

# PULS GENİŞLİĞİ MODÜLASYONLU ELEKTROHİDROLİK BİR SERVO SİSTEMİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

**Ömer KELEŞ ve Yücel ERCAN**

Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Maltepe 06570, Ankara,  
[omer@gazi.edu.tr](mailto:omer@gazi.edu.tr), [vercan@gazi.edu.tr](mailto:vercan@gazi.edu.tr)

## ÖZET

Bu çalışmada, puls genişliği modülasyonlu elektrohidrolik bir servo sisteminin açık ve kapalı çevrim davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Elektrohidrolik servovalf, piston-silindir ve yükten oluşan elektrohidrolik servo sisteminin puls genişliği modülasyonlu girişler için konum kontrolü deneysel olarak yapılmıştır. Puls genişliği modülasyonlu basamak, rampa ve sinüsoidal referans girişler için açık ve kapalı çevrim sistemlerin cevapları bulunmuştur. Puls frekansının sistem cevabı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu inceleme neticesinde, ele alınan sisteme sinüsoidal referans giriş uygulandığında puls frekansının referans giriş frekansına oranının en az 50 olması gerektiği sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Puls genişliği modülasyonu, elektrohidrolik sistem, elektrohidrolik servovalf, hidrolik konum kontrolü.

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF A PULSE-WIDTH MODULATED ELECTRO-HYDRAULIC SERVO SYSTEM

### ABSTRACT

In this study, the open loop and closed loop behaviors of a pulse-width modulated electro-hydraulic system are investigated experimentally. The position of the load of a system which consists of an electro-hydraulic servovalve, a power cylinder and the load is controlled by using pulse-width modulated inputs to the servovalve. Open-loop and closed-loop responses of the system are obtained for step, ramp and sinusoidal reference inputs. Effect of pulse frequency on the system response is investigated. Results indicate that pulse frequency should be at least 50 times the reference frequency for the specific system used in the experiments.

**Keywords:** Pulse-width modulation, electro-hydraulic system, electro-hydraulic servo valve, hydraulic position control.

### GİRİŞ

Hidrolik sistemler, hızlı cevap, büyük güç uygulayabilme ve yüksek hassasiyet gibi üstünlükleri nedeni ile, uçak sanayii, endüstriyel robotlar, savunma sanayii ve bilgisayar kontrollü takım tezgahları gibi dalları da içine alan oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bilgisayar teknolojisinde son yıllarda kaydedilen büyük gelişmeler ve fiyatlarındaki düşüşler sonucu, bu cihazlar diğer kontrol uygulamalarının yanı sıra akışkan gücü kontrolünde da kullanılmaya başlanmıştır. Sayısal hidrolik sistemler karmaşık kontrol stratejileri ve referans girişleri uygulayabilmekte, kontrol sisteminin parametrelerinin değişimine kolayca olanak

vermektedir. Bu tür sistemler PC ve veri toplama/kontrol kartı gibi standart donanımlar sayesinde makul bir fiyata kurulabilmektedir [1-7].

Özellikle yavaş hareket eden hidrolik tahrik sistemlerinde bazı problemler vardır. Bunlardan en önemlisi, “stick-slip” denilen sistemin tutuk hareket etmesi olayıdır. Diğer bir problem de, hidrolik yağın içinde bulunan kir ve benzeri maddelerin yavaş hareket esnasında valf orifislerini tıkamasıdır. Son yıllarda oldukça geniş bir kullanım alanına sahip olan puls genişliği modülasyonu tekniği ile, bu tip problemlerin ortadan kaldırılabilmesi ya da azaltılabileceği yapılan deneysel çalışmalarla gösterilmiştir [1-7]. Ayrıca bilgisayar yapısına uygun

olması da bu tekniğin avantajlarından biridir. Puls genişliği modülasyonu tekniği, hidrolik sistemlere ekonomik yönden de fayda sağlamaktadır. Bu teknik sayesinde, servovalfe göre daha ucuz bir valf olan, selenoid valflerle servo sistemler oluşturulabilmektedir [1-6]. Bu tekniğin uygulandığı servovalf kullanılan sistemlerde, valf işaret değiştiren darbelerle çalıştığından, yavaş hareket istenilen durumlarda tutukluğu ortadan kaldırmakta ve valfin içindeki orifislerde mil oluşmasını önleyerek hareketin daha yavaşlamasına ya da durmasına engel olmaktadır [7].

Puls genişliği modülasyonu tekniği 1938 yılında Reeves tarafından bulunmuş [8-10] ve 1950 yılında Jackson tarafından geliştirilmiştir [11]. Bu teknik hidrolik kontrol sistemlerinde ilk olarak 1950'li yılların sonlarına doğru kullanılmıştır. Murtaugh tarafından geribeslemeli bir servovalfin geribesleme bağlantısı ortadan kaldırılmış, makara ve diğer elemanlar arasındaki toleranslar daha büyük tutularak daha düşük maliyetli bir hızlı anahtarlama valfi elde edilmeye çalışılmıştır [12]. Daha sonra Murtaugh elde ettiği bu hızlı anahtarlama valfine puls genişliği modülasyonu tekniğini uygulamış ve başarılı olmuştur. O yıllardaki elektronik teknolojisi günümüzdekinden çok farklı olduğundan, puls genişliği modülasyonlu sinyalin elde edilmesinde lambalı devreler kullanılmıştır. Ikebe ve Nakada basit yapıda bir servovalf elde etmek amacıyla, normal bir servovalfte tork motorlu kanatçığın yerine piezokristalle sürülen bir kanatçık yerleştirmiştir [13]. Piezokristalli kanatçığın lineer olmayan etkilerini gidermek için de kanatçık puls genişliği modülasyonlu sinyallerle sürülmüştür. Yapılan frekans cevabı deneylerinde iyi sonuçlar elde edilmiş ve bu sonuçlar klasik servovalf cevapları ile karşılaştırılarak, piezokristal kanatçıklı servovalfin klasik bir servovalf kadar iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Suematsu vd. yaptıkları çalışmada, iki adet üç yollu selenoid valf tarafından sürülen hidrolik bir piston-silindir, bu piston-silindirin pistonuna direkt bağlı dört yollu hidrolik makaralı bir valf ve makaralı valf tarafından sürülen hidrolik bir yük silindirinden oluşan bir sistem kurmuştur [1,3]. Selenoid valflere puls genişliği modülasyonu tekniği uygulanmıştır. Selenoid valfler tarafından sürülen birinci piston-silindir lineer bir kontrol elemanı gibi düşünülmüştür. Suematsu vd. yaptıkları deneysel çalışmalarla, puls genişliği modülasyonlu sinyal ile sürülen selenoid valflere bağlı birinci piston-silindiri lineer eleman gibi kullanmayı başardıklarını göstermiştir. Muto vd. çalışmalarında, iki adet yüksek hızlı üç yollu selenoid valf tarafından sürülen hidrolik bir piston-silindirden oluşan sistemi ele almıştır [2]. Selenoid valflerin lineer olmayan valf karakteristiklerini ve ölü bölge problemini giderebilmek için sisteme puls genişliği modülasyonu tekniği uygulanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarla, puls genişliği modülasyonu tekniği kullanılarak bu problemlerin minimuma indirilebildiği gösterilmiştir.

