

## Bir DC Motorun Gerçek Zamanlı Kontrolünde Üç Yöntem

Ali Nehir Yücel<sup>1</sup>, Yusuf Buğday<sup>2</sup>, Mehmet Önder Efe<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara  
{st04120042, ybugday, onderefe}@etu.edu.tr

### Özetçe

Bu çalışmada bir DC motorun gerçek zamanlı kontrolü üzerinde durulmaktadır. Kontrolör, bir kişisel bilgisayar üzerinde Matlab ortamında gerçekleştirilmekte ve kutup atama yöntemi, kayan kipli denetim ve bulanık denetim yöntemleri üzerinde durulmaktadır. Bir lisans bitirme projesi olarak gerçekleştirilen bu çalışmada donanımın düşük örnekleme frekanslarında çalışabilecek işlemsel kapasitede olması bir dezavantaj teşkil etmekle birlikte çalışmanın önemli katkısı bu dezavantaja rağmen doğrusal olmayan tekniklerle istenen kapalı çevrim performansının elde edilebilmiş olmasıdır.

### 1. Giriş

Bir lisans bitirme projesi olarak gerçekleştirilen bu çalışma, deney düzeneği olarak hazırlanmış ve ticari olarak erişilebilen bir DC motor sisteminin üzerinde gerçekleştirilen bazı deneyleri içermektedir. DC motorlar gerçek zamanlı birçok uygulamada kullanılıyor olmalarından dolayı kontrol mühendislerinin sıkça incelediği sistemler olmuşlardır. Sunulan bu çalışma kutup atama, kayan kipli denetim (KKD) ve bulanık denetim yöntemlerini incelemektedir.

Denetim kuramının iyi bilinen yaklaşımlarından biri olan kutup atama yöntemi, sistemin dinamik modelinin bilindiği varsayımı altında istenen cevabın hangi kapalı çevrim kutupları ile elde edilebileceğinin cevabı ile başlayan ve bu kutupların kapalı çevrimde elde edilmesini sağlayan bir kazanç matrisinin bulunmasını öngören fevkalade güçlü bir yaklaşımdır. Bu çalışmada da sistemle gelen kılavuzdaki bilgilerden istifade edilmiş ancak modele bağımlılıktan kaynaklanan bazı sorunların varlığı teşhis edilmiştir.

Çalışmada yer alan ikinci yaklaşım olan KKD 1960'lı yıllardan beri üzerinde araştırma yapılan bir denetim tekniğidir. KKD içeren geribeslemeli sistem bozuculara karşı gürbüz olduğu için araştırmacıların ilgisini çekmekte ve bu alanda her sene düzenlenen konferanslarda birçok müspet bulgu rapor edilmektedir. Çevreden sisteme karışabilecek parazitlere ve bozuculara karşı olan gürbüzlüğü sayesinde KKD yaklaşımı, robotik sistemler [2], otomotivde motor kontrol sistemleri [3] ve manyetik askı sistemleri [4] gibi çok çeşitli uygulama alanlarında başarılı biçimde uygulanabilmektedir. Koshkouei [5] normal PID

kontrolörler, oransal terimli KKD yöntemi ve oransal-integral terimlerinin KKD ile birleştirilmesiyle oluşan kontrolörler tasarlamış ve bir DC motorun üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sistemdeki bozucuların düşük düzeyde etkin olduğu durumlarda PID kontrolörlerin iyi bir takip neticesi verdiğini fakat bozucu etkilerin etkinliğinin artmasıyla oransal-integral KKD yönteminin daha iyi bir performans sergilediğini gözlemlemiştir. Bunun yanı sıra, KKD yönteminin bulanık denetimle birleştirildiği bir kontrolörün incelendiği bir başka çalışmada [6], kayan kipli bulanık denetimin erişme kipindeki gürbüzlüğü geliştirdiği gözlemlenmiştir. KKD yönteminin bulanık mantıkla tümleşik olarak çalıştığı bu kontrolörün parametre değişimlerinden ve dış bozuculardan sıradan PID kontrolörlere göre daha az etkilendiği sonucuna varılmıştır. Yöntemin çatırdama sorunu ise [7-8] kaynaklarında ele alınmıştır. Burada da KKD yaklaşımının denenmesindeki temel neden sistemde yer alan kayış mekanizmasının sistem davranışına kattığı doğrusalsızlık olmuştur. KKD yaklaşımının bu doğrusalsızlığı bertaraf edebilmesi önemli bulgular arasındadır.

