

# Bulanık Mantık ve Erişim Kuralı Yaklaşımını Kullanarak Bir Elektrikli Aracın Dayanıklı Hız Denetimi

Gonca ÖZMEN KOCA, Z. Hakan AKPOLAT  
Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi  
Elektronik ve Bilgisayar Bölümü  
23119 ELAZIĞ

## ÖZET

Bu çalışmada, fırçasız doğru akım motoru kullanılan bir arkadan itişli elektrikli araç için dayanıklı hız denetleyicisi geliştirilmiştir. Öncelikle, elektrikli aracın matematiksel modeli hızlanma ve yavaşlama (frenleme) durumları için çıkarılmıştır. Temel amaç; elektrikli aracın, farklı yol koşullarında ve farklı referans hız değerlerinde kararlı, güvenli ve yüksek performanslı hızlanmasını ve yavaşlamasını sağlayacak dayanıklı bir denetleyici tasarlamaktır. Bu amaçla, dayanıklı denetim yöntemlerinden biri olan Kayma Kipli Denetim (KKD) sistem tasarımıyla kullanılan Erişim Kuralı (EK) yaklaşımı ile elektrikli araç için hız denetleyicisi tasarlanmış ve bu denetim yönteminin uygulanmasıyla ilgili problemler benzetim sonuçlarıyla gösterilmiştir. Daha sonra, Bulanık Mantık (BM) ve EK yaklaşımı birlikte kullanılarak yeni bir denetim sistemi geliştirilmiştir. Önerilen denetim sisteminin farklı yol koşulları ve farklı referans hız değerleri için dayanıklı bir denetim sağladığını gösteren benzetim sonuçları sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrikli araçlar, kayma kipli denetim, erişim kuralı yaklaşımı, dayanıklı denetim, bulanık mantık.

## Robust Speed Control of an Electric Vehicle Using Fuzzy Logic and Reaching Law Approach

### ABSTRACT

In this study, a robust speed controller is developed for a rear driven Electric Vehicle (EV) in which a brushless DC motor is used. First of all, The mathematical models of EV are derived for both acceleration and deceleration cases. The main objective is to design a robust controller that provides stable, safe and high performance acceleration and deceleration for different road conditions and different speed references. For this aim, a speed controller for the EV is designed using the Reaching Law (RL) Control approach which is a technique to design Sliding Mode Control (SMC) systems and the application problems of this system is developed by using Fuzzy Logic (FL) and RL approach together. Simulation results showing the robustness of the purposed controller for different road conditions and different reference speed values are presented.

**Keywords:** Electric vehicles, sliding mode control, reaching law approach, robust control, fuzzy logic.

### 1. GİRİŞ

Artan taşıt sayısı, yakıt tüketimi ve hava kirliliği özellikle son yıllarda araştırmacıları Elektrikli Araçlarla (EA) ilgili çalışmalar yapmaya yönlendirmiştir (1). Güvenilir, etkili ve çevreyle dost olan elektrik enerjisi araçların elektrik motorları ile hareket ettirilebileceği düşüncesinin ortaya çıkmasına neden olmuştur.

Bir elektrikli aracın tahrik sistemi temel olarak elektrik enerjisi kaynağı, elektrik motoru ve denetim sisteminden oluşmaktadır. Çevre kirliliğine yol açmaması yanında EA'lar içten yanmalı araçlara göre daha kısa denetim periyodunda daha doğru denetlenebilirler. Ayrıca sessiz çalışırlar ve motor torku tam olarak bilinir. Elektrik motorlarının tork cevapları, birkaç milisaniye civarındadır ve içten yanmalı motorlara göre yaklaşık 10-100 katı daha hızlıdır (2). İçten yanmalı makineler veya hidrolik frenlerle karşılaştırıldığında elektrik motorlarıyla üretilen frenleme ve sürme torku

daha küçük belirsizliklere sahiptir (2). Elektrik motorlarının bu avantajları 1990'ların sonlarında araştırmacıların özellikle araç hareket denetimi ile ilgili çalışmalar (3) (4) yapmasını sağlamıştır.

Dayanıklı bir denetim yöntemi olarak Kayma Kipli Denetim (KKD) stator akımı ve tork denetimi için EA'larda özellikle tercih edilmiştir (5). Proca ve arkadaşları hız ve akı gözetleyicisi tasarlarlarken KKD'ü , akı ve akım denetimi için de kaskat bağlı ayırık zaman Kayma Kipli denetleyicileri kullanmışlardır (6).

Bulanık Mantık (BM) tabanlı denetim uygulamaları doğrusal olmayan zamana bağımlı sistemler için etkili denetleyicilerin gelişmesine imkan vermesiyle son zamanlarda büyük bir önem kazanmıştır (7). Khatun ve arkadaşları tarafından ABS'li EA'lar için tekerleğin kaymasını denetleyen BM tabanlı denetleyiciler geliştirilmiştir (7). Pusca ve arkadaşları ise EA'm gerçek hızını kestirip daha sonra bulanık denetleyiciler ile buna

göre referans hız üreten bir sistem tasarlamışlardır (8). Ancak bu çalışmaların hiçbirinde değişen yol şartları ve farklı hız taleplerinde dayanıklı bir hız denetimi sağlayan denetleyici tasarımı ve sonuçları sunulmamıştır.

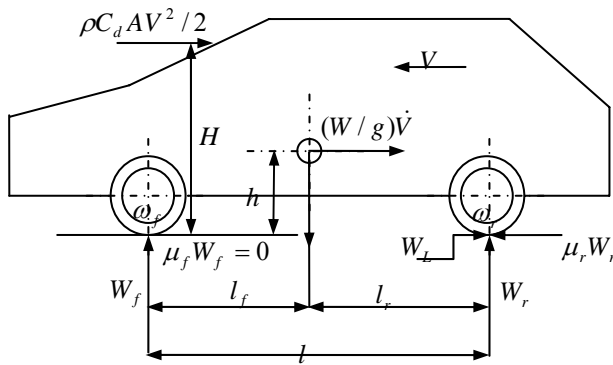
Bu makalede, yolun kuru, ıslak, karlı ve buzlu olması durumunda istenen hıza ulaşmak ve mevcut hızdan yavaşlayarak aracı durdurmak için KKD tasarımında kullanılan EK yaklaşımı ile dayanıklı bir denetleyici tasarlanmıştır. Ancak, bu denetleyicinin istenen denetim performansını sağlamadığı benzetim sonuçlarıyla gösterilmiştir. Daha sonra Bulanık Mantık EK yaklaşımı ile birlikte kullanılarak her türlü yol şartında dayanıklı denetim sağlayan bir denetleyici geliştirilmiş ve önerilen denetim yapısının başarısını gösteren benzetim sonuçları sunulmuştur.

## 2. BİR ELEKTRİKLİ ARACIN MATEMATİKSEL MODELİ

Bu çalışma, öncelikle sabit mıknatıslı fırçasız doğru akım motoru kullanan bir arkadan itişli elektrikli aracın dinamiğini temsil eden matematiksel model, hızlanma ve yavaşlama (frenleme) durumları için ayrı ayrı çıkarılacak ve daha sonra denetleyiciler tasarlanacaktır.

### 2.1 Hızlanma Dinamiği

Şekil 1’de verilen aracı göz önünde bulundurarak elektrik motorunun aracın arka tekerleğine güç sağladığını düşünelim (9). Ön tekerlekler pasif olduğundan bu tekerleklerin dairesel hızları araç gövdesinin hızına eşittir. Bu, ön tekerlekler boyunca etkin dönme sürtünme katsayısının çok küçük ve ihmal edilebilir olduğu anlamına gelmektedir ( $\mu_f \cong 0$ ).



