



EGITIM AMAÇLI PNÖMATİK SERVO-KONTROL DÜZENEGİN DENEYSEL DEĞERLENDİRMESİ

Mehmet YUNT
Arkin YETİS
Koray K. SAFAK
Osman S. TÜRKAY

ÖZET

Pnömatik sistemlerin endüstride birçok uygulama alanları bulunmaktadır. Hidrolik sistemlere göre daha ekonomik ve düşük güç gerektiren uygulamalarda yeterli olmaktadır. Bununla birlikte güç iletiminde kullanılan havanın sıkıştırılabilir olması nedeniyle hassasiyet gerektiren kontrol uygulamalarında bazı problemlerle karşılaşmak mümkündür. Havanın sıkıştırılabilir olmasının neden olduğu doğrulsuzluk pnömatik sistemlerin hidrolik sistemler kadar hassas modellenmesini güçleştirmektedir.

Bu çalışmanın amacı pnömatik bir eğitim servomekanizma düzeneginin analog kontrol uygulamasının deneysel olarak değerlendirilmesidir. Düzenek üzerinde bulunan klasik PID denetleyicisi ve durum denetleyicisi test edilmiştir. Sonuçlar istenilen referans değerlerine ulaşıldığını göstermiş ancak çeşitli kaynakların neden olduğu gürültü probleminin irdelenmesi ve gürültünün azaltılması gerekliliği saptanmıştır. Deneysel sisteminin akışkan gücü kontrol ve otomatik kontrol derslerinde eğitim amaçlı olarak kullanılarak temel kavramların eğitimi açısından faydalı olduğu görülmüştür.

1. GİRİŞ

Sıkıştırılmış hava kaynağının birçok fabrikada mevcut olması, ilk yatırımların nispeten düşük maliyetli olması ve havanın güç iletiminde yavaş yavaş bilinen avantajlarının olması pnömatik sistemleri düşük güç gerektiren ve bilhassa sıralı kontrol uygulamalarında cazip kılmaktadır. Pnömatik sistemlerin doğrusal olmayışları ve sıkıştırılabilir olması nedeniyle kapalı çevrim kontrolde karşılaşılan problemlere rağmen teknolojik elemanlardaki gelişmeler sonucunda pnömatik servo-kontrol son yıllarda daha çok kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak damgalama makineleri, çapak alma makineleri ve paletleme araçları gösterilebilir.

Bu çalışmada irdelenen eğitim amaçlı deneysel düzenek klasik PID denetleyici ve durum denetleyici (status controller) donanımını içermektedir. Denetleyici ve güç elemanları analog olmakla birlikte deneysel verileri kaydedip incelemek üzere deneysel sisteme PC tabanlı bir veri kayıt sistemi bağlanmıştır. Çalışmada denetleyici parametrelerinin performans etkileri gözlemlenmiştir. PID denetleyicisi için sinir salınım ayar yöntemi ve durum denetleyicisi ayarları için deneme-yanılma yöntemi uygulanmıştır. Deneysel sistemin oldukça iyi performans gösterdiğini ve eğitim-araştırma amacıyla uygun bir düzenek olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak veri kayıt sisteminden kaynaklanan olası elektriksel ve ölçüm gürültülerinin irdelenerek azaltılması gereği görülmüştür.

2. DENETLEYİCİ TIPLERİ

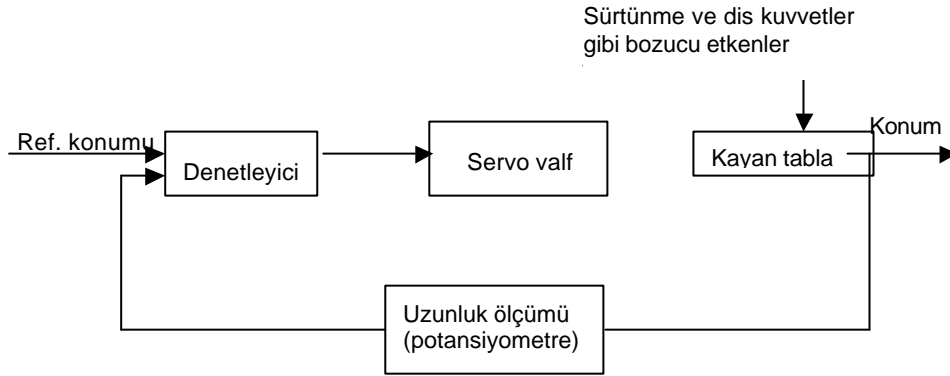
Deneyisel çalışmalar klasik PID denetleyici ve durum denetleyicisi kullanılarak yapıldı [1,2].