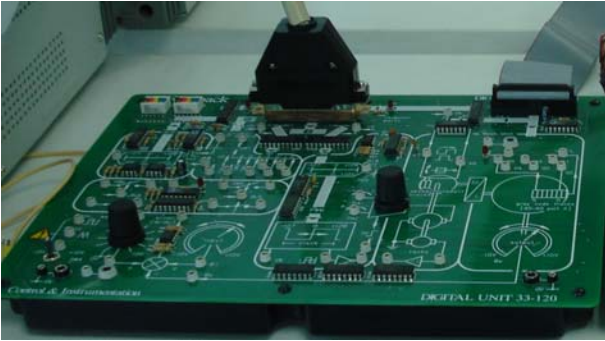
Bu çalışmada incelenen son yaklaşım bulanık mantık yaklaşımıdır. Bulanık mantık ilk olarak Prof. Zadeh [9] tarafından önerilmiş bir yaklaşımdır. Bulanık mantık birçok farklı bilim alanında kullanılan bir ifade ediş biçimidir. Bulanık kontrolün geleneksel kontrol yaklaşımlarına göre temel avantajı dilsel tanımları kullanarak sistem dinamiği ve onun karmaşıklığının tasarımı yansıttığı güçlükleri bertaraf edebilmesidir. Bu yönüyle biyokimyasal süreç denetiminde, asansör sistemlerinde, hızlı tren ve ABS fren sistemlerinde, robotik ve havacılıkta, ses ve görüntü işleme problemlerinde başarıyla kullanılan bir yaklaşım olarak bulanık mantık, bu çalışmada da DC motor kontrolünde kullanılmaktadır. Kaynak [10], bulanık kontrol yöntemiyle kontrol edilen bir DC motorun eylemsizlik değişimlerine karşı, PID kontrolörlere oranla daha iyi bir netice verdiğini rapor etmekte olup bulanık denetimle ilgili ayrıntılı bir çalışma [10] kaynağında mevcuttur.

Bildiri şu şekilde düzenlenmiştir: 2. bölümde deney düzeneği tanıtılmış, 3. bölümde kutup atama yöntemi ile denetim, 4. bölümde kayan kipli denetim, 5. bölümde bulanık mantık ile denetim, 6. bölümde ise

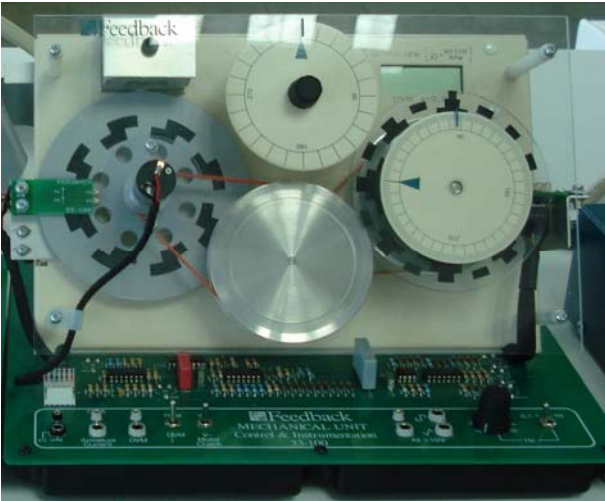
gerçek zamanlı deneysel sonuçların irdelenmesi verilmiş, son kısımda ise sonuçlar sunulmuştur.

## 2. Denei Düzenegi

Bu çalışmada donanım elemanı olarak kontrolörü koşturan bir masaüstü bilgisayar, *Feedback Instruments* firmasının ürettiği sayısal kontrol ünitesi, mekanik ünite, kontrol bilgisayarı ile iletişimi kurmak için bir okuma / yazma kartı ve yazılım elemanı olarak ise Matlab / Simulink ve MS C / C++ derleyicisi kullanılmıştır. Şekil 1’de sayısal ünitenin, Şekil 2’de ise mekanik ünitenin resimleri verilmiştir. Mevcut düzenek ile bilgisayar ortamında yapılan tasarımların, doğrudan ve hızlı bir biçimde denenmesi mümkün olmakta, yazılım yoluyla kontrolörün değiştirilebilmesi ve yeniden tasarlanabilmesi farklı yaklaşımların prototip deneylerinin kurulmasına olanak tanımaktadır.