Şekil 1. EA'nın hızlanma ve sabit hız periyotlarında araca etkiyen kuvvetler

Aracın sürücü gücü arka tekerlekteki dönme sürtünmesi ile üretilir. Dirençler; atalet gücü ve hava direncini içerir.  $W_r, W_f$  sırasıyla arka ve ön tekerlek yükünü gösterir. Aracın dinamik denklemlerinin elde edilebilmesi için Newton'un 2. yasası ( $\sum F = ma$ ) uygulanırsa;

$$\frac{W}{g} \dot{V} = \mu_r W_r - \frac{1}{2} \rho C_d A V^2 - W_L \quad (1)$$

denklemini yazılabilir. Burada,

$$W_r = \frac{W l_f}{l} + \frac{W h}{g l} \dot{V} + \frac{\rho C_d A H}{2 l} V^2 \quad (2)$$

dir. Ayrıca ön tekerlek yükü;

$$W_f = \frac{W l_r}{l} + \frac{W h}{g l} \dot{V} + \frac{\rho C_d A H}{2 l} V^2 \quad (3)$$

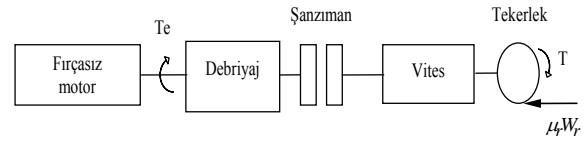
olarak ifade edilebilir. (1) ve (2) numaralı denklemlerden;

$$\dot{V} = \frac{g \rho C_d A (l - \mu_r H)}{2 W (l - \mu_r h)} V^2 + \frac{\mu_r g l_f}{(l - \mu_r h)} - \frac{g l}{W (l - \mu_r h)} W_L \quad (4)$$

eşitliği elde edilir. Şekil 2'den yine Newton'un 2. yasası ( $\sum T = J \dot{\omega}$ ) kullanılarak;

$$J \dot{\omega} = T - \mu_r W_r r_{\omega} - B_{\omega} \omega^2 - W_L r_{\omega} \quad (5)$$

eşitliği yazılabilir. Burada, J dönen elemanların (motor, tekerlekler, sürücü şanzıman sistemi gibi) toplam atalet momentidir



Şekil 2. Sürücü sistem

Denklemler (2) denklemler (5)'de yerine yazılırsa;

$$\dot{\omega} = \frac{B_{\omega}}{J} \omega^2 - \frac{\mu_r r_{\omega} W l_f}{J l} - \frac{\mu_r r_{\omega} W h}{J g l} \dot{V} - \frac{\mu_r r_{\omega} \rho C_d A H}{2 J l} V^2 + \frac{T}{J} - \frac{W_L r_{\omega}}{J} \quad (6)$$

elde edilir. T, tekerleğin sürücü momentidir. 3 fazlı 4 kutuplu fırçasız motorun kullanılması durumunda moment (tork) ifadesi;

$$T = \frac{3 K_t \eta_i (K U_m - K_e \omega_{\omega})}{R_a + p L} \quad (7)$$

olarak yazılabilir  $\left( p = \frac{d}{dt} \right)$ .

Sürtünme katsayısı  $\mu$ , kayma oranı  $\lambda$ 'ya bağlıdır (9). Şekil 3'de sürtünme katsayısı  $\mu$  ile kayma oranı  $\lambda$  arasındaki doğrusal olmayan ilişki dört farklı yol koşulu için gösterilmiştir. Sürtünme katsayısı, matematiksel olarak;

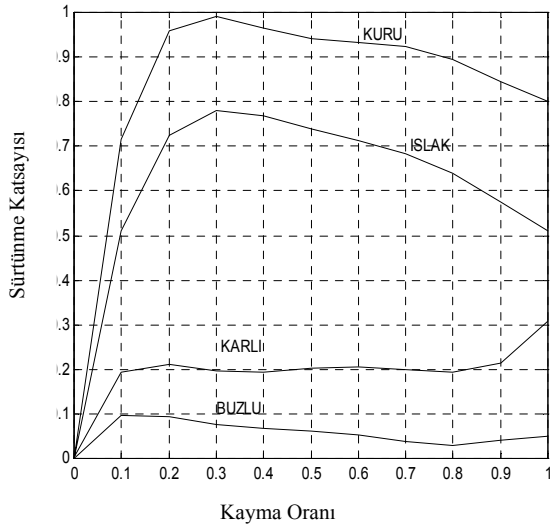
$$\mu = f(\lambda) \quad (8)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada kayma oranı,

$$\lambda = \frac{\omega_{\omega} - V / r_{\omega}}{z} \quad (9)$$

$$z = \begin{cases} \omega_\omega & (\text{hızlanma için}) \\ \frac{V}{r_\omega} & (\text{yavaşlama için}) \end{cases}$$

olarak ifade edilir.



Şekil 3. Kayma oranına göre sürtünme katsayısı arasındaki ilişki (3)

Durum değişkenleri,

$$x_2 = \omega_\omega \quad (\text{tekerleğin açılmal hızı})$$

$$x_1 = \frac{V}{r_\omega} \quad (\text{araba gövdesinin eşdeğer açılmal hızı})$$

olmak üzere,

$$x = [x_1 \quad x_2]^T \quad (x : \text{durum vektörü})$$

$$U = [0 \quad U_m]^T \quad (U : \text{denetim girişi})$$

$$W_L \quad (W_L : \text{bozucular})$$

şeklinde tanımlanırsa, sistemin durum uzay modeli;

$$\dot{x} = F(x) + GU + DW_L \quad (10)$$

$$y = x$$

olur. Burada;

$F$  : durum matrisi

$G$  : tekil olmayan denetim matrisi (determinantı

0 olmayan matris)

$D$  : harici bozucu matrisidir.  $F$ ,  $G$  ve  $D$  matrisleri aşağıda verilmiştir:

$$F = \begin{bmatrix} -\frac{g\rho C_d A r_\omega (l - \mu_r h)}{2W(l - \mu_r h)} x_1^2 + \frac{\mu_r g l_f}{r_\omega (l - \mu_r h)} & \\ \frac{\mu_r r_\omega^3 \rho C_d A (H - h)}{2J(l - \mu_r h)} x_1^2 - \frac{B_\omega}{J} x_2^2 - \frac{3K_r K_e \eta_i}{J R_a} x_2 - \frac{\mu_r r_\omega W l_f}{J(l - \mu_r h)} & \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$G = \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \frac{3K_r K_e \eta_i}{J R_a} \end{bmatrix}; \quad D = \begin{bmatrix} -\frac{g l}{r_\omega W (l - \mu_r h)} \\ \frac{r_\omega l}{J(l - \mu_r h)} \end{bmatrix}$$

Burada,  $\alpha$  keyfi seçilen bir sabittir ve  $G$ 'yi tekil olmayan bir matris yapmak için tanımlanmıştır. Denklem (10) ve (11) ile ifade edilen durum uzay modeli, motor endüktansı ihmal edilebilecek kadar küçük olduğundan  $L \approx 0$  alınarak belirlenmiştir.

## 2.2 Yavaşlama (frenleme) Dinamiği

Hızın azalması durumunda, ön ve arka tekerlekler arasında bölüşülen fren gücü; aracın istikamet (yön) denetimi (tayini), araç gövdesinin kararlılığı ve aracın frenleme mesafesi gibi sürüş performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. İdeal frenleme durumunda, yol yüzeyine karşı ön ve arka tekerlek sürtünme katsayıları eşit olur.

