

# ELEKTROHİDROLİK VALFLERİN GELİŞİMİ VE KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

**İbrahim YÜKSEL**  
**Mesut ŞENGİRGİN**

## ÖZET

Bu çalışmada, elektrohidrolik denetim sistemlerinde kullanılan valflerin tarihsel gelişimi ve karakteristikleri ele alınmıştır. Öncelikle servovalfler, solenoid valfler ve diğer alternatif valfler üzerinde yapılan çalışmalar hakkında bilgi verilmiş ve daha sonra bu valfler tanıtılarak karakteristikleri ele alınmıştır. Ayrıca hızlı anahtarlama valfleri ve diğer alternatif valfler hakkında bilgi ve örnekler sunulmuştur. Valflerin çeşitli açılardan birbirleri ile karşılaştırması yapıldıktan sonra çalışma sonuç kısmı ile tamamlanmıştır.

## 1. GİRİŞ

Elektrohidrolik denetim sistemleri, yüksek kuvvet/ağırlık oranları, gürbüz yapıları ve yüksek dinamik başarımları nedeniyle bugün endüstriyel alanda ağır yük manipülatörlerinden hassas takım tezgahlarına kadar pek çok alanda kullanılmaktadır. Dijital denetim olanaklarının yaygınlaşması ile birlikte uzay taşıtlarından, hassas test cihazları, simülörler ve eğlence endüstrisine (tiyatro ve özel sinema platformları v.b) kadar uygulama alanlarını genişletmişlerdir.

Bu sistemlerin içinde en önemli eleman, kullanıcıya giden akışkan debi ve basıncını denetleyen elektrohidrolik valflerdir. Elektrohidrolik valfler çok zayıf bir elektrik işareti (maksimum 50 W civarında) ile kW seviyelerinde akışkan gücünü denetler.

Elektrohidrolik valfler, endüstriyel alanda daha çok servovalfler ve solenoid valfler olarak bilinmektedir. Diğer taraftan genelde geliştirme çalışmaları alanında bilinen ve belli alanlarda uygulama olanağına sahip değişik türden valflerde mevcuttur. Bunlardan bir türü ise hızlı anahtarlama valfi veya dijital valflerdir. Bunların dışında da bazı özel uygulama alanlarına sahip valfler de mevcuttur. Elektrohidrolik valfler üzerinde geliştirme çalışmaları, gerek akademik ve gerekse endüstriyel alanda devam etmektedir. Bu çalışmaları aşağıdaki şekilde özetleyebiliriz.

1940'lardan bu yana geliştirilen [1] ve günümüzde en mükemmel gelişme aşamasına gelmiş bulunan tork motorlu servovalfler oldukça karmaşık bir yapıya sahip olup çok hassas denetim gerektiren sistemlerde kullanılmaktadırlar. Servovalfler üzerinde yapılan ilk çalışmalar [2,3] daha çok valfin birinci kademesi olan plaka-lüle düzenlemesinin akışkan karakteristikleri üzerindedir. Murtaugh [30] ise servovalflerin ilk yıllarında, daha sonra ortaya çıkan hızlı anahtarlama valfleri ile yaygın uygulama olanağı bulan darbe genişlik modülasyon tekniği ile servovalflerin çalıştırılması üzerinde kapsamlı bir çalışma yapmıştır. Daha sonra Ikebe ve ark. [4] yine darbe genişlik modülasyon tekniği ile çalışan, plaka hareketini tork motoru yerine piezoelektrik esasına göre yerine getiren bir servovalf geliştirmiştir. LeQuoc ve ark. [5] yaptıkları bir çalışmada servovalf için yeni bir kavram geliştirilmiş olup, geliştirilen servovalfin geri dönüş basıncı ve geri dönüş orifisi sistem denetim ihtiyaçlarını yerine getirecek biçimde ayarlanabilmektedir. Arafa ve ark. [6] yaptıkları bir çalışmada servovalfin ikinci kademesi olan sürgü elemanı üzerine etki eden akışkan kuvvetlerini analiz etmişlerdir. Daha sonra

yapılan bazı çalışmalarda [7,8,9,10] servovalfin birinci kademesi olan plaka-lüle düzenlemesinin matematik modellenin kurulması ve dinamik davranışının araştırılması üzerinde olmuştur. Günümüzde yapılan çalışmalar [11,12,13,14,15] ise daha çok servovalf kullanan elektrohidrolik sistemlerinin modellenmesi ve bu sistemler için gerekli denetim algoritmalarının geliştirilmesi üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Servovalflere bir alternatif olarak sunulan solenoidle çalışan oransal valfler 1970'li yıllarda ortaya çıkmaya başlamıştır. Bu valfler daha çok bugün tek bir şirket halin gelmiş bulunan Bosch ve Rexroth gibi büyük hidrolik firmaların araştırma geliştirme çalışmaları sonucu geliştirilmiştir. İlk çalışmalar [18,19] valfin oransal hareketini sağlayan doğrusal solenoidin geliştirilmesi üzerinde yoğunlaşmıştır. Taft [17] yaptığı bir çalışmada gerek servovalf ve gerekse solenoidli oransal valfte kullanılan sürgülü valf elemanı üzerine etki eden akışkan kuvvetlerinin karakteristiklerini incelemiştir. Qureshi [20] ve Harms [21] ayrı ayrı yaptıkları çalışmalarda oransal valflerin tasarım analizi ve uygulama örneklerini vermiştir. Daha sonra yapılan bazı çalışmalarda [22,23] daha çok oransal valflerde kullanılan solenoid elemanın geliştirilmesi üzerinde devam etmiştir. Lai ve ark. [24] yaptıkları bir çalışmada oransal valf kullanılan bir devrede hassas akış denetimi sağlamak için kendi kendini ayarlayan denetleyici tasarımını incelemiştir. Heyen [25], düşük maliyetli oransal valflerin konum denetiminde kullanılmasının sağladığı avantajları vurgulamıştır. Vaughan ve ark. bir çalışmasında [26] oransal valflerin modellenmesi ve simulasyonunu incelemiş ve bir başka çalışmasında [27] oransal valflerin denetiminde kullanılmak üzere kayan kipli bir denetleyici tasarımını ele almışlardır. Oransal valflerin ileri seviyede gelişimin sonucunda servo solenoid veya yüksek cevap hızlı oransal valfler ortaya çıkmış [28,29] olup 1980'lerden bu yana kullanılmaktadırlar.

Bir yandan servovalflere alternatif olarak oransal valfler üzerinde çalışmalar devam ederken aynı zamanlarda hızlı aç-kapa türü valfler üzerinde çalışmalar sürdürülmüştür. Dijital denetim teknolojisinin yaygınlaşmaya başladığı 1975'li yıllarda bu valfler bir taraftan hızlı anahtarlama ve diğer taraftan da dijital valf adı altında sunulmuştur. Bu valflerin oransal sürülmesinde ise darbe genişlik modülasyon tekniklerinden yararlanılmıştır. Gerçekte darbe genişlik modülasyon tekniğinin ilk uygulamaları [30,31] servovalfler üzerinde olmuştur. Hızlı anahtarlama valfi üzerinde darbe genişlik modülasyon tekniği uygulaması ile ilgili ilk çalışmalardan birisi [32] pnömatik sistemler üzerindedir. Post [33] anahtarlama elemanı olarak çok hızlı çalışan küçük bilye elemanı kullanmış ve bunun sürülmesinde elektromekanik dönüştürücü olarak küçük boyutlu klasik solenoidten yararlanmıştır. Daha sonraki çalışmalarda [34,35,36] Post'un geliştirdiği bilyeli valfin dijital denetim sistemlerinde uygulanma olanakları ele alınmıştır. Mansfeld [37] ise bilye elemanın hareketinde solenoid yerine tork motorundan yararlanmış ve geliştirilen bu yeni tür bilyeli valfi servo denetim sistemlerinde dijital denetim elemanı olarak kullanmıştır. Daha sonraları ise bu yeni tür bilyeli valf çok hızlı anahtarlama bilyeli valf [38] adı ile ticari olarak piyasaya sürülmüştür. Anahtarlama elemanı olarak ferromıknatıs bir disk kullanan ve bu diskin hareketi için farklı bir solenoid yapısı kullanan bir çalışma başlatılmış [41] ve benzer konuda farklı çalışmalar [42,43,44] devam ettirilmiştir. Bu konuda yapılan son bir çalışmada [45] disk valfin farklı bir modeli geliştirilmiş ve bunun üzerinde darbe genişlik modülasyon tekniği uygulanmıştır. Yakın zamanlarda klasik solenoidle çalışan hızlı aç-kapa tipi valfler üzerinde darbe genişlik modülasyon tekniği uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Muto ve ark. [39] yaptıkları iki farklı çalışmada dijital farksal darbe genişlik modülasyon tekniği ile çalıştırılan bir elektrohidrolik denetim sisteminde aç-kapa tipi klasik solenoid kullanmıştır. Manfred ve ark. [46] ise pnömatik konum denetim sistemlerinde klasik solenoid ile çalışan 2/2 yön denetim valfleri kullanarak normal ve farksal darbe genişlik modülasyon tekniği uygulamalarını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Burada ayrıca dijital sinyal işleme tekniklerinden de yararlanılmıştır.

Yukarıda verilenlerin dışında, değişik yapıda valfler üzerinde çalışmalar farklı firmalar tarafından bugün de sürdürülmektedir. Bunlardan birisi mini-servovalf [47] diğeri de fırçasız DA motorlu servovalftir [48].