2.1. PID Denetleyici

PID denetleyicisinin transfer fonksiyonu şu formülle ifade edilir [3],

$$D(s) = K \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (1)$$

burada K oransal kazanç katsayısı, T_I integral zamanı ve T_D türevsel zaman sabitleridir. Deneyisel pnömatik servo-kontrol düzeneginin blok diyagramı Şekil 1 'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Deneyisel pnömatik servo-kontrol düzeneginin blok diyagramı.

Bilindiği üzere kapalı çevrim sistemlerde oransal kazanç katsayısını yükseltmek genel olarak sürekli rejim hatasını azaltır fakat sistemi göreceli olarak kararsızlığa götürür. Integral kazanç K/T_I , $t=t_0$ zamanından önceki hataları integral etkiyle toplamak suretiyle sürekli rejim hatasını yok eder. Integral etkinin diğer önemli bir katkısı sistem cevabını hızlandırır ancak buna karşılık sistem cevabında asmaya neden olarak salınımlı kararsızlığa yöneltebilir. Türevsel kontrol kazancının KT_D artması sistem cevabını hızlandırıcı ve asmayı azaltıcı olumlu etkilerde bulunur ancak gürültülü ölçümleri yükselterek olumsuz etkiler.

Sistemin matematiksel modeli biliniyorsa en iyi PID katsayıları analitik olarak hesaplanabilir. Birçok endüstriyel uygulamada olduğu gibi model bilinmiyorsa katsayı ayarları deneysel olarak yapılır. Bu konuda geliştirilmiş yöntemler arasında en çok kullanılan yöntem Ziegler-Nichols sınır salınım yöntemi ve süreç tepki yöntemidir [3].

Sınır salınım yönteminde kapalı çevrim sistem sadece oransal denetleyiciyle kontrol edilirken basamak giriş uygulanır. Oransal kazanç değeri K , sistem cevabı esik kararlılık sınırına yaklaşıncaya kadar artırılır ve sistemin cevabı sinüzoidal cevaba yaklaşır. Bu durumda sınır kazanç değeri K_u ve sinüzoidal sınır periyodu T_u ölçülür. Kullanılacak denetleyici tipine göre K_u ve T_u değerleri aşağıdaki formüllerde kullanılır [3]. Bu formüller analog sistemler için geliştirilmiş olmakla birlikte sayısal olarak kontrol edilen yavaş sistemler için de kullanılabilir.

$$P: K_p = 0.5 K_u \quad (2)$$

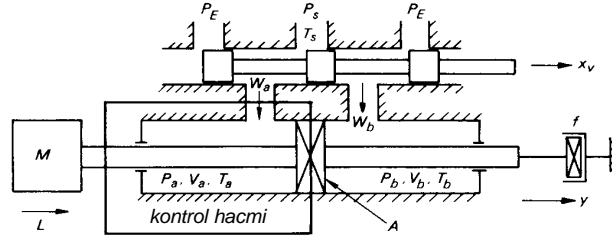
$$PI: K_p = 0.45 K_u \quad K_I = (0.45 K_u) / (0.85 T_u) \quad (3)$$

$$PD: K_p = 0.8 K_u \quad K_d = (0.8 K_u) (0.12 T_u) \quad (4)$$

$$PID: K_p = 0.6 K_u \quad K_I = (0.6 K_u) / (0.5 T_u) \quad K_d = (0.6 K_u) (0.12 T_u) \quad (5)$$

2.2. Durum Denetleyicisi

Pnömatik sistemlerin dinamik denklemleri genellikle doğrusal değildirler. Shearer [4] açık çevrim pnömatik bir servovalfin belirli bir denge noktasında doğrusallaştırılmış denklemlerini türetmiştir. İncelenen model Şekil 2.'de gösterilmektedir.



Şekil 2. Pnömatik servomekanizma [4]

Bazı kabuller sonucunda [4], açık çevrim sistemin transfer fonksiyonu ve sönümsüz doğal frekansı aşağıdaki şekilde elde edilir,

$$\frac{\Delta y}{\Delta x_v} = \frac{k_1 \gamma P_i^2 / A}{s(s^2 + \omega_n^2)} \quad (6)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{2gP_i A^2}{V_i M}} \quad (7)$$

