



Değişken kayma yüzeyli kayan kipli denetim yönteminin elektromekanik bir kanat tahrik sistemine uygulanması

Bülent Özkan *^{ID}

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, Savunma Sanayii Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü, 06261, Mamak, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Gürbüz elektromekanik kanat tahrik sistemi tasarımı
- Değişken kayma yüzeyli kayan kipli denetim
- Sabit kayma yüzeyli kayan kipli denetim

Makale Bilgileri

Geliş: 28.07.2016

Kabul: 11.10.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.337655

Anahtar Kelimeler:

Kanat tahrik sistemi,
değişken kayma yüzeyli
kayan kipli denetim,
sabit kayma yüzeyli kayan
kipli denetim,
gürbüz denetim,
bilgisayar benzetimi

ÖZET

Bu çalışmada, değişken kayma yüzeyli kayan kipli denetim yönteminin elektromekanik özellikteki bir kanat tahrik sistemine uygulanması ele alınmaktadır. Bu amaçla, öncelikle ele alınan kanat tahrik sisteminin matematiksel modeli çıkarılmış, ardından bahsedilen model esas alınarak kayan kipli denetim yaklaşımına göre bir denetim sistemi tasarlanmıştır. Belirtilen kapsamda kayan kipli denetim sisteminin kayma yüzeyinin sabit ve değişken olması durumları ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Değişken kayma yüzeyli durum için yüzeyin değişimi zamana bağlı birinci dereceden bir fonksiyonla tanımlanmıştır. Ayrıca ifade edilen değişim, uygun şekilde seçilen bulanık fonksiyonlarla da sağlanmaya çalışılmıştır. Karşılaştırma amaçlı olarak PID (oransal, tümvsel ve türevsel) denetim kuralına göre klasik bir denetim sisteminin de oluşturulduğu çalışmanın sonunda, önerilen denetim sistemlerinin başarımları genel olarak değerlendirilmiştir.

Implementation of the sliding mode control method with a varying sliding surface on an electromechanical fin actuation system

H I G H L I G H T S

- Robust electromechanical fin actuation system
- Sliding mode control with a varying sliding surface
- Sliding mode control with a constant sliding surface

Article Info

Received: 28.07.2016

Accepted: 11.10.2016

DOI:

10.17341/gazimmfd.337655

Keywords:

Fin actuation system,
sliding mode control with a
varying sliding surface,
sliding mode control with a
constant sliding surface,
robust control,
computer simulation

ABSTRACT

In this study, the implementation of the sliding mode control method regarding a varying sliding surface on an electromechanical fin actuation system is dealt with. First, the mathematical model of the considered control actuation system is derived and then a control system considering the sliding mode control approach is designed upon the mentioned model. In this extent, the sliding mode controllers with both constant and varying sliding surfaces are evaluated individually. For the varying sliding surface case, the variation of the surface is described by means of a time dependent first order linear function. Moreover, the adjustment is tried to be done regarding appropriately-constructed fuzzy functions, too. For comparison purpose, a classical control system accounting the PID (proportional plus integral plus derivative) control action is also designed. At the end of the study, the responses of all the proposed control schemes are evaluated altogether.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güdümlü mühimmatlar ve insansız hava araçları gibi uçan sistemlerin başarımında önemli rol oynayan birimlerden biri de kanat tahrik sistemleridir. Kanat tahrik sistemleri, bir anlamda uçan eyletimli sistemlerin kolları ve bacakları olarak da adlandırılabilir. Ele alınan uçan sistemin denetleyicisi tarafından üretilen komut sinyallerinin kanat bağlantı milleri olarak adlandırılan hareket iletim elemanlarının ucuna bağlı olan ve genel olarak aerodinamik denetim yüzeyleri olarak tanımlanan kanatlar aracılığıyla açısız hareketlere dönüştürülmesini ve böylelikle hava aracının belirlenen uçuş yörüngesi boyunca yol almasını sağlayan kanat tahrik sistemlerinin işlevlerini istenildiği gibi yerine getirebilmesi için çeşitli denetim yaklaşımları ele alınmıştır [1, 2]. Özellikle uçuş sırasında karşılaşılan doğrusal olmayan aerodinamik etkilerle sistem üzerine gelen bozucu girişler ve ölçer gürültüsü gibi etmenler, kanat tahrik sistemlerinin denetim problemini karmaşık hale getirmektedir [3]. Bu nedenle, klasik yaklaşımların yanısıra çeşitli modern ve ileri denetim yöntemleri de kanat tahrik sistemi tasarımında göz önüne alınmıştır [4]. Konuyla ilgili çalışmalar incelendiğinde, en fazla tercih edilen yaklaşımın PID (oransal, tümlevsel ve türevsel, *İng. proportional plus integral plus derivative*) denetim işlemi içeren klasik denetim yöntemi olduğu görülmektedir. Öte yandan, elektromekanik eyletimli kanat tahrik sistemlerinin maruz kaldığı sürtünme ve doğrusal olmayan sistem dinamiği gibi doğrusal olmayan etkiler altındaki başarımını artırmak ve uçuş yüklerinden kaynaklanan istenmeyen salınımların genliğini azaltmak amacıyla, bulanık mantık tabanlı PID tipi denetim şemaları da geliştirilmiştir [5]. PID ve bulanık mantık tabanlı denetim sistemleri içeren elektromekanik eyletimli kanat tahrik sistemlerinin modellenerek gerçek zamanlı bilgisayar benzetimlerinin yapıldığı çalışmalar literatürde yer almaktadır [6, 7]. Tasarlanan mevcut denetim yöntemleri arasında, başarım özelliklerini en fazla karşılayan yaklaşım gürbüz (*İng. robust*) denetim yöntemleri olmuştur. Yukarıda da bahsedilen bozucu girişler ve parametre belirsizlikleri altında dahi, gürbüz denetim sistemlerinin oldukça tatminkâr sonuçlar sunduğu görülmüştür. Belirtilen çerçevede, H_2 ve H_∞ gibi norm tabanlı denetim sistemlerinin yanı sıra kayan kipli denetleyicili algoritmalar da önerilmiştir [4]. Bu bağlamda, otonom uçan sistemlerin bozucu girişler ve belirsizlikler altındaki denetimini sağlamak amacıyla tümlev işlemi içeren ve yüksek mertebeli kayan kipli denetim sistemleri tasarımlarına literatürde rastlanmaktadır [8]. Genel anlamda, bahsedilen sistemler için uyarlamalı kayan kipli denetim sistemleri de önerilmiştir [9]. Fazla yaygın olmamakla birlikte, sürekli zaman kümesinde geliştirilenlere alternatif olarak, parametre belirsizliği etkisini daha da azaltmak amacıyla ayrık zaman kümesinde tasarlanmış kayan kipli denetim sistemlerine rastlanmaktadır [10]. Öte yandan tasarlanan kayan kipli denetim sistemleri çoğunlukla sabit bir kayma yüzeyi esas alınarak geliştirilmiş olup, bu durumda denetim işaretindeki çatırtı (*İng. chattering*) ile sistem cevabı arasında bir uzlaşma yapılması durumu ortaya çıkmıştır [4]. Çatırtının sistem denetimi üzerindeki olumsuz etkisini en aza indirebilmek

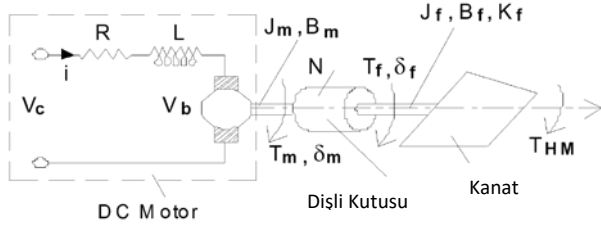
amacıyla, değişken kayma yüzeyli uyarlamalı kayan kipli denetim yöntemleri önerilmiştir [11, 12]. Elektromekanik eyletimin göz önüne alındığı bu çalışmadan farklı olarak hidrolik bir eyletimin söz konusu olduğu ve mevcut çalışmada ele alınan kanat tahrik sistemi yerine aerodinamik bir yük uygulama sisteminin incelendiği; dolayısıyla kanat tahrik sisteminde açısız konum olan denetim değişkeninin tork olarak seçildiği bir bildiride de değişken kayma yüzeyli bir kayan kipli denetim sistemi uygulaması sunulmuştur [13]. Bu kapsamda, bulanık mantık destekli uyarlamalı kayan kipli denetim sistemleri de önerilmiş ve örnek dinamik sistemler üzerinde -çoğunlukla bilgisayar benzetimi düzeyinde- ilgili uygulamalar yapılmıştır [14]. Kayan kipli denetim yaklaşımının teorik ve deneysel uygulamalarının da derli toplu olarak incelendiği çalışmalar literatürde mevcuttur [15].