## 2. SERVOVALFLER

### 2.1. Genel Özellikleri

Başlangıçta, askeri uçak ve füzelerin hassas denetiminde kullanılmaya başlayan servovalfler daha sonraları endüstriyel alanda da uygulama olanağına sahip olmuşlardır. Bugün servovalfler, askeri teçhizat ve havacılık yanında sivil havacılık ve uzay taşıtlarında da kullanılmaktadır. Endüstriyel alanda ise özellikle yüksek dinamik başarımlı test makineleri en önemli uygulama alanlarından biridir. Maliyetlerinin çok yüksek olması dolayısıyla son senelerde, endüstriyel alanda servovalflerin yerini daha çok hızlı oransal solenoid valfler ve diğer türden hızlı valfler almaya başlamıştır.

Bir servovalf, temelde kapalı döngü elektrohidrolik denetim sistemlerinde kullanılan elektriksel denetimli hidrolik kuvvetlendiricidir. Servovalflerin en önemli özelliği elektriksel giriş işareti ile akışkan debisi çıkış işareti arasında tam bir doğrusal bağıntı sağlaması ve diğeri de çok küçük bir giriş sinyaline karşılık çok büyük çıkış işareti vermesidir. Bu valfler yardımıyla elektrohidrolik denetim sistemlerinde yaklaşık 0,08 W gibi çok düşük güçlü elektrik sinyali yardımıyla 100 kW'tan daha büyük hidrolik güçleri çok hassas bir biçimde denetlemek mümkündür. Cevap hızları ise 100-500 Hz mertebelerinde olup diğer türden oransal elektrohidrolik valfler ile bu hızlara erişmek halihazırda mümkün değildir.

Bütün bu avantajları yanında dezavantajları da bulunan servovalflerin her şeyden önce maliyetleri çok yüksektir. Servovalflere en yakın dinamik başarımlı servo solenoid valflerden yaklaşık en az 1.5-2 kat ve oransal solenoid valflerden en az 2.5-3 kat daha pahalıdırlar. Servovalflerin imalat işlemleri çok karmaşık olup çok sıkı işlem toleransı gerektirirler. Bunun sonucunda hidrolik yağdaki kirlenmelere karşı çok aşırı duyarlı hale geldiklerinden 3µm gibi çok ince filtreleme gerektirirler. Ayrıca yağdaki sıcaklık artışından etkilenmeleri sonucunda sıfır ve konumlandırma hatalarına neden olurlar.

### 2.2. Yapısı ve Çalışması

Çok büyük bir bölümü çift kademeli olan servovalflerin birinci kademeleri ya çoğunlukla çift lüleli plaka valf şeklinde yada jet-boru valfi şeklindedir (Şekil 1). İkinci kademeleri ise çoğunlukla sürgülü valf biçimindedir. Gerek plaka-lüle ve gerekse jet-boru valfinin elektromekaniksel hareketi bir tork motoru yardımı ile sağlanmaktadır.

Tork motoru; bir kalıcı mıknatıs ve bir de elektromıknatıs (armature) devresinden meydana gelmiş elektromekaniksel bir çeviricidir. Sargı uçlarına uygulanan akım sinyali sonucu meydana gelen mıknatıs akısının mıknatıs kuvvetine dönüşmesi ve bu kuvvetin de mekaniksel harekete dönüşmesi sağlanır.

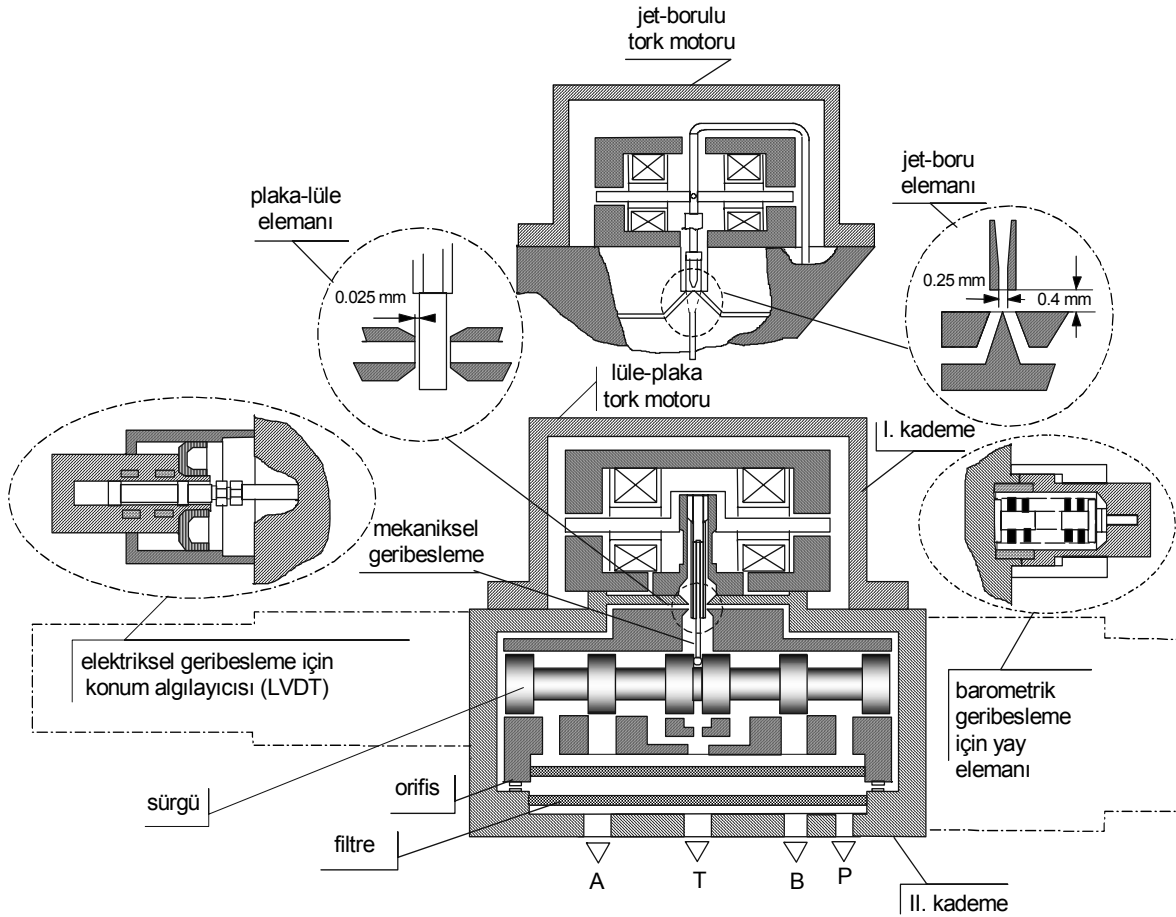
Tork motoru çıkışından elde edilen mekaniksel hareket ya doğrudan bir valfin hareketli elemanını (genellikle sürgü elemanı) hareket ettirmek ya armatür ucunun uzantısı veya ona dikey olarak yerleştirilmiş bir plakayı yada yine armatüre dikey olarak yerleştirilmiş bir jet borusunu hareket ettirmek için kullanılır. Akışkan kuvvetlerinin meydana getirdiği sınırlamalar dolayısıyla böyle bir valfin tek kademede sağlayabileceği akışkan debisi çok sınırlı kalmakta ve ayrıca bu tür tek kademe valflerde kararsızlık sorunları da ortaya çıkmaktadır.

Her ne kadar armatür ve ona bağlı plaka jet-borusunun hareketi giriş işareti ile oransal olarak değişmekte ise de plaka üzerine etki eden akışkan kuvvetleri ve diğer kuvvetlerden dolayı bu oransallık çok dar sınırlar içinde kalmaktadır. Bu nedenle oransallık sınırını artırarak daha kararlı çalışmasını sağlamak üzere valfin birinci kademesi ile ikinci kademesi arasına bir geribesleme mekanizması yerleştirmek gerekmiştir. Geribesleme mekanizması ya sürgü konumunun izlenmesi şeklinde yada servovalfin denetlediği yük basıncını veya da yük akışındaki değişimleri düzenleyecek şekilde olabilmektedir [49].

Konumun doğrudan geribeslenmesi halinde lüleler valf sürgüsü üzerinde yer alır. Bu durumda tork motoru uzantısı olan plaka sürgü konumunu bire bir izler ve bu nedenle bu tür geribeslemeye bazen hidrolik izleyici de denmektedir.

Geribeslemenin bir diğer yolu da plaka ile sürgü arasına mekaniksel bir bağlantı yerleştirmektir. Bu düzenleme kuvvet geribeslemesi veya mekaniksel geribesleme olarak bilinir. Tarihsel gelişme içinde bu türün tek plakalı normal spiral yay geribeslemeli türüne de rastlamak [50] mümkünse de günümüzde plaka ile sürgü arasında yaprak yay şeklinde bir geribesleme mekanizması kullanılmaktadır (Şekil 1).

Birinci kademe ile ikinci kademe arasındaki mekaniksel bağlantıyı ortadan kaldıran ve görece daha basit bir yapıya sahip servovalf türü de barometrik geribeslemeli veya yay merkezlemeli servovalftir. Bu düzenlemede valf sürgüsünün iki tarafına birer adet yay yerleştirilmiş olup mekaniksel geribesleme bağlantısı ortadan kaldırılmıştır. Bu valf türünde, birinci kademedeki oluşan basınç farkının sağladığı kuvvetler ikinci kademedeki yay kuvvetleri ile dengelenerek oransal bir denetim sağlanır. Statik ve dinamik performansları mekaniksel geribeslemelilere göre oldukça düşüktür.