Burada ön ve arka tekerleğin, referans azalma hızını aynı anda takip ettiği varsayılmıştır. Hızın azalması;  $W_r$  arka tekerlek yükü hızlanma durumundaki değerinden daha azdır ve  $W_f$  ön tekerlek yükü artmaktadır. Kararlı frenleme ve kısa mesafede aracın durması şartlarını sağlayan hız için ön ve arka tekerleklerin sürtünme katsayıları;  $\mu_r = \mu_f$  dir. Buna göre, sistemin dinamik eşitlikleri aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\frac{W}{g} \dot{V} = \mu_r W_r + \mu_f W_f - \frac{1}{2} \rho C_d A V^2 - W_L \quad (12)$$

$$J_r \dot{\omega}_{or} = -\mu_r W_r r_\omega - B_{or} \omega_{or}^2 + K_{Br} U_{Br} \quad (13)$$

$$J_f \dot{\omega}_{of} = -\mu_f W_f r_\omega - B_{of} \omega_{of}^2 + K_{Bf} U_{Bf} \quad (14)$$

Denklem (2) ve (3)'de verilen  $W_r$  ve  $W_f$  denklem (12), (13) ve (14)'de yerine yazılırsa ve durum değişkenleri,

$$x_1 = \frac{V}{r_\omega} \quad (\text{araba gövdesinin eşdeğer açılmal hızı})$$

hızı)

$$x_2 = \omega_{or} \quad (\text{ön tekerleğin açılmal hızı})$$

$$x_3 = \omega_{of} \quad (\text{arka tekerleğin açılmal hızı})$$

olarak tanımlanırsa, sistem dinamiğini temsil eden, denklem (10)'da sistemin yavaşlama modeli için  $F$ ,  $G$  ve  $D$  matrisleri;

$$F = \begin{bmatrix} \left\{ \begin{array}{l} \frac{g\rho C_d A r_\omega (l - (\mu_r - \mu_f)H)}{2W(l - (\mu_r - \mu_f)h)} x_1^2 + \frac{g(\mu_r l_f + \mu_f l_r)}{r_\omega (l - (\mu_r - \mu_f)h)} \\ \frac{B_{or}}{J_r} x_2^2 - \frac{3K_i K_e \eta_i}{J_r R_a} x_2 - \frac{\mu_r r_\omega^3 \rho C_d A (H - hl)}{2J_r l (l - (\mu_r - \mu_f)h)} x_1^2 \\ \frac{\mu_r r_\omega W (l_f l - h(\mu_r l_f + \mu_f l_r))}{J_r l (l - (\mu_r - \mu_f)h)} \end{array} \right\} \\ \left\{ \begin{array}{l} -\frac{B_{of}}{J_f} x_3^2 + \frac{\mu_f r_\omega^3 \rho C_d A (Hl - h)}{2J_f l (l - (\mu_r - \mu_f)h)} x_1^2 \\ \frac{\mu_f r_\omega W (2h(\mu_r l_f + \mu_f l_r) - l_f l)}{J_f l (l - (\mu_r - \mu_f)h)} \end{array} \right\} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{Br}}{J_r} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{Bf}}{J_f} \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} \frac{gl}{W(l - (\mu_r - \mu_f)h)} \\ \frac{\mu_r r_\omega h}{J_r (l - (\mu_r - \mu_f)h)} \\ \frac{\mu_f r_\omega h}{J_f (l - (\mu_r - \mu_f)h)} \end{bmatrix}$$

olarak yazılabilir.

### 3. KAYMA KIPLİ DENETİM VE ERİŞİM KURALI YAKLAŞIMI

Kayma Kipli Denetim (KKD), değişen parametrelere sahip veya lineer olmayan sistemlerin denetimi için kullanılan en etkili dayanıklı denetim yöntemlerinden biridir (10). Bu denetim yöntemi, bozucu girişler ve modellenmemiş parametrelerin etkisinin görüldüğü durumlarda belirsizliklerin ve bozucuların sınırları bilindiği sürece dayanıklı bir denetim sağlar.

Erişim Kuralı (EK) yaklaşımı, Gao ve Hung tarafından KKD yönteminin tasarımı için yeni bir metod olarak tanıtılmıştır (11). Bu yaklaşımda, öncelikle anahtarlama fonksiyonunun istenen dinamik denklemini sağlayacak bir denetim kuralı türetilir. Denetim girişi, sistemin bilinen modeli ve bozucuların sınırlarının erişim kuralı ile birlikte göz önüne alınması ile elde edilir. Asimptotik kararlı olan anahtarlama fonksiyonunun diferansiyel eşitliğinin aslında bir erişim şartı olduğuna dikkat edilmelidir.

Denklem (10) ile ifade edilen durum uzay modeline sahip sistem için EK yaklaşımı kullanılarak yapılan denetleyici tasarımı aşağıda kısaca anlatılmıştır:

Anahtarlama fonksiyonunun;

$$S = Ce = C(x - x_d) \quad (16)$$

olarak ifade edildiğini düşünelim. Ulaşılmak istenen değeri izleme hatası,

$$e = x - x_d \quad (17)$$

dır. Burada temel amaç  $S'$  in sifıra doğru hızla düşmesini temin ederek hatanın belli bir dinamikle azalmasını sağlamaktır.

$S'$  in dinamiğinin azalan olmasını garanti etmek için;

$$\dot{S} = -\beta S - \beta \psi \operatorname{sgn}(S) \quad (18)$$

denklemini kullanılabilir (11). Denklem (10)  $C$  matrisi ile çarpılırsa,

$$C\dot{x} = CF(x) + CGU + CDW_L \quad (19)$$

elde edilir. Denklem (16)'nın türevi alınırsa;

$$\dot{S} = C\dot{e} = C(\dot{x} - \dot{x}_d)$$

$$C\dot{x} = \dot{S} + C\dot{x}_d \quad (20)$$

olur. Denklem (19)'da  $C\dot{x}$  yerine denklem (20)'deki değeri yazılırsa;

$$\dot{S} + C\dot{x}_d = CF(x) + CGU + CDW_L \quad (21)$$

ifadesi elde edilir. Denklem (18) (21)'de yerine yazılırsa,  $U$  denetim kuralı;

$$U = (CG)^{-1}[C(\dot{x}_d - F(x) - DW_L) - \beta S - \beta \psi \operatorname{sgn}(S)] \quad (22)$$

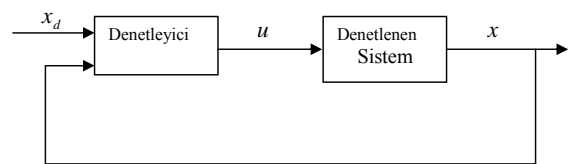
şeklinde belirlenmiş olur.

### 4. ERİŞİM KURALI YAKLAŞIMI VE BULANIK MANTIK KULLANILAN ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN FARKLI YOL ŞARTLARINDA DAYANIKLI HIZ DENETİMİ

Bu bölümde öncelikle, Kayma Kipli Denetim (KKD) tasarımında kullanılan Erişim Kuralı (EK) yaklaşımı ile bir elektrikli araç için hız denetleyicisi tasarlanacak ve bu denetim yöntemiyle ortaya çıkan problemler benzetim sonuçlarıyla gösterilecektir. Daha sonra, farklı yol koşullarında ve farklı hızlarda elektrikli araçlar için dayanıklı bir hız denetimi sağlamak amacıyla Bulanık Mantık (BM) ve EK yaklaşımı birlikte kullanılarak yeni bir denetim sistemi anlatılacaktır. Önerilen yeni denetim sisteminin etkinliğini gösteren benzetim sonuçları, elektrikli aracın hızlanma ve yavaşlama modelleri için ayrı ayrı sunulacaktır.

#### 4.1 Elektrikli Aracın Hızlanma Modeli İçin Erişim Kuralı Yaklaşımı ile Denetleyici Tasarımı

Bu bölümde EK yaklaşımı ile bir elektrikli aracın hız denetimi yapılacaktır. Denetlenen sistemi ve tasarlanacak denetleyiciyi içeren kapalı çevrim sistemin blok diyagramı Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. Denetlenen sistemi ve tasarlanacak denetleyiciyi içeren kapalı çevrim sistemin blok diyagramı

Burada  $x_d$  ulaşılmak istenilen hız değeridir. Şekil 4’de de görüldüğü gibi gerçek hız değeri ile ulaşılmak istenilen hız değeri kullanılarak denetleyici çıkışında bir denetim sinyali ( $U$ ) üretilir. Bu denetim sinyali sisteme uygulanarak istenilen hız değerine ulaşmaya çalışılır.

