

# Yüksek Duyarlılıklı Hareket Denetleyicilerin Deneysel İncelenmesi

*Asanterabi Malima, Erhan Demirok ve Asif Sabanovic*

Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi  
Sabancı Üniversitesi, İstanbul

{malima, erhandemirok}@su.sabanciuniv.edu, asif@sabanciuniv.edu

## Özetçe

Bu bildiri, mikro-nano ölçekli sistemlerdeki manipülatörler için yüksek duyarlılıkta hareket denetimi incelenmiştir. PID, kayan kipli denetleyici (KKD), ayrık kayan kipli denetleyici (AKKP) ve nöron-kayan kipli denetleyicisinin (NKKD) yüksek duyarlılıklı Maxon RE40 148877 DC motorlu sistem karakteristiğine etkisi ele alınmıştır. Sistemin kararlılığını sağlamak için kararlılık çözümlemesi Lyapunov ölçütü ile gerçekleştirilmiştir. MATLAB benzetim sonuçları ile dSpace deney düzeneğinden elde edilen sonuçlar karşılaştırma amacıyla sonuçlar kısmına eklenmiştir.

## 1.Giriş

Mekanik manipülatörleri, işleme makineleri, mikroelektronik üretim cihazları ve otomatik muayene makineleri gibi hareket denetleyicilerle desteklenen modern mekanik sistemlerin duyarlılık denetiminde yüksek hızda, doğrulukta ve dayanıklı konum referans izleme performansı beklenmektedir. Özellikle mikroelektronik ve modern mekanik cihazların minyatürleştirilmesinde yüksek duyarlılıkta denetimin gerekliliği kaçınılmazdır. Deneylerin gerçekleştirilmesinde gerekli duyarlılıkta denetim, ölçme ile belirlenir ve sınırlanır. Konum hata bilgisinin geçici (transient) zaman boyunca kodlayıcı (encoder) çözünürlüğünde hesaplanması amacıyla kodlayıcıyı kullanırken ölçmenin denetleyici duyarlılığı üzerine etkisi gözlemlenmiştir.

Bu bildirinin amacı, ikinci mertebeden ve m kütleli sarkaç modeli ile yüklenen bir elektrik motorundan oluşan sistem için yüksek duyarlılıkta bir denetleyici geliştirmektir. Sinüzoidal referans girişli ve akım sınırlı sarkaç yüklü DC motorun (Şekil 1) konum denetimini sağlayacak bir denetleyici tasarlanacaktır. Çok küçük cihazların mikro-nano ölçekli manipülasyonlarındaki çevre koşullarından dolayı böyle manipülatörler için yüksek duyarlılıklı hareket denetleyicileri gerektiğinden literatürde kullanılan değişik tiplerdeki denetleyiciler incelenmiş, sistemin modeli benzetilerek davranışı gözlemlenmiş ve sonunda denetleyiciler gerçek DC motor üzerinde gerçek zamanda dSpace 1103 arayüzü ve kartı kullanılarak uygulanmıştır.

Böyle bir deneyi gerçekleştirirken statik sürtünme (stiction), Coulomb ve viskoz sürtünmeleri gibi sürtünmelerden kaynaklanan belirsizlikler ile eylemsizlikten kaynaklanan belirsizlikler göz önünde bulundurulmuştur [1]. Bu belirsizliklerin etkisini ortadan kaldırmak için bağlantısız (offline) deneylerle doğrusal olmayan sürtünme modeli elde edilerek sürtünme dengelemesi (friction compensation) tabanlı duyarlı model önerilmiştir [1]. Bu tip bozan etkenlerin (disturbance) üstesinden gelebilmek için literatürde bozan etken gözlemleyicisi uygulaması [2] gibi daha verimli yaklaşımlar kullanılmıştır. Bozan etken gözlemleyicisinin en önemli getirisi, dc bozan etken sinyalleri ile sınırlı olmaması ile birlikte bozan etken söndürmesi (disturbance rejection) için gerekli bant genişliğinin her zaman ayarlanabilir olmasıdır. Ancak

gerçekçemiz, duyarlılığın kullanılan denetleyicinin dayanıklı ve kararlı olmasına bağlı yapısal olmayan ortamlardaki duyarlı DC motorları, piezo eyleyicileri (actuator) ve diğer mekanik manipülatörlerin denetimidir. İlk defa Utkin'in [3] değişken yapıli sistemlere kayan kipli denetim fikrini ortaya atmasıyla birlikte getirisinden dolayı kayan kipli denetleyiciler (KKD) birçok uygulamada çekici hale gelmiştir. Kayan kip sadece belirlenen bir anahtarlama yüzeyi ile yönlendirilir ve bu yüzden durum yörüngesi (state trajectory) daha önce bahsettiğimiz belirsizliklere karşı duyarsızdır [3].