Şekil 1. Servovalfin genel özellikleri

Özellikle son senelerde ortaya çıkan geribesleme türü de elektriksel geribeslemedir. Bu düzenlemede sürgünün konumu bir indüktif konum algılayıcısı (LVDT) tarafından adım adım izlenmekte ve dolayısı ile bu şekilde çok hassas bir denetim sağlamak mümkün olmaktadır. Bu düzenleme ile mekaniksel elemanlarda ortaya çıkan laçkalık, sürtünme kuvvetlerinden etkilenme, zamanla ortaya çıkan aşınma etkisi en aza indirilmiş olmaktadır. Şekil 1'de çeşitli geribesleme bağlantıları ile birlikte mekaniksel geribeslemeli bir servovalf örneği gösterilmiştir.

Servo valflerin birinci ve ikinci kademeleri arasında yer alan geribesleme bağlantısına ek olarak, özel bazı uygulamalarda valfin kumanda ettiği yük basıncı veya yük akışı arasında da bir geribesleme bağlantısı kullanılmaktadır [51]. Yük basıncı geribeslemesinde, yükün sabit basınç altında hareketi sağlanmaya çalışılır. Bu tür valfte yük akış yolları ile sürgü ve birinci kademe arasında özel akış yolları yer alır ve sürgü konumu ve dolayısıyla da valf açıklığı yük basıncı ile birinci kademelinin sağladığı basınç kuvvetleri arasında dengelenir. Yük basıncı geri beslemesini basınç algılayıcıları yardımıyla elektriksel olarak da sağlamak mümkündür. Böylece elektriksel sistemlerin sağladığı avantajlardan da yararlanılmış olunur.

Yük akışının veya diğer bir değiş ile yük hızının denetlenmesi gereken uygulamalarda ise akış geribeslemeli servovalfler kullanılmaktadır. Mekaniksel akış geribeslemeli valflerde kullanıcıya (silindir veya motor) gönderilen akışkan debisi mekaniksel algılayıcılar yardımı ile kuvvete dönüştürülür ve bu kuvvet tork motorunda giriş akımının meydana getirdiği kuvvet ile dengelenmeye çalışılır. Giriş akımının öngördüğü bir değerde gerçekleşen dengelenme sonucunda kullanıcılara gönderilen akışkan miktarı sabit bir değerde denetlenmiş olur.

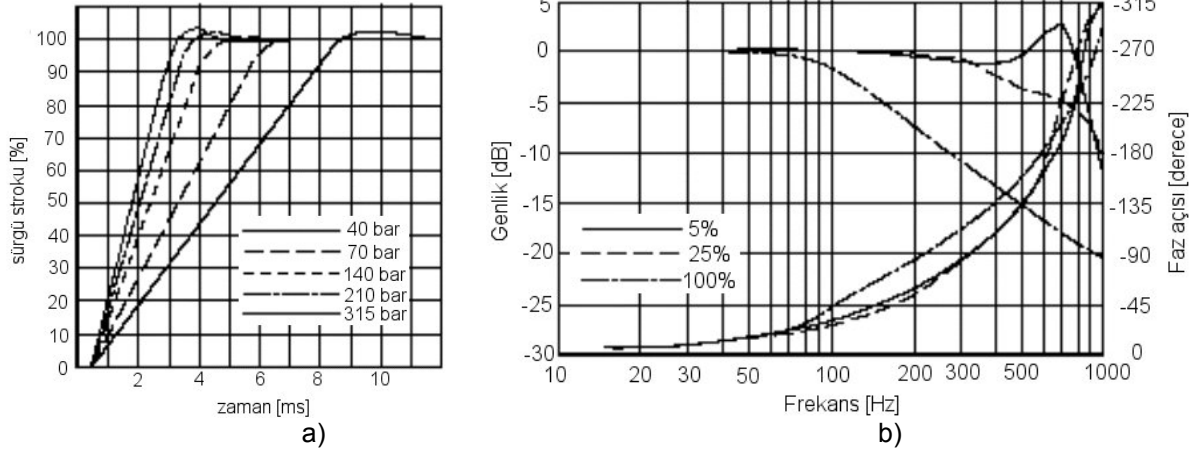
Tork motorlu iki kademeli servovalflerin diğer bir biçimi de Şekil 1'de görülen jet-boru elemanlı valflerdir. Bu valflere; akışkan basıncının jet momentumuna dönüştürüldüğü jet-boru ilkesinden yararlanır. Bu düzenlemede akış jeti, momentumun basınç veya akış şeklinde geri kazanıldığı iki delik (alıcı) arasında yönlendirilir ve bu işlem genellikle tork motoru tarafından yerine getirilir. Elektriksel giriş işareti, daha önceki düzenlemede (plaka-lüle) olduğu gibi önce mekaniksel harekete, daha sonrada jet-boruda akışkan momentumuna ve o oranda akışkan basıncına dönüştürülmektedir ki valfin bu aşamadan sonraki çalışması plaka-lüle valfin aynısıdır. Bu düzenlemede de, plaka-lüle düzenlemesinde olduğu gibi genellikle jet-boru elemanı ile sürgü arasında yaprak yay şeklinde geribesleme elemanı kullanılır. Bu elemanın işlevi ise mekaniksel geribeslemeli plaka-lüle valfteki ile aynıdır. Bu tür valflerin en önemli özelliği plaka-lüle valflere göre daha gevşek tolerans gerektirdiğinden kirleticilere karşı daha az hassas olmalarıdır.

### 2.3. Karakteristikleri

Servovalflerin en önemli özelliği olan elektriksel giriş işareti ile akışkan debisi çıkış işareti arasındaki bağlantı tamamen doğrusaldır. Valf sürgüsünün akışkan geçiş deliklerini tam kapama (sıfır biniş), artı kapama (aşırı biniş) ve eksi kapama (eksi biniş) durumuna göre karakteristik eğri sıfır noktasından, yatak eksene teğet veya düşey eksen teğet biçimde başlayarak doğru bir çizgi şeklinde devam eder. Eğri üzerinde giriş ve çıkış işaretleri % cinsinden tanımlanır.

Valfin kapasitesi nominal debisine göre belirlenir. Servovalflerde nominal debi ise 70 bar basınç düşümüne karşılık gelen debidir. 70 barlık basınç düşümü; basınç hattından valf girişi ile kullanıcı (silindir veya motor) arasında 35 bar artı kullanıcıdan valfe girişi ile valften tanka çıkışı arasında 35 bar olarak hesaplanır. Pilot kademeli servo yön denetim valflerinde nominal debi 2 lt/dak ile 100 lt/dak arasında değişir. Daha yüksek debiler için çok kademeli servovalfler kullanılır.

Valfin dinamik karakteristikleri girişine uygulanan basamak veya sinüzoidal giriş sinyali testleri ile belirlenir. Şekil 2'de verilen eğrilerinden görüldüğü gibi yük basıncı ve akışkan miktarı arttıkça artan akışkan kuvvetlerine bağlı olarak cevap hızı düşmektedir. Özellikle Şekil 2b'de görülen frekans cevabı eğrileri valfin dinamik karakteristiklerini tam olarak açıklamaktadır. Burada yatay eksende frekans değerleri, düşey eksende dB cinsinden çıkış/giriş genlik oranı ve faz açısı değerleri yer almaktadır. Bu eğriler ise teorik olarak açık-döngü transfer fonksiyonu,



Şekil 2. Servovalflerin dinamik karakteristikleri

$$G(s) = \frac{1}{\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n}s + 1}$$

olan bir sistemin frekans cevabını tanımlar. Bu eğri üzerinde kritik frekans  $-3$  dB genlik oranı düşümüne karşılık gelen frekans olup bu duruma karşılık gelen faz gecikmesi  $-90^\circ$  dir. Bu durum ise en uygun sönüm oranı,  $\zeta=0.7$  değerine karşılık gelmektedir. Sistemin dinamik davranış açısından en uygun olduğu bölge  $-3$  dB karşılık gelen frekansa kadar olan bölgedir. Bu frekans genellikle kırılma frekansı veya sistem frekans aralığını gösterir. Bu frekanstaki faz açısı değeri ise yaklaşık  $-90^\circ$  ye yakındır. Geribeslemeli denetim sistemlerinin kararlılığı açısından genlik oranındaki düşüş kadar bu faz gecikmesinin önemi de büyüktür. Faz gecikmesi ne kadar artarsa sistemin kararlılık açısından denetimi o kadar zorlaşır.

### 3. SOLENOİD VALFLER VE KARAKTERİSTİKLERİ

Endüstriyel alanda servovalflere alternatif olarak solenoid valfler ortaya çıkmıştır. Elektrohidrolik denetim sistemlerinde kullanım olanağına sahip olmayan AC solenoidleri bir tarafa bırakırsak, DC solenoid valfler, genelde

- Aç/kapa tipi
  - Basit aç-kapa
  - Hızlı anahtarlama valfleri
- Oransal valfler
  - kuvvet denetimli
  - hareket denetimli
- Servo solenoid veya hızlı oransal solenoid

biçiminde sınıflandırılabilir.