Bu çalışmada, üzerine etkiyen bozucu tork ve ölçer gürültüsü gibi denetimsiz girişlerle başlangıçta tam olarak öngörülemeyen parametre belirsizlikleri altında dahi göz önüne alınan kanat tahrik sisteminin kararlılığını ve kendisinden beklenen başarım gereksinimlerini yerine getirmesini sağlarken denetim girişinde meydana gelebilecek çatırtıları da engelleyen değişken kayma yüzeyli kayan kipli bir denetim sistemi oluşturulmaya çalışılmıştır. Bahsedilen kayma yüzeyi değişimi; ele alınan hata değişkeninin zamana göre değişimine karşılık gelen düşey eksen boyunca gerçekleşen doğrusal bir ötelenme ile kayma yüzeyinin hata-hatanın zamana göre değişimi düzlemindeki dönüşü ile tanımlanmaktadır. Burada belirtilen ötelenme ve dönüşler zamana bağlı birinci dereceden doğrusal fonksiyonlar şeklinde tanımlanmış olup, bu fonksiyonların katsayılarının ele alınan denetim probleminin başlangıç ve bitiş koşullarına göre belirlendiği ve bunun yanı sıra uygun şekilde seçilen bulanık mantıklı üyelik fonksiyonları aracılığıyla kestirildiği iki farklı yaklaşım ele alınmaktadır [13]. Ayrıca karşılaştırma amaçlı olarak, sabit kayma yüzeyli bir kayan kipli denetim sistemi ile PID kuralını esas alan klasik bir denetim sistemi de tasarlanmıştır. Kanat tahrik sisteminin fiziksel dünyadaki başarım özelliklerinin gerçeğe en yakın şekilde benzetimini yapabilmek amacıyla sistem üzerine etkiyen bozucu giriş ve gürültü etmenleri de göz önüne alınmış ve oluşturulan denetim sistemleri kesikli (*İng. discrete*) zaman kümesinde ifade edilmiştir [16]. Nihayet, oluşturulan modeller kullanılarak MATLAB® Simulink® ortamında gerçekleştirilen bilgisayar benzetimlerinden elde edilen sonuçlar esas alınarak, bahsedilen dört denetim sisteminin genel bir değerlendirilmesi yapılmıştır.

2. SİSTEM DİNAMİK MODELİ (DYNAMIC MODELING OF THE SYSTEM)

Göz önüne alınan kanat tahrik sistemi, Şekil 1'de verilen şematik çizimde de görüldüğü gibi üç ana kısımda incelenebilir doğru akım motoru (DC motor), dişli kutusu ve kanat. Şekil 1'de şematik diyagramı sunulan DC motor temel olarak denetim gerilimi (V_c), ters elektromotif gerilim (*İng. back-emf voltage*, V_b), indüktans (L), direnç (R) ve denetim akımı (i) değişkenleri ile tanımlanmış olup, J_m ve B_m

sırasıyla DC motorun rotor kısmının motor çıkış miline indirgenmiş eylemsizlik momenti ve motor çıkış mili ile mil yatakları arasındaki viskoz sürtünme katsayısını ifade etmektedir. T_m ve δ_m ise sırasıyla motor çıkış torku ve motor çıkış milinin açısal yerdeğiştirmesine karşılık gelmekte olup, N parametresi ($N>1$) dişli kutusunun aktarma oranına işaret etmektedir. Bunların yanısıra J_f , B_f ve K_f sembolleri de sırasıyla kanat ve dişli kutusunun kutuyu kanada bağlayan mil üzerine indirgenmiş toplam eylemsizlik momenti, dişli kutusu ile kanat bağlantı mili arasındaki viskoz sürtünme katsayısı ve kanatçık direngenliğini göstermektedir. Benzer şekilde T_f ve δ_f de kanat bağlantı mili üzerindeki tork ve kanat açısal yerdeğiştirmesini temsil etmekte olup, T_{HM} ile atmosferik etkilerin kanat üzerinde oluşturduğu menteşe momenti belirtilmektedir.



Şekil 1. Elektromekanik kanat tahrik sistemi (Electromechanical fin actuation system)

Burada, K_t motor tork katsayısını göstermek üzere T_m ve i arasında aşağıdaki bağıntı (Eş. 1) yazılabilir.

$$T_m = K_t i \quad (1)$$

Ayrıca, motor çıkış ve kanat bağlantı milleri üzerinde tanımlanan tork ve açısal yerdeğiştirme parametreleri arasında da Eş. 2 ve Eş. 3 mevcuttur.

$$T_f = N T_m \quad (2)$$

$$\delta_f = \delta_m / N \quad (3)$$

Diğer momentlere nazaran kanat dinamiğine olan etkisi oldukça az olan kanat direngenliği ihmal edildiğinde, kanat tahrik sisteminin hareket denklemi δ_f parametresi denetim değişkeni olarak seçilerek aşağıdaki gibi (Eş. 4) yazılabilir.

$$T_f = J_e \ddot{\delta}_f + B_e \dot{\delta}_f + T_{HM} \quad (4)$$

Yukarıda yer alan J_e ve B_e kanat bağlantı mili üzerine indirgenmiş eşdeğer eylemsizlik momenti ve viskoz

sürtünme katsayısını göstermekte olup, sırasıyla $J_e = J_f + N^2 J_m$ ve $B_e = B_f + N^2 B_m$ şeklinde tanımlanmıştır.

T_{HM} , K_{HM} menteşe momenti katsayısı olmak üzere, δ_f 'nin fonksiyonu olarak aşağıdaki yaklaşık ifadeyle tanımlanabilir.

$$T_{HM} = K_{HM} \delta_f \quad (5)$$

Eş. 1, Eş. 2 ve Eş. 5, Eş. 4'de yerine yazıldığında, denetim değişkeni akım parametresi (i) olacak şekilde kanat tahrik sisteminin dinamik davranışını tanımlayan diferensiyel denklem müteakip formda elde edilir.

$$i = J'_e \ddot{\delta}_f + B'_e \dot{\delta}_f + K'_{HM} \delta_f \quad (6)$$

Burada $J'_e = J_e / (N K_t)$, $B'_e = B_e / (N K_t)$ ve $K'_{HM} = K_{HM} / (N K_t)$ tanımları yapılmıştır (Eş. 6).

Sistem dinamik modeli, durum değişkenleri $x_1 = \delta_f$ ve $x_2 = \dot{\delta}_f$, sistem girişi $u=i$ ve sistem çıkışı da $y=x_1$ olacak şekilde, Eş. 7, Eş. 8 gibi durum uzayı formunda da yazılabilir

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (7)$$

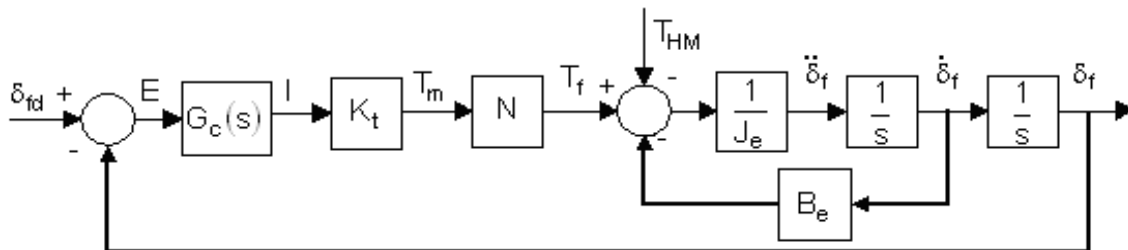
$$\dot{x}_2 = -c_1 x_1 - c_2 x_2 + c_u u \quad (8)$$

Yukarıdaki eşitlikte $c_1 = K_{HM} / J_e$, $c_2 = B_e / J_e$ ve $c_u = N K_t / J_e$ olarak tanımlanmıştır.

3. KLASİK DENETİM SİSTEMİ TASARIMI (DESIGN OF THE CLASSICAL CONTROL SYSTEM)

Kanat açısal yerdeğiştirmesinin denetim değişkeni olarak seçildiği klasik denetim sistemi, Eş. 6'da verilen sistem hareket denklemi esas alınarak ve istenen (referans) kanat açısı değeri δ_{fd} sembolüyle gösterilmek suretiyle Şekil 2'deki blok diyagramında gösterildiği gibi oluşturulabilir.

Şekil 2'de görülen "s" harfi Laplace değişkenini ifade etmek üzere $G_c(s)$ ifadesi denetleyici (kontrolcü) transfer fonksiyonunu göstermektedir. Ele alınan sistemde çalışma sıklığı (frekansı) istenen bant genişliği (köşe sıklığı) değerinden çok daha büyük olduğundan, tutarlı bir yaklaşımla sürücü transfer fonksiyonu "1" olarak alınabilir. $G_c(s)$ ise PID denetim kuralına göre aşağıdaki gibi oluşturulur.



Şekil 2. Klasik denetim sistemi blok diyagramı (Block diagram of the classical control system)

$$G_c(s) = K_p + (K_i/s) + K_d s \quad (9)$$

Eş. 9'da K_p , K_i ve K_d , denetleyicinin sırasıyla oransal, tümlevsel ve türevsel kazançlarını göstermektedir.