Kayan kipli ve ayrık kayan kipli denetleyicileri incelememizi genişletmek için Yıldız ve Sabanovic'in ele aldığı [4] nöro-kayan kipli denetleyicisi uygulaması da göz önünde bulundurulmuştur. Sistemdeki konum hata ortalamasının karesi olarak tanımlanan performans fonksiyonunun ağırlık katsayılarını güncellemek için geri yayılım algoritması kullanılmıştır.

2. bölüm sistem dinamiğinin kuramsal tartışmasını içermektedir. Sistem modellemesi ve denetleyici tasarımı için bu çözümleme gereklidir. Altbölüm 2.1'de derin ayrıntılara yer vermek yerine deneyde kullanılan PID denetleyicisi ile ilgili açıklamalar bulunmaktadır. Altbölüm 2.2 denetleyici tasarımı ve kayan kipli denetleyicinin (KKD) sistemimizdeki uygulamasını barındırırken altbölüm 2.3'te ise ayrık kayan kipli denetleyici (AKKP) uygulaması yapılmıştır. Altbölüm 2.4 sinir ağlarının kayan kipli denetleyicileri üzerindeki etkisini kapsamaktadır. 3. bölüm yüksek duyarlılıkta denetim, 4. bölüm deneyler ve sonuçları kapsamaktadır. 5. bölümde ise deney sonuçlarının yorumlanmasına yer verilmiştir.

## 2.Sistem Dinamiği ve Modelleme

Otomatik kontrol alanı telekomünikasyon, endüstriyel süreç, taşıtlar, güç sistemleri gibi uygulama alanlarında geribesleme ihtiyaçlarının ve problemlerin görülmesiyle 1940'lı yılların ortalarında ortaya çıkmıştır. Değişik özellikteki komponentlerden oluşan duyarlı güvenilir kuvvetlendiricilerin tasarımının anahtar problem olmasıyla telekomünikasyon sektörü geribeslemeli sistemlere başlıca etken olmuştur [8]. Bu fikir, bize denetleyici olarak kayan kipli denetleyicinin kullanılması hakkında motivasyon sağlamıştır.

Problemi genel çerçeve içerisinde vurgularsak, denetlenecek sistem olan DC motorun dinamik denklemi:

$$T = k_T i = J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} \dots \dots \dots (1)$$

olmaktadır ve yük olarak ucuna bir kütle bağlı sarkaç bulunmaktadır (Şekil 1)

Burada:

T: DC motordan gelen tork

$k_T$ : Motorun tork sabiti

J: Motorun rotor eylemsizliği

b: Motorun sönüm katsayısı

$\ddot{\theta}$ : Açısal ivme



bir denetim yasası (control law) tasarlanır. Kararlılık, Lyapunov kanununa göre ölçüt alınmıştır. Bu yüzden yüzey

$$\sigma = Ce + \dot{e} \dots\dots\dots (4)$$

olarak seçilebilir. Denetleyicinin hesaplanması için verilen konum (theta) hatası için denklem 2 göz önüne alındığında eğer,

$$J\dot{\theta} + b\dot{\theta} + T_l = T = \kappa_T i \dots\dots\dots (5)$$

ise sistem durumları,

$$x_1 = \theta \Rightarrow \dot{x}_1 = \dot{\theta}$$

$$x_2 = \dot{\theta} \Rightarrow \dot{x}_2 = \frac{1}{J}[-bx_2 - T_l + \kappa_T u] \dots\dots\dots (6)$$

olmaktadır. theta için hata,

$$e = \theta_{ref} - \theta \dots\dots\dots (7)$$

$$\dot{e} = \dot{\theta}_{ref} - \dot{\theta} \dots\dots\dots (8)$$

O zaman kayan manifoldu hata ve hatanın zamana göre türevi olarak tanımlayabiliriz,