Basit aç-kapa solenoid valflerin yapısı kaba ve dinamik başarımları çok düşüktür. Bunlar hassas denetim gerektiren kapalı döngü denetim sistemlerinde kullanılamaz. Endüstriyel alanda kullanılanların çoğunluğu sürgülü valf yapısındadır.

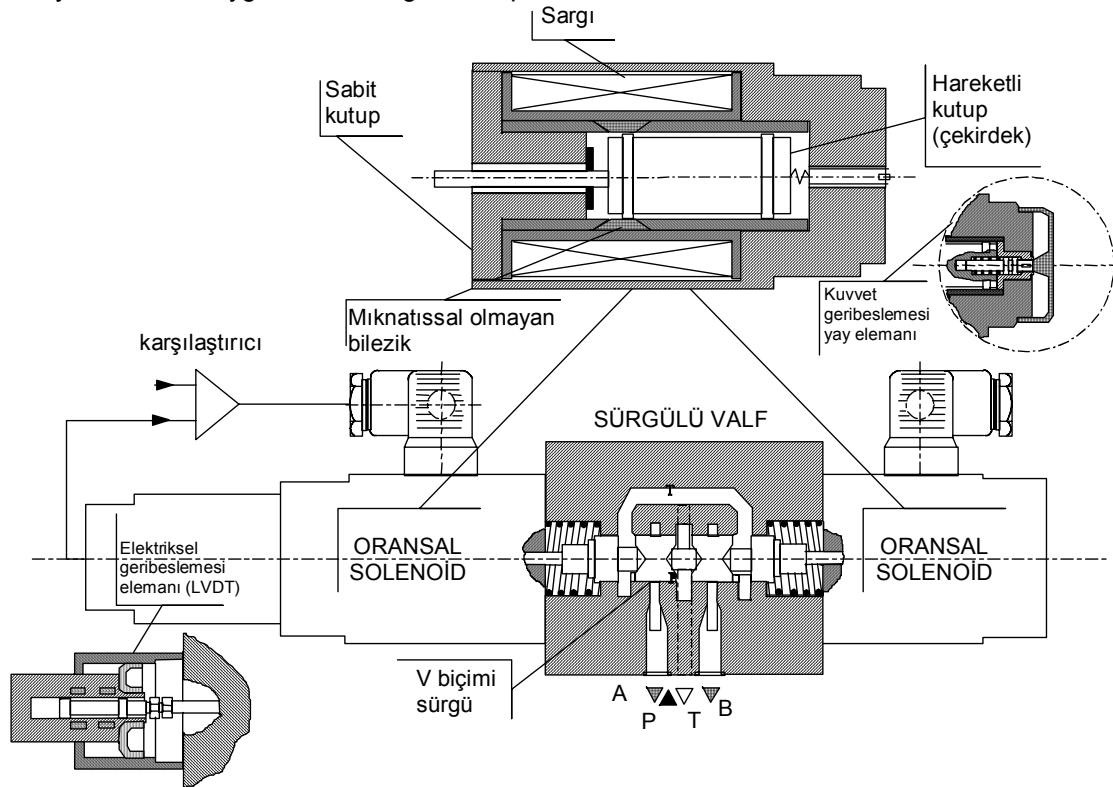
Hızlı anahtarlama valfleri ise genelde solenoidle çalışan aç-kapa karakteristiklerine sahip olmakla beraber 1ms gibi çok yüksek cevap hızlarına sahiptirler. Bu valfler ayrıca ileride ele alınacaktır.

### 3.1. Oransal Valfler

1970'lerin sonlarına doğru geliştirilen oransal valfler aç/kapa solenoid valfler ve elektrohidrolik servovalfler arasında geniş bir alana yayılır. Bu valflerin çıkış debisi ile giriş akım değişimi, servovalflerde olduğu gibi tam doğrusal olmadığından oransal adını alırlar. Doğrusal olmayan cevap yapılarına rağmen, maliyetleri servovalflere göre oldukça düşük olduğundan büyük akışkan debilerinde yüksek hız gerektiren konum, hız ve kuvvet denetim uygulamalarında tercih edilmektedirler. Oransal valfler daha çok dünyaca ünlü hidrolik firmalarının araştırma ve geliştirme çalışmaları sonucunda ortaya çıkmışlardır. Gerçekte oransal valfler 4-yol aç/kapa solenoid valflerin evrimleşmesi sonucu ortaya çıkmış olup geleneksel solenoidin yerini doğrusal solenoid almıştır.

Doğrusal solenoidte sargıya uygulanan elektrik akımına karşılık oluşan kuvvet merkezleme yayının kuvveti ile dengelenerek valf sürgüsü akım girişine orantılı biçimde konumlandırılmaya çalışılır. Konumlandırma tamliğini iyileştirmek için merkezleme yayları çıkarılarak sürgünün ucuna bir konum algılayıcısı (LVDT) ilave edilir. Bu durumda akım geribeslemeli elektronik kuvvetlendirici ile sürülen solenoidte oluşan kuvvet veya hareket, sargı direncindeki değişime rağmen sabit bir değerde tutulabilir. Konum algılayıcılı valfin hassas oransal denetimde kullanılan elektronik devre, konum algılayıcısı yoluyla algılanan sürgünün gerçek konumunu arzu edilen bir konum giriş işareti ile karşılaştırır ve bir kapalı döngü geribeslemeli denetim yolu ile bu iki değer arasındaki farkı hatta işareti olarak belirler ve sonuçta bu hatayı ortadan kaldıracak biçimde işlem yapar.

Bu tür oransal valfler çok yüksek dinamik başarımlarını gerektirmeyen enjeksiyon makineleri gibi endüstriyel alanlarda uygulama olanağına sahiptirler.



Şekil 3. Oransal solenoid yapısı

**Kuvvet denetimli** solenoidlerde hareketli eleman (armature) yaklaşık 1.5 mm gibi çok küçük bir hareket mesafesine sahiptir. Bu tür solenoidlerde belli bir harekete karşılık gelen kuvvet sargıya uygulanan akımı değiştirmek suretiyle denetlenir. Kısa hareket mesafeli oluşlarından yoğun bir yapıya sahiptirler ve bu özelliklerinden dolayı daha çok iki kademeli yön denetim ve basınç denetim valflerinde pilot valf olarak kullanılır.

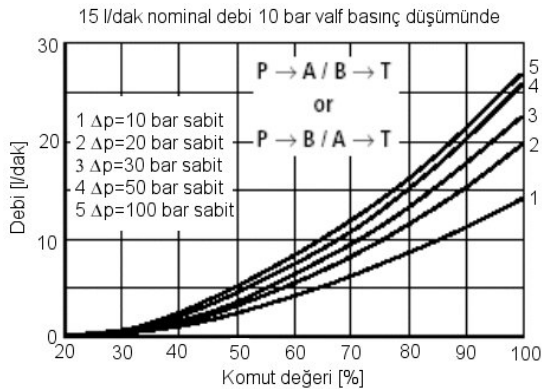
**Hareket denetimli** solenoidlerde hareketli elemanın konumu bir kapalı döngü denetim devresi ile denetlenir. Bunun sonucunda solenoidin bulunduğu valfin sürgüsü herhangi istenen bir konumda denetlenmiş olur. Bunların hareket mesafesi daha uzun olup valfin büyüklüğüne göre 3-5 mm arasında değişir. Bu tür solenoidler genelde konum algılayıcısı ile birlikte tek kademeli 4-yol yön valflerinde kullanılır.

Konum algılayıcılı valfin hassas oransal denetimde kullanılan elektronik devre, konum algılayıcısı yoluyla algılanan sürgünün gerçek konumunu arzu edilen bir konum giriş işareti ile karşılaştırır ve bir kapalı döngü geribeslemeli denetim yolu ile bu iki değer arasındaki farkı hata işareti olarak belirler ve sonuçta bu hatayı ortadan kaldıracak biçimde işlem yapar.

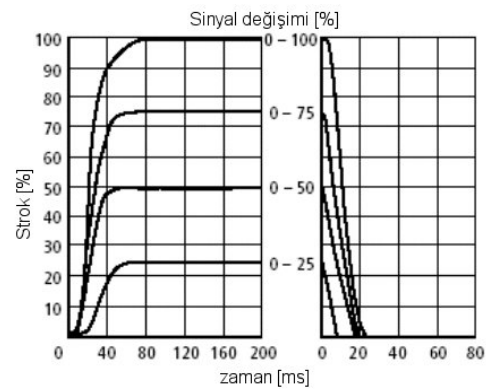
### 3.2. Karakteristikleri

Oransal valflere ait, farklı basınç farkı değerleri için verilen tipik akış karakteristik eğrileri Şekil 4'te olduğu gibidir. Görüldüğü gibi valfin elektriksel giriş işaretine karşılık gelen debi çıkış değerleri arasında tam bir doğrusallık yoktur. Aslında oransal valfler solenoidi doğrusal çalışan akışkan denetim valfleridir.