(6) denkleminde Δx_v sürgü valfine uygulanan deplasman girişi, Δy yük çubugunun deplasman çıkışı, ω_n sönümsüz doğal frekans, k_1 valf sabiti, γ havanın spesifik sabiti, P_i giriş kapağı basıncı, V_i başlangıçtaki hacim, M hareket eden kütle ve A pistonun kesit alanıdır. Denklem (6) kararsızdır. Sistemi kararlı yapmak için açık döngü, (8) denklemiyle kapatılır,

$$\frac{\Delta y'}{\Delta y} = (K_a s^2 + K_v s + K_y) \quad (8)$$

Böylece sistemin kapalı çevrim transfer fonksiyonu (9) denklemiyle elde edilir,

$$\frac{\Delta y}{\Delta x_i} = \frac{k_1 \gamma P_i^2 / [A s (s^2 + \omega_n^2)]}{1 + (K_a s^2 + K_v s + K_y) k_1 \gamma P_i^2 / [A s (s^2 + \omega_n^2)]} \quad (9)$$

Sistem donanımındaki durum denetleyicisi (8) denklemiyle ifade edilen geribesleme denetleyicisinin bir çeşididir. Temel fark hız ve ivme sinyallerini referans değerinden çıkartmadan doğrudan durum denetleyicisi birimine bağlanmasıdır.

Durum denetleyicisi konumu kontrol edilen kütle için, konum hatasını, hız ve ivme değerlerini, (10) denkleminde gösterilir. Kütle için konumu doğrusal potansiyometreyle ölçüldükten sonra hız ve ivme denklemleri elektronik türev olarak hesaplanır. Durum denetleyicisi denklemi,

$$y(t) = K_x [r(t) - x(t)] - K_{\dot{x}} \dot{x}(t) - K_{\ddot{x}} \ddot{x}(t) \quad (10)$$

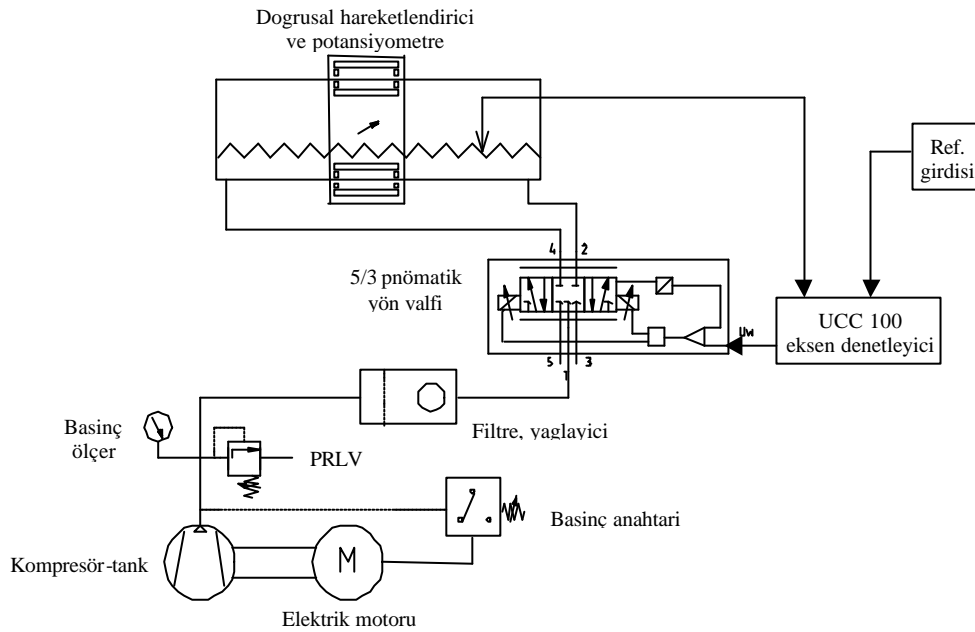
şeklinde ifade edilir. Burada K_x , $K_{\dot{x}}$, ve $K_{\ddot{x}}$ sırasıyla, konum, hız ve ivme katsayılarıdır. Bu üç sinyalin toplamı bir sınırlayıcıdan geçirilerek denetim sinyali elde edilir. Durum denetleyicisi katsayılarını en iyi değerlere ayarlayan bir yöntem olmadığından, katsayılar deneme-yanılma yoluyla ayarlanır.

3. DENEYSEL DÜZENEK

Pnömatik devre ve elektriksel kontrol sistemi Şekil 3'de gösterilmektedir. Kompresör-tank kaynağından sisteme 6 bar basınç kadar basınçlı hava gönderilebilmektedir. Kompresörün çıkış basıncı, basınç ayar valfinden istenilen çalışma basıncına göre ayarlanır ve hava süzgeci ile yağlayıcıya şartlandırılır.

