$$

$$c_3 = \frac{C_f C_r L}{m J} \quad (8c)$$

$$c_4 = - \left[ \frac{a^2 C_f + b^2 C_r}{U J} + \frac{C_f + C_r}{U m} \right] \quad (8d)$$

$$c_5 = \frac{C_f C_r L^2}{m J U^2} - \frac{b C_r - a C_f}{J} \quad (8e)$$

$$c_6 = - \frac{a C_f}{J} \quad (8f)$$

$$c_7 = \frac{C_f C_r L}{m U J} \quad (8g)$$

Tanımlama işlemi, girdi ve çıktı örneklemeleri kullanılarak yapılacağından, yukarıdaki sürekli zamanda tanımlanmış aktarım işlevlerinin, kesikli zamanda ifade edilmeleri daha uygundur. Kesikli zaman aktarım işlevleri, eşitlik (9) da verilmiştir..

$$G_1(z) = \frac{b_0 z^2 + b_1 z + b_2}{z^2 + a_1 z + a_2} \quad (9a)$$

$$G_2(z) = \frac{b_3 z + b_4}{z^2 + a_1 z + a_2} \quad (9b)$$

Kesikli zaman aktarım işlevleri parametreleri ile, sürekli zaman aktarım işlevleri parametreleri arasında ilişki eşitlik (10)'da verilmiştir.

$$a_1 = c_4 T - 2 \quad (10a)$$

$$a_2 = 1 + c_5 T^2 - c_4 T \quad (10b)$$

$$b_0 = c_1 \quad (10c)$$

$$b_1 = c_2 T - 2 c_1 \quad (10d)$$

$$b_2 = c_1 + c_3 T^2 - c_2 T \quad (10e)$$

$$b_3 = c_6 T \quad (10f)$$

$$b_4 = c_7 T^2 - c_6 T \quad (10g)$$

Kesikli zaman aktarım işlevlerinin parametrelerinin oluşturduğu küme aşağıda verilmiştir.

$$\Theta_d = [a_1 \ a_2 \ b_0 \ b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4]^T \quad (11)$$

Fiziksel parametre kümesinden bu kümeyi oluşturmak kolaydır. Ancak  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_0$ , ...,  $b_4$  parametreleri, fiziksel parametrelerin karmaşık ve doğrusal olmayan işlevlerinden oluştuğu için bu kümeden fiziksel parametrelere dönmek her sistem için kolay olmayabilir.

Taşıma işlevleri yerine ARMAX modeli kullanmak tanılama algoritması için daha uygundur. Aktarım işlevleri kullanılarak ARMAX modeline kolaylıkla ulaşılabilir [5], [6].

$$y_1 = A_y^p, \quad y_2 = r$$

$$\varepsilon_1, \varepsilon_2 : \text{Gürültü ifadeleri} \quad (12)$$

$$y_1(k) + a_1 y_1(k-1) + a_2 y_1(k-2) =$$

$$b_0 u(k) + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) + \varepsilon_1(k) + k_1 \varepsilon_1(k-1) + k_2 \varepsilon_1(k-2)$$

$$y_2(k) + a_1 y_2(k-1) + a_2 y_2(k-2) =$$

$$b_3 u(k-1) + b_4 u(k-2) + \varepsilon_2(k) + k_3 \varepsilon_2(k-1) + k_4 \varepsilon_2(k-2)$$

### Parametre Kestirim Yöntemi

Bu çalışmada parametre kestirim metodu olarak *öngörü hatası kestirimi yöntemi* kullanılmıştır [3]. Bu yöntem, çeşitli model yapıları ile kullanılabilir. Tanımlanan modellerin asimtotik özellikleri istenen düzeydedir ve *en büyük olabilirlik kestirim yöntemi* [1] ile aynı sonuçları verdiği durumlar mevcuttur. Bu

avantajların yanında, optimal parametrelerin bulunmasında, yerel minimumların çokluğu gibi zorluklar yaşanabilmektedir.