Gerçek anlamda valf elektriksel giriş işareti ile akışkan çıkış işareti arasında, servovalflerde olduğu gibi tam bir doğrusallık sağlanamaz. En karakteristik doğrusalsızlık ise ilk harekete başlamada, valfin belli bir elektriksel giriş işareti değişimine (yaklaşık %30) karşılık hiçbir akışkan çıkış işareti üretmemesidir. Bunun temel nedeni solenoidin karakteristik yapısından kaynaklanmaktadır. Solenoid türü elektromekanik aygıtlarda, uygulanan bir elektrik işaretine karşılık sargıdaki akım hemen hareketi oluşturacak yeterlilikte bir çekim kuvveti sağlayamaz. Dolayısıyla da akım belli bir değere ulaşmadan valf açılmaya başlamaz. Bu dinamik davranış açısından bir ölü zaman gecikmesine karşılık gelmekte olup solenoid türü elektromekanik aygıtlarda doğrusalsızlığın en önemli kaynağıdır. Bu durum oransal solenoidlerde en aza indirilmiş olup valfin belli bir çalışma bölgesi içerisinde doğrusal bir bağıntı sağlanmıştır. Buna karşılık aç-kapa biçiminde çalışan solenoid valflerde valfin giriş işareti ile akışkan çıkış işareti arasında herhangi bir doğrusal bağıntı yoktur. Bunlarda, valf belli bir akım değerinde tamamen açıktır ve belli bir akım değerinin altında da tamamen kapalı duruma geçer ve dolayısıyla giriş işareti ile çıkış işareti arasında hiçbir doğrusal bağıntı yoktur.



Şekil 4. Oransal valfin karakteristik eğrileri



Şekil 5. Oransal valflerin dinamik karakteristikleri

Buna karşılık oransal valfler servovalflere göre çok daha az basınç düşümüne sahiptirler. Şekil 4'ten görüldüğü gibi aynı nominal debiyi farklı basınç düşümlerinde sağlayabilmektedir. Burada söz konusu olun basınç düşümü ise valfin giriş ağız ile çıkış ağız arasındaki basınç farkıdır. Oransal valflerde değişik akış karakteristikleri oluşturmak için valf sürgüsü üzerinde bazı yapısal değişiklikler yapılmıştır. Bu değişiklikler, Şekil 3'te görüldüğü gibi daha çok sürgü pistoncukları üzerinde V-biçimi veya U-biçimi çentikler açmak suretiyle yapılır.



### 3.3. Dinamik Karakteristikleri

Şekil 5'te verilen basamak cevabı eğrilerinden görüldüğü gibi oransal valflerin cevap hızları servovalflere göre oldukça düşüktür. Ayrıca harekete başlama anında solenoid hareketli elemanın belli zaman harekesiz kaldığı gözlenmektedir. Ölü zaman gecikmesi olarak bilinen bu değer, hareket miktarı yüzdesine bağlı olarak toplam zaman gecikmesinin %10 ile %30 arasında değir. Ölü zaman gecikmesi ne kadar düşük olursa solenoidin doğrusallığı o kadar iyi demektir. Buna karşılık ölü zaman gecikmesi aç/kapa solenoid valflerde % 75'lere kadar çıkabilmektedir.

Oransal valflerin toplam zaman gecikmesi (ölü zaman gecikmesi artı cevap eğrisinin değerine ulaşması için geçen zaman), valfin büyüklüğüne bağlı olarak yaklaşık 40 ms ile 250 ms arasında değişmektedir. Adsal debiye bağlı olarak tanımlanan valf kapasitesi arttıkça akışkan kuvvetleri artışına bağlı olarak zaman gecikmesinin de o oranda artacağı aşikârdır.

### 3.4. Servo Solenoid veya Yüksek Hızlı Solenoid Valfler

Bu valfler oransal valflerin ileri seviyede gelişimin sonucunda ortaya çıkmış olup 1980'lerden bu yana kullanılmaktadırlar. Bu valflerde, yüksek hızlı elektriksel geribeslemeli doğrusal solenoid elemanı yanında, servovalf kalitesinde sürgü ve sürgü kılıfı kullanılır. Daha çok yön denetim valfi biçimde olup valf sürgüsü, servovalflerde olduğu gibi genellikle sıfır binişlidir. Cevap hızları, valf büyüklüğüne bağlı olarak % 5'lik giriş sinyali genliğinde 150 Hz'e kadar çıkabilmektedir. % 100'lük giriş işareti genliğinde bu değer yaklaşık 50-60 Hz civarındadır. Servovalflerden % 50 daha ucuz olan bu valfler, dinamik başarımlar açısından oransal valflerin yetersiz kaldığı endüstriyel alanlarda kullanılabilirler.

#### 3.4.1. Karakteristikleri

Valfin akış kapasitesini belirleyen adsal debi, servovalflerde olduğu gibi 70 bar basınç düşümündeki debi olarak tanımlanır. Akışkan kapasiteleri 3 lt/dk ile 200 lt/dak arasında değişmektedir.

Karakteristik akış eğrileri doğrusal olup bu durum sürgü kılıfına özel geometrik geçiş deliği açılarak sağlanmaktadır. Akışkan geçiş deliği dikdörtgen biçiminde olan valflerde akış eğrisi tamamen doğrusaldır. Bu yapısı ile servovalflere çok benzemektedirler. Gerçekte servovalflerde imalatı zorlaştıran ve dolayısıyla maliyeti artıran elemanlardan birisi sıfır binişli ve belli bir kılıf içinde çalışan valf sürgüsüdür. Buna karşılık bu valflerde, servovalflerde olduğu gibi çok küçük deliklere ve hareket mesafesine sahip plaka-lüle düzenlemesi yoktur. Bu nedenle de bu valflerin kirleticilerden korunması için 10µm altında filtreleme yeterli olmaktadır.

Dinamik başarımları servovalfler seviyesine erişmiş olmamakla beraber onlara oldukça yakındır. Dinamik karakteristik eğrileri, Şekil 2'de servovalf için verilen eğriler ile benzerdir. Cevap hızları %5'lik giriş genliğinde 200 Hz civarında olup %100'lük giriş genliğinde ise 50 Hz civarındadır.

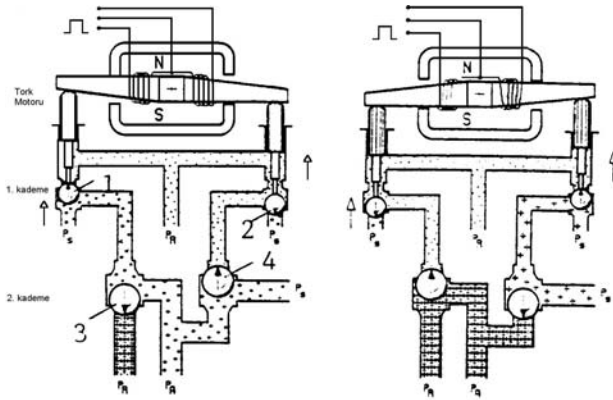
#### 3.4.2. Kullanım Alanları

Servo solenoid valfler ile en yüksek gelişim aşamasına erişmiş bulunan oransal valfler endüstriyel alanda servovalflerin kullanıldığı hemen hemen her alanda kullanılabilir hale gelmiştir. Çok yüksek akışkan debilerinde çok yüksek cevap hızı ve denetim hassasiyeti gerektirmeyen uygulamalarda oransal valfler yeterli olmaktadır. Buna karşılık daha yüksek dinamik başarımlar ve cevap hızı gerektiren; CNC takım tezgahları, çelik endüstrisi, rüzgar türbinleri, kağıt endüstrisi, seramik endüstrisi, kereste ve mobilya endüstrisi, gemiler, kaldırma platformu, kar temizleme araçları, hidrolik direksiyon gibi pek çok elektrohidrolik devrelerin yer aldığı uygulamalarda servo solenoid valfler yaygın olarak kullanılmaktadır.

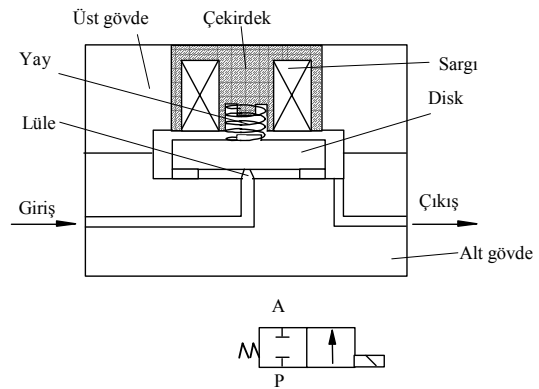
#### 4. HIZLI ANAHTARLAMA VALFLERİ VE DİĞER ALTERNATİF VALFLER

Anahtarlama valfleri genellikle oturma elemanı tipinde aç/kapa türü valflerdir. Hidrolik sistemlerde anahtarlama valfi üzerinde yapılan ilk çalışmalar [33] bilye elemanlı valf üzerinde gerçekleştirilmiştir. Daha sonraki çalışmalarda [37] bu valf sayısal denetimli uçuş sistemlerinde uygulanmış ve elektriksel kumandasında tork motoru kullanılmıştır. 1.5 ms gibi çok yüksek cevap hızlarına sahip bu valflerin imalatına geçilmiş olup oransal kumandalarında darbe genişlik modülasyon (PWM) tekniklerinden yararlanılmıştır. Şekil 6'da digivalve adı altında ticari amaçla piyasaya sürülen, çift kademeli tork motoru ile çalışan 3/2 bir bilyeli valf örneği görülmektedir. Toplam anahtarlama hızları 1-1.5 ms arasında olan bu valflerle 200 bar basınç altında en çok 20 lt/dak debi sağlanmıştır.