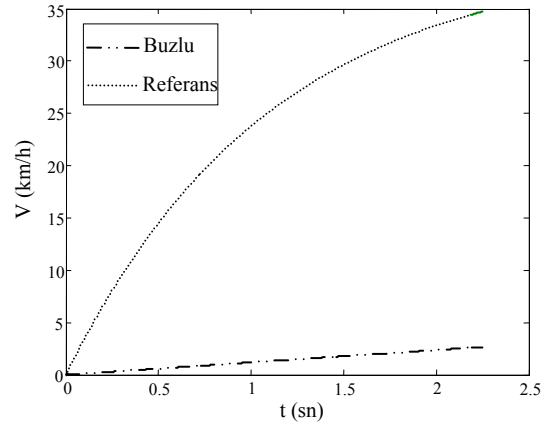
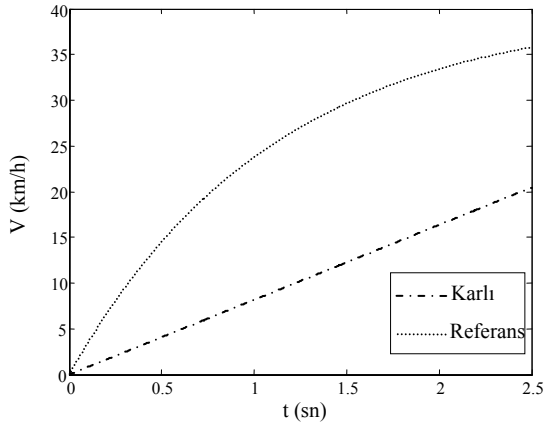
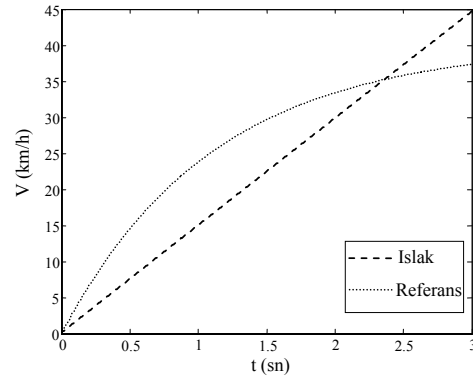
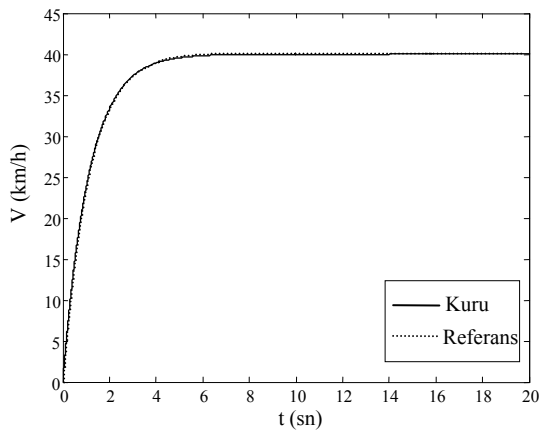
Bu kısımda amacımız araç gövdesinin eşdeğer açılal hızını denetlemektir. Aynı anda hem araba gövdesinin, hem de arka tekerleğin açılal hızlarının denetlenmesi mümkün değildir. Yani, farklı yol şartları için aracın belirli bir hızda gitmesi istenirken, arka te-

olmak üzere, denklem (10), (15),(18) ve (22) kullanılarak elektrikli aracın hızlanma durumuna ait elde edilen denetim sinyali aşağıda verilmiştir (12):

$$U = \frac{1}{q}((a\lambda_1 + d)x_1^2 + ex_2^2 + fx_2 - \beta_1\lambda_1x_1 + (m + c\lambda_1)W_L + (g - \lambda_1b) + \lambda_1\dot{x}_{1d} + \dot{x}_2 - \beta_1\psi_1 \operatorname{sgn}(S) + \beta_1\lambda_1x_{1d}) \quad (24)$$

Burada,

$$a = \frac{g\rho C_d A r_\omega (l - \mu_r H)}{2W(l - \mu_r h)}, b = \frac{\mu_r g l_f}{r_\omega (l - \mu_r h)},$$



Şekil 5.  $\gamma=0.9$  değerinde farklı yol şartları için aracın hızlanması (40km/h referans hız değerine)

kerleğin de yine belirlediğimiz farklı bir hızda dönmesi mümkün değildir. Seçtiğimiz araç arkadan itişli olduğu için ön tekerleğin açılal hızı, araç gövdesinin eşdeğer açılal hızına eşittir. Böylece ön tekerlek hızı ölçülmek suretiyle arabanın gövdesinin hızı belirlenebilir. Arka tekerleğin açılal hızı  $x_2 = x_{2d}$  olarak alınıp tasarım buna göre gerçekleştirilmiştir. Yani aracın gövdesinin sadece eşdeğer açılal hızı denetlenmektedir. Buna göre,

$$S = Ce = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$c = \frac{gl}{r_\omega W(l - \mu_r h)}, d = \frac{\mu_r r_\omega^3 \rho C_d A (H - h)}{2J(l - \mu_r h)},$$

$$e = \frac{B_\omega}{J}, f = \frac{3K_i \eta_i K_e}{J R_a}, g = \frac{\mu_r r_\omega W l_f}{J(l - \mu_r h)},$$

$$m = \frac{r_\omega l}{J(l - \mu_r h)}, q = \frac{3KK_t \eta_i}{J R_a}$$

şeklinde tanımlanmıştır. Aracın dinamiğinden dolayı araç gövdesinin belirli bir hız değerine ani yükselmesi mümkün olmaz. Bu yüzden hız talebinin de istenilen değere belirli bir sürede ulaşılmasını sağlayan bir referansa eşit olması gerekir. Bu referansı, transfer fonksiyonu  $G_f(s) = \frac{\gamma}{s + \gamma}$  olan alçak geçiren bir filtre girişine basamak fonksiyonu uygulayarak çıkışından elde edilebilir. Yükselme ani olmadığı için araç gövdesinin bu hız talebini takip etmesi kolay olacaktır.

Denklem (24)'deki  $U$  denetim sinyalinin, farklı yol şartlarında  $\gamma = 0.9$  sabit değeri için hızlanma modeline uygulanması ile elde edilen benzetim sonuçları Şekil 5'de verilmiştir. Bu benzetim sonuçları farklı yol şartlarında  $\gamma = 0.9$  sabit değeri için elde edilmiştir. Referans hız 40 km/h seçilmiştir.

Şekil 5'de görüldüğü gibi  $\gamma = 0.9$  sabit değeri için kuru yol şartında referans hız istenildiği gibi takip edilmektedir. Ancak ıslak, karlı ve buzlu yol şartlarında kararsız sonuçlar gözlenmiştir. Bunun temel nedeni farklı yol şartları için sistem dinamiğinin farklı  $\gamma$  değerleri gerektirmesidir. Yani  $\gamma$  değerini sabit tutarak her türlü yol şartında ve hız değerinde iyi bir denetim performansı sağlamak mümkün değildir.