Bu sistemle, 15 µm hata payı ile konum kontrolü yapılmıştır. Muto vd. diğer bir çalışmalarında iki adet selenoid valf kullanan sayısal kontrollü bir hidrostatik transmisyon sistemine puls genişliği modülasyonu tekniğini uygulamış ve yapılan deneylerde iyi kontrol performansı elde etmişler [5]. Sakai vd. selenoid valfler kullanılan, bağımsız üç üniteye sahip, 6 serbestlik dereceli elektrohidrolik bir manipülatöre puls genişliği modülasyonunu uygulamıştır [4]. 2050 mm uzunluğunda ve 92 kg ağırlığında olan bu manipülatörle, 35 kg'lık yükün 3 mm hassasiyetle konum kontrolü yapılmıştır. Jeronymo vd. düşük maliyetli hidrolik servo sistemleri elde etmek amacıyla hızlı anahtarlama özelliğine sahip selenoid valfler üzerine çalışmıştır [6]. Selenoid valflerin lineer olmayan ve kesikli valf karakteristiklerinin sisteme olan etkilerini bertaraf etmek veya en aza indirmek için selenoid valflere puls genişliği modülasyonu tekniği tatbik edilmiş ve başarılı olunmuştur. Mansfeld bilya tipi oturma elemanlı valflerin tork motoru yolu ile çok hızlı anahtarlama (1 ms mertebelerinde) üzerine çalışmıştır [14]. Bu valflerin sürülmesinde puls genişliği modülasyonu tekniği uygulanmış ve başarı sağlanmıştır.

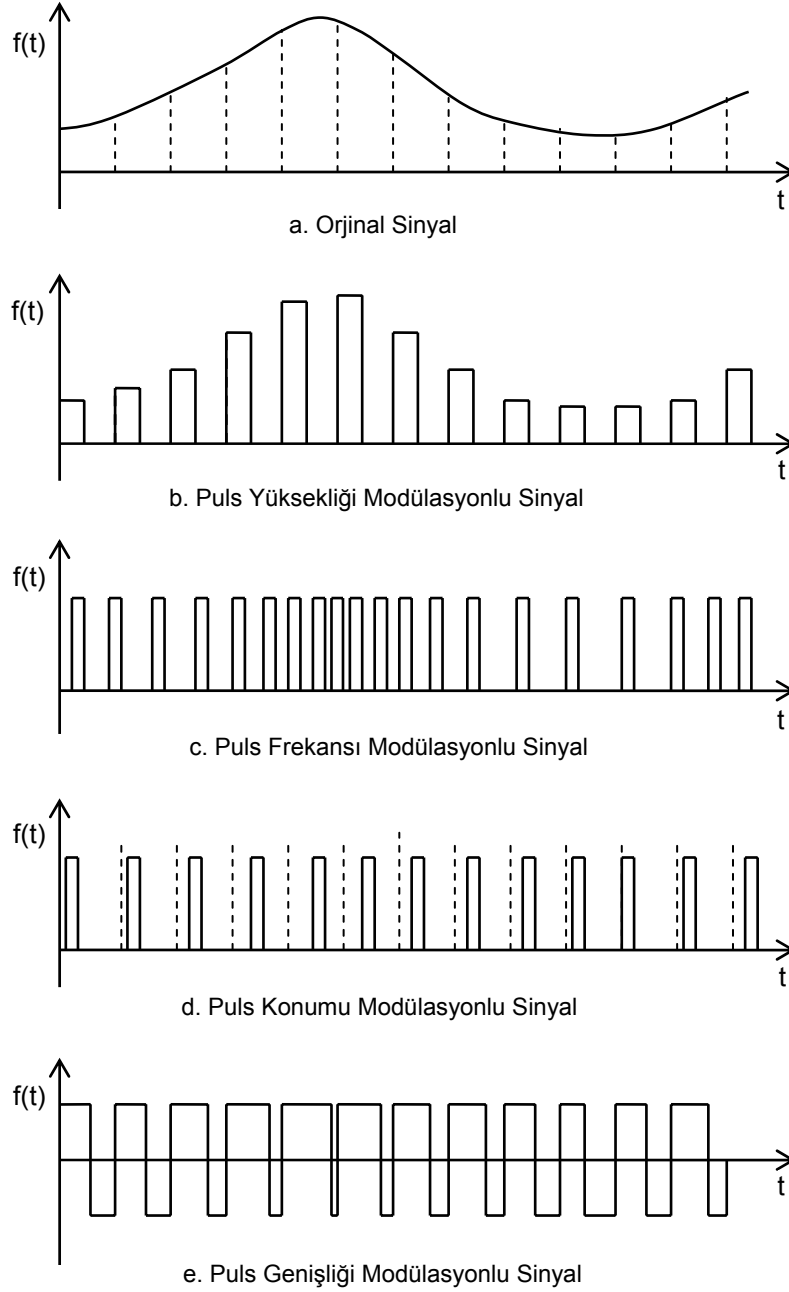
Son yıllarda yeni tasarımı yapılan hidrolik servo sistemlerde, sayısal teknolojinin getirdiği avantajlar ve puls genişliği modülasyonu tekniği sayesinde servovalflerin yerini yüksek hızlı selenoid valflerin aldığı görülmektedir [1-6]. Ancak, günümüzde servovalf kullanılan analog hidrolik servo sistemlerin yaygın olarak kullanıldığı da bir gerçektir. Bu nedenle bu çalışmada, mevcut analog hidrolik servo sistemlerin sayısal hidrolik servo sistem haline dönüştürülerek kabiliyetlerinin ve performanslarının artırılması düşünülmüş ve servovalf kullanılan puls genişliği modülasyonlu hidrolik bir servo sistem incelenmiştir.