Özel bir solenoid devresinden yararlanılarak serbest yüzer diskli hızlı bir anahtarlama valfi üzerinde yapılan çalışmada [41] tek kademede 3-5ms cevap hızlarına ve 4.5l/dak (100bar,disk valf) akışkan debilerine erişilebileceği gösterilmiştir. Aç/kapa türü olan bu valfin oransal çalışmasını gerçekleştirmek amacı ile darbe genişlik modülasyon (PWM) ve mikroişlemci sinyal işleme tekniklerinden yararlanılmıştır [42]. Daha sonra yapılan bir çalışmada [45] özel bir solenoid devresi, disk, yay ve lüle elemanından oluşan valf, (Şekil 7) 50 bar sistem basıncında 3 ms cevap hızındadır ve 15 l/dak'lık bir debiye sahiptir. Darbe genişlik modülasyon tekniği ile giriş işaretine orantılı bir çıkış işareti veren bir oransal valf gibi çalıştırılabilir. Bu özelliğinden yararlanılarak denetim sistemlerinde kullanılması uygun hale gelmiştir. Bir başka çalışmada [52] bir hidrolik silindirin sürülmesinde her biri 2/2 lik solenoidli 4 adet valf ile 4 yolu yön denetim valfi oluşturulmuştur. Aç-kapa türü olan bu solenoid valflerin çok özel sinyal işleme teknikleri ve mikroişlemci yardımı ile oransal olarak çalıştırılması gerçekleştirilmiştir. Burada fark darbe genişlik modülasyon tekniklerinden yararlanılmıştır. Hızlı aç/kapa solenoidli valfler üzerinde özellikle fark darbe genişlik modülasyon tekniğine dayanan çalışmalar sürdürülmektedir



Şekil 6. Digivalve

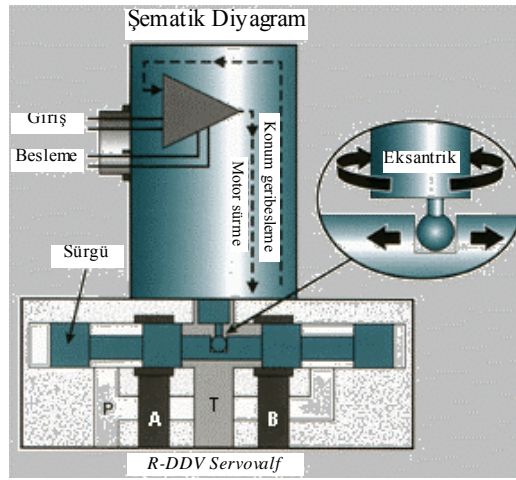


Şekil 7. Disk valf modeli

Alternatif valf örneği olarak özellikle ABD piyasasında yer alan ve servovalf olarak sunulan, Şekil 8'deki valfi ele alabiliriz. Doğrudan sürülen servovalf (DDV) adı ile anılan valf bir fırçasız DA elektrik motoru ile bir sürgülü valftan meydana gelmiştir.

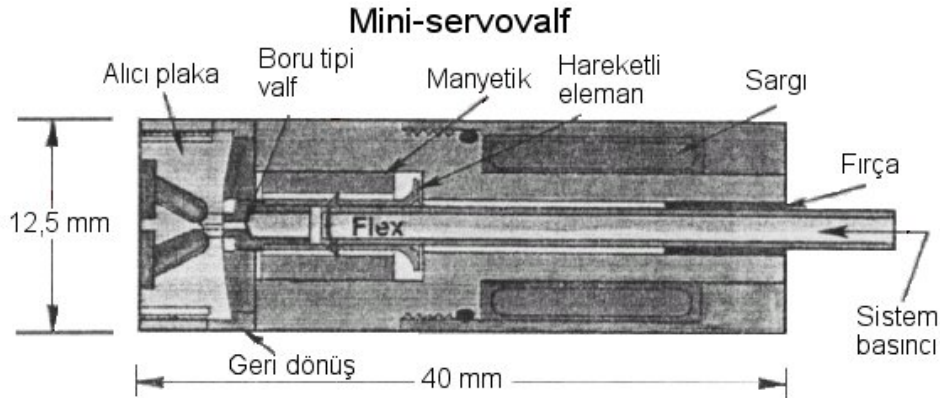
Sınırlı dönmeye sahip DA motoru valf sürgüsünü doğrudan hareket ettirerek akışkan akımı sağlar. Motorun açılma hareketini öteleme hareketine dönüştürmek için motor miline bir eksantrik ilave edilmiştir. Bu valf sistemi aynı zamanda motor kılıfı içersine yerleştirilmiş, gelişkin denetim algoritması da içeren bir elektronik denetleyici devresi ile birlikte gelmektedir. Denetleyici elektronik olarak algılanan sürgü konumunu arzu edilen konum ile karşılaştırarak sürgünün konumunu arzu edilen değerde tutmaya çalışır. Valf tek kademeli olup sistem basıncından bağımsız çalışmaktadır. Sonuçta kirlenmeye ve aşınmaya maruz kalabilecek ve bakım gerektirecek orifis, lüle ve jet-boru ve filtreleme ihtiyacı göstermez. Valfin akışkan kapasitesi 200 lt/dak' olup valf büyüklüğüne bağlı olarak cevap hızı da 200 Hz'e kadar çıkabilmektedir.

Robot uygulamalarında, servovalflere alternatif olarak sunulan diğer bir valf türü de tek kademeli, 4 yollu, en küçüğü 28 gr ağırlığında, 45 mm boyunda, 12.5 mm çapında minyatür bir valftir. Şekil 9'da verildiği gibi valfin mıknatıssal devresi bir kalıcı bir de elektromıknatıstan ibaret olup basınçlı akışkanı kullanıcıya yönlendirmek için esneyebilir hareketli bir jet-boru benzeri eleman kullanılmaktadır. Çok küçük boyutlara sahip ve hiç bir sürtünme yüzeyi içermeyen valfin dinamik başarımı aşikâr olarak çok yüksektir. En küçük boyutlusu üzerinde yapılan deneysel çalışmalarda [47] frekans cevabı 700 Hz mertebelerinde bulunmuştur. Çalışma basıncı 35 bar ile 200 bar arasında değişen bu valfler tek kademede 1.5-9 lt/dak. debi sağlayabilmektedirler. Elektriksel güç tüketimleri 7-8 W olup uyarı akımları 0.7 A civarındadır. Çok sıkı toleranslar gerektirmediğinden yağdaki kirleticilere karşı daha az hassas olduğu görülmektedir.



Şekil 8. DDV servovalf

En önemli uygulama alanı olarak da robotlar ve özellikle de robot elleri gösterilmektedir. Gerçekte ABD firması Sarcos robotları için geliştirilmiştir. Tek kademede herhangi bir geribesleme mekanizması içermeyen bu valflerin normal hidrolik silindirlerde doğrudan kullanımı pek uygun olmadığından bu valflerle geribeslemeli olarak çalışacak özel hidrolik ve pnömatik silindirler geliştirilmiştir. Minyatür valflerin herhangi bir boru bağlantısı gerektirmeden üzerine doğrudan yerleştirilebildiği bu silindirlerde aşikâr olarak çok küçük boyutlardadır. Tipik olarak; boyları 50-140mm., çapları 15-25mm., strokları 25-75mm, ve sağladıkları kuvvet 350-1350 N arasında değişmektedir. Valf ile silindir arasına yerleştirilen özel bir kuvvet algılayıcısı yardımıyla tüm sistemin geribeslemeli oransal denetimi sağlanmaktadır.



Şekil 9. Mini-servovalf

## 5. ELEKTROHİDROLİK VALFLERİN ELEKTRONİK DENETİMİ

Elektrohidrolik valflerin kapalı döngü denetim sistemi içinde zayıf bir elektrik sinyali ile sürülmesi ve denetlenmesi için elektronik devrelere ihtiyaç vardır. Bu devreler ise; analog ve dijital olmak üzere iki şekilde karşımıza çıkar. Analog devrenin en önemli kısmını ise sürücü devre teşkil eder. Ayrıca analog devre, kullanılacak valfin türü ve kullanım alanına göre bir toplama veya hata seçici, basamak, ramp, PWM, çift kademe gibi çeşitli sinyal üretim ve işleme, PID denetleyicisi gibi devrelerinin bir veya bir kaçını içerebilir. Konum (LVDT) geribeslemeli valflerde ayrıca osilatör ve demodülatör gibi sinyal işleme devreleri de yer alır.

Akım sürme devresi girişine uygulanan zayıf akımlı (1-5mA) gerilim sinyaline karşılık valf sargısı üzerinden giriş sinyaline orantılı kuvvetlendirilmiş bir akım sinyali (servovalflerde 10-500 mA, solenoidlerde 200-3000 mA mertebelerinde) sürer. Akım sürme devresinde yer alan akım geribeslemesi yoluyla giriş gerilimi ile çıkış akımı arasında doğrusal bir bağıntı sağlanır. Akım geribeslemesi ayrıca özellikle sıcaklığa bağlı olarak sargı direncinde meydana gelen değişimlere rağmen akımın sabit bir değerde denetlenmesini de sağlar. Basit bir akım sürme devresi bir işlemsel kuvvetlendirici ile bir veya daha fazla tranzistörden meydana gelir. Bazı uygulamalarda toplama kuvvetlendiricisi ve akım sürücü devre valf üzerinde, valf ile birlikte gelir.