Şekil 2'de verilen blok diyagramı esas alınarak gerekli cebirsel işlemler yapıldığında, klasik denetim sisteminin kapalı çevrim transfer fonksiyonu Eş. 10 ile bulunur.

$$G_{\delta\delta_f}(s) = \frac{n_2 s^2 + n_1 s + 1}{d_3 s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + 1} \quad (10)$$

$$\text{Burada } n_1 = \frac{K_p}{K_i}, \quad n_2 = \frac{K_d}{K_i}, \quad d_1 = \frac{K'_{HM} + NK_t K_p}{NK_t K_i},$$

$$d_2 = \frac{B'_e + NK_t K_d}{NK_t K_i} \text{ ve } d_3 = \frac{J'_e}{NK_t K_i} \text{ tanımları yapılmıştır.}$$

Eş. 10'da verilen transfer fonksiyonuna göre kanat tahrik sistemi için oluşturulan kapalı çevrim klasik denetim sisteminin karakteristik polinomu $[D(s)]$ Eş. 11 ile elde edilir.

$$D(s) = d_3 s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + 1 \quad (11)$$

Karakteristik polinomu Eş. 11'deki gibi ortaya çıkan üçüncü mertebeden denetim sisteminin kazançları, sistem kutuplarını belirlenen başarımlarını sağlayacak şekilde karmaşık düzlemde yerleştirmek suretiyle belirlenebilir. Buna göre denetleyici kazançları, kapalı çevrim denetim sisteminden beklenen bant genişliği (ω_c) ve sönüm oranı (ζ_c) parametrelerinin fonksiyonu olarak, $D(s)$ polinomunun üçüncü mertebeden ideal denetim sistemi için aşağıda verilen karakteristik polinom ifadesine $[D_3(s)]$ eşitlenmesi ile hesaplanabilir [16].

$$D_3(s) = (1/\omega_c^3)s^3 + [(2\zeta_c + 1)/\omega_c^2]s^2 + [(2\zeta_c + 1)/\omega_c]s + 1 \quad (12)$$

Eş. 11 ve Eş. 12'nin birbirine eşitlenmesi ile denetleyici kazançları için Eş. 13, Eş. 14, Eş.15 ortaya çıkmaktadır.

$$K_p = [(2\zeta_c + 1)J_e \omega_c^2 - K'_{HM}]/(NK_t) \quad (13)$$

$$K_i = (J'_e \omega_c^3)/(NK_t) \quad (14)$$

$$K_d = [(2\zeta_c + 1)J'_e \omega_c - B'_e]/(NK_t) \quad (15)$$

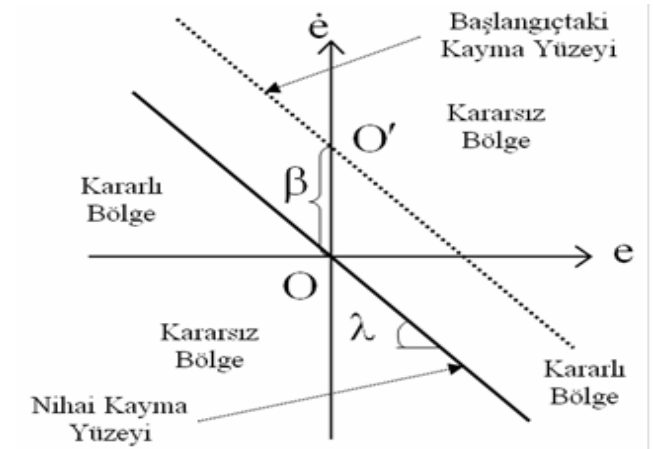
4. KAYAN KİPLİ DENETİM SİSTEMİ TASARIMI (DESIGN OF THE SLIDING MODE CONTROL SYSTEM)

Ele alınan sistem parametreleri ve sistem üzerine etkileyen aerodinamik yük değerlerindeki belirsizlikler ile ölçülere gelen bozucu girişler, kanat tahrik sistemleri için tasarlanan klasik tabanlı denetim sistemlerinin başarımlarını çoğu zaman ciddi şekilde azaltmaktadır. Bu gibi durumlarda akla gelen yaygın yaklaşımlardan biri de gürbüz bir denetim

sisteminin geliştirilmesidir. Belirtilen kapsamda ele alınabilecek yöntemlerden olan kayan kipli denetim sistemlerinde amaç, ele alınan sistem için seçilen durum değişkenlerini öncelikle "kayma yüzeyi (manifoldu)" olarak adlandırılan bir yüzey üzerine, daha sonra da bu yüzey sayesinde istenen değerlere taşımaktır. Göz önüne alınan kanat tahrik sistemi gibi ikinci mertebeden sistemler için Şekil 3'de gösterildiği gibi bir eğri şeklinde olan kayma yüzeyi, referans değerinin sabit olduğu regülasyon (*İng. regulation*) uygulamalarında sistemin birinci ve ikinci durum değişkenlerinden (x_1 ve x_2) oluşan bir kayma düzleminde tanımlanırken, burada göz önüne alınan uygulama benzeri değişken referans girişli takip (*İng. tracking*) uygulamalarında yatay ve dikey eksenlerini sırasıyla hata ve hatanın zamana göre değişiminin (e ve \dot{e}) oluşturduğu düzlemler üzerinde ifade edilmektedir [14]. Burada "hata", ele alınan denetim değişkeninin istenen (referans) ve gerçek değerleri arasındaki fark olarak tanımlanmakta olup, mevcut durum için Eş. 16 ile ifade edilebilir.

$$e = \delta_{fd} - \delta_f \quad (16)$$

En genel hali Şekil 3'de verilen kayma düzleminde e ve \dot{e} parametrelerinin her ikisinin de pozitif ve her ikisinin de negatif değerler aldığı I ve III. bölgeler "kararsız bölge" olarak adlandırılırken, düzlemin II ve IV. bölgeleri "kararlı bölge" şeklinde tanımlanmaktadır. Kayma yüzeyinin uygun şekilde değiştirildiği uygulamaları kapsayacak şekilde ilk ve son durumdaki kayma yüzeyleri sırasıyla başlangıçtaki ve nihai kayma yüzeyleri olarak ifade edilmiş olup, β ve λ sembolleri kayma yüzeyinin sırasıyla kayma ve eğim değişkenlerini göstermektedir.



Şekil 3. Kayan kipli denetim sistemi için kayma düzlemi
(Sliding surface for the sliding mode control system)

Kayma yüzeyinin denklemi, Şekil 3'e göre en genel halde Eş. 17 ile ifade edilebilir.

$$S = \dot{e} + \lambda e + \beta \quad (17)$$

Burada "S" harfi kayma yüzeyini göstermekte olup, sistem dinamiğinin istenildiği gibi denetlenebilmesi; bir başka

deyişle e ve \dot{e} değerlerinin sıfıra (kayma düzlemi orijinine) çekilebilmesi için, $S=0$ koşulunun sağlanması gerekir. Bu durumda kayma yüzeyinin denklemi, Eş. 17 yardımıyla Eş. 18 yazılabilir.

$$\dot{e} = -(\lambda e + \beta) \quad (18)$$

Sistem başariım gereksinimlerinin karşılanması yanında denetim sistemlerinin tasarımındaki önemli bir diğer husus da sistem kararlılığının sağlanmasıdır. Bu amaçla, kayma yüzeyi parametresinin karesi cinsinden aşığıdaki gibi tanımlanan bir Lyapunov fonksiyonu $[V(S)]$, oluşturulmaya çalışılan kayan kipli denetim sisteminin kararlılığının garanti edilmesi amacıyla kullanılabilir.

$$V(S) = S^2 / 2 \quad (19)$$

Tasarlanan kayan kipli denetim sisteminin kararlılığı için, $V(0) > 0$ olmasının yanında $S > 0$ durumunda $V(S) > 0$ ve $V(S) < 0$ koşullarının da sağlanması gerekir. Eş. 19'da verilen aday Lyapunov fonksiyonuna bakıldığında bahsedilen ilk iki koşulu sağladığı görülmektedir. Denetim sisteminin kararlılığı için belirtilen üçüncü koşul ise, $S\dot{S} < 0$ eşitsizliğini doğurur. Belirtilen eşitsizlik, pozitif bir μ parametresi ile Eş. 20'ye dönüştürülebilir.

$$\dot{S} = -\mu \text{sgn}(S) \quad (20)$$

Eş. 20'deki $\text{sgn}(S)$ ifadesi S değişkenini esas alan işaret fonksiyonu olup, Eş. 21 ile tanımlanmaktadır.

$$\text{sgn}(S) = \begin{cases} -1 & , S < 0 \text{ ise} \\ 0 & , S = 0 \text{ ise} \\ 1 & , S > 0 \text{ ise} \end{cases} \quad (21)$$

Eş. 17 zamana göre türevi olan eşitlikte birlikte Eş. 20'de yerine yazılırsa, Eş. 7, Eş. 8 ve Eş. 16'nın da yardımıyla denetim sistemi girişı için Eş. 22 elde edilir.

$$u = u_c + u_d \quad (22)$$

Eş. 22'deki u_c ve u_d terimleri denetim girişinin sırasıyla sürekli ve süreksiz kısımlarını göstermektedir. Belirtilen kısımlardan "eşdeğer denetim girişı" olarak da adlandırılan u_c ; bozucu giriş ve parametre belirsizliklerinden kaynaklanan etkileri ortadan kaldırmaya çalışırken, u_d ; denetim sistemi durum değişkenlerinin kayma yüzeyi üzerinde tutulmasını sağlamaktadır [18]. Anılan terimlerin açık halleri, $x_{1d} = \delta_{fd}$ olmak üzere müteakip ifadelerde verildiği gibidir.