## PULS MODÜLASYONU

Puls modülasyonu, elektronikte özellikle haberleşme alanında ve motorların hız kontrolünde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Yükün düşük hızlarda sürüldüğü hidrolik sistemlerde karşılaşılan tutukluk ve hız düşmesi problemlerine çözüm getirdiği ve bilgisayar uygulamalarına müsait olduğu için hidrolik kontrolde kullanımı da gündeme gelmiştir. Verilen bir sinyale puls modülasyonu başlıca dört biçimde uygulanmaktadır:

- Puls yüksekliği modülasyonu
- Puls frekansı modülasyonu
- Puls konumu modülasyonu
- Puls genişliği modülasyonu

Puls yüksekliği modülasyonunda, pulsün genişliği ve frekansı sabit olup, pulsün yüksekliği modüle edilen sinyalin (Şekil 1.a) büyüklüğüne bağlı olarak, zamana göre değişkendir (Şekil 1.b). Pulsün işareti ise modüle



**şekil 1.** Puls modülasyonu türleri

edilen sinyalin işaretine göre seçilir. Puls yüksekliği modülasyonunda modüle edilen sinyalin büyüklüğü azaldığında pulsların büyüklüğü de azalacağından, hidrolik kontrolde kullanıldığı takdirde düşük hızlarda tutukluk ve orifislerde mil teşekkülü gibi problemler ortaya çıkabilir.

Puls frekansı modülasyonunda ise, puls yüksekliği ve genişliği sabit olup, pulsun frekansı zamana göre değişkendir (şekil 1.c). Bu teknik, frekans modülasyonu kullandığından karmaşık elektronik aygıtlar gerektirir. Özel arabirimler ve aygıtlar olmadan normal bilgisayarlarla uygulanması bu günkü teknolojiyle mümkün değildir. Diğer yandan negatif işaretili sinyallerin modülasyonu için özel

tedbirler alınması gereklidir. Bu ise sistemi daha da karmaşık hale getirir.

Puls konumu modülasyonunda, pulsun yüksekliği, genişliği ve frekansı sabit tutulmakta, pulsun bir periyot içindeki konumu zamana göre değiştirilmektedir (şekil 1.d). Bu tekniğin hidrolik kontrole uygulanması da özel cihazlar geliştirilmesini ve negatif sinyalleri pozitif sinyallerden ayıracak özel tedbirler alınmasını gerektirir.

Puls genişliği modülasyonunda, sabit genlikli bir pozitif bir de negatif pulstan yararlanılır. Birbirini izleyen pozitif ve negatif iki pulsun toplam süresi daima sabittir. Ancak pozitif ve negatif pulsların

birbirlerine göre uzunluğu modüle edilen sinyalin büyüklük ve işaretine göre değişir (Şekil 1.e).

Elektrohidrolik kontrolde puls genişliği modülasyonu tekniği kullanılmaktadır. Elektrohidrolik kontrolde puls genişliği modülasyonunun tercih edilmesinin en önemli nedeni, puls genişliği modülasyonunun biri pozitif diğeri negatif olmak üzere puls çiftlerinden oluşmuş olmasıdır. Bu sinyal yapısı uygulamada yüksek hızlı solenoid valflerin açık/kapalı biçimde kullanılmasına olanak sağlar. Servovalf kullanılan sistemlerde ise sistemi işaret değiştiren darbelerle çalıştırdığından yavaş hareketin istendiği sistemlerde tutukluğu ortadan kaldırır ve valfin içindeki orifislerde mil oluşmasını önleyerek hareketin yavaşlamasına mani olur.

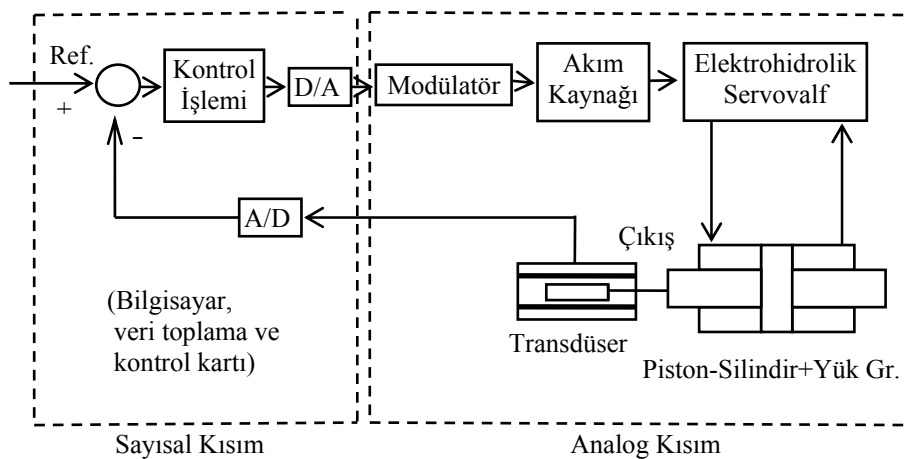
Modülasyon yapısı hem pozitif hem de negatif işaretli sinyallerle kullanmaya uygundur. Puls yüksekliğinin ve frekansının sabit olması uygulamada kolaylık sağlar; sistemin karmaşıklığını azaltır; sistemin tasarım ve analizini kolaylaştırır [7].

## SİSTEM YAPISI

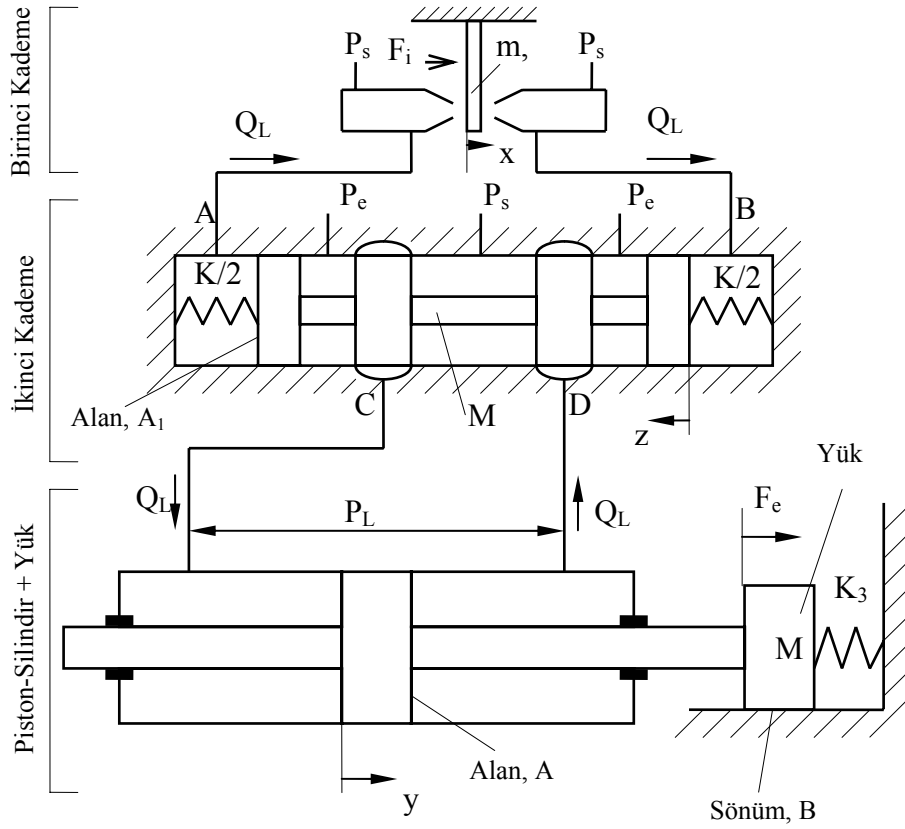
Bu çalışmada ele alınan sistem, analog puls genişliği modülasyonlu sistemlere göre daha üstün özelliklere sahip olan sayısal bir puls genişliği modülasyonlu elektrohidrolik servo sistem olup, yapısı Şekil 2'de şematik olarak verilmiştir. Sistem sayısal ve analog olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır. Sayısal kısım bilgisayar, veri toplama ve kontrol kartından oluşmaktadır. Kontrol işleminin seçimi, kontrol parametrelerinin belirlenmesi, istenen referans girişinin sağlanması sayısal ortamda yapılmaktadır. Analog kısım ise puls genişliği modülatörü devresi, akım kaynağı (servo yükseltici), elektrohidrolik servovalf, piston-silindir ve yük grubu ile konum transdüserinden meydana gelmiştir. Böylece, sayısal kontrolün sağladığı kullanım esnekliği ile puls genişliği modülasyonunun sağladığı performans özellikleri bir araya getirilmektedir.