#### 4.2 Elektrikli Aracın Yavaşlama Modeli İçin Erişim Kuralı Yaklaşımı ile Denetleyici Tasarımı

Yavaşlama modelinde hızlanma modelinden farklı olarak, araç gövdesinin açısal hız bilgisi ön tekerleğin açısal hızı ölçülerek elde edilemez. Yavaşlama modeli için, bir gözetleyici ile araç gövdesinin açısal hızının kestirildiği veya ölçülebildiği varsayılmıştır. Buna göre,

$$S = Ce = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_3 \\ C_4 & C_5 & C_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 - x_{1d} \\ x_2 - x_{2d} \\ x_3 - x_{3d} \end{bmatrix} \quad (25)$$

olmak üzere, denklem (22) ile verilen  $U$  denetim girişinin ön tekerlek için  $U_2$  ve arka tekerlek için  $U_1$  olmak üzere yavaşlama modeli kullanılarak yeniden düzenlenmiş hali aşağıda verilmiştir (12):

$$U_1 = \frac{1}{k_1(C_2C_6 - C_3C_5)} [((C_1C_6 - C_3C_4)a_1 + (C_3C_5 - C_2C_6)d_1)x_1^2 + (C_2C_6 - C_3C_5)g_1x_2^2 + (C_2C_6 - C_3C_5)h_1x_2 + ((C_3C_4 - C_1C_6)b_1 +$$

$$(C_2C_6 - C_3C_5)e_1) + ((C_1C_6 - C_3C_4)c + (C_3C_5 - C_2C_6)f_1)W_L + (\beta_2C_3C_4 - \beta_1C_1C_6)(x_1 - x_{1d}) + (\beta_2C_3C_5 - \beta_1C_2C_6)(x_2 - x_{2d}) + (\beta_2C_3C_6 - \beta_1C_3C_6)(x_3 - x_{3d}) + (C_1C_6 - C_3C_4)\dot{x}_{1d} + (C_2C_6 - C_3C_5)\dot{x}_{2d} - (\beta_1\psi_1C_6)\text{sgn}(S_1) + (\beta_2\psi_2C_3)\text{sgn}(S_2) \quad (26)$$

$$U_2 = \frac{1}{r_1(C_2C_6 - C_3C_5)} [((C_3C_5 - C_2C_6)n_1 + (C_2C_4 - C_1C_5)a_1)x_1^2 + (C_2C_6 - C_3C_5)m_1x_3^2 + ((C_1C_5 - C_2C_4)b_1 + (C_3C_5 - C_2C_6)o_1) + ((C_2C_4 - C_1C_5)c + (C_2C_6 - C_3C_5)p_1)W_L + (\beta_1C_1C_5 - \beta_2C_2C_4)(x_1 - x_{1d}) + (\beta_1C_2C_5 - \beta_2C_2C_5)(x_2 - x_{2d}) + (\beta_1C_3C_5 - \beta_2C_2C_6)(x_3 - x_{3d}) + (C_2C_4 - C_1C_5)\dot{x}_{1d} + (C_2C_6 - C_3C_5)\dot{x}_{3d} + (\beta_1\psi_1C_5)\text{sgn}(S_1) - (\beta_2\psi_2C_2)\text{sgn}(S_2) \quad (27)$$

Burada,

$$a_1 = \frac{g\rho C_d A r_\omega (l - (\mu_r - \mu_f)H)}{2W(l - (\mu_r - \mu_f)h)},$$

$$b_1 = \frac{g(\mu_r l_f + \mu_f l_r)}{r_\omega (l - (\mu_r - \mu_f)h)}, \quad d_1 = \frac{\mu_r r_\omega^3 \rho C_d A (H - hl)}{2J_r l (l - (\mu_r - \mu_f)h)},$$

$$e_1 = \frac{\mu_r r_\omega W (l_f l - h(\mu_r l_f - \mu_f l_r))}{J_r l (l - (\mu_r - \mu_f)h)},$$

$$f_1 = \frac{\mu_r r_\omega h}{J_r (l - (\mu_r - \mu_f)h)}, \quad g_1 = \frac{B_{\omega r}}{J_r}, \quad h_1 = \frac{3K_t K_e \eta_i}{J_r R_d},$$

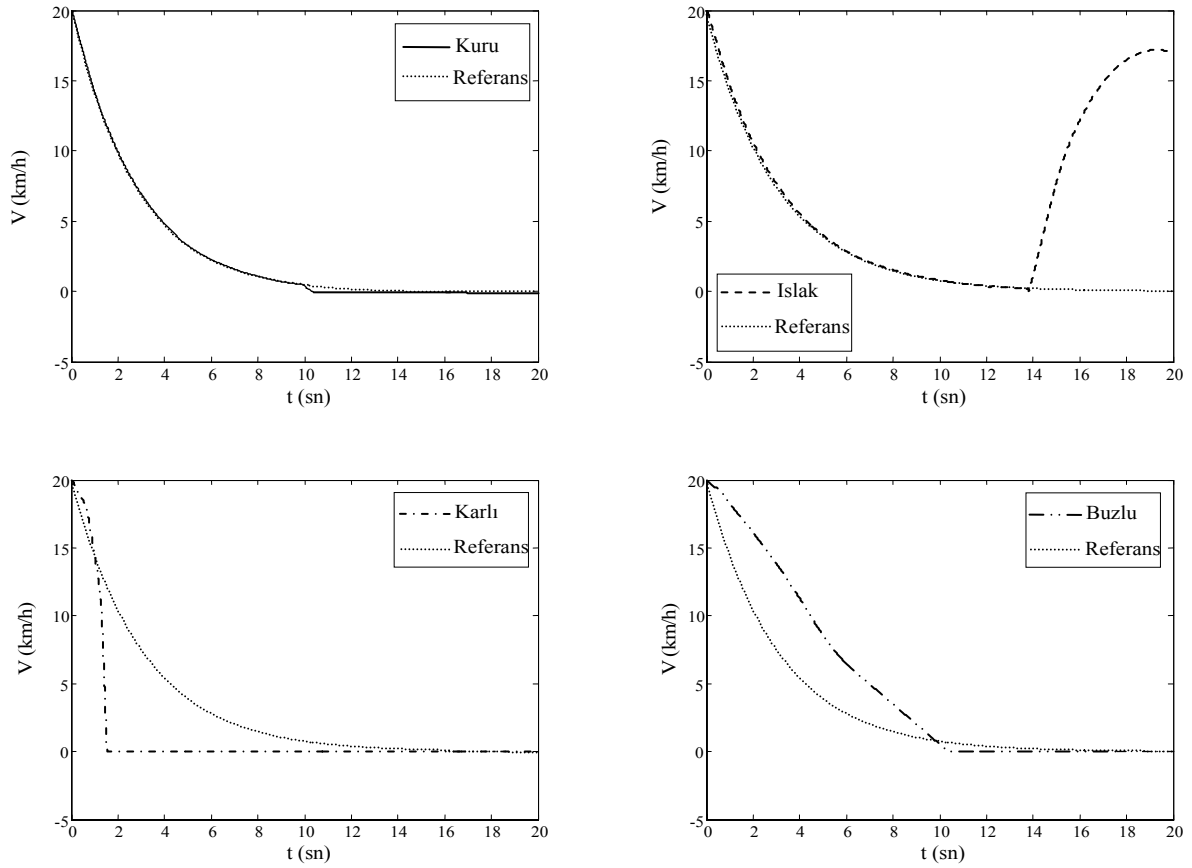
$$k_1 = \frac{K_{Br}}{J_r}, \quad m_1 = \frac{B_{\omega f}}{J_f}, \quad n_1 = \frac{\mu_f r_\omega^3 \rho C_d A (Hl - h)}{2J_f l (l - (\mu_r - \mu_f)h)},$$

$$o_1 = \frac{\mu_f r_\omega W (2h(\mu_r l_f + \mu_f l_r) - l_r l)}{J_f l (l - (\mu_r - \mu_f)h)},$$

$$p_1 = \frac{\mu_f r_\omega h}{J_f (l - (\mu_r - \mu_f)h)}, \quad r_1 = \frac{K_{Bf}}{J_f}$$

şeklinde tanımlanmıştır.