$$u_c = [\ddot{x}_{1d} + \lambda \dot{x}_{1d} + \dot{\lambda} x_{1d} + (c_1 - \dot{\lambda})x_1 + (c_2 - \lambda)x_2 + \dot{\beta}] / c_u \quad (23)$$

$$u_d = \mu \text{sgn}(S) / c_u \quad (24)$$

Denetlenen sisteme ait hata ve hatanın zamana göre değişimi değişkenlerinin kayma yüzeyine taşınması ile bir anlamda gerçekte ikinci mertebeden bir sistem olan kanat tahrik sisteminin dinamiği birinci mertebeden bir sistem gibi davranmaya zorlanmakta ve sistemin hata dinamiğinin Eş. 25 gibi olması istenmektedir.

$$\dot{e} + \omega_c e = 0 \quad (25)$$

Yukarıdaki eşitlikte yer alan ω_c parametresi sistem için istenen bant genişliğini (köşe frekansını) göstermekte olup, birinci mertebeden bir sistem davranışı göstermesi istenen kanat tahrik sistemi için hata dinamiği kayma yüzeyi üzerinde tanımlanmaktadır. Diğer bir ifadeyle referans alınacak ideal sistemin hata dinamiği denklemi, $\beta=0$ kabulüyle, Eş. 17'den aşığıdaki şekilde yazılabilir (Eş. 26).

$$\dot{e} + \lambda_d e = 0 \quad (26)$$

Eş. 26'daki λ_d değişkeni kayma yüzeyi için istenen eğimi ifade etmektedir. Buradan, Eş. 25 ve Eş. 26'nın birbirine eşitlenmesi sonucunda, λ_d için Eş. 27 elde edilir.

$$\lambda_d = \omega_c \quad (27)$$

μ parametresi ise, denetim probleminin başlangıcı (t_0) ile hata ve hatanın zamana göre değişimi büyüklüklerinin kayma yüzeyine ulaşma anındaki (t_s) değerleri Eş. 20'de kullanılarak yaklaşık olarak müteakip formda hesaplanabilir (Eş. 28).

$$\mu = [S(t_0) - S(t_s)] / (t_0 - t_s) \quad (28)$$

Sistem durum değişkenlerini kayma yüzeyi üzerinde tutma işlevini yerine getiren u_d girdisi, içerdigi işaret fonksiyonunun süreksizliği dolayısıyla kayma yüzeyi üzerinde teorik olarak sonsuz sayıda anahtarlama (*İng. switching*) yapılmasını gerektirir. Bu durum, denetim girişinde (işaretinde) "çatırtı" olarak tabir edilen olgunun ortaya çıkmasına neden olur. Sık yön değiştiren denetim girişleri nedeniyle denetim sisteminde kullanılan eyleticilerin aşırı güç tüketimi ve öngörülen ömründen çok önce işlevsiz hale gelme olasılığı dolayısıyla, bahsedilen çatırtı etkisinin ortadan kaldırılması veya en azından asgari bir düzeye indirilmesi için çeşitli yaklaşımlar ele alınmıştır. Bu yaklaşımlardan en sık uygulananları, süreksiz işaret fonksiyonu yerine aşığıdaki gibi tanımlanan "kısmi sürekli" bir doyma (*İng. saturation*) fonksiyonunun $[\text{sat}(S)]$ veya üyelik fonksiyonları uygun şekilde (Mamdani tipi üçgen şekilli üyelik fonksiyonu gibi) tanımlanmış bulanık mantık tabanlı fonksiyonların $[f_r(S)]$ kullanımındır. Öte yandan, işaret fonksiyonunun belirtilen tip fonksiyonlarla ikamesi durumunda denetim sistemi parametrelerinin; işaret sinyalinin sürekliliği ile sistem kararlılığı arasında bir uzlaşma sağlayacak şekilde seçilmesi gerekmektedir (Eş. 29) [17, 18].

$$\text{sat}(S) = \begin{cases} -1 & , \quad S \leq -a \text{ ise} \\ S/a & , \quad -a < S \leq a \text{ ise} \\ 1 & , \quad S > a \text{ ise} \end{cases} \quad (29)$$

Burada a değişkeni, doyma fonksiyonunun yarı genişliği olarak tanımlanmaktadır.

4.1. Sabit Kayma Yüzeyle Kayan Kipli Denetim Sistemi
(Sliding Mode Control System with a Constant Sliding Surface)

Şematik olarak Şekil 3’de gösterilen kayma yüzeyinin sabit; bir başka deyişle $\beta=0$ ve Eş. 27’den $\lambda=\lambda_d$ olması durumunda, Eş. 24’de verilen denetim girişinin sürekli kısmı Eş. 30’a dönüşür.

$$u_c = [\ddot{x}_{1d} + \lambda_d \dot{x}_{1d} + c_1 x_1 + (c_2 - \lambda_d)x_2]/c_u \quad (30)$$

Denetim girişinin u_d ile gösterilen bileşeni içinse, Eş. 24’de verilen genel ifade ve müteakip yorumlardaki alternatif fonksiyonlar göz önüne alınmıştır.

4.2. Kayma Yüzeyi Değişiminin Birinci Dereceden Doğrusal Fonksiyonlarla Tanımlandığı Değişken Kayma Yüzeyle Kayan Kipli Denetim Sistemi
(Sliding Mode Control System with a Varying Sliding Surface Whose Change is Defined by means of First Order Linear Functions)

Kayma yüzeyinin değişken olması durumunda, denetim girişi bileşenleri olan u_c ve u_d için sırasıyla Eş. 23 ve Eş. 24’de verilen ifadeler geçerlidir. Denetim sistemi kararlılığı muhafaza edilirken çatırtı etkisinin asgari düzeye çekilebilmesi amacıyla oluşturulan değişken kayma yüzeyle kayan kipli denetim sistemi şemasında kayma yüzeyinin değişimi, β ve λ parametreleri müteakip ifadelerde verildiği gibi zamanın (t) birinci dereceden doğrusal fonksiyonları şeklinde tanımlanmıştır (Eş. 31, Eş.32).

$$\beta = \beta(t) = \beta_1 t + \beta_0 \quad (31)$$

$$\lambda = \lambda(t) = \lambda_1 t + \lambda_0 \quad (32)$$

Eş. 31 ve Eş. 32’de yer alan β_0 , β_1 , λ_0 ve λ_1 , β ve λ parametrelerinin t_0 ve t_s anlarındaki değerleri göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Buna göre, e ve \dot{e} değişkenlerinin Şekil 3’de gösterilen kararsız bölgede bulunması durumunda λ parametresinin sabit ve istenen eğim değerinde (λ_d) olduğu varsayılmıştır. Bu durumda, müteakip Eş. 33, Eş. 34 elde edilir.

$$\lambda_0 = \lambda_d \quad (33)$$

$$\lambda_1 = 0 \quad (34)$$

Öte yandan bu bölgede β değeri sıfırdan farklı olup, ancak t_s süresi sonunda sıfırlanacağı (t_s anında kayma yüzeyinin orijinden geçeceği) kabul edilmiştir. Belirtilen koşullar göz önüne alındığında müteakip ifadeler bulunur (Eş. 35, Eş. 36).

$$\beta_0 = (\dot{e}_0 + \lambda_0 e_0)t_s / (t_0 - t_s) \quad (35)$$

$$\beta_1 = -\beta_0 / t_s \quad (36)$$

Burada e_0 ve \dot{e}_0 ; sırasıyla e ve \dot{e} büyüklüklerinin başlangıçtaki (t_0 anındaki) değerlerine işaret etmektedir.

Diğer taraftan e ve \dot{e} değişkenlerinin kararlı bölgede bulunması durumunda ise, $t=t_s$ anında $\lambda(t_s) = \lambda_d$ olacağı kabulüyle λ_0 ve λ_1 için aşağıdaki denklıklar türetilir (Eş. 37, Eş. 38).

$$\lambda_0 = [\lambda_d t_0 + (\dot{e}_0 / e_0)t_s] / (t_0 - t_s) \quad (37)$$

$$\lambda_1 = (\lambda_d - \lambda_0) / t_s \quad (38)$$

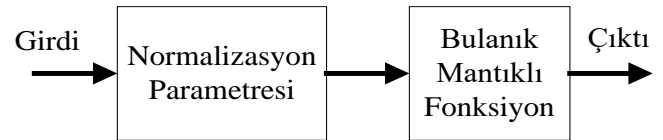
Ayrıca, kararlı bölgede β parametresi sıfır olacağından, β_0 ve β_1 katsayıları da aşağıdaki gibi sıfır değerini alacaktır (Eş. 39, Eş. 40).

$$\beta_0 = 0 \quad (39)$$

$$\beta_1 = 0 \quad (40)$$

4.3. Kayma Yüzeyi Değişiminin Bulanık Mantıklı Fonksiyonlarla Tanımlandığı Değişken Kayma Yüzeyle Kayan Kipli Denetim Sistemi
(Sliding Mode Control System with a Varying Sliding Surface Whose Change is Defined by means of Fuzzy Logic Functions)

Kayma yüzeyi değişiminin bulanık mantıklı fonksiyonlarla tanımlandığı bu yaklaşımda β_0 , β_1 , λ_0 ve λ_1 parametreleri [19, 20], Mamdani tipi üçgen şekilli üyelik fonksiyonları kullanılarak kestirilmeye çalışılmıştır [21]. Bu amaçla, yapısı Şekil 4’de gösterilen bulanık mantıklı fonksiyon yapısında Tablo 1’deki gibi seçilen normalizasyon parametreleri kullanılarak girdi değerleri -1 ila +1 aralığına çekilmiş ve çıktılar olarak β_0 , β_1 , λ_0 ve λ_1 elde edilmiştir.