Şekil 1- Sayısal Kontrol Ünitesi



Şekil 2- Mekanik Ünite

Mekanik Ünite, üzerine bütünleşmiş bir motor, takojeneratör ve motor bilgilerinin tutulabilmesi için yerleştirilmiş analog ve sayısal kodlayıcıdan oluşmaktadır. Ünite üzerinde bulunan motoru analog veya anahtarlamalı bir giriş sinyali ile sürebilmek için bir güç yükseltici bulunmaktadır. Mekanik ünite, düşük

frekanslı sinüs, kare ve üçgen dalga biçiminde test sinyali üreten bir sinyal üreticisine sahiptir. Bu özelliklerinin yanında mekanik ünite motorun dönüş hızının 32:1 oranında küçültülerek gösterilebildiği ve motora uygulanan anlık gerilim değerinin görülebildiği sıvı kristalli bir göstereye de sahiptir.

Sayısal ünite kontrol bilgisayarıdan gelen verinin, mekanik üniteye iletilmesinde görev almaktadır. Sayısal ünite üzerinde bulunan analog/sayısal ve sayısal/analog çeviriciler sayesinde bilgisayar tarafından oluşturulan sayısal sinyaller analog sinyallere (kontrol sinyali) dönüştürülmekte ve sistemden elde edilen analog sinyaller (durum bilgisi) sayısal hale getirilmektedir. Böylelikle yazılım ortamında geliştirilecek her kontrolörün çevre birimlerle iletişimi sağlanmaktadır.

## 3. Kutup Atama Yöntemi ile Denetim

Bu bölümde durum geri beslemesinde kullanılan kutup atama yöntemi kısaca gözden geçirilecektir ve yapılan tasarım açıklanacaktır.

Durum geri beslemesinde kutup atama yöntemi kullanılırken, sistemin kararlılık, performans gibi özelliklerini en iyi şekilde ayarlamak gereklidir. Bunu ayarlanmanın temelini durum geri beslemesinde kullanılan kazanç faktörü oluşturmaktadır. Bu çalışmada kullanılan, doğrusal, zamanla değişmeyen, tek giriş çok çıkış (SIMO) bir sistemde durum uzayı modeli aşağıdaki standart eşitliklerdeki gibi verilmiştir.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

$$y = Cx + Du \quad (2)$$

Bu durumda (1) eşitliğindeki  $A$  matrisi  $n \times n$ ,  $B$  matrisi  $n \times 1$ ,  $C$  matrisi ise  $1 \times n$  boyutlarında matrislerdir. Tasarımlarda kullanılmış olduğumuz sistemlerde  $n=2$  dir. Sisteme uygulanacak olan kontrol sinyali (3) eşitliğindeki gibi tanımlanmış olsun.

$$u = -Kx + r \quad (3)$$

Yukarıda  $r$  sisteme uygulanan referans girişini,  $u$  sistemin kontrol sinyalini,  $1 \times n$  boyutlarında olan  $K$  matrisi ise sistemin durum geri besleme matrisini temsil etmektedir.

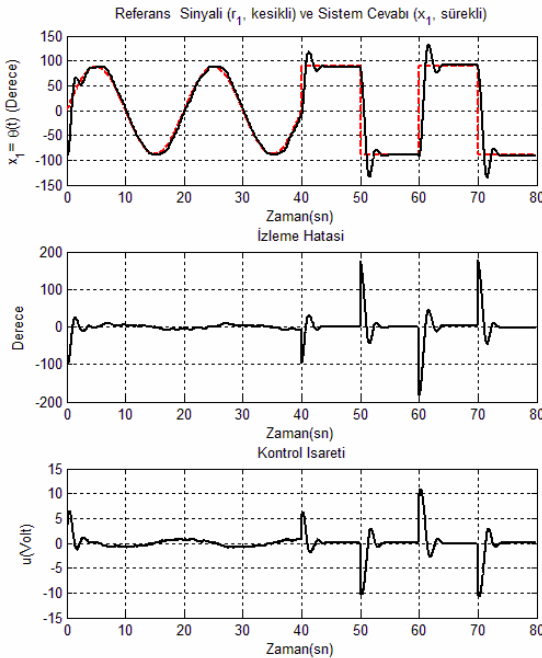
Bu çalışmada motor pozisyonu ölçülmekte, sayısal türev yoluyla açısal hız elde edilmektedir ve böylece durum değişkenlerine erişilmektedir. DC motor sistemi kontrol edilebilir olduğundan kapalı sistem çevriminin kutupları uygun bir  $K$  seçimi ile istenen noktalara konabilir.