$$\sigma = Ce + \dot{e} \dots\dots\dots (9)$$

Denklem 9, sistem durumlarının hareketinin kayan kip manifoldu üzerinde kalması için bir koşuldur. Sistem kayan hareketine başlamasından itibaren hata ve hatanın zamana göre türevinden oluşan hareket denklemi,

$$\sigma = 0 \Rightarrow \dot{e} = -Ce \dots\dots\dots (10)$$

olmaktadır. Burada "C" kayan manifoldun eğimidir ve hatanın sifıra gitme hızını göstermektedir. Ancak aşmaya (overshoot) sebep vermesinden dolayı eğimin çok yüksek değerler alması mümkün olmamaktadır. Sistemin kararlılığı için Lyapunov fonksiyonu denklem 11'deki gibi seçilmiştir.

$$V = \frac{\sigma^2}{2}, \quad V > 0 \text{ bütün } \sigma \text{ değerleri için} \dots\dots\dots (11)$$

V=0 sadece  $\sigma = 0$  için  
V, pozitif tanımlı fonksiyon

Asimptotik kararlılık için Lyapunov fonksiyonunun türevi negatif tanımlı olması gerekmektedir.

$$\dot{V} = \sigma \cdot \dot{\sigma} = \sigma \cdot (C\dot{e} + \ddot{e}) \dots\dots\dots (12)$$

Eğer akım genliğini M olarak seçersek, durum hareketini kayan manifoldda tutmak için aşağıdaki eşdeğer denetleyiciyi seçebiliriz:

$$u = M \cdot \text{sign}(\sigma) = \begin{cases} M \Rightarrow \sigma > 0 & \text{için} \\ -M \Rightarrow \sigma < 0 & \text{için} \end{cases} \dots\dots\dots (13)$$

Eğer seçilen denetleyici yeteri kadar büyükse asimptotik kararlılık elde edilir bu yüzden  $\dot{V}$ 'nin negatif tanımlı olması sağlanmış olunur:

$$\lim_{\sigma \rightarrow 0^+} (\dot{V}) < 0, \quad \dot{V} < 0$$

$$\lim_{\sigma \rightarrow 0^-} (\dot{V}) > 0, \quad \dot{V} < 0 \dots\dots\dots (14)$$

### 2.3.Ayrık Kayan Kipli Denetleyicinin Sistem Üzerinde Uygulanması

Kayan kipli denetleyicide olduğu gibi ayrık kayan kipli denetleyici de parametre değişikliklerine karşı dayanıklı ve bozucu etkenlere karşı duyarsız olmasından dolayı dayanıklı bir denetim tekniğidir. Ancak ayrık kayan kipli denetiminin de dalgalanma veya çatırdama ile sadece belirsizlik eşleşmesi durumunda dayanıklı olması gibi sınırlamalardan dolayı kararlılık çözümlemenin yapılması gereklidir.

Denetleyici, bilgisayarda belirli bir örnekleme frekansında uygulandığında çatırdama veya salınım problemleri sınır

bölgesinde (boundary layer) gözlemlendiği için ayrık kayan kipli denetleyici (AKKD) geliştirilmiştir.

Eğer denklem 11 ve 12' deki gibi  $v = \frac{\sigma^T \sigma}{2}$  ve  $\dot{v} = \sigma^T \dot{\sigma}$  ise,

$$\dot{\sigma} + D \sigma = 0 \dots\dots\dots (15)$$

olmaktadır.

$$x_{k+1} = f_k(x_k) + b_k(x_k)u_k \text{ and } \frac{\partial \sigma}{\partial x} = G \dots\dots\dots (16)$$

$$\sigma_{k+1} = G \underbrace{(x_{k+1}^{ref} - f_k(x_k))}_{b_k u_{eqk}} - b_k(x_k)u_k \dots\dots\dots (17)$$

$$u_{eqk} = u_k + (Gb_k)^{-1} s_{k+1} \dots\dots\dots (18)$$

$$u_{eqk} \approx u_{k-1} + (Gb_k)^{-1} s_{k+1} \dots\dots\dots (19)$$

Dikkat çekilmesi gereken önemli nokta denetleyicinin sürekli olması ve bu yüzden sisteme çatırdamanın olmaması beklenir.