Şekil 4. Ele alınan bulanık mantıklı fonksiyon yapısı (Fuzzy logic function structure considered)

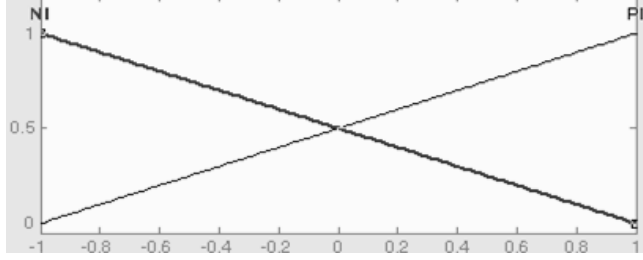
Tablo 1. Bulanık mantıklı fonksiyon yapısı parametreleri (Parameters of the fuzzy logic function structure)

Girdi	Normalizasyon Parametresi	Çıktı
$e \cdot \dot{e}$	$1/e_0 \cdot \dot{e}_0$	β_0 ve β_1
$\lambda - \lambda(t_s)$	$1/\lambda(t_0)$	λ_0 ve λ_1

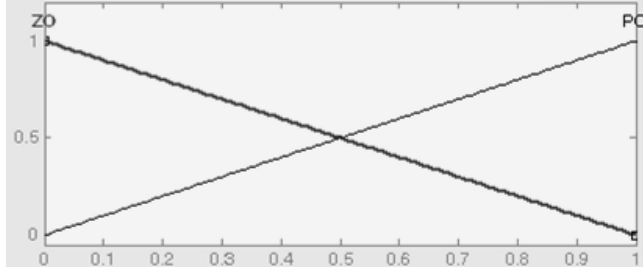
Belirtilen kapsamda β_0 ve β_1 ’in eldesi için girdi e \dot{e} çarpanı olacak şekilde oluşturulan girdi ve çıktı üyelik fonksiyonları sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6’da verilmiştir. Burada ilgili kural

tablosu, PI, NI, PO ve ZO kısaltmaları sırasıyla pozitif giriş, negatif giriş, pozitif çıkış ve sıfır çıkış durumlarına karşılık gelecek şekilde aşağıdaki gibi çıkarılmıştır.

- Girdi PI ise, çıktı PO.
- Girdi NI ise, çıktı ZO.



Şekil 5. β_0 ve β_1 için kullanılan girdi üyelik fonksiyonları (Input membership functions used for β_0 and β_1)



Şekil 6. β_0 ve β_1 için kullanılan çıktı üyelik fonksiyonları (Output membership functions used for β_0 and β_1)

Tip ve şekilleri β_0 ve β_1 için seçilenler gibi olan üyelik fonksiyonları esas alınarak λ_0 ve λ_1 için oluşturulan kural tablosu da yukarıdaki kısaltmalara ek olarak ZI tabiri de sıfır girdiyi tanımlayacak şekilde aşağıdaki gibi oluşturulmuştur.

- Girdi PI ise, çıktı PO.
- Girdi NI ise, çıktı PO.
- Girdi ZI ise, çıktı ZO.

5. BİLGİSAYAR BENZETİMLERİ (COMPUTER SIMULATIONS)

Ele alınan elektromekanik tipteki bir kanat tahrik sistemi için önerilen klasik ve kayan kipli denetim sistemlerinin başarımlı özelliklerinin karşılaştırmalı olarak belirlenmesi amacıyla, MATLAB® Simulink® ortamında oluşturulan model kullanılarak Tablo 2'de sunulan parametre değerleri için bilgisayar benzetimleri gerçekleştirilmiştir.

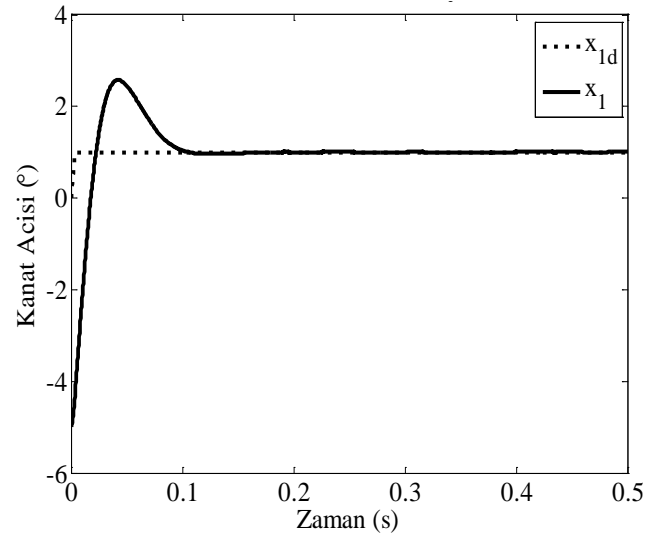
Referans kanat açısının 1° genliğe sahip basamak giriş ile 1° genlik ve 5 Hz ($=31,4$ rad/s) sıklığında (ω_d) sinüs fonksiyonu olmak üzere iki farklı şekilde seçildiği benzetimlerde, kanat bağlantı mili üzerine azami genliği 0,5 N·m olan bozucu bir tork ve kanat mili açısız konumunu ölçmek amacıyla kullanılan algılayıcı (açıölçer) üzerine de azami genliği $0,001^\circ$ olan rastlantısal gürültünün etki ettiği kabul edilmiştir. Benzetimlerde, bant genişliği (ω_c) olarak 10 ve 15 Hz ($=62,8$ ve $94,2$ rad/s) değerleri göz önüne alınmıştır. Ayrıca,

varsayılan J_e , B_e ve K_{HM} sayısal değerleri sayısal değerleri üzerinde de %10 mertebesinde belirsizliğin bulunduğu öngörülmüştür.

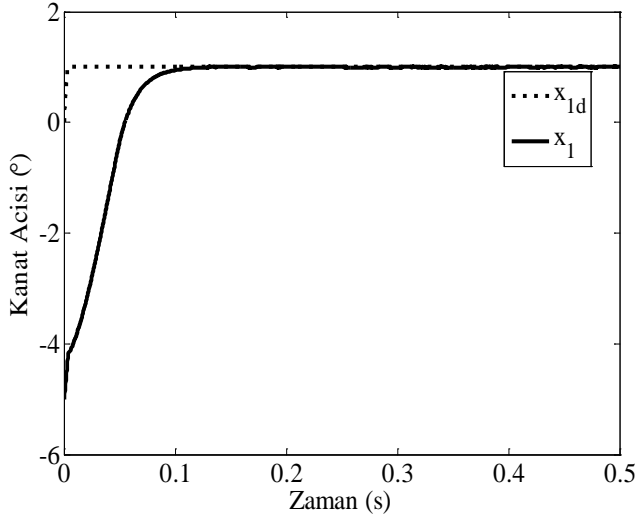
Bunların yanı sıra e_0 ve \dot{e}_0 sırasıyla 5° ve $0,5$ %/s alınarak 0,5 s'lik benzetim süresi ve 5 kHz örnekleme sıklığı değeri için MATLAB® Simulink® ortamında gerçekleştirilen bilgisayar benzetimleri sonucunda önerilen denetim sistemlerinin durağan durum etrafındaki azami salınım miktarı ve azami akım gereksinimi büyüklükleri için elde edilen değerler Tablo 3'de sunulmuştur. Ayrıca, Tablo 3'de yapılan numaralandırmaya göre 1 numaralı konfigürasyon için denetim sisteminin referans girişe cevabı, 2 numaralı konfigürasyon için sistem cevabı ve sistemin hata düzlemindeki davranışı, 5 numaralı konfigürasyon için sistem cevabı ve sistemin hata düzlemindeki davranışı, 6 ve 7 numaralı konfigürasyonlar için sistem cevabı ile 8 numaralı konfigürasyon için sistem cevabı ve sistemin hata düzlemindeki davranışı Şekil 7'den Şekil 19'a kadar olan grafiklerde verilmiştir.