Düzenekte 5/3 pnömatik yön valfi kullanılmaktadır. Valf, UCC 100 eksen denetleyicisi biriminden çıkan 0-10V arasındaki elektriksel sinyalle uyarılır [1]. Valf elektronik devresi, sürgü valfinin konumlamasını yaklaşık 5 ms yerleşme zamanı ve 70 Hz bant genişliğinde gerçekleştirir [1].

Hareketi kontrol edilen kütle çift-etkili çubuksuz bir silindir-manyetik piston sistemine bağlanmıştır. Kütle ve piston üzerindeki mıknatıslar kuvvet / kilitleme etkisini sağlamaktadır. Kütle az sürtülmeli bilyeli yataklara bağlanmış olarak iki kılavuz çubuk üzerinde hareket etmektedir. Piston stroku 200 mm'dir. Doğrusal potansiyometre süpürücünün konumuna orantılı olarak 0 ile 10V arasında voltaj üretmektedir. UCC 10 kontrol birimi konumun referans ve ölçülen değerlerini karşılaştırarak pnömatik servovalfe uyarı sinyalini gönderir [5].



Şekil 3. Pnömatik sistemin devresi [1]

4. DENEYSEL YÖNTEM VE SONUÇLAR

PID denetleyicisinin Ziegler-Nichols yöntemiyle ayarlanması için, sürekli zamanlı sistem A/D çeviricisi ile örnekledi ve veriler bilgisayara kaydedildi. Sistemdeki önemli frekans bileşenleri, yaklaşık 140π rad/sec olan oransal valf frekansı ile tüm sistemin doğal frekansıdır. Tablo 1'de verilen sistem parametreleri kullanılarak sistemin teorik doğal frekansı $\omega_n = 45$ rad/sec olarak hesaplandı. Böylelikle, veri toplama sisteminin örnekleme frekansı Nyquist örnekleme frekansından daha yüksek olan 200 Hz olarak seçildi.

Tablo 1. Pnömatik denetim sistemi parametreleri

$g = 1.4$	$P_i = 4$ bar	$V_i = 4.91 \cdot 10^{-5} m^3$	$M = 2.7$ kg	$A = 4.91 \cdot 10^{-4} m^2$
-----------	---------------	--------------------------------	--------------	------------------------------

Bilgisayardaki ADC kartinin çözünürlüğü 12 bit ölçüm aralığı ise 0-10 V idi. Bu yüzden, en büyük nicemleme hatası $10/2^{12} = 0.00244$ V oldu. En büyük nicemleme hatası dogrusal potansiyometrenin kazancıyla çarpılarak ölçüm hatası $0.00244 \text{ V} \cdot 228 \text{ mm}/10 \text{ V} = 0.0556 \text{ mm}$ olarak bulundu.

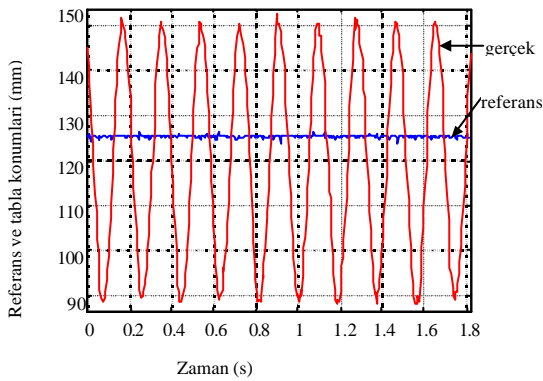
4.1. PID Denetleyicisi Sonuçları

PID parametrelerinin ayarlanması için Ziegler-Nichols sinir salınım yöntemi kullanıldı. Sinir salınım davranışı, Şekil 4'de görüldüğü gibi $K_u = 2.2$ değeriyle başladı. Sinir periyodu, $T_u = 0.185$ s olarak bulundu. Böylece, denetleyici parametreleri Tablo 2'de görüldüğü gibi, Ziegler-Nichols formüllerine göre hesaplandı.