$$(Gb)^{-1} = \begin{bmatrix} C & 1 \\ K_t & J \end{bmatrix}^{-1} = \begin{pmatrix} K_t \\ J \end{pmatrix}^{-1} = \frac{J}{K_t} \dots\dots\dots (20)$$

### 2.4.Nöro-Kayan Kipli Denetleyicinin Sistem üzerinde Uygulanması

Çoğu denetim sistemleri bilinmeyen doğrusal olmayan dinamiklere sahiptir. Bilindiği gibi sinir ağları (SA) denetim sistemlerindeki bilinmeyen doğrusal olmayan dinamikleri, parametre değişimlerini ve beklenmeyen dış bozucu etkenleri ortadan kaldırmak için doğrusal olmayan herhangi bir fonksiyonu yaklaşık olarak benzetebilir.

Bildiride, sistemin kararlı ve dayanıklı olması için Lyapunov kararlılık kriterinden yararlanılarak nöro-kayan kipli denetleyicinin kullanımı sunulmuştur. Aşağıda ayrıntılandırıldığı gibi bu tip denetleyicinin çatırdamayı tamamiyle ortadan kaldırması beklenmektedir.

Denetleyici için referans olan denetim girişi denklem 21'deki gibi verilmektedir:

$$u = w_1 e + w_2 \dot{e} + w_3 \dots\dots\dots (21)$$

burada  $w_i$ 'ler konum hatası e'nin, hatanın zamana göre türevi  $\dot{e}$ 'nin ve 1'in ağırlık katsayılarıdır (Şek. 4).

Denklem 22'deki hata fonksiyonunu minimize etmek için nöro-denetleyicilerin ağırlık katsayıları online olarak güncelleştirilir.

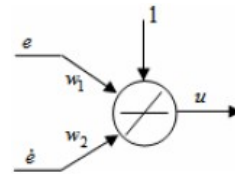
$$E = \frac{1}{2} (\dot{\sigma} + D\sigma)^2 \dots\dots\dots (22)$$

Burada,  $\sigma = Ce + \dot{e}$  (C ve D pozitif katsayılarıdır). Ağırlık katsayılarının güncellenmesi aşağıdaki gibidir:

$$W_1^{new} = W_1^{old} - n \frac{\partial E}{\partial W_1} \dots\dots\dots (23)$$

$$W_2^{new} = W_2^{old} - n \frac{\partial E}{\partial W_2} \dots\dots\dots (24)$$

$$W_3^{new} = W_3^{old} - n \frac{\partial E}{\partial W_3} \dots\dots\dots (25)$$



Şekil 4: Konum denetleyicisinin yapısı

Gerekli hesaplardan sonra aşağıdaki sonuçlar elde edilir:

$$W_2^{new} = W_2^{old} - n(\dot{\sigma} + D\sigma)|e| \dots\dots\dots (26)$$

$$W_2^{new} = W_2^{old} - n(\dot{\sigma} + D\sigma)\dot{e} \dots\dots\dots (27)$$

$$W_3^{new} = W_3^{old} - n(\dot{\sigma} + D\sigma) \dots\dots\dots (28)$$

Burada  $\eta$  sabit bir terimdir.

### 3.Yüksek Duyarlılıklı Denetim

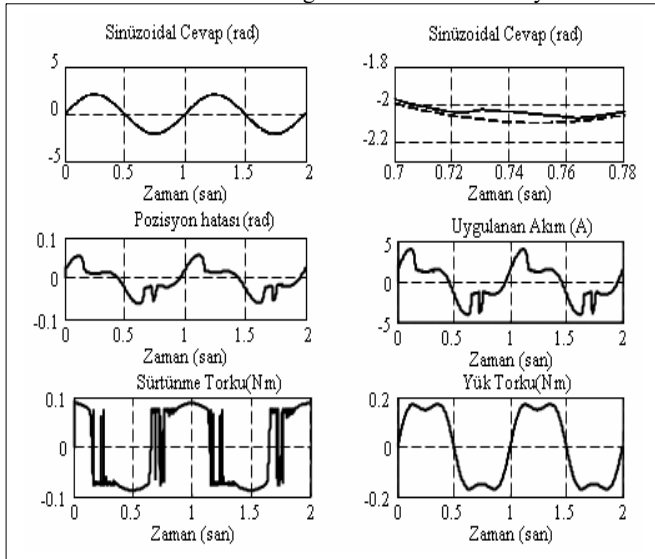
Daha önce belirttiğimiz gibi, amaç bir önceki bölümde kullandığımız denetleyicilerden elde edilen sonuçları karşılaştırarak uygun denetleyiciyi belirlemektir. Duyarlılık ihtiyacı, çalışma koşullarımızın mikro montaj istasyonumuzda kullanılan mekanik manipülatörler gibi sadece küçük ölçekte olmalarından değil manipülatörlerin hareket edebileceği alanın da sınırlı olmasından doğmaktadır.