Dijital devreler daha çok analog akım sürücü devreye ilaveten valfin kapalı döngü denetim sistemi içinde kullanımında gereklidir. Özellikle CNC takım tezgahları ve benzeri uygulamalarda hassas konum denetimi gerektiren yerlerde özel hazırlanmış ve standartize edilmiş hazır dijital kartlar kullanılır. Bu kartlar ile PID denetleyicisi dahil olmak üzere karmaşık denetim algoritması işlemleri yerine getirilebilir. Dijital devreler enkoder gibi dijital konum geribesleme elemanı, PLC ve PC bilgisayarlar ile iletişim kurabilir.

## 6. KARŞILAŞTIRMA

Piyasada yaygın olarak kullanılan solenoid valfler ile servovalfler maliyet açısından karşılaştırıldığında genellikle basit aç/kapa türü solenoid valfler baz alınmaktadır. Buna göre konum geribeslemesiz oransal valfler basit solenoidlerin en az 2 katı, geribeslemeli oransal valfler 2.5 katı, servo solenoid valfler 3.5 katı ve servovalfler ise en 6 katı maliyetindedir. İmalat kolaylığı açısından ise en gevşek toleranstan en sıkı toleransa doğru gidecek olursak maliyet açısından verilen sıralamayı izlemek gerekir. Buna karşılık dinamik başarımlar açısından en iyisi servovalfler olmak üzere bu sırayı tersten izlemek gerekir. Yağdaki kirleticilere karşı filtreleme kalitesi basit solenoid valfler için 20 µm yeterli görülürken servovalflerde bu değer 3 µm ve altında olması istenir. Gerek normal oransal valfler ve hızlı oransal valflerde ise 10 µm ve altında filtreleme yeterlidir.

Dinamik davranış açısından en hızlısı servovalfler olup % 100 giriş işaretinde erişebildiği en yüksek frekans 250 Hz, bunu izleyen servo solenoid valflerin en yüksek cevap frekansı 200 Hz civarında ve geribeslemeli oransal valflerde 70 Hz ve geribeslemesiz oransal valflerde da 50 Hz dir. Histerisiz servo solenoid valfler ve servovalflerde %0.5'in altında olup servo solenoid valflerde tipik olarak %0.2'nin altında, servovalflerde ise %0.1'in altındadır. Buna karşılık geribeslemesiz oransal valflerde histerisiz %5 ve geribeslemeli oransal valflerde da %1'in altındadır. Genelde kapalı döngü konum denetiminde yaklaşık %1 civarında konumlandırma tamlığı istenen yerlerde oransal valfler uygun görülmektedir. Buna karşılık %0.5 altında konumlandırma tamlığı gerektiren yerlerde servo solenoidler veya servovalfler uygun görülmektedir.

Hızlı anahtarlama valfleri daha çok gelişim aşamasında olmakla beraber bilyeli bir valf türü Digivalve adı altında ticari anlamda 1985'lerden sonra Hollanda'da piyasaya sürülmüş olmakla beraber şu anki durumu hakkında bir bilgiye erişilememiştir. Maliyeti oldukça düşük olup geribeslemesiz oransal valfler civarındadır. Valfi oluşturan, oturma tipi bilye elemanını anahtarlama için tork motoru türü basit bir

elektromekanik aygıt kullanılmakta olup kirleticilere karşı hassasiyeti çok düşüktür. Sadece 10 µm'lik bir filtreleme işlemi yeterli görülmektedir. Bu valflerin imalatı basit olup çok sıkı imalat toleransı gerektirmemektedir. Bu da sonuçta maliyetin oldukça düşük kalmasını sağlamaktadır. Darbe genişlik modülasyon tekniği ile sürülen bu valflerin anahtarlama hızı 1 ms'nin altında kalmakla beraber % 80'lik bir oransallık sınırı içinde çalışma frekansı 100 Hz civarındadır.

Servovalflere alternatif olduğunu iddia eden DDV servovalfı maliyet açısından daha ucuz ve dinamik başarımlı açısından servovalflere yaklaşmış gibi görünmekle beraber, histerisiz ve doğrusallık açısından zayıf görünmektedir. Gerçekte valfin elektriksel giriş işareti ile akışkan çıkış debisi arasındaki karakteristik eğrileri verilmemiştir. Yalnız doğrusallığın %7,5 civarında olduğu belirtilmektedir ki bu da hassas bir konum denetimi için yeterli görülmemektedir. Histerisiz ise %2 civarında olup bu değer konum geribeslemeli oransal valflerin değerinden daha kötüdür.

Mini-servovalf olarak tanımlanan valf ise robot ve hatta robot eli gibi çok özel uygulamalarda kullanılmak üzere geliştirilmiş ve halihazır piyasa durumu hakkında pek bir bilgi yoktur. Dolayısıyla gerçek anlamda diğer valflerle bir karşılaştırılması yapılamamıştır.

## SONUÇ

Geribeslemeli denetim döngüsü içinde kullanılan elektrohidrolik valfler bir elektriksel giriş işareti sonucu sağladıkları hidrolik akışkan çıkışı ile bir eyleyicinin (hidrolik motor veya silindir) konum, hız veya ivmesini hassas bir şekilde denetler. Bu anlamda en hassas denetim sağlayan elektrohidrolik valf türü servovalftir. Servovalflerde kullanılan en önemli elemanı tork motorunun gelişmesi 1940'lı yıllarda tamamlanmıştır. Diğer önemli elemanı valf sürgüsü ve sürgünün içinde çalıştığı kılıfın imalatı, imalat endüstrisindeki hassas imalat olanaklarına bağlı olarak gerekli en sıkı toleranslarda yapılabilir.

Elektrohidrolik denetim sistemleri içinde, servovalflere yüksek dinamik başarımlı doğrusal denetim sağlamanın limiti olarak bakılabilir. Bazı dezavantajlarına rağmen halihazırda servovalflerin sağladığı yüksek dinamik başarımlı, güvenilirlik ve hassasiyette bir geribeslemeli denetim sağlayacak valf türü yoktur. Bununla beraber bir yandan aşırı yüksek maliyet ve kirleticilere karşı aşırı hassasiyet, diğer yandan dinamik başarımları servovalflere yaklaşan hızlı oransal valfler veya servo solenoidlerinin ortaya çıkması servovalflerin endüstriyel alanda kullanılmalarını kısıtlamıştır. Ayrıca elektronik devrelerin yardım ile de hızlı oransal valflerin başarımlarını servovalflere çok yaklaştırmıştır.

Gerek hızlı anahtarlama valfleri ve gerekse alternatif valfler zamanla belli özel uygulama alanlarında yer alacak gibi görünmektedir. Yalnız bunun için bu valfler üzerinde daha fazla çalışma yapmak gerekecektir. Sonuç olarak endüstriyel alanda, daha basit yapıda, kullanımı kolay, kirleticilere karşı fazla hassas olmayan ve dinamik başarımlı yüksek, düşük maliyetli valfler her zaman kabul görecektir.

## KAYNAKLAR

- [1] DUNN, J. F., A study of permanent-magnet torque motor, D.A.C.L Research Memorandum No. R.M. 6387-5 Dynamic Analysis and Control Laboratory, M.I.T, 1954.
- [2] FENG, T.Y., Static and Dynamic Control Characteristics of Flapper-Nozzle Valves, Journal of Basic Engineering, Trans. of ASME, pp. 275-284, Sept. 1959.
- [3] LIÇHTROWIÇZ, A., Flow and Force Characteristics of Flapper Valves, 3 rd International Fluid Power Symposium, pp. B1-1-B1-11, 9-11 May, 1973.
- [4] IKEBE, Y. and NAKADA, T., On a piezoelectric flapper type servovalve operated by pulse-width-modulated signal, IEEE JACC, pp.945-953, 1973.