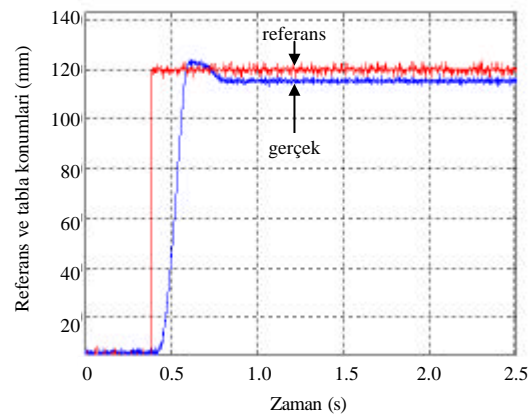
Tablo 2. Ziegler-Nichols yöntemiyle elde edilen PID denetleyici parametreleri

Denetleyici tipi	Parametreler		
P:	$K_p = 1.1$		
PI:	$K_p = 0.99$	$K_I = 6.3$	
PD:	$K_p = 1.76$	$K_d = 39.07$	
PID:	$K_p = 1.32$	$K_I = 14.3$	$K_d = 29.3$

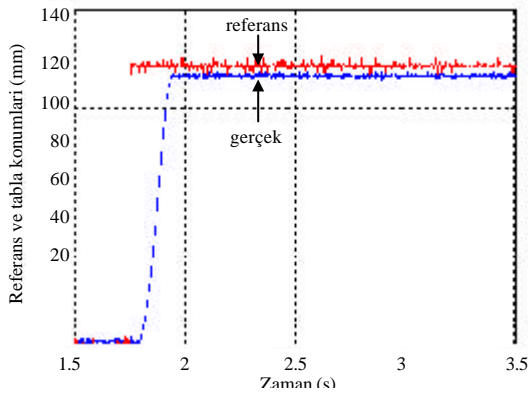
Sistem yanıtlarından aşağıdaki sonuçlar gözlemlendi. Oransal denetleyici az miktarda asma ile yaklaşık 3.5 mm sürekli rejim hatası gösterdi (Şekil 5). Türev teriminin ilavesiyle PD denetleyicisi asmayı engelledi fakat sürekli rejim hatasını engelleyemedi (Şekil 6). PI ve PID denetleyicilerinde bulunan integral eylemi Şekil 7 ve 8'de görüldüğü gibi, sürekli rejim hatasını giderdi, fakat periyodu yaklaşık 0.8 s olan süren salınımlara sebep oldu. Bu sonuç şu şekilde açıklanabilir: sistemin transfer fonksiyonunda zaten bir integratör bulunmaktadır, diğer bir integratörün ilavesiyle kuru sürtünme ve havanın sıkıştırılabilirliği gibi doğrusal olmayan etkilerin birleşmesi salınımlı davranışa sebep olmaktadır. Bu davranış, silindirde yeterli basıncın birikmesiyle statik sürtünmenin yenilmesi sonucu oluşan gecikmeyle de ilişkilidir. Tüm durumlar için sistem yaniti ve referans işaretinde yüksek frekans gürültüsü görüldü. Bu gürültüler muhtemelen elektriksel gürültü girişimi, topraklama gürültüsü ve sistemdeki ölçüm gürültüsünden kaynaklanmaktadır.



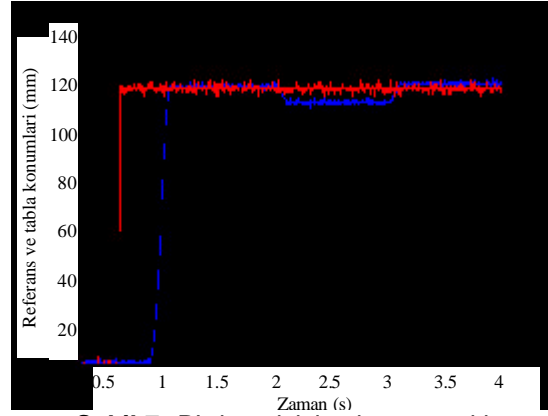
Şekil 4. Sinirda kararlılık noktasındaki sistem yaniti (T_u değerini tespit etmek için)



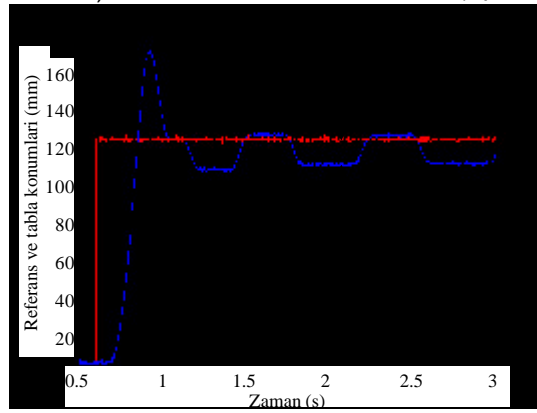
Şekil 5. Oransal denetleyiciyle sistem yaniti ($K_p = 1.1$)



Sekil 6. PD denetçisiyle sistem yaniti
($K_p = 1.76$, $K_d = 39.07$)



Sekil 7. PI denetçisiyle sistem yaniti
($K_p = 0.99$, $K_i = 6.3$)