Gerçek zamanlı deneylerde eğer kodlayıcı kullanılırsa amaç, konum hatalarını kodlayıcı çözünürlüğüne yakın değerlerde hesaplamaktır. Burada dayanıklılık sadece kararlılık için dayanıklılık anlamında değil performans için dayanıklılık anlamına da gelmektedir. Dinamik karakteristiğinin bir birimden diğerine geçerken ya da bir birimin karakteristiği çalışma sırasında değişirken denetleyici katsayılarının iyi ayarlanması işinden kaçınmak için bu önemli bir ihtiyaçtır [1].

### 4.Deneyler ve Sonuçlar

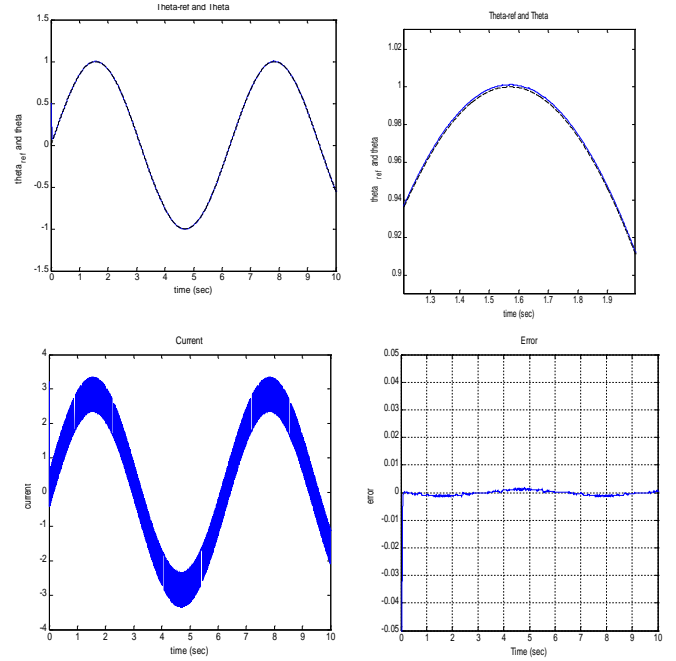
Önceki bölümlerde açıklandığı gibi bütün deneylerin MATLAB benzetim grafik sonuçları aşağıda gösterilmiştir.

Statik sürtünmenin dahil edildiği durumda PID denetleyicisi:



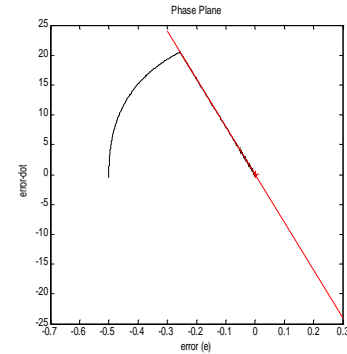
Şekil 5: Çıkış, referans giriş, konum hatası, akım, sürtünme ve yük torkunun karşılaştırılması

Sistemin kayan kipli denetleyici ile denetlenmesi :