Hızlanma modelinde olduğu gibi referans hız sinyali bir alçak geçiren filtre yardımıyla oluşturulacaktır. Şekil 6'da verilen benzetim sonuçları, Denklem (26) ve (27)'deki  $U$  denetim sinyallerinin farklı yol şartlarında sabit bir  $\gamma$  değeri için ( $\gamma = 0.3$ ) yavaşlama modeline uygulanması ile elde edilmiştir.



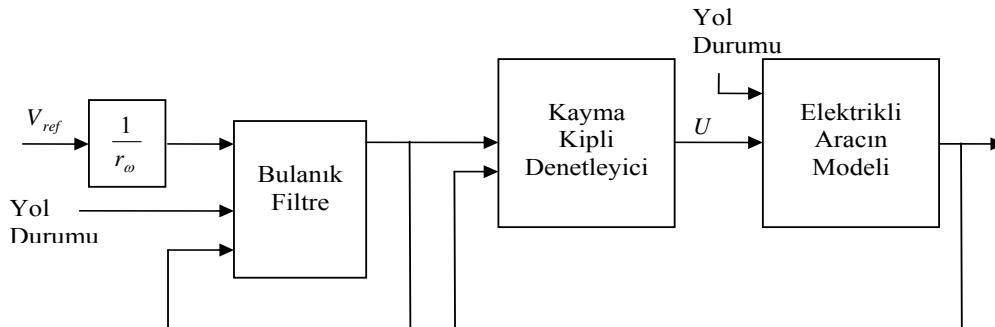
Şekil 6.  $\gamma=0.3$  değerinde farklı yol şartları için aracın yavaşlaması (20km/h referans hız değerinden)

Şekil 6'da görüldüğü gibi  $\gamma = 0.3$  sabit değeri için kuru yol şartında kararlı bir yavaşlama grafiği elde edilmiştir. Ancak ıslak ve buzlu yol şartlarında istenen denetim performansı elde edilememiştir. Hızlanma modelinde olduğu gibi, bunun temel nedeni seçilen  $\gamma$  değerinin her yol şartı için uygun olmamasıdır.

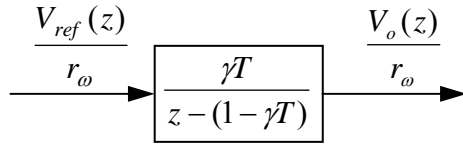
#### 4.3 Önerilen Denetim Sistemi

Yukarıda sunulan benzetim sonuçları, tüm yol şartlarında ve hız değerlerinde sabit bir  $\gamma$  değeri kullanılmasının kararlı bir sürüşün sağlanmasını engellediğini göstermiştir. Bu nedenle farklı yol şartlarında ve

farklı hızlarda duruma en uygun  $\gamma$  değerinin belirlenmesi ve kullanılması gerekir. Bu alt bölümde, uygun  $\gamma$  değerinin seçilmesi için BM ve EK yaklaşımını beraber kullanan yeni bir denetim sistemi tasarlanmıştır. Denetleyicide  $\gamma$  değerinin seçimi Sugeno tipi bir bulanık filtre ile sağlanmıştır (13). Denetim sisteminin blok diyagramı Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 8 alçak geçiren ayırık zaman bir filtrenin yapısını göstermektedir. Bulanık filtre için bu yapı kullanılmıştır



Şekil 7. Denetim sisteminin blok diyagramı



Şekil 8. Ayırık zamanda alçak geçiren filtre

Filtrenin z domaindeki çıkış ifadesi (14),

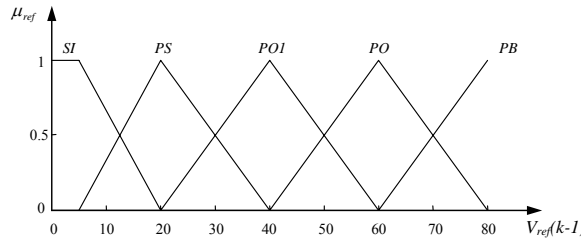
$$V_o(z) = z^{-1}AV_o(z) + Bz^{-1}V_{ref}(z)$$

ve fark denklemi,

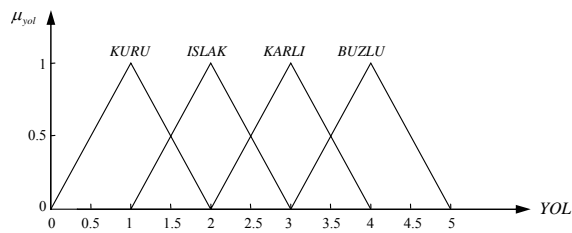
$$V_o(k) = AV_o(k-1) + BV_{ref}(k-1) \quad (28)$$

olarak yazılabilir. Burada  $A = 1 - \gamma T$ ,  $B = \gamma T$  ve $T = 10^{-4}$  (örnekleme periyodu) olarak alınmıştır.Sugeno tipi bulanık filtrenin giriş değişkenleri olarak  $V_o(k-1)$ ,  $V_{ref}(k-1)$  ve  $YOL$ , çıkış değişkeniolarak da  $V_o(k)$  alınmıştır. Tüm çıkış fonksiyonları için

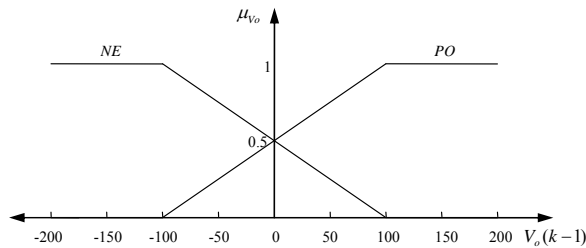
Denklem (28) kullanılmıştır. Girişler için kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 9'da verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 9. Giriş değişkenleri için kullanılan üyelik fonksiyonları

Yol ve referans hız durumuna göre Tablo 1'de hızlanma ve Tablo 2'de yavaşlama için iyi performans sağlayan  $\gamma$  değerleri verilmiştir. Bu değerler deneme yanılma yöntemiyle en iyi sistem cevabını sağlayacak şekilde seçilmiştir. Tablo 1 ve 2 aynı zamanda bulanık filtre için kural tabanını oluşturmak için kullanılmıştır. Denetim sisteminde,  $\gamma$  değeri arttıkça sistem cevap hızının arttığı unutulmamalıdır.