Tablo 2. Bilgisayar benzetimlerindeki sayısal değerler (Numerical values used in computer simulations)

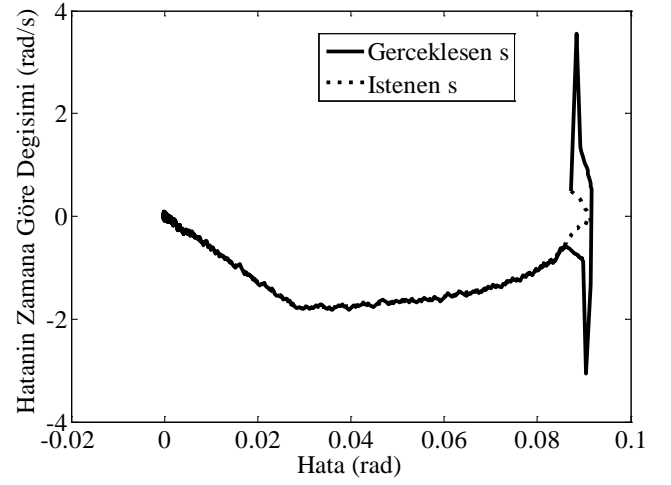
Parametre	Sayısal Değer
J_e	0,05 kg·m ²
B_e	0,01 N·m·s/rad
K_{HM}	20 N·m/rad
N	2
K_t	20 N·m/A
a	0,2
ζ_c	0,7
t_s	50 ms
Referans Giriş Açısı Sınırı	10°
Giriş Hızı Sınırı	50 rpm
Akım Sınırı	15 A



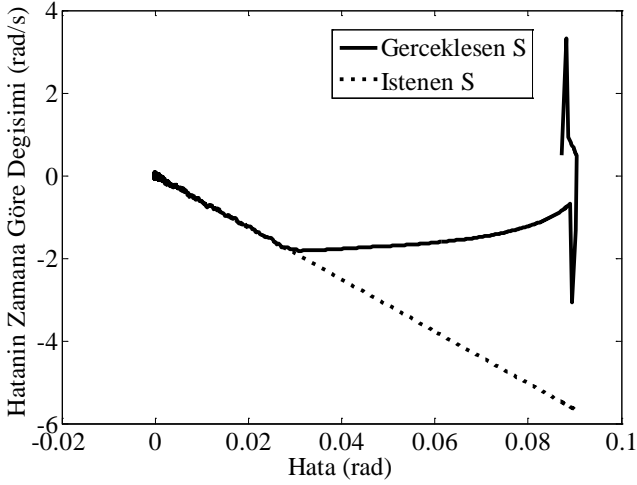
Şekil 7. 1 numaralı konfigürasyon için sistem cevabı (System response for configuration number 1)



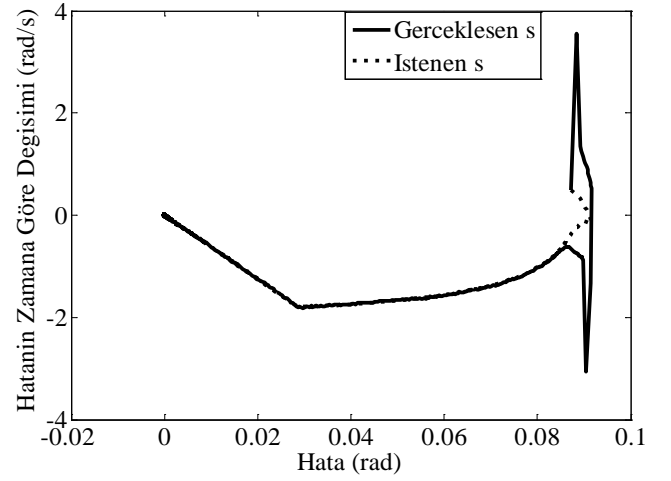
Şekil 8. 2 numaralı konfigürasyon için sistem cevabı
(System response for configuration number 2)



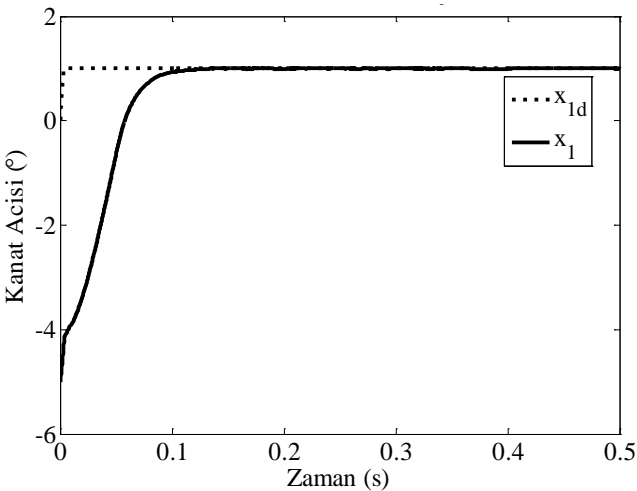
Şekil 11. 5 numaralı konfigürasyon için sistemin hata düzlemindeki davranışı
(System behavior on the error plane for configuration number 5)



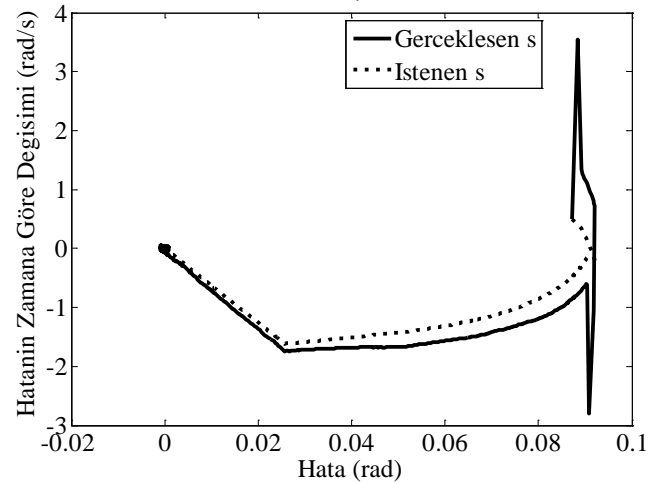
Şekil 9. 2 numaralı konfigürasyon için sistemin hata düzlemindeki davranışı
(System behavior on the error plane for configuration number 2)



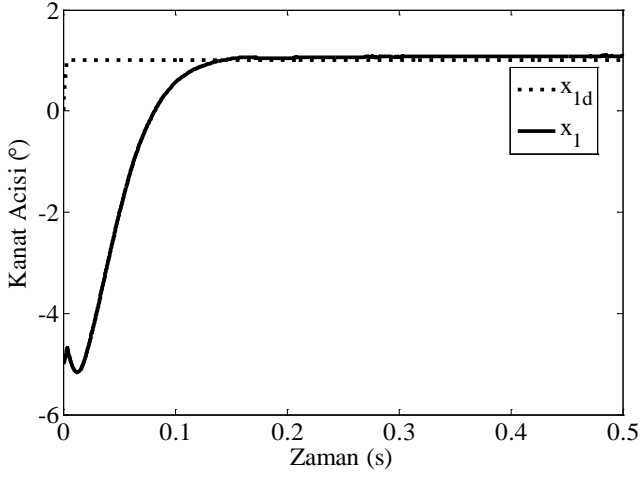
Şekil 12. 6 numaralı konfigürasyon için sistemin hata düzlemindeki davranışı
(System behavior on the error plane for configuration number 6)



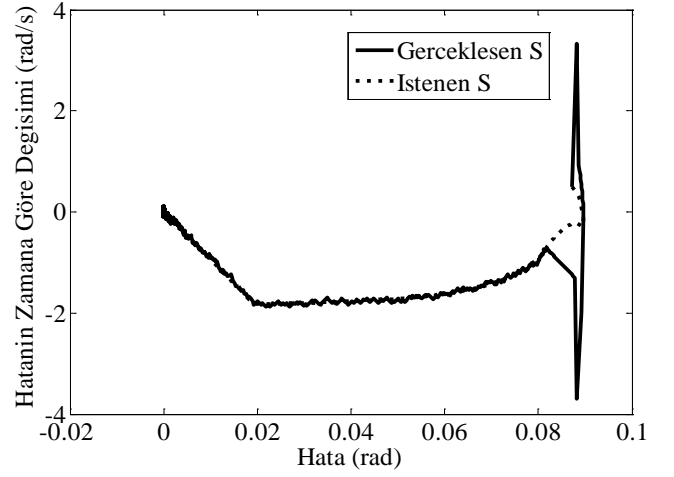
Şekil 10. 5 numaralı konfigürasyon için sistem cevabı
(System response for configuration number 5)



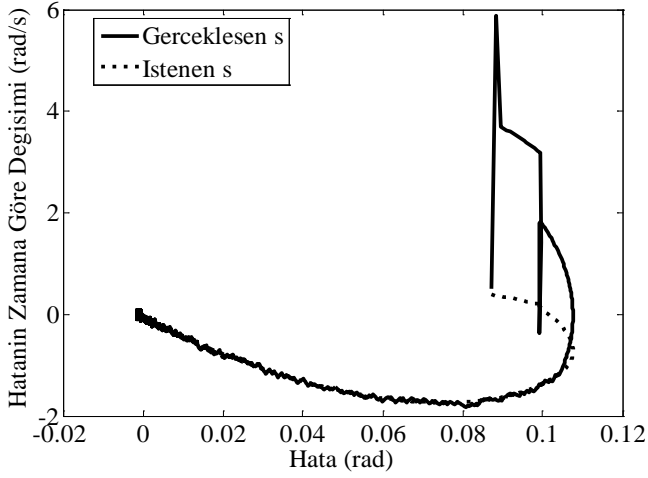
Şekil 13. 7 numaralı konfigürasyon için sistemin hata düzlemindeki davranışı
(System behavior on the error plane for configuration number 7)