Bu sistemde, analog/sayısal (A/D) ve sayısal/analog (D/A) dönüşümleri yapabilmesi amacıyla normal bir bilgisayarın içine bir veri toplama ve kontrol kartı takılmıştır. Sistemin çalışması sırasında analog transdüser çıkışı bilgisayar tarafından A/D dönüştürücü kullanılarak belli zaman aralıklarıyla okunur. Okunan değer sayısal hale getirilir ve bir sonraki okumaya kadar saklanır. Bu değer bilgisayarın hafızasında bulunan ya da yine örnekleme yoluyla bilgisayar tarafından okunan referans değeri ile karşılaştırılarak hata bulunur. Hataya kontrol işlemi uygulanarak sisteme gönderilecek kontrol girişi önce sayısal olarak elde edilir, sonra da bilgisayardaki D/A dönüştürücüyle analog bir gerilim haline getirilir. Bu gerilim yeni bir kontrol çıkışı hesaplanıncaya kadar sabit tutulur. Bilgisayardan elde edilen bu analog gerilim sistemin analog kısmına kontrol girişi olarak beslenir. Sinyal önce puls genişliği modülatörü ile puls genişliği modülasyonlu bir gerilim sinyali haline dönüştürülür, sonra da akım kaynağına gönderilerek puls genişliği modülasyonlu bir akım sinyaline dönüştürülür. Bu amaç için akışkan gücü kontrol sistemlerinde kullanılan normal bir servo yükselticiden yararlanılabilir. Akım kaynağından çıkan sinyal elektrohidrolik servovalfi tahrik eder. Servovalf de piston-silindiri tahrik ederek yükün sürülmesini sağlar.

Bu sistemde kullanılan servovalf, piston-silindir ve yük grubu basitleştirilmiş olarak Şekil 3'de görülmektedir. Elektrohidrolik servovalf, birinci kademesi kanat-nozul tipinde olan iki kademeli bir servovalftir ve  $P_s$  sabit basıncındaki hidrolik akışkanla beslenmektedir. Akım kaynağından gelen akım sinyali ile tahrik edilen moment motoru birinci valf kademesini, birinci valf kademesinin hidrolik çıkışı da ikinci valf kademesini tahrik etmektedir. Valfin ikinci kademesiyle birinci kademesi arasında geribesleme elemanları yoktur. Servovalfin ikinci kademe çıkışı piston-silindir grubunu tahrik etmektedir. Servovalf, piston-silindir ve yükün detaylı modellenmesi [7]'de verilmiştir.



Şekil 2. Puls genişliği modülasyonlu sayısal elektrohidrolik servo sistemin yapısı

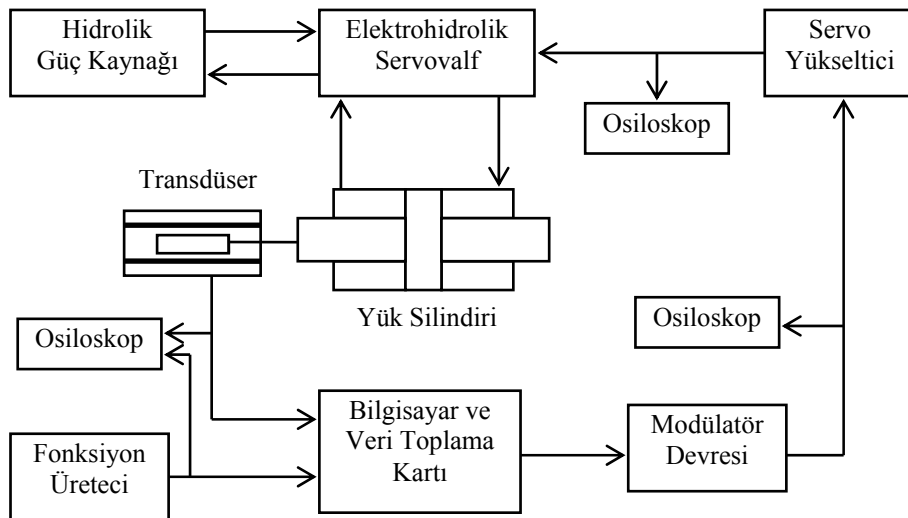


Şekil 3. Servovalf, piston-silindir ve yük

### DENEY DÜZENEGİ

Bu çalışmada ele alınan elektrohidrolik servo sistem, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü imkanları ile Otomatik Kontrol Laboratuvarı'nda kurulmuş ve tüm deneyler burada yapılmıştır. Deney düzeneğinin şematik diyagramı ise Şekil 4'de görülmektedir. Deney düzeneği hidrolik bir güç kaynağından beslenmektedir. Kontrol çevriminde veri toplama ve kontrol kartıyla donatılmış bir bilgisayar referans ve

geribesleme bilgilerini örnekleyerek karşılaştırma işlemini yapmakta ve kontrol işlemini belirleyerek analog bir kontrol çıkışı sağlamaktadır. Çevrimin ileri besleme hattında sırasıyla puls genişliği modülatörü, servo yükseltici, servovalf ve yük silindiri yer almaktadır. Geribesleme hattında ise yükün konumunu ölçen bir transdüser bulunmaktadır. Sisteme referans girişi bir fonksiyon üretici veya bilgisayar tarafından sağlanmaktadır.