Sekil 8. PID denetçisiyle sistem yaniti
($K_p = 1.32$, $K_i = 14.3$, $K_d = 29.3$)

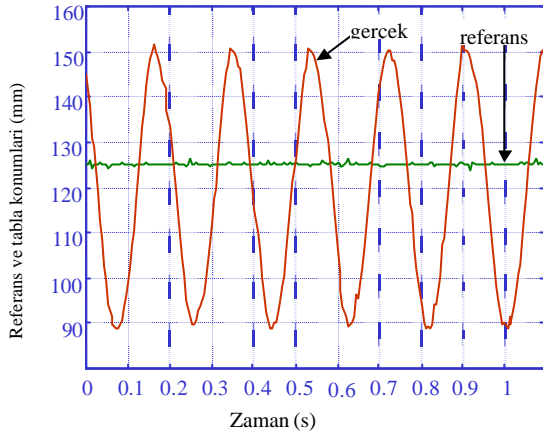
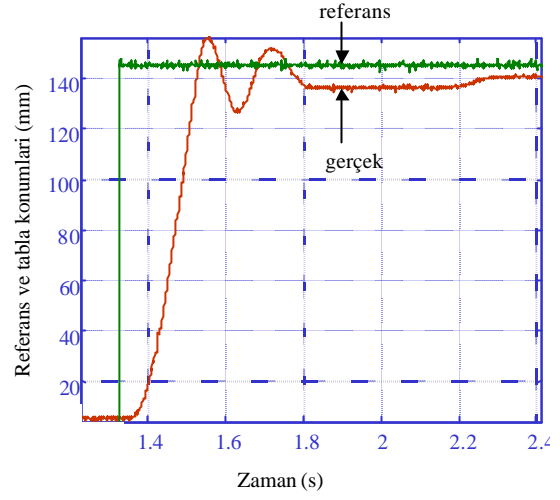
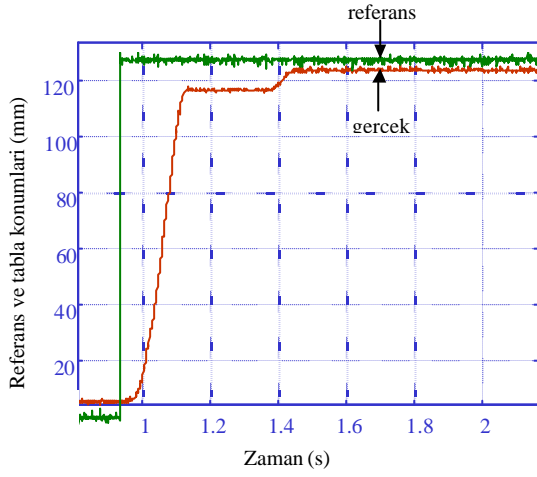
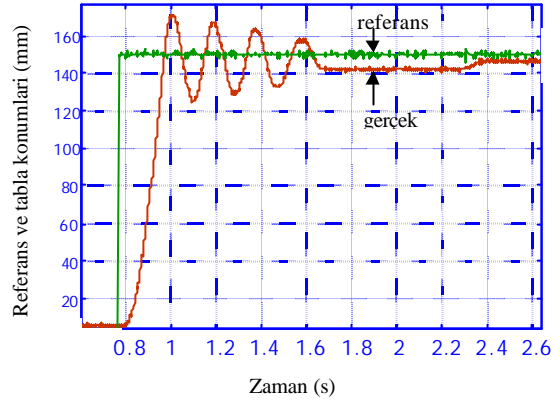
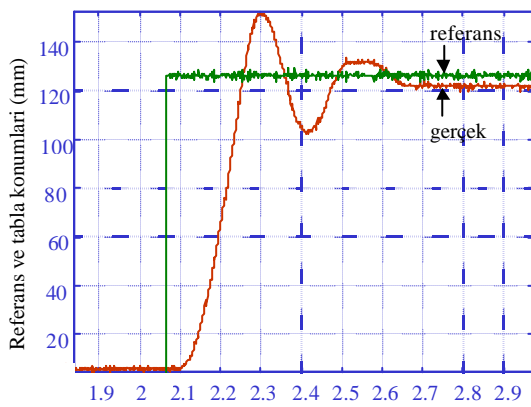
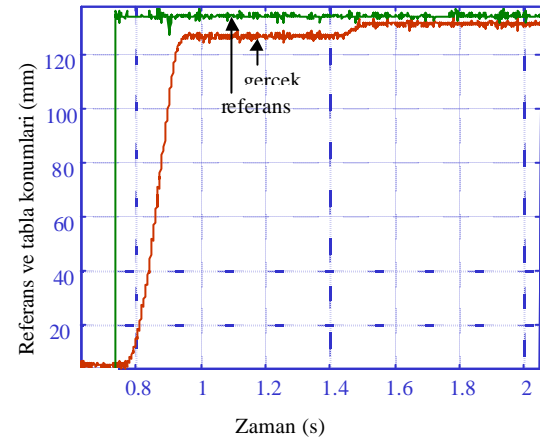
4.2. Durum Denetleyicisi Sonuçları