Seçilen model, bir sonraki zamanda alınacak çıktıyı öngöreceği şekilde tanımlanır:

$$\hat{y}_m(t|t-1) = f(Z^{t-1}) \quad (13)$$

$$Z^N = \{u(1), y(1), u(2), y(2), \dots, u(N), y(N)\} \quad (14)$$

$u(t)$ : t zamanındaki girdi

$y(t)$ : t zamanındaki çıktı

Öngörücü parametrik hale getirilir:

$$\hat{y}_m(t | \Theta) = f(Z^{t-1}, \Theta) \quad (15)$$

$\Theta$ : Kestirilecek parametre kümesi

Uygun bir norm içersinde, gözlemlenen veri kullanılarak,

$$\hat{y}(1 | \Theta), \dots, \hat{y}(N | \Theta) \text{ ve } y(1), \dots, y(N) \text{ arasındaki}$$

farkı en aza indirecek parametre kümesi,  $\hat{\Theta}_N$ , kestirilir.

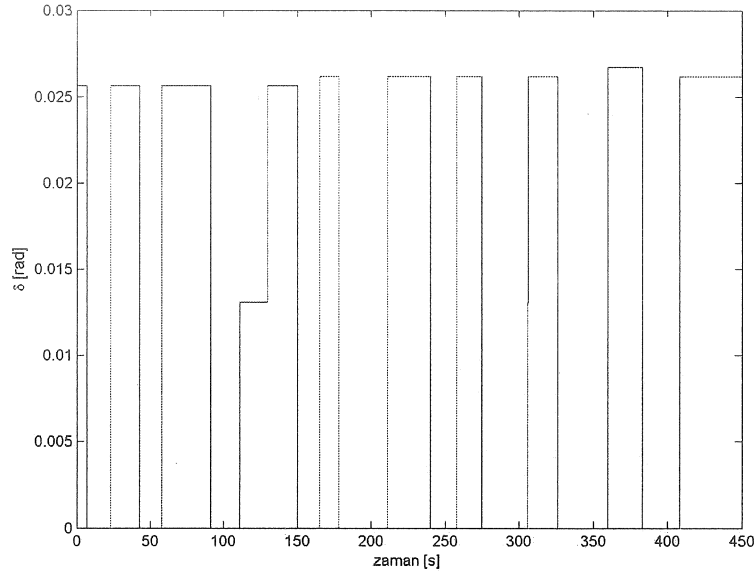
$$\hat{\Theta}_N = \arg \min_{\Theta} V_N(\Theta) \quad (16)$$

$$V_N(\Theta) = \sum_{t=1}^N \left\| y(t) - f(Z^{t-1}, \Theta) \right\|^2 \quad (17)$$

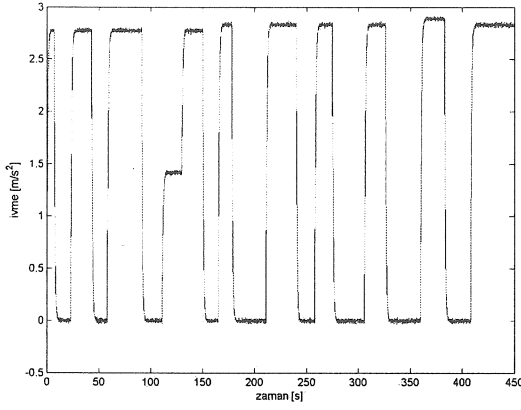
Yukarıdaki ifadeyi minimize eden parametre kümesini,  $\hat{\Theta}_N$ , bulmak için sayısal arama yöntemi kullanılmıştır. Sayısal optimizasyon sırasında Gauss-Newton ve Levenberg-Marquard yöntemleri kullanılmıştır [1], [7].