Şekil 4. Deney düzeneğinin şematik diyagramı

## Hidrolik Güç Kaynağı

Hidrolik güç kaynağı basınç kompanseörlü, değişken deplasmanlı tipte pistonlu bir hidrolik yağ pompası, bunu süren 22 kW'lık bir elektrik motoru ve gerekli filtreleme elemanlarından oluşmaktadır. Pompanın çıkış basıncı 200 bar'a kadar ayarlanabilmektedir. 1450 d/dk'da ve 200 bar çıkış basıncında pompanın debisi yaklaşık 60 l/dk'dır. Deneylerde kullanılan hidrolik sistem parçalarının çoğunun kullanım basıncı 100 bar olduğundan deneyler sırasında 100 bar kaynak basıncı kullanılmıştır.

## Elektrohidrolik Servovalf

Bu çalışmada MOOG marka 931 model bir elektrohidrolik servovalf kullanılmıştır. Valfin en yüksek çalışma basıncı 200 bar olmasına rağmen, diğer elemanlarla uyumluluk sağlanması için 100 bar'da çalıştırılmıştır. Valf iki kademeli olup, birinci kademesi kanat-nozul tipinde, ikinci kademesi ise makaralı tiptedir. İki kademe arasında herhangi bir geribesleme elemanı bulunmamaktadır. Birinci valf kademesi elektromanyetik olarak bir moment motoru tarafından sürülmektedir. Bu amaçla valfe sağlanan giriş akımının maksimum nominal değeri 13.25 mA'dır. İmalatçı firma, maksimum giriş akımında ve 3000 psi ( $\approx 207$  bar) basınç farkında valften geçen debinin nominal değerini 2.5 in<sup>3</sup>/s ( $\approx 0.041$  l/s) olarak vermiştir.

## Yük Silindiri

Deney düzeneğinde yükü sürmek için bir piston-silindir kullanılmıştır. Deneyler sırasında daha büyük genlikli konum değişiklikleri elde edebilmek amacıyla laboratuvarında bulunan silindirlerden en küçük alanlı ( $A=2,69 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>) seçilmiştir. Kullanılan silindir çift etkili ve çift kollu pistonla sahiptir.

## Konum Transdüseri

Deney düzeneğinde SENSOTEC marka, MDL 3000 model, DCDT tipi bir konum transdüseri kullanılmıştır. Silindirik ve paslanmaz çelik gövdeli

olan transdüserin ölçüm sınırları  $\pm 76$  mm'dir. Transdüserle birlikte gelen kalibrasyon sertifikasında transdüser dönüşüm katsayısı  $K_f=0.06768$  V/mm olarak verilmiştir.

## Servo Yükseltici

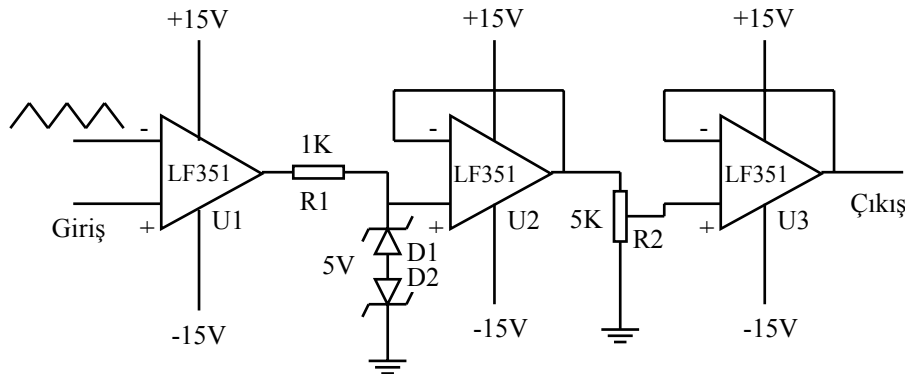
Deneylerde MOOG marka, E082-300-100 model, oransal kontrol yapabilen ve oransal kazancı ayarlanabilen, gerilim girişli ve akım çıkışlı bir DC servo yükseltici kullanılmıştır. Servo yükselticinin kazancı  $K_p = 3-50$  mA/V aralığında kesintisiz ayarlanabilmektedir. İki değişken kazançlı olmak üzere dört adet girişi mevcuttur. Servo yükseltici puls genişliği modülasyonlu deneylerde sadece akım kaynağı olarak kullanılmıştır.

## Bilgisayar, Veri Toplama ve Kontrol Kartı

Deneylerde 80486-DX2-66 MHz'lik işlemciye sahip, 8 MB RAM'i olan bir PC tipinde bilgisayar kullanılmıştır. Bilgisayara MetraByte marka, DAS20 model veri toplama ve kontrol kartı takılmıştır. Bu kart analog-sayısal ve sayısal-analog dönüşüm işlemlerini yapabilmektedir. Kart 16 tek veya 8 çift uçlu analog giriş kanalı ve 2 adet analog çıkış kanalına sahip olup analogtan sayısala saniyede 100000 dönüşüm yapabilmektedir.

## Puls Genişliği Modülatörü

Puls genişliği modülatörü, laboratuvarında geliştirilmiş bir elektronik devredir. Devre şeması Şekil 5'de verilen bu elektronik devre, bilgisayardan gelen analog sinyalleri puls genişliği modülasyonlu analog sinyallere dönüştürerek servo yükselticiye göndermektedir. Modülatörde temel eleman olarak 4 MHz band genişliğine sahip, FET girişli işlemsel yükselteç olan LF351 entegre devreleri kullanılmıştır. Modülatörün çalışması sırasında, üretilmesi istenilen puls genişliği modülasyonlu sinyalin frekansına eşit frekansta bir üçgen dalga fonksiyon üreticinden sağlanır. Modülatördeki U1 entegresi, fonksiyon üreticinden gelen üçgen dalga ile bilgisayardan gelen



Şekil 5. Puls genişliği modülatörünün devre şeması

giriş gerilimini karşılaştırarak  $\pm 15 V$  genlikli puls genişliği modülasyonlu sinyal üretmektedir.  $D1$  ve  $D2$  diyotları yardımıyla  $\pm 15 V$  genlikli puls genişliği modülasyonlu sinyalin genliği  $\pm 5.7 V$ 'da sabit tutulur.  $U2$  ve  $U3$  entegre devreleri tampon olarak kullanılmıştır.  $R2$  potansiyometresi ise, puls genişliği modülasyonlu çıkış sinyalinin genliğini ayarlamaktadır. Bilgisayardan gelen giriş sinyali  $\pm 4 V$  arasında değişmektedir. Giriş sinyali ile puls genişliği modülasyonlu çıkış sinyalinin puls genişlikleri arasında lineer bir ilişki vardır. Giriş sinyali  $0 V$  olduğunda çıkıştaki puls çiftlerinin genişlikleri birbirine eşit olmaktadır.