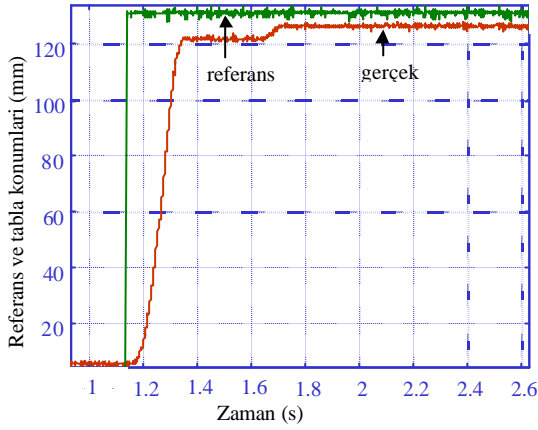
Durum denetleyicisinin ayarlanmasında sezgisel bir yöntem kullanıldı. Oransal katsayı K_x üç degerine eristiginde sistem kararsız hale gelmektedir. Bu davranis Sekil 9'da gösterilmistir.

Hiz geri beslemesi ilave edilerek, hiz katsayisi K_x iki degerine ayarlandiginda, Sekil 10'da görüldüğü gibi hafifçe sönümlü bir yanit elde edildi. Yalnız, sürekli rejim hatasi giderilemedi. Bu sebeple hiz katsayisi Sekil 11'de görüldüğü gibi yediye çıkarıldı. Bu kez asma görülmeyi, fakat oldukça yavas bir yanit elde edildi. Belirli denetleyici katsayilari için iki basamakli yanit karakteristigi tespit edildi. Klasik PID denetleyicisinde olduğu gibi, hiz katsayisinin genel olarak salinimlari sönümleme ve kararlıligi artırma özellikleri görüldü.

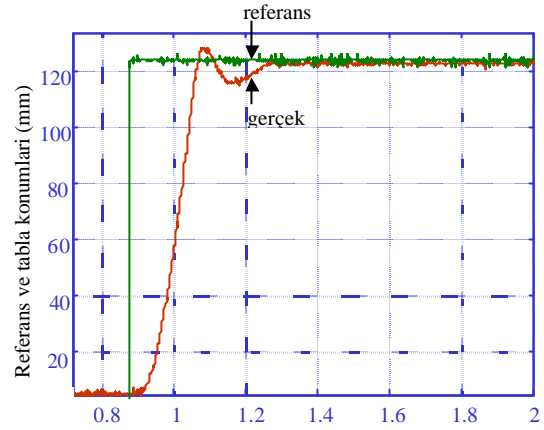
Daha sonra, oransal katsayı sabit tutularak ($K_x=3$), 2.7 degerinde ivme geribeslemesi uygulandı; sistem yaniti Sekil 12'de görülmektedir. Salinimlar ortadan kayboldu fakat yaklaşık 20 mm gibi yüksek bir asma ve sürekli rejim hatasi gözlemlendi. Yükselme zamani hiz geribeslemesine göre daha düşük çıktı. Ivme katsayisi, ayarlanabilecek en yüksek deger olan 10'a getirildiginde, Sekil 13'de görülen yanit elde edildi. Bu yanitta, ivme katsayisinin salinimlari engelleyemedigi görüldü. Ivme katsayisinin genel olarak sistem yanitininin hizlandırma etkisi olduğu tespit edildi.

Sekil 14-16'da görülen yanitlarda birlesik hiz ve ivme geribeslemesi uygulandı. Oransal, hiz ve ivme katsayilarinin sistem yanitina etkileri su sekilde özetlenebilir; oransal katsayinin artisi göreceli olarak daha kararsiz sistem yanitina sebep olmaktadır. Fakat bu artis, sürekli rejim hatasini ve sistem hizini artırir. Bu gözlem klasik oransal denetimdekine benzerdir. Hiz katsayisi salinimlari azaltir ve sistem kararlıligini artırir. Ivme katsayisi asmayı engelleyememektedir.