### Kestirim Yönteminin Uygulanması

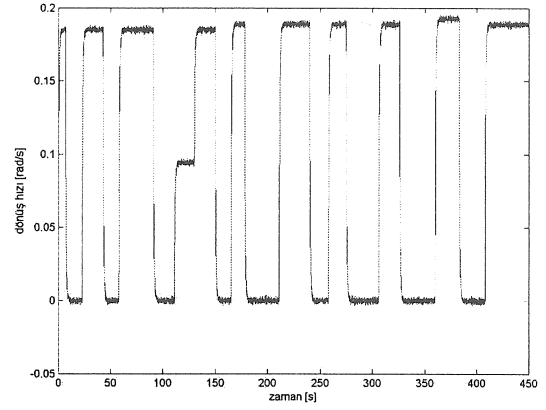
İki farklı öngörücü ile uygulamalar yapılmıştır. Birinci uygulamada ARMAX modeli, ikinci uygulamada ise durum uzayı modeli kullanılmıştır. Her ikisinde de örnekleme periyodu 0.05 saniye ve örnekleme sayısı 9000 olarak alınmıştır. Uygulamalarda kullanılan girdi ve çıktılar aşağıda verilmişlerdir.



Şekil 2 Sistem Girdisi



Şekil 3 p noktasındaki ivme ölçer verisi

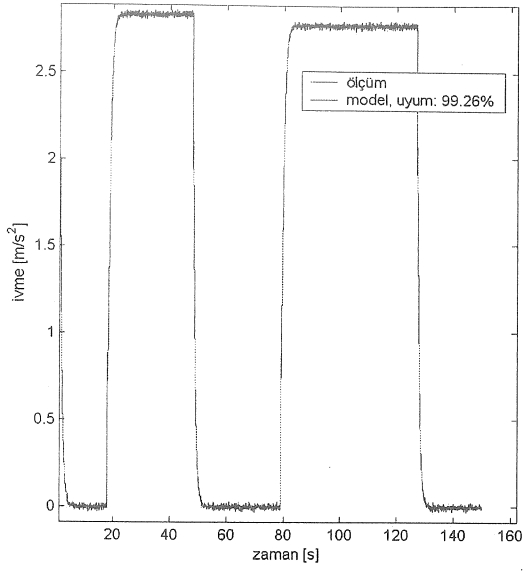


Şekil 4 Jiroskop verisi

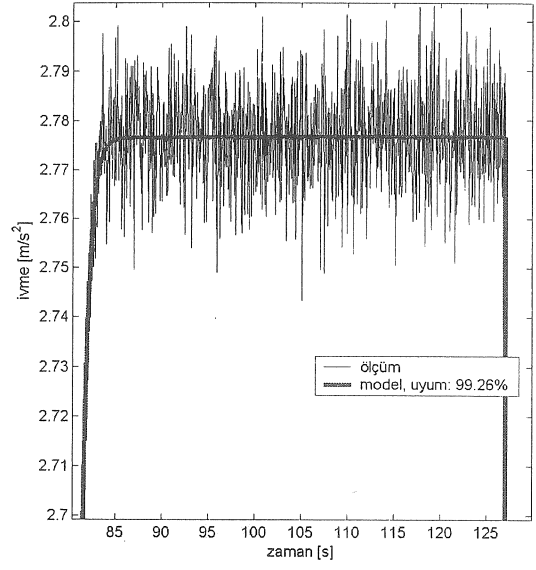
Kara-kutu ARMAX modelinin tanılanması:  
Eşitlik (12)'de verilen ARMAX modeli öngörücü olarak kullanılmıştır. Kestirilen parametre kümesi, eşitlik (11)'de verilmiştir. Optimizasyon için sayısal arama yöntemi kullanıldığından, parametrelerin başlangıç değerleri önemlidir. Doğru parametre

değerlerine ulaşabilmek, yerel minimum değerlerine takılmamak için uygun başlangıç değerleri seçmek gerekmektedir [8], [9]. Öngörü hatası kestirimi yöntemi ile kestirilen parametreler çizelge 1 'de verilmiştir.