- [5] LEQUOC, S., CHENG, R.M.H. and LAYE, A., Investigation of an Electrohydraulic Servovalve With Tunable Return Pressure and Drain Orifice, *Trans. Of ASME, Journal of Dynamics, Measurement, and Control*, vol. 109, pp. 276-285, Sept. 1987.
- [6] ARAFA, H.A. and RİZK, M., Spool hydraulic stiffness and flow force effects in electrohydraulic servo-valves, *Proc. Instn. Mech. Engrs Vol. 201, No C3*, pp. 193-199, 1987.
- [7] LIN, S.J. and AKERS A., A Nonlinear Model of a Flapper-Nozzle Valve, *Proc. Of American Control Conference, Vol. 2*, pp. 1520-1525, 1989.
- [8] LIN, S.J. and AKERS, A., Dynamic analysis of a flapper- nozzle valve, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 113, pp.163-167, 1991.
- [9] TSAI, S.T., AKERS, A. and LIN, S.J., Modeling and dynamic evaluation of a two-stage two-spool servovalve used for pressure control, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 113, pp.709-713, 1991.
- [10] BURROWS, C.R., MU, C. and DARLING, J., A dynamic analysis of a nozzle-flapper valve with integral squeeze film damper, *Transaction of ASME, Vol. 113*, pp.702-708, 1991.
- [11] PLUMMER, A.R. and VAUGHAN, N.D., Robust Adaptive Control for Hydraulic Servosystems, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, pp. 237-244, June 1996.
- [12] TUNAY, I and KAYNAK, O., Provident Control of an Electrohydraulic Servo with Experimental Results, *Mechatronics Vol. 6, No. 3*, pp. 249-260, 1996.
- [13] TSUCHIYA, T., YAMAKADO, M., ISHII, M. and SUGANO, M., Fundamental Study on Vibration Control Using the Derivative of Acceleration "Jerk" Sensor, *JSME International Journal, Series C*, Vol. 41, No.4, pp. 786-791, 1998.
- [14] ZIAEI, K. and SEPEHRI, N., Modeling and identification of electrohydraulic servos, *Mechatronics Vol. 10*, pp. 761-772, 2000.
- [15] LIU, G. P. and DALEY, S., Optimal-tuning nonlinear PID control of hydraulic systems, *Control Engineering Practice* 8, pp 1045-1053, 2000.
- [16] NIKSEFAT, N. and SEPEHRI, N., Design and experimental evaluation of a robust force controller for an electro-hydraulic actuator via quantitative feedback theory, *Control Engineering Practice* 8, pp. 1335-1345, 2000.
- [17] TAFT, C. K. . The stability of pilot-operated proportional Hydraulic Valves, *Fluid Power systems and control conference, Univ. Of Wisconsin, May 21-23, 1975*.
- [18] RATIACZAK, H., Proportionalmagnete für Hydrventile, *Fluid Vol. 6*, pp.30-31, 1974.
- [19] HEISER, V.J., Proportionalventile mit lagegeregeltem magnetsteilglied, *Bosch Tech. Brichte* 6, pp.34-43, 1977.
- [20] QURESHI, A.S., Proportional solenoids: Design analysis and application to mobile hydraulic valves, *Proceedings of the 33<sup>rd</sup> National Conference on Fluid Power, Chicago, Vol.31* pp.197-206, 1977.
- [21] HARMS L.C., Electro-hydraulic proportional flow control valves, *Proceedings of the 33<sup>rd</sup> National Conference on Fluid Power, Chicago, Vol. 31*, pp.193-196, 1977.
- [22] LU, Y.H., Statisches und dynamisches verhalten von proportionalmagneten, o+p ölhydraulik und pneumatik, Nr.5, pp.403-407, 1981.
- [23] LEE, C.O. and SONG, C.S., Untersuchungen an einem proportionalmagneten, o+p ölhydraulik und pneumatik, Nr.6, pp.497-499, 1981.
- [24] LAI, J. Y. and CHEN, Y.R., Adaptive Flow Rate Control of an Hydraulic Proportional Valve, *JSME International Journal, Series III, Vol. 35, No. 4*, pp. 582-590, 1992.
- [25] HEYEN,G., Position control with low cost proportional valves, *EURO+PEAN Journal For Fluid Power*, pp 20-25, Feb 1992.
- [26] VAUGHAN, N. D. and GAMBLE, J.B., The Modeling and Simulation of a proportional solenoid valve, *Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 118, pp.120-125, March 1996.
- [27] VAUGHAN, N. D. and GAMBLE, J.B., Comparison of Sliding Mode Control With State-feedback and PID control Applied to a Proportional Solenoid Valve, *Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 118, pp.434-438, Sept. 1996.
- [28] GÖTZ, W., HAACK, S. and MERTLİK, R., Electrohydraulic Proportional and control systems, *Bosch Automation*, 1999.
- [29] LANG, R. A., Proportional and servo valve Technology, *Rexroth Hydraulics*, 1989.

- [30] MURTAUGH, S. A., An Introduction to the time modulated acceleration switching electrohydraulic servomechanism, ASME, Journal of Basic Engineering, pp. 263-268, 1959.
- [31] TSAI, S. C. and UKRAINETZ, P.R., Response characteristics of a pulse-width-modulated Electrohydraulic servo, Trans. ASME, Journal of Basic Engineering, pp. 204-214, 1970.
- [32] GOLDSTEIN, S.R. and RICHARDSON, H.H., A differential pulse-length modulated pneumatic servo utilizing floating flapper disk switching disc valves, Trans. ASME, Journal of Basic Engineering, Series C-D, pp. 427-437, 1968.
- [33] POST K.H., Study of electro-hydraulic control valves with fluidic ball elements, Institut für Flugführung, Braunschweig, Report DLR-FB 73-75, 1974.
- [34] EL-IBIARY, Y. , UKRAINETZ, P.R. and NIKIFORUK, P.N., Design and Performance of some new digital electrohydraulic valves, Proc. Of 33<sup>rd</sup> Conference an fluid power, Vol. 31, pp. 116-125, 25-27 Oct. 1977.
- [35] EL-IBIARY, Y. , UKRAINETZ, P.R. and NIKIFORUK, P.N., Design and assessment of a new solenoid-operated ball valve for digital applications, Proc. Of 34<sup>th</sup> Conference an fluid power, Vol. 32, pp. 31-34, 7-9 Nov. 1978.
- [36] EL-IBIARY, Y., DODDS, D.E. and NIKIFORUK, P.N., Load position control with on-off hydraulic valves, Hydraulics & Pneumatics, pp. 149-151, 1979.
- [37] MANSFELD G., Fast switching ball valves as digital control elements for an electro-hydraulic servo actuator, 6<sup>th</sup> International Fluid Power Symposium, Cambridge, BHRA paper G1, 1981.
- [38] DRIJSEN, R.H.H., Digivalve is a super fast switching ball valve, Het Offshore blad 1/86, Feb 1986.
- [39] MUTO, T., YAMADA, H. and SUEMATSU, Y., Digital Control of Hydraulic Actuator system operated by differential pulse-width- modulation, JSME International Journal, Series III, Vol.33, No.4, pp 641-648, 1990.
- [40] SUEMATSU, Y., YAMADA, H., TSUKAMOTO, T. and MUTO, T., Digital Control of Electrohydraulic servo system operated by differential pulse-width- modulation, JSME International Journal, Series III, Vol.33, No.4, pp 641-648, 1990.
- [41] YÜKSEL İ., An investigation of electro-hydraulic floating disc switching valves, PhD Thesis, University of Surrey, 1981.
- [42] USMAN A., Development of an electro-hydraulic floating double-disc valve, PhD Thesis, University of Surrey, 1984.
- [43] LAU K.S., Position controlled disc valve, PhD Thesis, University of Surrey, 1987.
- [44] SUN Y. and PARKER G.A., Steady-state theoretical model of an electro-hydraulic single disk pilot valve, Trans ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.114, pp.293-298, 1992.
- [45] ŞENGİRİGN, M., Elektrohidrolik disk valflerin geliştirilmesi ve bunların çeşitli sinyal işleme teknikleri yolu ile denetlenmesinin incelenmesi, Doktora tezi, U. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2000.
- [46] MANFRED, L., and LÜ, Y., Pneumatischer Positionierantrieb mit Schaltventilen, o+p ölhydraulik und pneumatik, 35, Nr.2, pp. 127-131, 1991.
- [47] FRASER, S., JACOBSEN, S., POTTER, D. and DAVIS, C., Miniature High Performance Servovalves, International Fluid Power Exposition and Technical Conference, Chicago (Submitted), pp.1-6, 1992.
- [48] www.hrtextron.com
- [49] MERRITT, H.E., "Hydraulic Control Systems", John Wiley & Sons, Inc., 1967.
- [50] MASKREY, R.H. and THAYE, W.J. r, A brief history of electrohydraulic servomechanism, Trans. ASME, Vol. 100 pp.110-116, 1978
- [51] GUILLON, M., "Hydraulic Servo Systems - Analysis and Design", Butterworths, London 1968.
- [52] WENNMACHER, G., Elektrohdraulischer positionierantriebmit schnellschaltventilen und digitaler regelung, o\*p ölhydraulik und pneumatik, Nr.2, pp. 85-90, 1992.

## ÖZGEÇMİŞLER

### İbrahim YÜKSEL

1951 İzmit doğumlu olup 1975 yılında Sakarya Devlet Mühendislik-Mimarlık Akademisi Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 1978 yılında University of Surrey, Guildford, İNGİLTERE'de M.Sc. (Yüksek Lisans) ve. 1981 yılında yine aynı Üniversitede Ph.D (Doktora) çalışmalarını tamamladı. 1982 tarihinde Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde Yardımcı Doçent olarak göreve başlamıştır. 1986 yılında Doçent ve 1993 yılında Profesör unvanını almıştır. Öğretim üyesi görevine ilaveten yaklaşık 9 yıl Dekan Yardımcısı ve 16 Ekim 1997-16 Ekim 2000 tarihleri arasında Dekan olarak da görev yapmıştır. Çalışma konuları elektrohidrolik sistemler, elektrohidrolik valfların geliştirilmesi, otomatik kontrol, otomasyon sistemleri, sistem dinamiği, modelleme ve simulasyondur. 'Otomatik Kontrol' ve 'MATLAB ile Mühendislik Sistemlerinin Analizi ve Çözümü' isimli iki adet basılı ders kitabı mevcuttur. Evli ve bir kız babasıdır.

### Mesut ŞENGİRGİN

1967 yılında Mustafakemalpaşa-BURSA'da doğdu. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden 1989 yılında "Lisans", Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nden 1992 yılında "Yüksek Lisans" ve 2000 yılında "Doktora" derecelerini aldı. Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde 1989-1997 yılları arasında Araştırma Görevlisi olarak çalıştı. 1997 yılından buyana halen aynı üniversitede Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Çalışmaları sistem dinamiği, hidrolik ve pnömatik sistemlerin modellenmesi ve kontrolü, sistem modelleme ve simulasyonu alanlarında yoğunlaşmaktadır