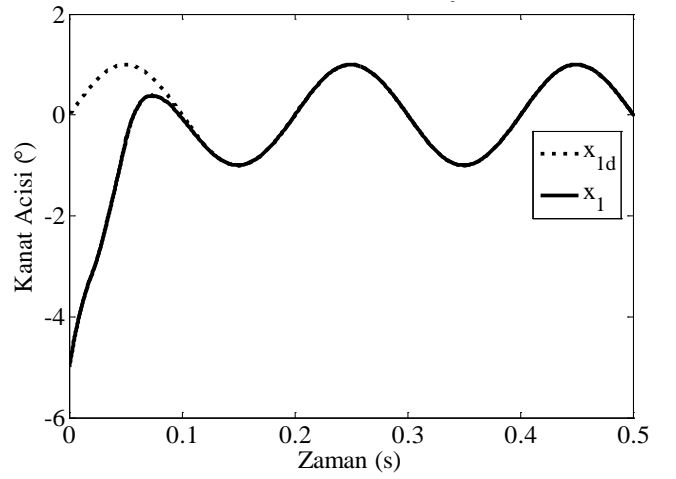
Şekil 14. 8 numaralı konfigürasyon için sistem cevabı
(System response for configuration number 8)



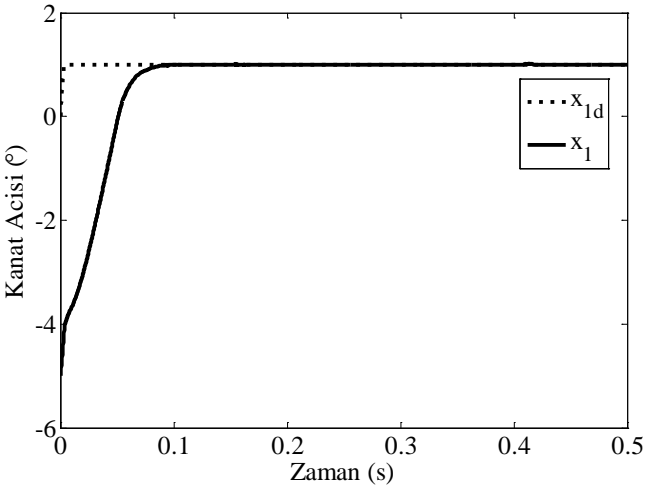
Şekil 17. 11 numaralı konfigürasyon için sistemin hata düzlemindeki davranışı
(System behavior on the error plane for configuration number 11)



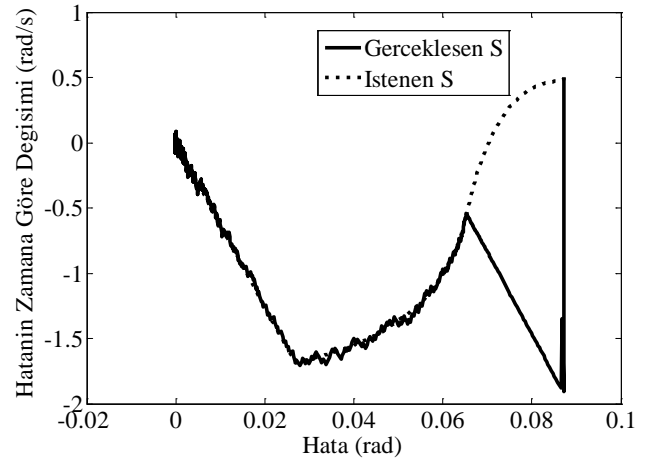
Şekil 15. 8 numaralı konfigürasyon için sistemin hata düzlemindeki davranışı
(System behavior on the error plane for configuration number 8)



Şekil 18. 14 numaralı konfigürasyon için sistem cevabı
(System response for configuration number 14)



Şekil 16. 11 numaralı konfigürasyon için sistem cevabı
(System response for configuration number 11)



Şekil 19. 14 numaralı konfigürasyon için sistemin hata düzlemindeki davranışı
(System behavior on the error plane for configuration number 14)

Tablo 3. Bilgisayar benzetimlerinden elde edilen sonuçlar (Data acquired from the computer simulations)

Konfigürasyon No,	Denetleyici Tipi	Süresiz Sistem Girişi Fonksiyonu	Durağan Durum Etrafında Azami Salınım Miktarı (°)	Azami Akım Gereksinimi (A)
$\delta_{fd}=1^\circ$ (Basamak Giriş) ve $\omega_c=62,8$ rad/s				
1	Klasik-PID		$5,75 \times 10^{-3}$	0,334
2		İşaret Fonksiyonu	$1,40 \times 10^{-4}$	0,595
3	Sabit Kayma Yüzeyle	Doyma Fonksiyonu	$7,61 \times 10^{-4}$	0,576
4	Kayan Kipli	Bulanık Mantıklı Fonksiyon	$3,55 \times 10^{-2}$	0,572
5		İşaret Fonksiyonu	$3,31 \times 10^{-3}$	0,599
6	Değişken Kayma Yüzeyle	Doyma Fonksiyonu	$7,61 \times 10^{-4}$	0,578
7	Kayan Kipli-Doğrusal	Bulanık Mantıklı Fonksiyon	$3,56 \times 10^{-2}$	0,573
8		İşaret Fonksiyonu	$8,84 \times 10^{-2}$	0,519
9	Değişken Kayma Yüzeyle	Doyma Fonksiyonu	$8,87 \times 10^{-2}$	0,494
10	Kayan Kipli-Bulanık Mantıklı	Bulanık Mantıklı Fonksiyon	$9,48 \times 10^{-2}$	0,489
$\delta_{fd}=1^\circ$ (Basamak Giriş) ve $\omega_c=94,2$ rad/s				
11		İşaret Fonksiyonu	$1,42 \times 10^{-3}$	0,601
12	Değişken Kayma Yüzeyle	Doyma Fonksiyonu	$6,14 \times 10^{-4}$	0,574
13	Kayan Kipli-Doğrusal	Bulanık Mantıklı Fonksiyon	$1,01 \times 10^{-2}$	0,565
$\delta_{fd}=1^\circ$ ve $\omega_d=31,4$ rad/s (Sinüs Giriş) ve $\omega_c=62,8$ rad/s				
14		İşaret Fonksiyonu	$8,92 \times 10^{-5}$	0,344
15	Değişken Kayma Yüzeyle	Doyma Fonksiyonu	$1,22 \times 10^{-3}$	0,314
16	Kayan Kipli-Doğrusal	Bulanık Mantıklı Fonksiyon	$1,38 \times 10^{-2}$	0,309

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Ele alınan elektromekanik eyletimli bir kanat tahrik sistemi için tasarlanan klasik ve kayan kipli denetim sistemleri için MATLAB® Simulink® ortamında gerçekleştirilen bilgisayar benzetimleri ile Tablo 3’de verildiği gibi elde edilen sonuçlara bakıldığında, durağan durum etrafındaki azami salınım miktarı için en düşük değer sabit kayma yüzeyle kayan kipli denetim sistemi seçenekleriyle elde edildiği görülmektedir. Bu anlamda, süresiz sistem girişinde işaret fonksiyonunun kullanılması durumunda ulaşılan değerler çoğunlukla diğer iki alternatifte göre daha düşüktür, en büyük salınımlar bulanık mantıklı fonksiyonlu süresiz sistem girişi fonksiyonlarında ortaya çıkmaktadır. Azami akım gereksinimi dikkate alındığında ise, en düşük değer PID tipi denetleyicili klasik denetim sistemi için olduğu ve bu bakımdan en kötü seçeneklerin kayma yüzeyinin birinci dereceden doğrusal fonksiyonlarla değiştiği kayan kipli denetim sistemi algoritmaları için elde edildiği gözlenmektedir. Diğer taraftan yukarıdaki grafiklerde verilen sistem cevaplarından da görüleceği üzere, en iyi sistem cevabını veren seçenek kayma yüzeyinin birinci dereceden doğrusal fonksiyonlarla değiştiği değişken kayma yüzeyle denetim sistemleridir. Göz önüne alınan kayan kipli denetim sistemlerinin hata düzlemindeki davranışları incelendiğinde ise, süresiz sistem girişi fonksiyonunun doyma fonksiyonu ile tanımlandığı durumlarda sistem hata

değişkenlerinin kayma yüzeyiyle en uyumlu davranışı sergilediği; buna karşın işaret fonksiyonunun dikkate alınması halinde kayma yüzeyi üzerinde çatırtı özelliklerinin gözlemlendiği sonucuna ulaşılmıştır. Belirtilen kapsamda en kötü hata düzlemi davranışı bulanık mantıklı fonksiyon içeren süresiz sistem girişinin uygulanması ile elde edilmiştir. Bunların yanı sıra, en yumuşak geçişli kayma yüzeyi profillerine bulanık mantıklı değişken kayma yüzeyle kayan kipli denetim sistemleri ile ulaşıldığı da göze çarpmaktadır. Bant genişliğinin artması durumunda, durağan durum etrafında azami salınım miktarının beklendiği üzere azaldığı, azami akım gereksiniminin ise neredeyse değişmediği gözlenmiştir. Referans kanat açısının basamak girişten azami genliği basamak giriş kadar olan sinüs fonksiyonuna değiştirilmesi durumunda, kanat tahrik sisteminin başlangıç cevabının eğimi basamak girişe göre daha az olan sinüs tipi referans girişle daha uyumlu olması nedeniyle, azami akım gereksinimi basamak girişli benzer konfigürasyonlara göre daha düşük çıkmıştır. Bahsedilen referans giriş-sistem cevabı uyumluluğu, durağan durum etrafındaki azami salınım miktarını da çok daha aşağı seviyelere çekmiştir. Buradaki durumdan farklı olarak denetim akımının durum değişkenlerinden biri olarak tanımlandığı ve denetim geriliminin girdi olarak alındığı elektromekanik sistemlerde, indüktans etkisi de hesaba katıldığında, sistemin mertebesi ikiden üçe çıkmaktadır. Bu durumda, tasarlanacak PID tipi denetleyicinin kazançları ile kayan kipli denetim sisteminin parametreleri de mevcut