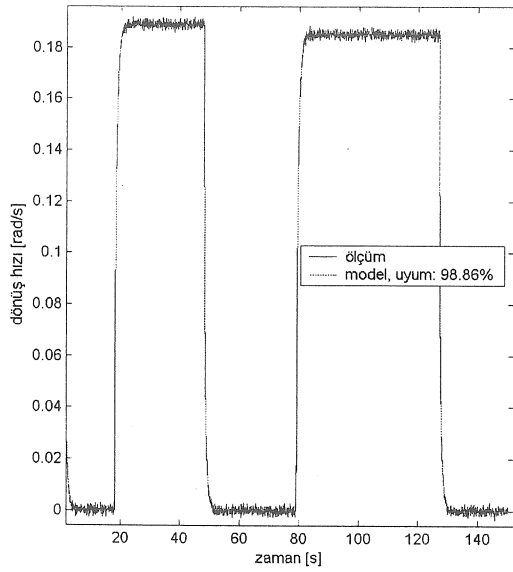
Çizelge 1 Kestirilen ARMAX parametreleri ve gerçek değerleri							
	$a_1$	$a_2$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
gerçek	1.6353	0.6568	34.7727	63.3273	30.8864	1.2273	1.0718
kestirilen	1.6449	0.6656	33.6874	60.5956	28.8586	1.1652	1.0164



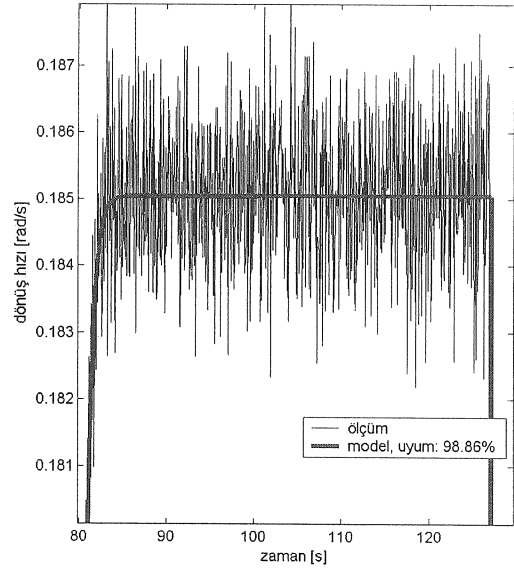
Şekil 5 Model - ivme ölçer verisi karşılaştırması



Şekil 6 Model - ivme ölçer verisi karşılaştırması, yaklaştırılmış



Şekil 7 Model - jiroskop verisi karşılaştırması



Şekil 8 Model - jiroskop verisi karşılaştırması, yaklaştırılmış

Çizelge 2 Hesaplanan fiziksel parametreler ve gerçek değerleri				
	$C_f$	$C_r$	J	a
gerçek	-48000	-35000	2750	1.5
hesaplanan	-50311	-35252	2949	1.37

Tanımlanan modelin geçerliliğinin sınanması gerekmektedir. Parametre kestirimi sırasında kullanılmayan girdi-çıkıtı verisi ile tanımlanan modelin cevabının karşılaştırılması, modeli sınamak için uygulanan yöntemlerden biridir. Aşağıdaki şekillerde bu karşılaştırmalar sunulmuştur.

Kestirilen parametre takımı,  $\hat{\Theta}_d$ , kullanılarak fiziksel parametre takımına,  $\hat{\Theta}_f$ 'e, ulaşılmıştır. Çizelge 2'de fiziksel parametrelerin hesaplanan ve gerçek değerleri verilmiştir.

**Gri-kutu durum uzayı modelinin tanılanması:** Gri-kutu modellerin kara-kutu modellere göre bazı avantajları vardır. Kestirilecek parametre sayısı bu yapılar kullanıldığında azaltılabilir. Bu da parametrelerin istatistiki doğruluğunu artırır. Sistemin fiziksel yapısıyla ilgili bilgilerin modelin içersinde kullanılması da mümkündür. Ancak optimizasyon yüzeyinin daha karmaşık şekillere sahip olması, yerel minimumların artması parametrelerin kestirimini zorlaştırır [9].