Tablo 1. Hızlanma durumu için maksimum  $\gamma$  değerleri

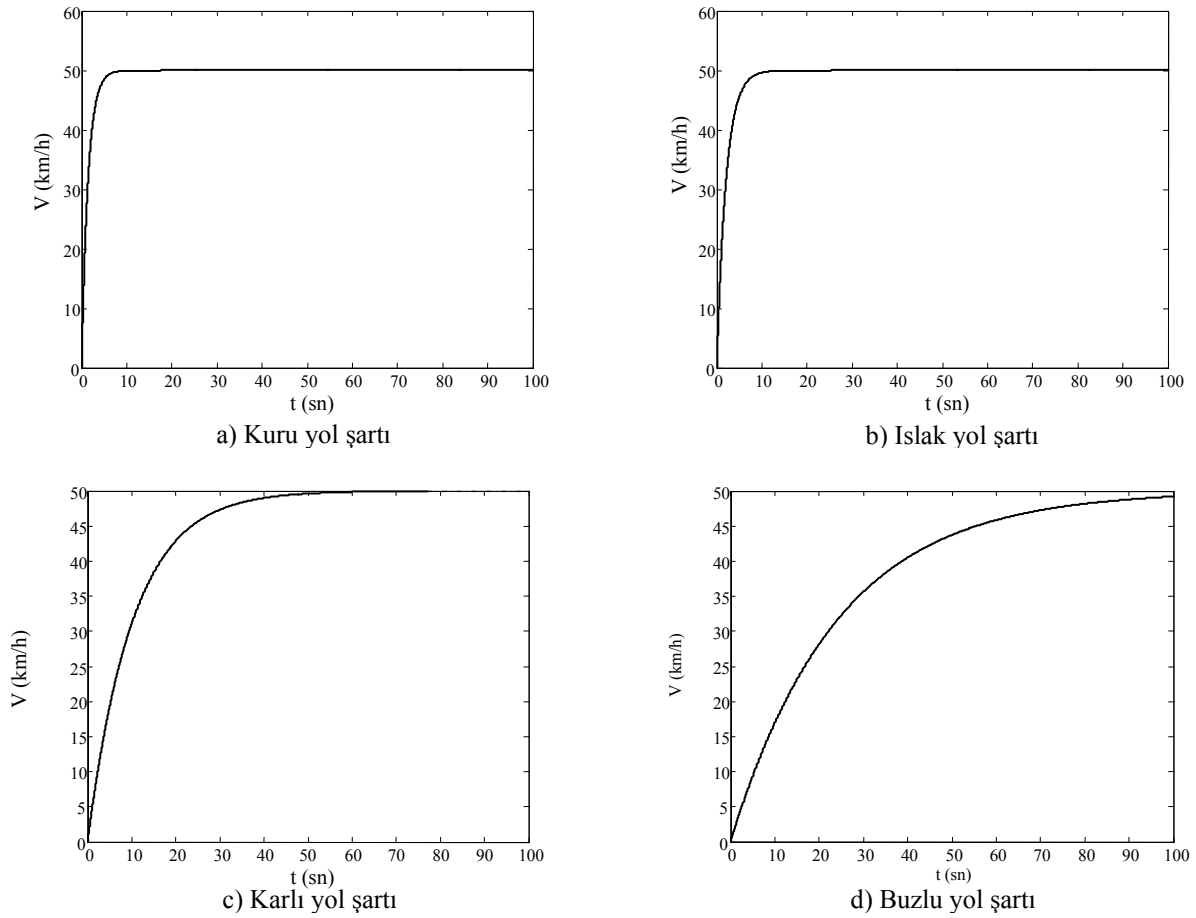
$V_{ref}$ YOL	5 km/h	20 km/h	40 km/h	60 km/h	80 km/h
Kuru	4.8	1.1	0.9	0.55	0.35
Islak	3	1	0.6	0.4	0.3
Karlı	1	0.25	0.12	0.08	0.06
Buzlu	0.4	0.11	0.05	0.035	0.025

Tablo 2. Yavaşlama durumu için maksimum  $\gamma$  değerleri

$V_{ref}$ YOL	5 km/h	20 km/h	40 km/h	60 km/h	80 km/h
Kuru	0.8	0.3	0.2	0.12	0.1
Islak	0.5	0.25	0.1	0.09	0.08
Karlı	0.1	0.06	0.01	0.025	0.001
Buzlu	0.03	0.009	0.005	0.0045	0.0005

Tablo 1 ve 2'den de görüldüğü gibi alçak geçiren filtrede sabit bir  $\gamma$  değeri seçmenin iki türlü sakıncası vardır: Birincisi,  $\gamma$  değeri çok küçük seçilerek her türlü yol şartında aracın çalışması sağlanabilir ancak, bu durumda, araç normal yol şartlarında bile düşük performansla çalışmak zorunda kalacaktır. Diğer taraftan  $\gamma$  değeri büyük seçilirse, Şekil 5 ve 6'da görüldüğü gibi yol şartları kötüleştiğinde araçta kararlı bir sürüş gözlenemeyecektir. İkincisi,  $\gamma$  değeri farklı hızlarda aynı seçilirse; küçük bir  $\gamma$  için düşük hızlardaki performans düşük olacaktır, büyük bir  $\gamma$  için ise yüksek hızlarda kararlı bir sürüş sağlanamayacaktır. Bu nedenle farklı hız ve yol şartlarında uygun  $\gamma$  değerleri kullanmamızı sağlayan bir bulanık filtre tasarlanmıştır. Bu bulanık filtre ve EK yaklaşımı birlikte kullanılarak oluşturulan denetleyici ile farklı hız ve yol şartlarında araç hızının 50km/h hıza yükselmesi durumuna ait benzetim sonuçları Şekil 10'da verilmiştir





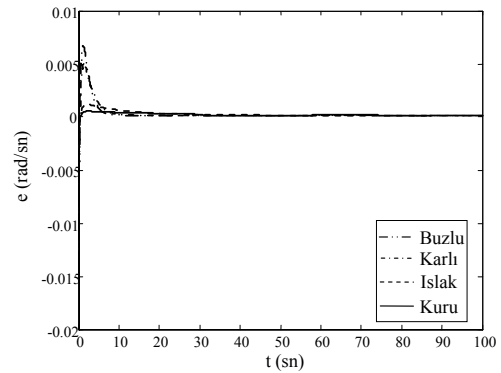
Şekil 10. BM ve EK yaklaşımı kullanılarak farklı yol şartları için araç gövdesinin hızlanması  
(50km/h referans hız değerine)

Şekil 10'da görüldüğü gibi her türlü yol şartında uygun bir karakteristikle istenilen hız değerine ulaşılmıştır. Bulanık filtre 5, 20, 40, 60 ve 80km/h hız değerleri referans alınarak tasarlanmıştır. Ancak BM yaklaşımının ara değer bulma özelliği sayesinde hızlanma modelinin 50km/h'lik ara hız değeri için de iyi bir performansla çalıştığı görülmektedir. Burada referans hız ile araç hızı birbirine çok yakın olduğundan aynı grafikte gösterilmemiştir. Bunun yerine araç gövdesinin eşdeğer açısal hızı ( $x_1$ ) ve ulaşmak istenilen açısal hız değeri ( $x_{1d}$ ) arasındaki hatanın ( $e$ ) değişimi Şekil 11'de gösterilmiştir.

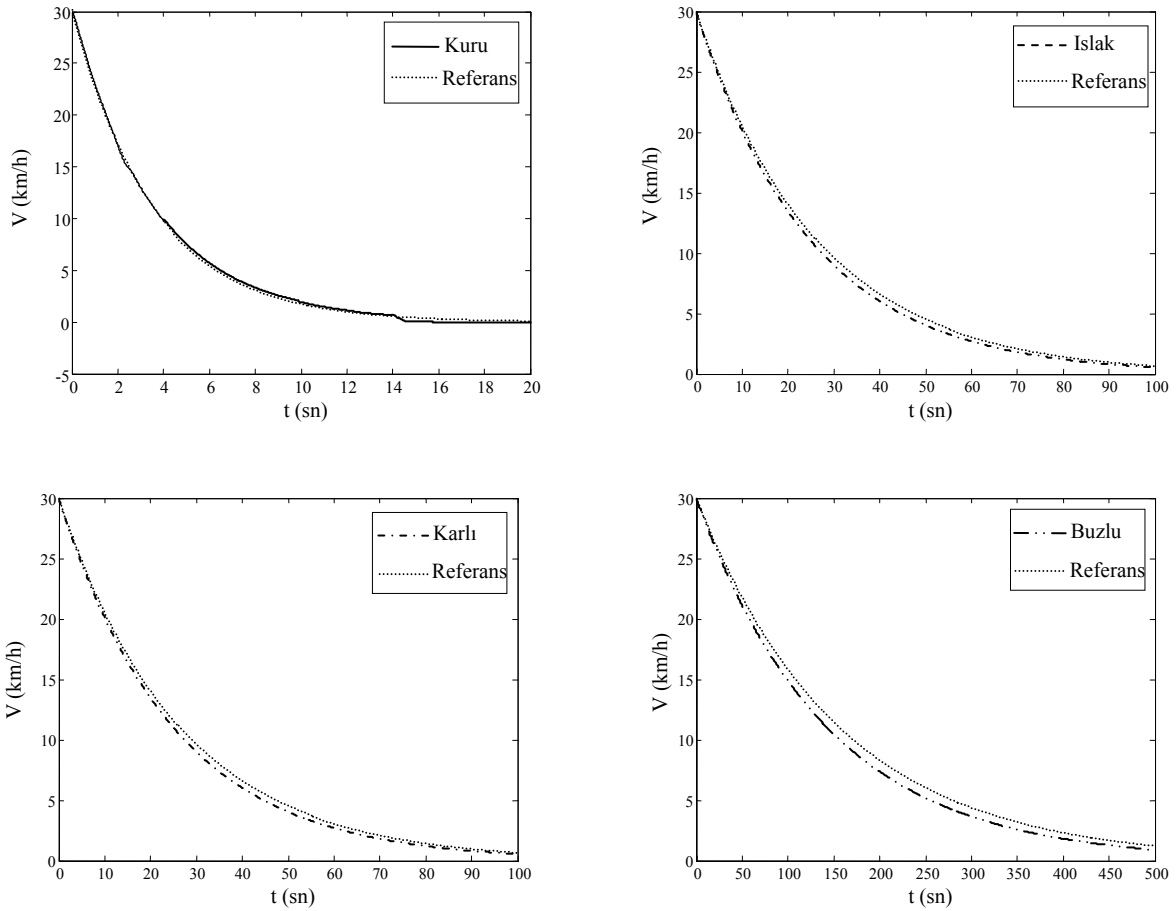
Kalkış anında küçük bir hata ile araç hareket etmekte ve istenilen hız değerine (50km/h) ulaşıldığında hata sifıra yaklaşmaktadır. Yol şartları kötüleştikçe sürtünmenin azalmasından dolayı sistem cevap hızı doğal olarak  $\gamma$  değerine bağlı bir şekilde yavaşlamaktadır.