## DENEY SONUÇLARI

Puls genişliği modülasyonlu sistemin performansının deneysel olarak incelenmesi iki aşama halinde yürütölmüştür. İlk olarak açık çevrim sistemin basamak ve sinüsoidal cevapları bulunmuştur. Daha sonra kapalı çevrim sistemin basamak, sinüsoidal ve rampa cevap deneyleri yapılmıştır.

### Açık çevrim sistemin basamak cevabı

Açık çevrim basamak cevap deneyinde puls frekansından kaynaklanan salınımların belirlenmesi amacı ile yükseklęi sıfır olan basamak giriş için frekans taraması yapılmıştır. Bu deneyin sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

### Açık çevrim sistemin sinüsoidal cevabı

Açık çevrim sinüsoidal cevap deneyinde iki ayrı referans giriş frekansı için puls frekansı taraması

**Tablo 1.** Açık çevrim sistemin basamak cevap deney sonuçları

Puls Frekansı (Hz)	Puls Frekansındaki Salınımların Genliği (mm)
10	5.25
20	2.20
30	1.17
50	0.53
80	0.24
100	0.15
200	0.12
400	0.07
600	0.05

yapılmıştır. Bu deneyde frekans oranı ile genlik oranı arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Bu deneyin sonuçları Tablo 2'de verilmiştir.

### Kapalı çevrim sistemin basamak cevabı

Kapalı çevrim sistemin basamak cevabı deneyinde sabit kazanç ve sabit basamak yükseklęinde puls frekansı taraması yapılmıştır. Bu deneyin sonuçlarından tipik üç tanesi Şekil 6-8'de grafik halinde görölmektedir.

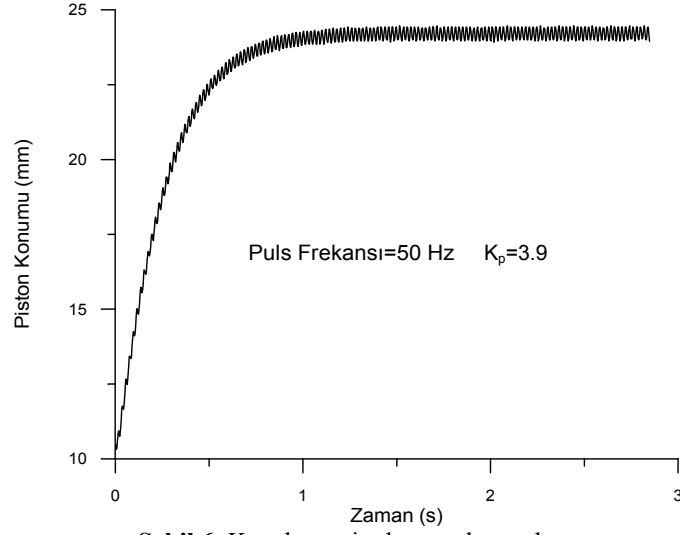
### Kapalı çevrim sistemin sinüsoidal cevabı

Kapalı çevrim sistemin sinüsoidal cevap deneyinde açık çevrimde olduğu gibi iki ayrı referans giriş frekansı için puls frekansı taraması yapılmıştır. Bu deneyde de frekans oranı ile genlik oranı arasındaki ilişki belirlenmeye çalışılmıştır. Bu deneyin sonuçları Tablo 3'de verilmiştir. Ayrıca 2 Hz'lik referans giriş için tipik üç deney sonucu grafik halinde Şekil 9-11'de verilmiştir.

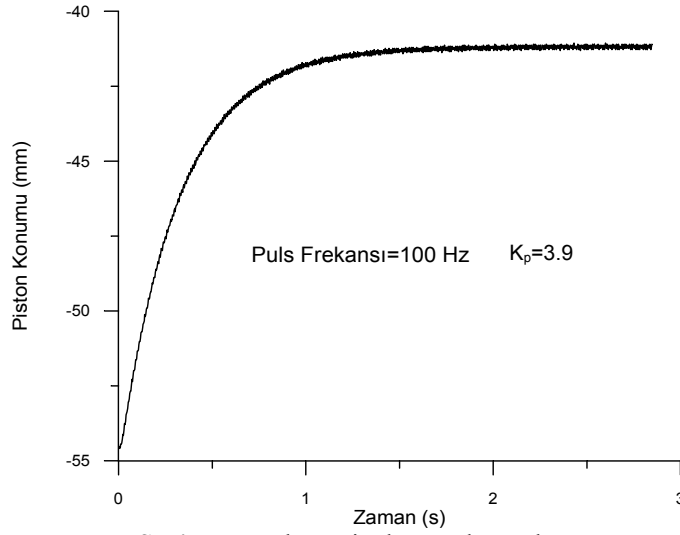
**Tablo 2.** Açık çevrim sistemin sinüsoidal cevap deney sonuçları

Puls Frekansı (Hz)	Sinüsoidal Referans Giriş Frekansı (Hz)	Frekans Oranı k	Deneysel Genlik Oranı(*) %
10	2	5	50
20	2	10	25
40	2	20	20
80	2	40	2
100	2	50	1.5
120	2	60	1.4
160	2	80	1.1
200	2	100	1
400	2	200	<1
600	2	300	<1
1000	2	500	<1
50	10	5	48
100	10	10	23
200	10	20	16
400	10	40	1.9
500	10	50	1.4
600	10	60	1
800	10	80	<1
1000	10	100	<1

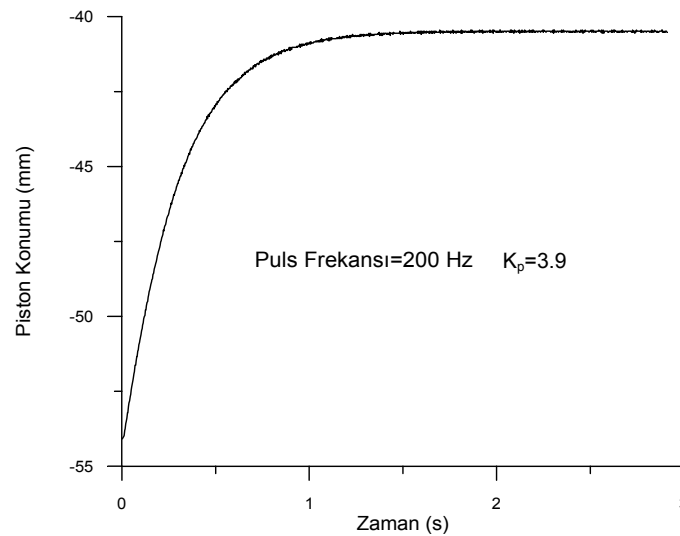
\* Puls frekansı bileşeni genliğinin referans frekansı bileşeni genliğine oranı