Üreticinin sağladığı katalog bilgilerine göre  $A$  ve  $B$  matrisleri aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -4.76 \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad B = [0 \quad 3.19] \quad (4)$$

Kapalı çevrim sisteminin kutuplarının -1.8 ve -1.9 değerlerine atanması problemi seçilmiştir. Bu seçimde kontrol sinyalinin  $\pm 7.5V$  ile sınırlı olması gibi sistem davranışını kısıtlayan fiziksel veriler dikkate alınmış, yapılan birçok deneye bakılarak yukarıda verilen değerlerle hem sistem cevabının hem de kontrol sinyalinin birlikte makul olabildikleri neticesine varılmıştır. Kontrol sistemine pozisyon referansı olarak ilk 40 saniye için sinüzoidal bir sinyal, ikinci 40 saniye için kare dalga sinyali uygulanmış, böylelikle sistemin türevlenebilir (sürekli) ve türevlenemez (süreksiz) referans sinyalleri için nasıl davranacağı sorusunun yanıtı aranmıştır.

Seçilen referans sinyaline ve belirlenen kapalı çevrim kutuplarına göre sistemin vermiş olduğu cevap Şekil 3'teki gibidir. Sistem verilen referans girişini, yine Şekil 3'te gösterilen mutlak değerce kabul edilebilir ölçüde küçük seyreden bir hatayla takip edebilmektedir.



Şekil 3- Kutup Atama Yönteminde elde edilen çıkış sinyalinin referans sinyaliyle birlikte gösterimi, izleme hatası ve kontrol işareti

#### 4. Kayan Kipli Denetim

Kullanılan DC motorun sürekli zamanlı ve doğrusal bir sistem olduğu göz önünde tutularak,  $s$  değişkeni Laplace dönüşüm değişkenini,  $\theta$  sistem çıkışını ve  $u$  motora uygulanan kontrol sinyalini göstermek üzere (5) eşitliğinde olduğu gibi bir transfer fonksiyonu yazılabilir.

$$\frac{\theta(s)}{u(s)} = \frac{k}{s(s+a)} \quad (5)$$

Zaman domeninde ise aşağıdaki ifade elde edilecektir

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k \end{bmatrix} u \quad (6)$$

Burada açısal pozisyon  $x_1$  ve açısal hız da  $x_2$  değişkenleri ile gösterilmiştir.

$r_1$  sisteme uygulanan referans açısal pozisyon sinyali,  $e_1=x_1-r_1$  pozisyon izleme hatası  $e_2=x_2-r_2$  pozisyon izleme hatasının türevi ve  $z = e_2 + \lambda e_1$  değişkeni de anahtarlama fonksiyonu olarak tanımlanırsa,  $r_2 = \dot{r}_1$  olduğu da göz önüne alınarak anahtarlama fonksiyonunun türevi aşağıdaki gibi hesap edilecektir.

$$\dot{z} = -ax_2 + ku - \dot{r}_2 + \lambda e_2 \quad (7)$$

$\zeta > 0$  olmak üzere  $\dot{z} = -\zeta \operatorname{sgn}(z)$  ile tanımlanan erişme kuralı seçilirse  $s$  değişkeni zamanla  $z = 0$  olan alt uzaya doğru yönelir ve bu uzay da yukarıdaki tanımlar gereği kararlı bir alt uzay olup hata vektörünü faz uzayının orijinine yönlendirir. Bu seçim aşağıdaki kontrol sinyalinin uygulanmasını öngörür ki işaret fonksiyonunun (9) denklemindeki gibi yumuşatılması ile çarptırma etkisinin kısmen de olsa azaltılabildiği kayan kipli denetim uygulamalarında sıkça başvurulan bir değişikliktir.