Sayısal arama için gerekli başlangıç değerlerinin kalitesine göre, parametre değerleri mutlak minimumun uzağında dolaşabilir, yerel bir minimuma saplanabilir ya da doğru değerlerine yaklaşabilirler. Bu sorunu aşmak için farklı çözümler üzerine çalışmalar yapılmaktadır [1], [3], [8], [9].

Eşitlik (2) ve (4) ile tanımlanan, sürekli zaman durum uzayı modeli kullanılarak aşağıdaki model tanımlanmıştır.

$$\dot{x} = A x + B \delta + \omega \quad (18)$$

$$y = C x + D \delta + e \quad (19)$$

$$A = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 \\ p_3 & p_4 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} p_5 \\ p_3 p_5 \left( L + \frac{L p_5}{U p_1} + \frac{p_2 + U}{p_1} \right) \\ p_2 + U \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} p_1 + p_3 \left( -d + L + \frac{L p_5 + p_2 + U}{U p_1} \right) & (p_2 + U) + p_4 \left( -d + L + \frac{L p_5 + p_2 + U}{U p_1} \right) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$D = \begin{bmatrix} p_5 + \left( -d + L + \frac{L p_5 + p_2 + U}{U p_1} \right) \left( \frac{p_3 p_5 \left( L + \frac{L p_5}{U p_1} + \frac{p_2 + U}{p_1} \right)}{p_2 + U} \right) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Bu modelde,

$$A = \begin{bmatrix} \frac{C_f + C_r}{mU} & \frac{a C_f - b C_r - U}{mU} \\ \frac{a C_f - b C_r}{JU} & \frac{a^2 C_f + b^2 C_r}{JU} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -\frac{C_f}{m} \\ -\frac{a C_f}{J} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{C_f + C_r}{mU} + (a-d) \frac{(a C_f - b C_r)}{JU} & \frac{a C_f - b C_r}{mU} + (a-d) \frac{(a^2 C_f + b^2 C_r)}{JU} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} -\frac{C_f}{m} - (d-a) \frac{a C_f}{J} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$\omega, e$  : gürültü terimleri olarak tanımlanmıştır.

Farklı bir parametre kümesi oluşturularak, bu model aşağıdaki matrislerle ifade edilebilir.

$$A = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 \\ p_3 & p_4 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} p_5 \\ p_6 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} p_1 + p_7 & p_3 & (p_2 + U) + p_7 & p_4 \\ 0 & & & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$D = \begin{bmatrix} p_5 + p_7 & p_6 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Parametrik hale getirilmiş model daha ayrıntılı incelendiğinde,  $p_6$  ve  $p_7$ 'nin  $p_1, \dots, p_5$  parametrelerinin işlevleri olduğu görülür. Yukarıdaki matrisler  $p_1, \dots, p_5$  parametreleri cinsinden yazılabilir.

Gri-kutu modelde ve tanılama işleminde kullanılan parametre kümesi aşağıda verilmiştir.

$$\Theta_g = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ p_4 \ p_5]^T \quad (23)$$

Sürekli zaman model kesikli zamana çevrildiğinde modelin içersinde yer aldığı Kalman öngörücüsü aşağıda verilmiştir.

$$\begin{aligned} \hat{x}(t+T) &= F \hat{x}(t) + G \delta(t) + K (y(t) - C \hat{x}(t) - D \delta(t)) \\ \hat{y}(t | \Theta_g) &= C \hat{x}(t) + D \delta(t) \end{aligned} \quad (24)$$

F, G, ve K matrisleri, A, B, C, ve T'yi kullanarak hesaplanmıştır [10]. K matrisi Kalman kazancıdır. F, G ve K matrislerinin elemanları, gri-kutu modelde kullanılan parametrelerin işlevlerinden oluşmaktadır. Öngörü hatası yöntemiyle kestirilen gri-kutu model parametreleri aşağıda verilmiştir.