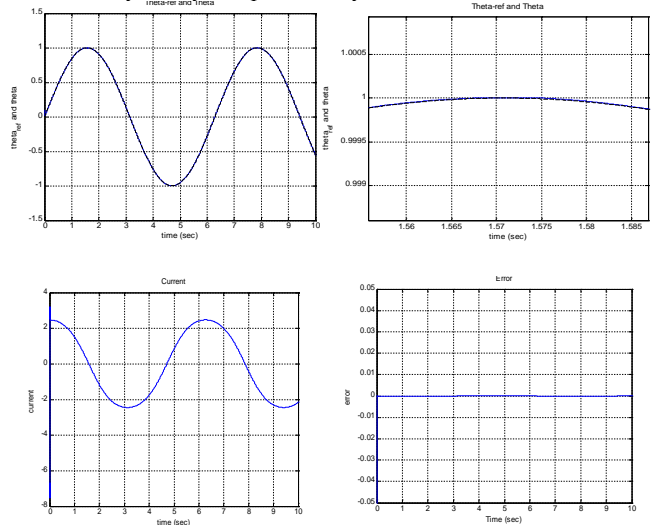
Şekil 6: C=80, M=2250 ve örnekleme zamanı=0,0001 saniye için sırasıyla çıkış ve referans konum, akım ve konum hatasının karşılaştırılması.

Faz grafiği:



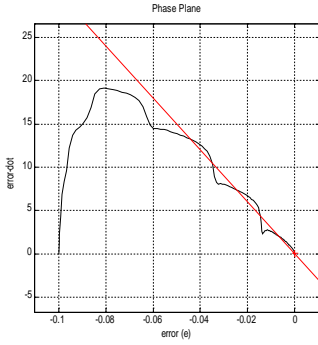
Şekil 7: C=80, M=2250

Sistemin ayrık kayan kipli denetleyici ile denetlenmesi:



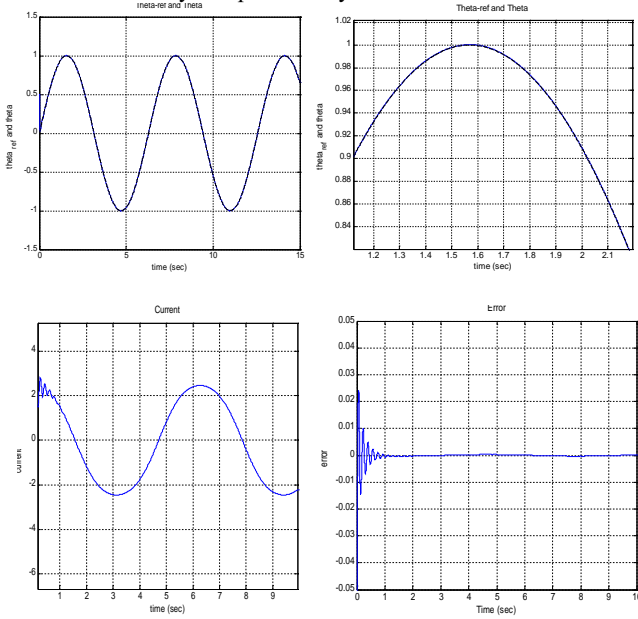
Şekil 8: C=300, D=1000 ve örnekleme zamanı=0,0001 saniye için sırasıyla çıkış ve referans konum, akım ve konum hatasının karşılaştırılması.

**Faz grafiği:**

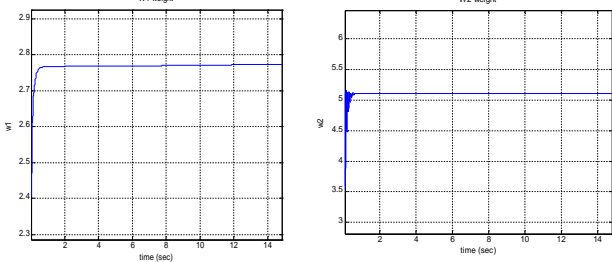


Şekil 9:  $C=300$ ,  $D=1000$ ,  $K_u=0,000222$  ve örnekleme zamanı= $0,0001$  saniye için faz grafiği

**Sistemin nöro-kayan kipli denetleyici ile denemesi:**



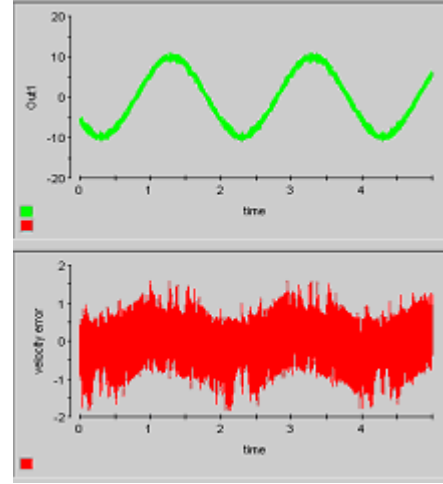
Şekil 10:  $C=200$ ,  $D=1000$ ,  $K_u=0,000222$  ve  $n=0,02$  için sırasıyla çıkış ve referans konum, akım ve konum hatasının karşılaştırılması.