Şekil 6. Kapalı çevrim basamak cevabı



Şekil 7. Kapalı çevrim basamak cevabı



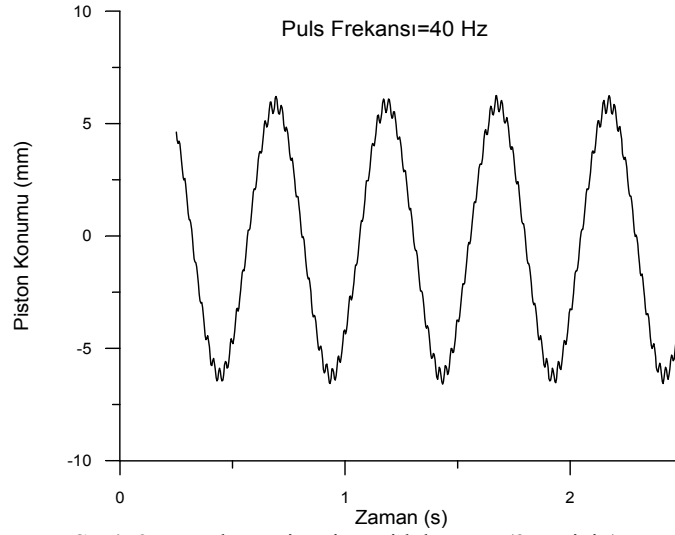
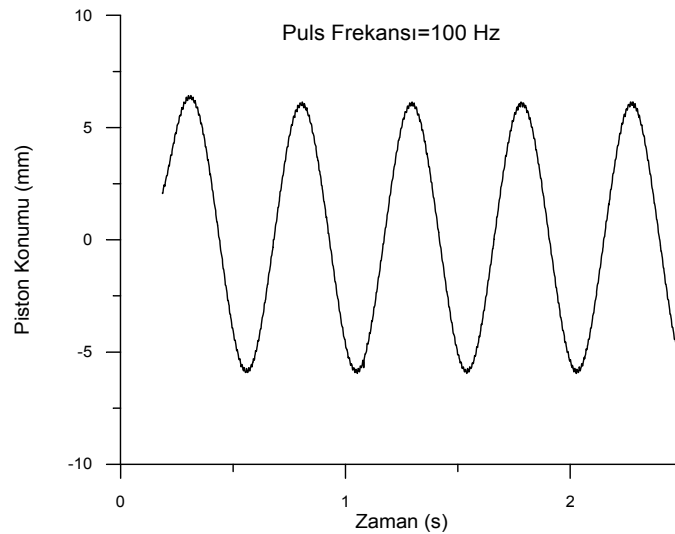
Şekil 8. Kapalı çevrim basamak cevabı

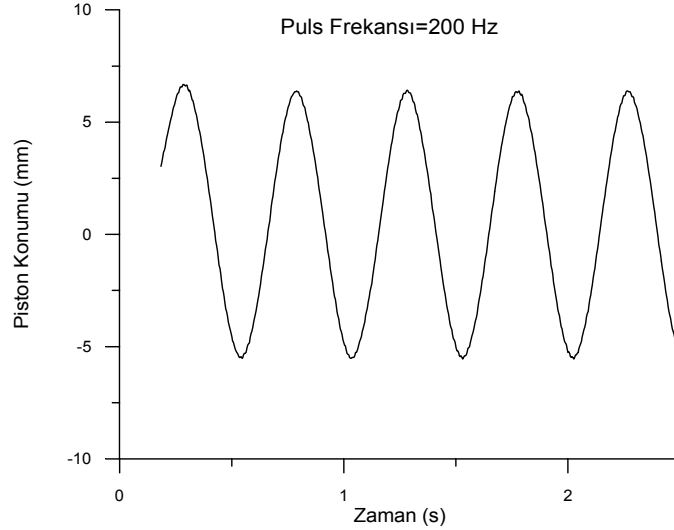


**Tablo 3.** Kapalı çevrim sistemin sinüsoidal cevap deney sonuçları

Puls Frekansı (Hz)	$K_p$	Sinüsoidal Referans Giriş Frekansı (Hz)	Frekans Oranı k	Genlik Oranı (*) %
10	20	2	5	0.364
20	20	2	10	0.157
40	20	2	20	0.063
80	20	2	40	0.017
100	20	2	50	0.013
120	20	2	60	0.011
160	20	2	80	<0.01
200	20	2	100	<0.01
400	20	2	200	<0.01
600	20	2	300	<0.01
1000	20	2	500	<0.01
50	20	10	5	0.159
100	20	10	10	0.047
200	20	10	20	0.037
400	20	10	40	0.016
500	20	10	50	<0.01
600	20	10	60	<0.01
800	20	10	80	<0.01
1000	20	10	100	<0.01

\* Puls frekansı bileşeni genliğinin referans frekansı bileşeni genliğine oranı

**Şekil 9.** Kapalı çevrim sinüsoidal cevap (2 Hz için)**Şekil 10.** Kapalı çevrim sinüsoidal cevap (2 Hz için)



Şekil 11. Kapalı çevrim sinüsoidal cevap (2 Hz için)