çalışmadaki eşdeğerlerinden farklı olacaktır. Çalışma kapsamında dikkat çekilmesi gereken hususlardan biri de, menteşe momentinin Eş. 5'deki gibi kanat açılmal yerdeğiştirmesinin birinci mertebeden bir fonksiyonu yaklaşımıyla tanımlanmayıp kanat bağlantı mili üzerine etkiyen bozucu bir giriş olarak hesaba katılması durumunda, kanat tahrik sistemi transfer fonksiyonunda, tümlev işleminden dolayı biri karmaşık düzlemin merkezinde olacak şekilde, iki adet kutup bulunacaktır. Bu durumda, mevcut çalışmada göz önüne alınan PID tipi denetim işlemi yerine sadece P (oransal, *İng. proportional*) veya PI (oransal ve tümlevsel, *İng. proportional plus integral*) işlemi içeren klasik bir denetim sistemi daha tatminkâr sonuçlar verebilir. Bahsedilen yapıdaki denetim sisteminin tasarımı köklerin yer eğrisi yöntemi kullanılarak yapılabilir.

7. SİMGELER (SYMBOLS)

Latin Harfleri (Latin Letters)

a	: Doyma fonksiyonunun yarı genişliği
B_e	: Kanat bağlantı mili üzerine indirgenmiş eşdeğer viskoz sürtünme katsayısını
B_f	: Dişli kutusu ile kanat bağlantı mili arasındaki viskoz sürtünme katsayısı
B_m	: DC motor mil yatakları arasındaki viskoz sürtünme katsayısı
D(s)	: Karakteristik polinom
e	: Hata
$f_f(S)$: Bulanık mantık fonksiyonu
$G_c(s)$: Denetleyici (kontrolcü) transfer fonksiyonu
i	: Denetim akımı
J_e	: Kanat bağlantı mili üzerine indirgenmiş eşdeğer eylemsizlik momenti
J_f	: Kanat ve dişli kutusunun kutuyu kanada bağlayan mil üzerine indirgenmiş toplam eylemsizlik momenti
J_m	: DC motorun rotor kısmının motor çıkış miline indirgenmiş eylemsizlik momenti
K_d	: Denetleyicinin türevsel kazancı
K_f	: Kanatçık direngenliği
K_{HM}	: Menteşe momenti katsayısı
K_i	: Denetleyicinin tümlevsel kazancı
K_p	: Denetleyicinin oransal kazancı
K_t	: Motor tork katsayısı
L	: İndüktans
N	: Dişli kutusu aktarma oranı
R	: Direnç
S	: Kayma yüzeyi
s	: Laplace değişkeni
t	: Zaman değişkeni
t_0	: Denetim işleminin başlangıç anı
T_f	: Kanat bağlantı mili üzerindeki tork
T_{HM}	: Menteşe momenti
T_m	: DC motor çıkış torku
t_s	: Hata ve hatanın zamana göre değişimi büyüklüklerinin kayma yüzeyine ulaşma anı
u	: Sistem girişi
u_c	: Sürekli denetim girişi

u_d	: Süreksiz denetim girişi
V(S)	: Lyapunov fonksiyonu
V_c	: Denetim gerilimi
x_1	: Birinci durum değişkeni
x_2	: İkinci durum değişkeni
y	: Sistem çıkışı

Yunan Harfleri (Greek Letters)

β	: Kayma yüzeyi kayma değişkeni
δ_f	: Kanat açılmal yerdeğiştirmesi
δ_{fd}	: İstenen (referans) kanat açısı
δ_m	: DC motor çıkış milinin açılmal yerdeğiştirmesi
λ	: Kayma yüzeyi eğim değişkeni
λ_d	: Kayma yüzeyi için istenen eğim
ω_c	: Bant genişliği (köşe frekansı)
ω_d	: Giriş sinüs fonksiyonu sıklığı
ζ_c	: Sönüm oranı

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Özkan B., Dynamic modeling, guidance, and control of homing missiles, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2005.
2. Guidance and Control Systems, Naval Weapon Systems Sunuşu, Ekim 2001.
3. Zarchan P., Tactical and Strategic Missile Guidance, Cilt: 157, Progress in Aeronautics and Astronautics, AIAA, Washington DC, USA, 1994.
4. Zhou K. and Doyle J.C., Essentials of Robust Control, Prentice-Hall Inc., 1998.
5. Muniraj M. and Arulmozhiyal R., Modeling and simulation of control actuation system with fuzzy-PID logic controlled brushless motor drives for missiles glider applications, The Scientific World Journal, Hindawi Publishing Corporation, 2015, 1-11, 2015.
6. Lauffs P.J., Hochstrasser M. and Holzapfel F., Real-time Simulation of Nonlinear Transmission Behavior in Electro-Mechanical Flight Control Systems, 2014 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICARES), 39-47, 2014.
7. Arulmozhiyal R., Murali M. and Manikanadan R., Modeling and simulation of control actuation system, APN Journal of Engineering and Applied Sciences, 10 (4), 1778-1782, 2015.
8. Tiwari P.M., Janardhanan S., un Nabi M., Attitude control using higher order sliding mode, Aerosp. Sci. Technol., 54, 108-113, 2016.
9. Cai W.W., Yang L.P., Zhu Y.W. and Zhang Y.W., Optimal satellite formation reconfiguration actuated by inter-satellite electromagnetic forces, Acta Astronaut., 89, 154-165, 2013.
10. Pan S., Edelberg K. and Hedrick J.K., Discrete Adaptive Sliding Control of Automotive Powertrains, 2014 American Control Conference (ACC), Portland, Oregon, USA, 2014.
11. Salamci M.U., Özgören M.K., Banks S.P., Sliding mode control with optimal sliding surfaces for missile

- autopilot design, *AIAA J. Guid. Control Dyn.*, 4, 719-727, 2000.
12. Durmaz B, Özgören M.K., Salamci, M.U., Sliding mode control for non-linear systems with adaptive sliding surfaces, *Trans. Inst. Meas. Control*, 2011.
 13. Özakalın M.U., Salamci M.U., Özkan B., Implementation of the Sliding Mode Control with Constant and Varying Sliding Surfaces to a Hydraulically-Actuated Fin Loading System, 19th IFAC World Congress on International Federation of Automatic Control (IFAC 2014), Cape Town, South Africa, 2014.
 14. Lin T.C., Lin Y.C., Zirkohi M.M. and Huang H.C., Direct adaptive fuzzy moving sliding mode proportional integral tracking control of a three-dimensional overhead crane, *J. Dyn. Syst. Meas. Contr.*, 138, 1-11, 2016.
 15. Kalaycı M.B., Yiğit İ., Theoretical and experimental investigation of some sliding mode control techniques used in practice, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30 (1), 131-142, 2015.
 16. Ogata K., *Modern Control Engineering*, Prentice-Hall International Editions, Second Edition, 1990.
 17. Erbatır K., Çallı B., Bulanık Mantık Sınır Tabakası Kalınlığı Ayarlaması ile Kayan Kipli Robot Kontrolü, Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi-Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı 2007 (TOK'07), Sabancı Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2007.
 18. Tokat S., Eksin İ., Güzelkaya M., Sliding Mode Control using a Nonlinear Time-Varying Sliding Surface, 10th Mediterranean Conference on Control and Automation-MED2002, Lisbon, Portugal, 2002.
 19. Wong C.C., Huang B.C., Lai H.R., Genetic-based sliding mode fuzzy controller design, *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 4 (3), 165-172, 2001.
 20. Hazzab A., Bousserhane I.K., Kamli M., Rahli M., A New Fuzzy Sliding Mode Controller for Induction Motor Speed Control, Second International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP 2006), Marakesh, Morocco, 2006.
 21. Kumar S., Nigam M.J., Robust sliding mode control using fuzzy controller, *Int. J. Sci. Res.*, 4 (3), 1470-1472, 2015.