Şekil 11: Sırasıyla ağırlık katsayıları  $w_1$  ve  $w_2$  grafikleri

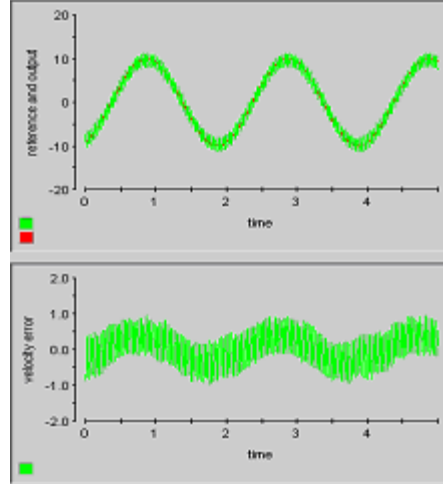
Gerçek zamanlı deneylerde Maxon RE40 148877 DC motorun denetimi için MATLAB R12 Simulink ile birlikte [dSpace DS1103](#) deney düzeneği ve sistemimize akım uygulamak için akım denetimli motor sürücüsü kullanılmıştır. Aşağıdaki sonuçlardan görüldüğü üzere system göz ardı edilemeyecek miktarda salınım yapmaktadır ve ölçümlere istenmeyen gürültü sinyalleri de eklenmiştir. Bu sonuçlar alçak geçiren filtrenin ve gerçek ortamda gözlemlenen bu sinyalleri ortadan kaldırmak için bozucu etken gözlemleyicilerinin kullanılması gerektiğini göstermektedir. dSpace ortamında elde edilen sonuçlar aşağıda görülmektedir:

**PID denetleyicisinin sisteme uygulandığı durum:**



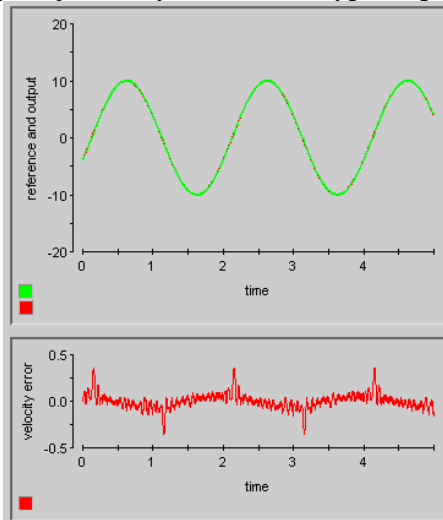
Şekil 12: En üstteki bölümde kırmızı referans, yeşil ise çıkışı (konum) gösterirken alttaki grafik  $K_p=1$ ,  $K_i=0,000005$  ve  $K_d=0,01$  için hız hatasını göstermektedir.

**Kayan kipli denetleyicisinin sisteme uygulandığı durum:**



Şekil 13: En üstteki bölümde kırmızı grafik referansı, yeşil grafik konum çıkışını gösterirken alt bölümdeki grafik  $C=100$  ve  $M=0,08$  için hız hatasını göstermektedir.

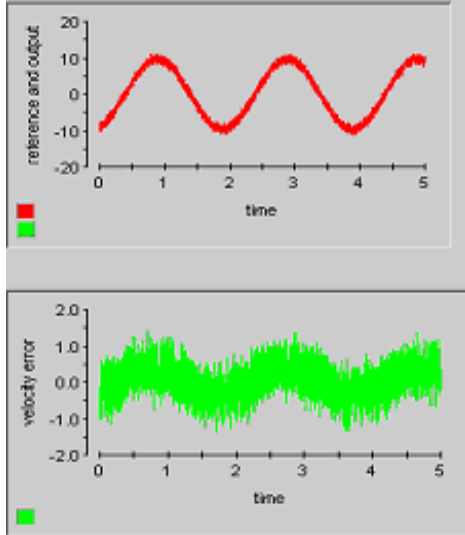
**Ayrık kayan kipli denetleyicisinin sisteme uygulandığı durum:**



Şekil 14: En üstteki bölümde kırmızı grafik referansı, yeşil grafik ise konum çıkışını gösterirken alt bölümdeki grafik  $C=30$ ,  $D=200$ , ve  $K_u=0,000005$  için hız hatasını göstermektedir.