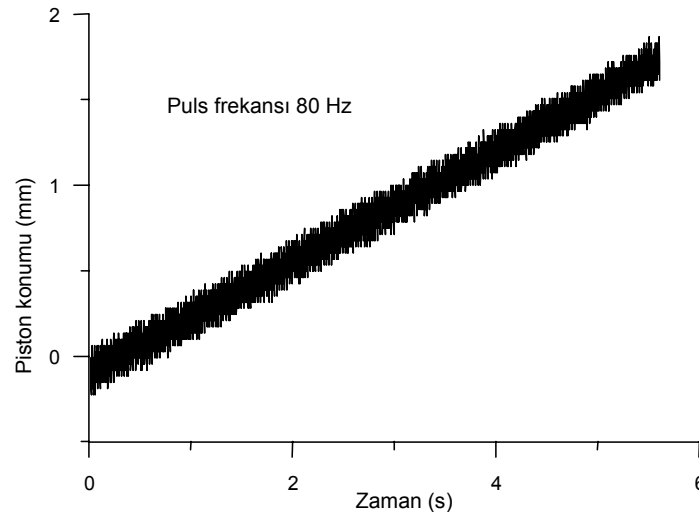
### Kapalı çevrim sistemin rampa cevabı

Puls genişliği modülasyonu tekniğinin yavaş hareket esnasındaki tutukluk etkisini giderdiğini görmek amacıyla değişik puls frekanslarında kapalı çevrim sistemin rampa cevabı deneyleri yapılmıştır. Pistonu yavaş bir şekilde hareket ettirmek için sisteme 20 mm/dak eğimli bir rampa giriş verilerek sistem cevapları bulunmuştur. Bu deneylerin sonuçlarından iki tanesi Şekil 12 ve 13'de grafik olarak verilmiştir. Deneylerde pistonun yavaş hareket esnasında tutuk hareket yapmadan gayet düzgün bir şekilde hareket ettiği osiloskopla izlenmiştir. Düşük puls frekanslarında yapılan deneylerin sonuçları incelendiğinde puls frekansından kaynaklanan salınımlar belirgin bir şekilde görülmektedir. Puls frekansı arttıkça bu salınımlar azalmaktadır.

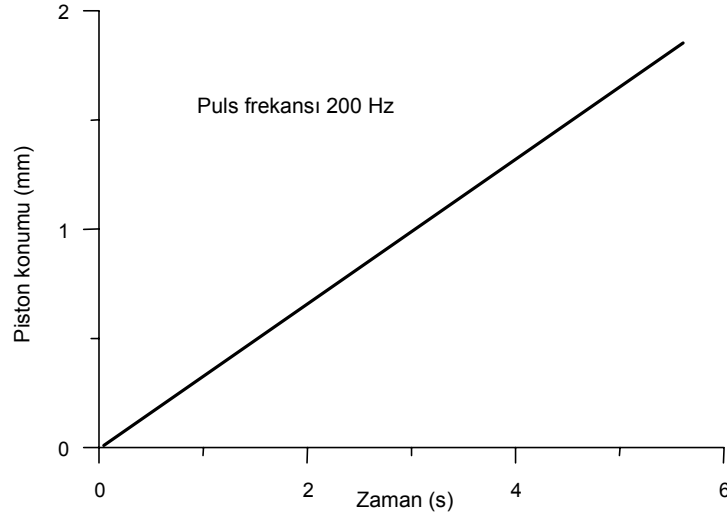
### SONUÇ

Bu çalışmada, puls genişliği modülasyonu tekniğinin bilgisayar kontrollü hidrolik sistemlere başarılı bir şekilde uygulanabildiği gösterilmiştir. Elektrohidrolik

servovalf, piston-silindir ve yükten oluşan elektrohidrolik servo sisteminin puls genişliği modülasyonlu girişler için konum kontrolü deneysel olarak yapılmıştır. Puls genişliği modülasyonlu basamak, sinüsoidal ve rampa girişler için açık ve kapalı çevrim sistemlerin cevapları bulunmuştur. Ayrıca puls frekansı ile referans giriş frekansı arasındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla, puls genişliği modülasyonlu açık ve kapalı çevrim sistemlerin, deneysel sinüsoidal cevapları incelenmiştir. Bu incelemede, özellikle puls frekansı bileşeni genliğinin referans frekansı bileşeni genliğine oranı dikkate alınmıştır. İnceleme neticesinde, bu çalışmada ele alınan elektrohidrolik servo sistem için puls frekansı bileşeni genliğinin referans frekansı bileşeni genliğine oranının %1 olmasının yeterli olduğu düşünüldüğü için, puls frekansının referans giriş frekansına oranının 50 veya üzerinde seçilmesinin uygun olacağı sonucuna varılmıştır. Bu oran küçüldükçe, yani puls frekansı referans frekansına yaklaştıkça, puls frekansı bileşeni genliği artmakta, referans frekansı bileşeni net bir şekilde ayırt edilememektedir.



Şekil 12. Kapalı çevrim sistemin rampa cevabı (80 Hz)



Şekil 13. Kapalı çevrim sistemin rampa cevabı (200 Hz)

## KAYNAKLAR

1. Suematu, Y., Yamada, H., Muto, T., “Digital control of hydraulic actuator system by the method of differential pulse-width modulation”, **Nippon Kikai Gakkai Robunshu, C Hen/Transactions of the JSME Part C**, Cilt 55, 2053-2060, 1989.
2. Muto, T., Yamada, H., Suematsu, Y., “Digital control of hydraulic actuator system operated by differential pulse-width modulation”, **JSME Int. Journal Series 3**, Cilt 33, 641, 1990.
3. Suematsu, Y., Yamada, H., Tsukamoto, T., “Digital control of electro-hydraulic servo system operated by differential pulse-width modulation”, **JSME Int. Journal Series 3**, 36, Cilt 61-68, 1993.
4. Sakai, T., Tanaka, H., Sato, Y., “Switching-valve operated servomechanism for articulated construction-manipulator (inertia-load control by PWM energized fluid-pulse flow)”, **Nippon Kikai Gakkai Robunshu, C Hen/Transactions of the JSME Part C**, Cilt 61, 1078-1083, 1995.
5. Muto, T., Kato, H., Sakamoto, K., “Digital control of hydrostatic transmission system driven by differential pulse-width modulation”, **Nippon Kikai Gakkai Robunshu, C Hen/Transactions of the JSME Part C**, Cilt 61, 3983-3990, 1995.
6. Jeronymo, C.E., Yamada, H., Muto, T., “Application of unified predictive control to on/off control of hydraulic system driven by fast-switching solenoid valves”, **JSME International Journal Series C-Dynamics Control Robotics Design and Manufacturing**, Cilt 39, 515-521, 1996.
7. Keleş, Ö., Puls genişliği modülasyonu ile hidrolik konum kontrolunun teorik ve deneysel incelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1998.
8. Reeves, A.H., *French Patent*, No 852183, 1938.
9. Reeves, A.H., *British Patent*, No 535860, 1939.
10. Reeves, A.H., *U.S.A. Patent*, No 2272070, 1942.
11. JACKSON, K.R., *U.S.A. Patent* No 2655940, 1950.
12. Murtaugh, S.A., “An introduction to the time modulated acceleration switching electro-hydraulic servomechanism”, **Transaction of the ASME Journal of Basic Engineering**, June, 263-271, 1959.
13. Ikebe, Y., Nakada, T., “On a piezoelectric flapper type servo valve operated by a pulse-width-modulated signal”, **Transaction of the ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control**, March, 88-94, 1974.
14. Mansfeld, G., “Fast switching ball valve as digital control elements for an electro-hydraulic servo actuator”, **Sixth International Fluid Power Symposium**, Cambridge, UK, 335-348, 1981.