Yavaşlama modeli için sadece EK yaklaşımı kullanılarak tasarlanmış denetleyicide farklı hız ve yol şartlarında sabit bir  $\gamma$  değeri ile her türlü yol durumu için iyi bir sonuç elde edilememiştir. Burada da benzer

şekilde farklı hız ve yol şartlarında Tablo 2'deki  $\gamma$  değerlerini seçmemize imkan veren bir bulanık filtre oluşturulmuştur. BM ve EK yaklaşımı kullanılarak araç hızının 30 km/h hız değerinden yavaşlama durumu için benzetim sonuçları Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 11. BM ve EK kullanılarak 50km/h referans hız değerine ulaşılrken farklı yol şartları için hatanın değişimi



Şekil 12. BM ve EK yaklaşımı kullanılarak farklı yol şartları için aracın yavaşlaması (30km/h hız değerinden)

Şekil 12'de görüldüğü gibi yol şartları kötüleştikçe aracın durması daha uzun süre almıştır. Bu sürenin bu kadar uzun olmasının başlıca sebebi aracın ağırlığının büyük olmasıdır.

## 5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, Erişim Kuralı (EK) yaklaşımı ve Bulanık Mantık (BM) kullanılarak bir Elektrikli Aracın (EA) farklı yol şartlarında dayanıklı hız denetimi yapılmıştır. Temel amaç; EA için farklı hız ve yol şartlarında daha iyi bir sürüş performansı sağlamaktır. Bulanık mantığın kullanıldığı denetim sistemi, her türlü yol şartında farklı hız değerlerine yükselme ve bu değerlerden yavaşlamak için seçilen referans sinyali ile aracın güvenli ve kararlı hareketini sağlamaktadır. Böylece araç; hız değeri ve yol durumu ne olursa olsun uygun bir eksponansiyel eğri ile istenilen değere yükselmekte ya da bu değerden düşmektedir.

Bu çalışmada, EK yaklaşımı dayanıklı bir hız denetimi sağlamak, BM denetleyici ise uygun referans hızlanma ve yavaşlama sinyalini elde etmek için kullanılmıştır. Geliştirilen denetleyici sayesinde yol şartlarına göre araç çok ani hızlanma veya yavaşlama isteğine maruz kalmamakta ve enerjinin tasarruflu kullanımını sağlamaktadır.

## 6. SEMBOLLER LİSTESİ

$W$	:aracın toplam kütlesi (N)
$W_f, W_r$	:ön ve arka tekerlek yükü (N)
$\dot{V}$	:araç gövdesinin ivmesi ( $m/sn^2$ )
$\rho$	:hava yoğunluğu ( $kg/m^3$ )
$C_d$	:hava direnç katsayısı
$A$	:aracın hava sürtünmesine maruz kalan ön yüzeyi ( $m^2$ )
$V$	:araç gövdesinin hızı (m/sn)
$W_L$	:bozucular (N)
$J$	:atalet momenti ( $kg.m^2$ )
$\dot{\omega}$	:tekerleğin açısal ivmesi ( $rad/sn^2$ )
$\omega$	:tekerleğin açısal hızı (rad/sn)
$B_\omega$	:sürtünme katsayısı ( $N.m.sn^2/rad^2$ )
$T$	:tekerleğin sürücü torku (N.m)
$K_t$	:tork sabiti (N.m/A)
$K_e$	:indüksiyon voltaj sabiti (V.sn/rad)
$K$	:kontrol kazancı

$R_a$	:bobin direnci ( $\Omega$ )
$L$	:bobin indüktansı (H)
$r_\omega$	:tekerleğin yarıçapı (m)
$S$	:anahtarlama fonksiyonu
$e$	:hata
$de$	:hatanın değişimi
$u$	:kontrol işareti

## 7. KAYNAKLAR

1. Chan, C. C., The State of The Art of Electric And Hybrid Vehicles, IEEE Proceedings, Vol. 90, No. 2, 247-274, 2002.
2. Hori, Y., Future Vehicle Driven by Electricity and Control, IEEE, AMC 2002-Maribor, Slovenia, 1-14, 2002.
3. Sakai, S., Sado, H., Hori, Y., Anti Skid Control with Motor in Electric Vehicle, AMC2000-NAGOYA, 317-322, 2000.
4. Sakai, S., Sado, H., Hori, Y., Motion Control in an Electric Vehicle with Four Independently Driven In-Wheel Motors, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 4, No. 1, 9-16, 1999.
5. Jezernik, K., Robust Induction Motor Control for Electric Vehicles, AMC'96-MIE, 436-440, 1996.
6. Proca, A. B., Keyhani, A., Miller, J. M., Sensorless Sliding-Mode Control of Induction Motors Using Operating Condition Dependent Models, Vol. 18, No. 2, 205-212, 2003.
7. Khatun, P., Bingham, C. M., Schofield, N., Mellor, P. H., Application of Fuzzy Control Algorithms for Electric Vehicle Antilock Braking/Traction Control Systems, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 52, No. 5, 1356-1364, 2003.
8. Pusca, R., Ait-Amirat, Y., Berthon, A., Kauffmann, J.-M., Fuzzy-Logic-Based Control Applied to a Hybrid Electric Vehicle with Four Separate Wheel Drives, IEE Proc.-Control Theory Appl., Vol. 151, No. 1, 73-81, 2004.
9. An, D. P., Nezu, K., Akuto, T., Design of Longitudinal Control System for Brushless Motor Electric Vehicle Using VSTC Control Theory, JSME International Journal, Vol. 38, No. 4, 756-764, 1995.
10. Utkin, V. I., Sliding Mode Control Design Principles and Applications to Electric Drives, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 40, No. 1, 23-35, 1993.
11. Gao, W.B., Hung, J. C., Variable Structure Control of Nonlinear Systems, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 40, No. 1, 45-55, 1993.
12. Özmen, G., Kayma Kipli Kontrol Ve Bulanık Mantık Kullanarak Elektrikli Araçların Hız Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
13. Passino, K., Yurkovich, S., Fuzzy Control, Addison Wesley, 1998.
14. Franklin, G.F., Powel, J.D., Workman, M., Digital Control of Dynamic Systems, Addison Wesley, 1990.