Parametre kestirimi sırasında kullanılan girdi-çıkı verisi ile tanılanan modelin cevabının karşılaştırılması, modeli sınamak amacıyla Şekil 9 ve 10'da sunulmuştur.

Fiziksel parametre kümesi,  $\hat{\Theta}_f$ , kestirilen parametre kümesi,  $\hat{\Theta}_g$ , kullanılarak elde edilmiştir. Kestirilen gri-kutu model parametrelerinden fiziksel parametrelerin hesaplanması sırasında (25) eşitlikleri kullanılmıştır.

$$\begin{aligned} C_f &= -p_5 m \\ C_r &= p_1 m U + p_5 m \\ J &= \frac{m (U + p_2)}{p_3} \\ a &= L + \frac{L p_5 + U^2 + p_2 U}{p_1 U} \end{aligned} \quad (25)$$

Çizelge 4'te fiziksel parametrelerin hesaplanan ve gerçek değerleri verilmektedir

## SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, doğrusal tek izli araç modeli yardımıyla, aracın dönüş dinamiğinin tanılanması incelenmiştir. Öngörü hatası kestirimi yöntemi kullanılarak, kara-kutu ARMAX modelinin ve gri-kutu durum uzayı modelinin parametreleri kestirilmiştir. Gerçek deneyler yerine, araç modeli kullanılarak benzetimler yapılmış, gürültülü algılayıcı verisi bu benzetimlerden alınmıştır. Modeller, tanılama işleminde kullanılmayan girdi-çıkı verisi ile sınanmış ve başarılı oldukları gözlenmiştir. Her iki uygulamada da kestirilen parametreler kullanılarak sistemin fiziksel parametreleri hesaplanmıştır. Özellikle gri-kutu modellemede, kestirim yönteminin başarılı çalışabilmesi için başlangıç değerlerinin kaliteli olması gerekmektedir. Bunun için sistemin dinamiği ile ilgili bilgiler kullanılarak çeşitli başlangıç değerleri denenmiştir. Parametrelerin bazılarında sayısal optimizasyon yönteminin başarısını arttırmak amacıyla ölçekleme yapılmıştır. Veri oluşturulması sırasında, aracın ilerleme hızının sabit olduğu ve bilindiği kabul edilmiştir. Aracın kütesinin de bilindiği varsayılmıştır. Bunlar ölçülmesi zor ya da masraflı olan parametreler değildir. Bilinen parametre sayısı arttırdıkça kestirilen parametrelerin doğruluğu artacaktır.

İki uygulamada da kullanılan model yapısı sayesinde, deneyler sırasında ivme ölçeri aracın ağırlık merkezine yerleştirme gerekliliği yoktur. Bu yaklaşım, deney için gerekli donanımın yerleştirilmesinde kolaylık sağlamaktadır. Ayrıca tanılama işlemi için ağırlık merkezinin bilinmesi ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır.

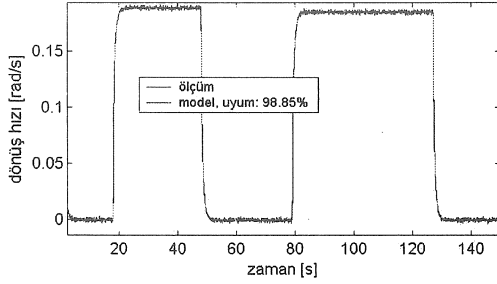
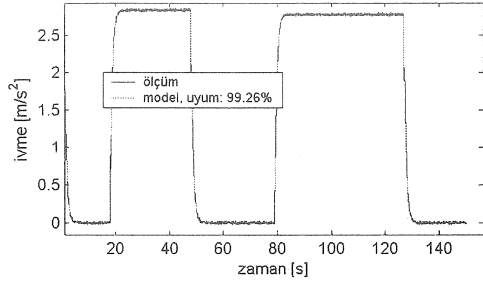
Çizelge 3 Gri-kutu model parametrelerinin gerçek ve kestirilen değerleri