$$u = \frac{1}{k} (ax_2 + \dot{r}_2 - \lambda e_2 - \zeta \operatorname{sgn}(z)) \quad (8)$$

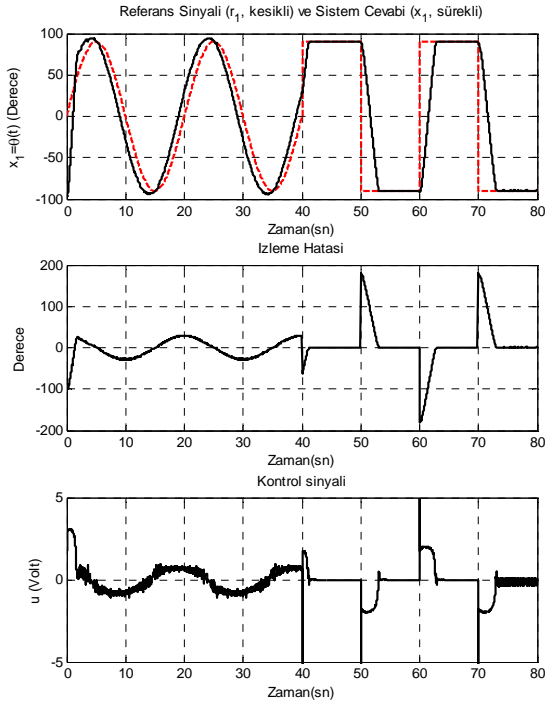
$$\operatorname{sgn}(z) \cong \frac{z}{|z| + \delta} \quad (9)$$

Denklem (1) ile verilen bilgilere göre  $a = 4.76$  ve  $k = 3.19$  alınarak kontrol sinyali hesaplanabilir. Sistemin belirlenmiş olan sabitler kullanılarak elde edilen cevabı Şekil 4'teki gibidir. Bu sistemde  $\lambda = 1$ ,  $\delta = 0.5$ ,  $\zeta = 5$  değerleri seçilmiştir. Sistemin istenen referans girişine hızlı bir biçimde yakınsama eğiliminde olduğu görülmektedir.

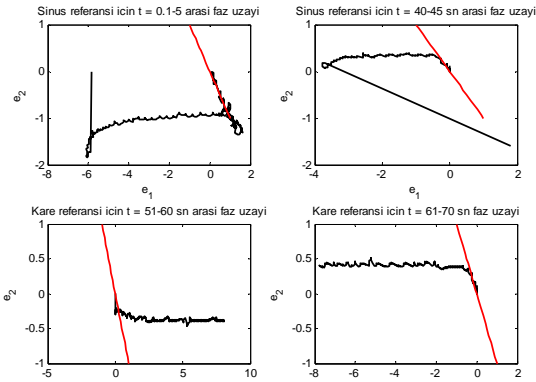
Referans sinyalindeki ani değişim anlarında sıfırdan farklı bir  $z$  değerini aniden sıfıra zorlamak isteyen kapalı çevrim dinamiği bu anlarda büyük genlikli kontrol sinyali üretmekte ancak uygulanan gerilim güvenlik nedeniyle kırılmaktadır. Şekil 3-4'teki izleme performansları birlikte değerlendirildiğinde KKD yöntemi ile elde edilen sürekli hal performansının daha iyi olduğu gözlemlenmektedir.

Sistemin Şekil 4'te gösterilen referans izleme neticeleri ile ortaya koyduğu faz uzayı davranışı Şekil 5'teki alt çizimlerde verilmektedir. Şekilde kayma yüzeyi ve hata yörüngesinin yüzeye yaklaşma biçimi ve yüzey etrafındaki davranışı görülmektedir. İlk 40 saniyelik sürede sinüzoidal referans sinyali uygulandığı için bu süredeki davranış sol üst alt çizimde gösterilmiş ve yüzey üzerindeki kayma açıkça seçilebilmiştir. Daha sonra referans işaretinde üç defa ani değişiklik olmuş ve

değişiklik anından itibaren geçen 5 saniyelik sürede kayma yüzeyinden uzaklaşan yörüngenin tekrar bu yüzeye nasıl döndüğü de sırasıyla sağ üst, sol alt ve sağ alt altçizgelerde gösterilmiştir.