**Sekil 9.** $K_x = 3$ için sistem yaniti**Sekil 10.** $K_x = 3, K_{\dot{x}} = 2$ için sistem yaniti**Sekil 11.** $K_x = 3, K_{\dot{x}} = 7$ için sistem yaniti**Sekil 12.** $K_x = 3, K_{\dot{x}} = 2.7$ için sistem yaniti**Sekil 13.** $K_x = 3, K_{\dot{x}} = 10$ için sistem yaniti**Sekil 14.** $K_x = 3, K_{\dot{x}} = 7, K_{\ddot{x}} = 10$ için sistem yaniti



Sekil 15. $K_x = 3, K_{\dot{x}} = 7, K_{\ddot{x}} = 5$ için sistem yaniti



Sekil 16. $K_x = 5, K_{\dot{x}} = 7, K_{\ddot{x}} = 5$ için sistem yaniti

SONUÇ

Bu çalışmada otomatik kontrolün temel kavramlarını göstermek üzere, eğitim amaçlı tek eksenli pnömatik bir konumlama sistemi kuruldu ve test edildi. PID ve durum denetim yöntemleri uygulandı ve sonuçları incelendi. Sistemin denetiminde PID denetleyicisinin gereksinimleri sağlamada yetersiz kaldığı gözlemlendi. Durum denetleyicisinin salınımsız ve sürekli rejim hatası az olan yanıt vermede daha başarılı olduğu görüldü.

Bu sistem, akışkan gücü kontrolü, kontrol teorisi veya sistem tanımlama konularında eğitim veya araştırma amaçlı kullanılabilir. Yalnız, gürültülerin kaynağı ile onları ortadan kaldıracak yöntemler üzerinde daha hassasiyetle durulmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] BRUER, S., BLIESENER, M., "UCC Axis Controller Operator's Manual", FESTO, 1994.
- [2] LEHMLER G., RUOFF, J., KIRCH, Z., WILLIAMS, B., "Programming and Commissioning of Servopneumatic Drives", FESTO, 1994.
- [3] FRANKLIN, G.F., POWELL, J.D., EMAMI-NAEINI, A., "Feedback Control of Dynamic Systems", Addison-Wesley Publishing Company, 1994.
- [4] MCCLOY, D., MARTIN, H.R., "The Control of Fluid Power", John Wiley & Sons, 1973.
- [5] "Quick Reference Guide for the Controller UCC100", FESTO, 1994.



ÖZGEÇMİSLER

Koray K. SAFAK

Bogaziçi Üniversitesi'nden 1995 yılında Makina Mühendisliği lisans, 1997 yılında ise Sistem ve Kontrol Mühendisliği yüksek lisans diploması aldı. Makina Mühendisliği doktorasını biyomimetik sualtı robotunun modellenmesi ve analizi konusunda 2001 yılında Northeastern Üniversitesinde tamamladı. Dinamik sistemlerin modellenmesi, simülasyonu ve kontrolü ile robotik konularında çalışmalar yapmaktadır. Yeditepe Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü'nde yardımcı doçent olarak çalışmaktadır. ASME International üyesidir.

Osman S. TÜRKAY

1978 yılında Bogaziçi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Yüksek Lisans diplomasını 1979 yılında Sussex Üniversitesi'nden Kontrol Mühendisliği dalından aldı. Aynı yıl Sussex Üniversitesinde Research Fellow bursu kazanarak doktorasını Makina Mühendisliği Anabilim dalında mil titresimleri ve kaymalı yataklar konusunda 1984 yılında tamamladı. 1985-86 yılında ITÜ Uçak ve Uzay Bilimleri fakültesinde, 1986-1988 yıllarında Bogaziçi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümünde yardımcı doçent olarak çalıştı. Bogaziçi Üniversitesi'nde 1988 yılında doçent, 1995 yılında profesör oldu. 2002 yılından beri Yeditepe Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesinde dekan yardımcısı olarak çalışmaktadır. Otomatik kontrol ve makina mühendisliği konularında yayınlanmış uluslararası ve ulusal kırk kadar makale ve bildirisi mevcuttur. Festo A.S. didaktik yayınlarından "Pnömatikle Maliyetlerin Azaltılması" kitabının ortak çevirmenliğini yapmıştır (1987).

1991-1995 yılları arasında Arçelik A.S. Arastırma-Gelistirme bölümünde çamasır makinalarının dinamik modellenmesi konusunda danışman araştırmacı olarak çalışmıştır.

TMMOB-MMO üyesi ve ASME International Türkiye Subesi kurucu başkan/üyelerindedir.