	P1	P2	P3	P4	P5
gerçek	-2.7667	-15.3500	-0.2545	-4.5273	22.5000
kestirilen	-2.7772	-15.3653	-0.2800	-4.7700	24.4020

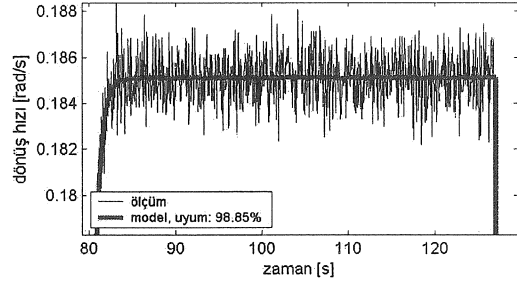
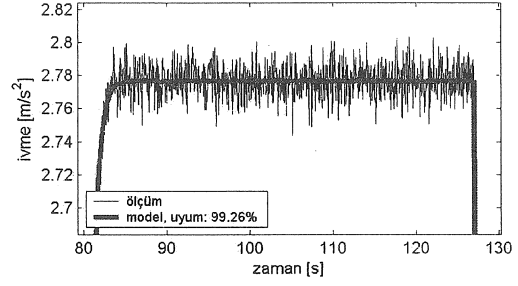
Çizelge 4 Hesaplanan fiziksel parametreler ve gerçek değerleri

	C <sub>f</sub>	C <sub>r</sub>	J	a
gerçek	-48000	-35000	2750	1.5
hesaplanan	-48804	-34512	2610	1.37





Şekil 9 Model - algılayıcı verisi karşılaştırması



Şekil 10 Model – algılayıcı verisi karşılaştırması, yaklaşılmış

#### IDENTIFICATION OF VEHICLE DYNAMIC BEHAVIOR USING A SINGLE TRACK VEHICLE MODEL

A single track (bicycle) model is used to identify the handling behavior of vehicles. ARMAX and state space model structures, and the method of prediction error estimation are used in parameter estimation. Physical parameters of the single track vehicle model are extracted from the identified models.

Keywords: System identification, parameter estimation, method of prediction error estimation, single track vehicle model, black box model, gray box model, ARMAX, state space model

#### KAYNAKÇA

1. Ljung, L., *System Identification, Theory for the User*, PTR Prentice Hall, New Jersey, 1987.
2. Ljung L., *Black-box Models from Input-output Measurements*, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Budapest, Hungary, May 21–23, 2001.

3. Ljung L., *Prediction Error Estimation Methods*, Linköping University, Department of Electrical Engineering, Report No.: LiTH-ISY-R-2365.
4. Kiencke U., Nielsen L., *Automotive Control Systems For Engine, Driveline, and Vehicle*, Springer, 2000.
5. Kumar, P. R., Varaiya, P., *Stochastic Systems: Estimation, Identification, and Adaptive Control*, Prentice Hall, 1986.
6. Franklin, G. F., Powell, J. D., Workman M., *Digital Control of Dynamic Systems*, Addison Wesley Longman, 1998.
7. Ljung, L., *System Identification Toolbox for Use with Matlab, User's Guide, Version 5*, MathWorks Inc.
8. Xie, L., Ljung, L., *Estimate Physical Parameters by Black Box Modeling*, Proc. of the 21st Chinese Control Conference, pp 673 - 677, 2002.
9. Parillo, P. A., Ljung, L., *Initialization of Physical Parameter Estimates*, Linköping University, Department of Electrical Engineering, Report No.:LiTH-ISY-R-2561.
10. Minkler G., Minkler J. *Theory and Application of Kalman Filtering*, Magellan Book Company, USA, 1993.