Şekil 4- Kayan kipli denetim için motor pozisyonunun referans işaretini takibi, izleme hatası kontrol işareti



Şekil 5- Kayan kipli denetim için hata vektörünün faz uzayında izlediği yörünge

## 5. Bulanık Denetim

Dilsel değişkenlerin kullanılabilmesine dayanan kural tabanlı yapısı ile bulanık mantık, dinamik sistemlerin diferansiyel denklemlerle veya fark denklemleriyle ifade edilen ifadeleri yerine, sistem davranışının algılanması ve bu algılamanın sözel tasviri ile modelleme ve kontrol çalışmalarının yapılmasını mümkün kılar. Literatürde pek çok başarılı uygulamaları olan bulanık mantık, sistemlerinin temel

bileşenleri giriş değişkenlerinin üyelik fonksiyonları marifetiyle bulanıklaştırılması, bir kural tabanında öngörülen kurullarla her bir kuralın aktifleşme düzeyinin belirlenmesi ve bu aktifleşme düzeylerine bakılarak duru bir çıkış sinyalinin üretilmesi şeklindedir. Bu esnada çıkarsama mekanizması ve bilgi bankasında da değişkenlerin nasıl bir araya getirileceği ve hangi parametrelerin kullanılacağı belirlenir.

Bu çalışmada standart bir bulanık kontrolör kullanılmış, pozisyon hatası ve bu hatanın türevi kontrolöre girdi olarak uygulanmış,  $R=9$  kural ile üçgensel üyelik fonksiyonları kullanarak bir kontrolör oluşturulmuştur. Kontrolörün giriş çıkış ilişkisi aşağıda verilmiştir.

$$u = \frac{\sum_{i=1}^R y_i \prod_{j=1}^m \mu_{ij}(e_j)}{\sum_{i=1}^R \prod_{j=1}^m \mu_{ij}(e_j)} \quad (10)$$

Burada  $e_1$  değişkeni pozisyon hatasını,  $e_2$  değişkeni açısal hız hatasını göstermekte,  $\mu_{ij}$  değişkenleri ise üyelik fonksiyonlarını temsil etmektedir. Buna göre kural tabanı

- ĞER  $e_1 \in N$  ve  $e_2 \in N$  ise ○ HALDE  $u = y_1$
- ĞER  $e_1 \in N$  ve  $e_2 \in S$  ise ○ HALDE  $u = y_2$
- ĞER  $e_1 \in N$  ve  $e_2 \in P$  ise ○ HALDE  $u = y_3$
- ĞER  $e_1 \in S$  ve  $e_2 \in N$  ise ○ HALDE  $u = y_4$
- ĞER  $e_1 \in S$  ve  $e_2 \in S$  ise ○ HALDE  $u = y_5$
- ĞER  $e_1 \in S$  ve  $e_2 \in P$  ise ○ HALDE  $u = y_6$
- ĞER  $e_1 \in P$  ve  $e_2 \in N$  ise ○ HALDE  $u = y_7$
- ĞER  $e_1 \in P$  ve  $e_2 \in S$  ise ○ HALDE  $u = y_8$
- ĞER  $e_1 \in P$  ve  $e_2 \in P$  ise ○ HALDE  $u = y_9$

şeklinde olup  $y_i$  değişkenlerinin uygun seçimi ile bulanık denetim işlevi elde edilmiştir. Bu çalışmada  $y_i$  değişkenleri (11) numaralı denklemdenki gibi seçilmiş, bu değişkenlerin seçiminde edinilen deneyimden istifade edilmiştir.

$$y = \begin{bmatrix} -7.8613 \\ -6.1900 \\ -4.9520 \\ -4.9520 \\ 0 \\ 4.9520 \\ 4.9520 \\ 6.1900 \\ 7.8613 \end{bmatrix} \quad (11)$$