Nöro-Kayan kipli denetleyicisinin sisteme uygulanması:



Şekil 15: En üstteki bölümde yeşil grafik referansı, kırmızı grafik ise konum çıkışı gösterirken alt bölümdeki grafik  $C=0,000001$ ,  $D=0,000001$  ve  $n=0,000001$  için hız hatasını göstermektedir.

## 5.Sonuç

Sonuç olarak altbölüm 2.1’de PID denetleyicisini kullanarak gerçekleştirilen çözümlerde, benzetimdeki modele statik sürtünmenin eklenmesiyle sistemde sadece viskoz sürtünmenin olduğu duruma göre daha büyük salınımlar meydana gelmiştir. Bu yüzden simulink modeline statik sürtünmenin eklenmesi sistemi denetlemesi daha zor haline getirmiş, bu salınımları ortadan kaldıracak daha dayanıklı bir denetleyici kullanılması sonucuna varılmıştır.

Altbölüm 2.2’de kayan kipli denetleyici (KKD) ile beklendiği gibi sonuçlarla karşılaşılmış ve hata değeri çok küçük değere düşürülmüş ancak sistemde çattırdamalar gözlenmiştir. Ayrıca açılal hızın çok yüksek frekanslarda değişik değerler aldığı görülmüştür.

Altbölüm 2.3’te ayrı kayan kip denetimli sistem ile daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Bildiride 2. mertebeden ayrı kayan kip denetimli (AKKD) sistem üzerinde durulmasına rağmen, uygulamalar daha yüksek mertebeden mekanizmalara genişletilebilir. Ayrıca beklendiği gibi AKKD sistemde çattırdama veya salınım problemleri bastırıldığı gözlenmiştir.

En son sistemdeki çattırdamaları ortadan kaldırması beklenen nöro-kayan kipli denetleyicisi (NKKD) sistemde denenmiştir ancak birim genlikte sinüzoidal referans uygulandığında küçük bir hata gözlemlenmiştir. Ayrıca dSpace ortamında elde edilen sonuçların benzetim sonuçlarına göre tek farkı alçak geçiren filtre ihtiyacı getiren istenmeyen gürültü sinyallerinin ölçümlere eklenmesidir.

Araştırmanın daha sonraki aşamasında yük altındaki farklı denetleyicileri gerçek zamanda test etmek için filtreler ve gözlemleyicilerin sisteme uygulanmasına çalışılacaktır.

## 6.Referanslar

[1] H. S. Lee and M. Tomizuka, “Robust Motion Controller Design for High - Accuracy Positioning Systems”, 1996.

[2] K. Ohnishi, “A new servo method in mechatronics,” Trans. *Jpn. Soc.Elec. Eng.*, vol. 107-D, sayfa. 83-86, 1987.

[3] V. I. Utkin, “Variable structure systems with sliding modes,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 22, sayfa. 212–222, Nisan 1977.

[4] Y. Yildiz and A. Sabanovic, “A Neuro-Sliding Mode of Timing Belt Servo-System”, *International Workshop on Advanced Motion Control*, AMC' 04 Kawasaki, Japan.

[5] V. I. Utkin – Sliding Modes in Control and Optimization, Springer Verlag 1992.

[6] C. Edwards and S. Spurgeon – Sliding Mode Control: Theory and Applications, Taylor & Francis, 1998.

[7] M. J. Corless and G. Leitmann, “Continuous state feedback guaranteeing uniform boundedness for uncertain dynamic systems”, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 24, sayfa 437–443, Ekim 1981.

[8] K. J. Åström. “Model Uncertainty and Robust Control”. Lund University, Sweden.

[9] K. Erbatur, M. O. Kaynak, , and A. Sabanovic, “A Study on Robustness Property of Sliding-Mode Controllers: A Novel Design and Experimental Investigations”, *IEEE*, vol. 46, NO. 5, Ekim 1999.