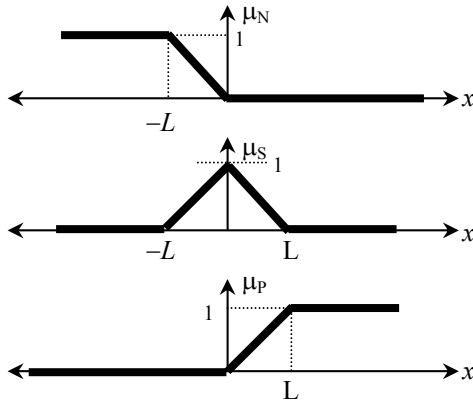
Denklem (10) ile verilen giriş çıkış ilişkisinde  $\mu_{ij}$  ile gösterilen üyelik fonksiyonları üçgensel üyelik

fonksiyonlardır ve Negatif, Sıfır ve Pozitif dilsel değişkenleri için bu üyelik fonksiyonları (12)-(14) ifadelerindeki gibi tanımlanmaktadır. Bu tanımlamalara göre üyelik fonksiyonunu betimleyen  $L$  parametresinin her üç tipteki üyelik fonksiyonu için ne anlama geldiği de Şekil 6'da gösterilmektedir.

$$\mu_N(x) = \max\left(\min\left(-\frac{x}{L}, 1\right), 0\right) \quad (12)$$

$$\mu_S(x) = \max\left(\min\left(1 + \frac{x}{L}, 1 - \frac{x}{L}\right), 0\right) \quad (13)$$

$$\mu_P(x) = \max\left(\min\left(\frac{x}{L}, 1\right), 0\right) \quad (14)$$



Şekil 6- Üyelik fonksiyonları

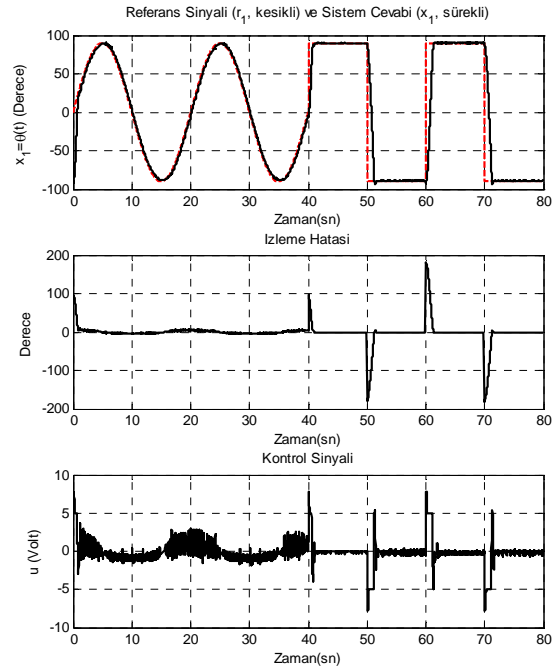
$L$  değeri, pozisyon hatasını niteleyen üyelik fonksiyonlarında 50, hatanın türevini niteleyen üyelik fonksiyonlarında ise 20 olarak seçilmiştir.

Bulanık mantık denetleyicisinin kullanıldığı durumda elde edilen neticeler Şekil 7'de, denetleyicinin tasvir ettiği denetim işlevi ise Şekil 8'de gösterilmiştir. Bulanık mantık denetleyicisinin kapalı çevrim performansı geçici halde kayan kipli denetleyiciye benzer olmakla birlikte  $y_i$  değişkenlerinin hızlı yakınsamayı elde edecek biçimde değiştirilebilmesi kontrol sinyalinde hızlı değişimleri arttırmış, buna mukabil geçici hal performansının ise iyileşmesi sağlanmıştır. Şekle göre, bulanık denetim sisteminin sürekli hal performansı oldukça iyi görünmektedir.

## 6. Sonuçlar

Bu çalışmada işlemsel yetenekleri kısıtlı bir DC motor sistemi üzerinde pozisyon kontrol deneyleri yapılmış, sistemde mevcut kayış mekanizmasından kaynaklanan doğrusalsızlıklar eşliğinde sistem performansı üç farklı yöntem denenerek irdelenmiştir. Kontrolör tasarımında sistemle gelen doğrusal model kullanılmış, kutup

atama, kayan kipli denetim ve bulanık kontrol yaklaşımları uygulanmıştır. Elde edilen bulgulara göre her üç yaklaşımla da beklenen sistem cevabı elde edilmiş, kayan kipli denetimde hata vektörünün kayma doğrusuna meyletmesi ve bu doğru üzerinden orijine yakınsaması deneysel olarak gözlemlenmiştir. Her üç yaklaşım için de referans izleme başarımları ve üretilen kontrol sinyalleri verilmiş, bunlar içerisinde kayan kipli denetim ve bulanık denetleyicinin hem sürekli hal hem de geçici hal başarımlarının iyi olduğu gözlemlenmiştir. Yükselme zamanı açısından bulanık denetleyici diğer seçeneklerden daha iyi sonuçlar üretirken kutup atama yöntemi aşımına sebep olması ve sürekli hal hatası göstermesi nedeniyle bu yöntemler arasında gürbüzlüğü en az olan yöntem olarak görülmektedir. Sistemin doğrusal bir modeli olmasına rağmen kayış sisteminin sisteme eklediği doğrusalsızlık ve kontrol sisteminin işlemsel vasıflarının kısıtlı olması bu çalışmada sunulan yöntemlerin kolay prototiplenebilir olması açısından değer arz etmektedir.

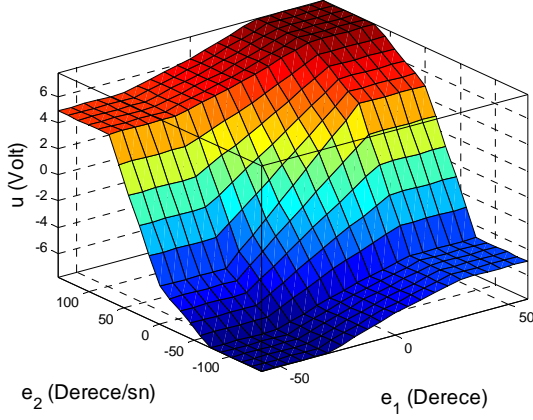


Şekil 7- Bulanık mantıkla motor pozisyonunun referans işaretini takibi, izleme hatası ve kontrol işaretini

Aynı değerlendirmeye kontrol sinyali de dahil edilecek olursa kutup atama yönteminin daha yumuşak geçişli bir çıkış ürettiği, buna karşın kayan kipli denetim ve bulanık denetim yaklaşımlarında ise kontrol sinyalinin hızlı geçişler gösterdiği dikkat çekmektedir. Hızlı geçişlerin anlık bozucuların çabuk bertarafı anlamında değerli olduğu ancak fiziksel gerçekleştirme açısından daha masraflı donanım gerektireceği de önemli bir bulgudur. Genel olarak işlemsel karmaşıklığı makul olan bulanık denetim yaklaşımının iyi netice verdiği söylenebilir.

## 7. Teşekkür

Bu çalışma 107E137 numaralı TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmiş olup çalışma TOBB ETÜ Kontrol Sistemleri laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 8 - Kontrol Yüzeyi

## 8. Kaynakça

- [1] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice Hall, 4th Edition, Nov 23, 2001,
- [2] Y. Cao, "Nonadaptive and Adaptive Sliding Mode Control of Robotic Systems with a General Sliding Surface", *Systems, Man and Cybernetics*, 1993.
- [3] Bhatti, A.I., Spurgeon, S.K., Dorey, R., Edwards, C., "Sliding Mode Configuration for Automotive Engine Control", *John Wiley and Sons Ltd.*, 1999.
- [4] S.B. Akat, M.Ö. Efe, "Bir Manyetik Askı Sisteminin Kontrolünde Dört Yöntemin Karşılaştırılması", *TOK'07 Bildiriler Kitabı İstanbul*, 5-7 Eylül 2007
- [5] A.J. Koshkouei, K.J. Burnham, "Control of DC Motors Using Proportional Integral Sliding Mode", *Control Theory and Applications Centre, Coventry University, Coventry, UK*
- [6] H.P. Pang, C.J. Liu, W. Zhang, "Sliding Mode Fuzzy Control with Application to Electrical Servo Drive", *Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*, Vol. 1, Oct. 2006
- [7] V.I. Utkin, "Sliding Mode Control Design Principles and Applications to Electric Drives", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 40, pp. 23-35, Feb.1993.
- [8] G. Bartolini, P. Pydynowski, "An Improved, Chattering Free VSC Scheme for Uncertain Dynamical Systems", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 41, No. 8, August 1996.
- [9] L.A. Zadeh, "Fuzzy Sets", *Information and Control*, Vol.8, pp. 338-353, 1965.
- [10] K.M. Passino, S. Yurkovich, *Fuzzy Control*, Prentice Hall, 1998.