

## ELEKTROPNÖMATİK ve ALTERNATİF VALFLERİN GELİŞİMİ VE KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

*Elif ERZAN TOPÇU\**

*İbrahim YÜKSEL\**

**Özet:** Bu çalışmada pnömatik denetim sistemlerinde kullanılan farklı yapılardaki standart elektropnömatik ve alternatif valflerin gelişimi ve karakteristikleri ele alınmıştır. Ayrıca doktora çalışması kapsamında geliştirilen bir hızlı anahtarlama valfinin yapısı ve karakteristikleri incelenmiştir. Hızlı anahtarlama valflerinin ve diğer alternatif valflerin gelecekteki uygulamalarda önemli bir yer tutacağı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Elektropnömatik Valf, Hızlı Anahtarlama Valfi, Alternatif Pnömatik Valfler.

### Development of Electropneumatic and Alternative Valves, Investigation of Their Characteristics

**Abstract:** In this study, the development and characteristics of different types of standard electropneumatic valves and alternative valves used in pneumatic control systems are reviewed. Also characteristics of a fast switching valve developed in a PhD work are investigated. It is emphasized that both the fast switching valves and the alternative valves are likely to take place more and more in the future applications.

**Key Words:** Electropneumatic Valve, Fast Switching Valve, Alternative Pneumatic Valves.

## 1. GİRİŞ

Elektropnömatik valfler elektriksel aygıtlar ile pnömatik sistem arasında bir arayüz elemanı görevi gören ve sistemin elektriksel bir sinyal ile uzaktan kumandalı çalışmasını sağlayan temel elemanlardır. Elektropnömatik valfler genel olarak servo, oransal, basit aç-kapa ve hızlı anahtarlama valfleri biçiminde sınıflandırılabilirler. Servo valfler hassas bir oransal denetim sağlamakla beraber yapıları karmaşık ve maliyetleri de çok yüksektir. Bu nedenle endüstrinin tüm alanlarında yaygın olarak kullanılamamakla beraber hidrolik sistemlerde kullanımı daha yaygındır. Daha basit yapıda ve o oranda düşük maliyetli solenoid valfler genelde aç-kapa etkisi ile çalışmaktadırlar. Bununla birlikte çeşitli teknikler kullanarak bu valfleri oransal çalıştırmak mümkün olmaktadır. Bu nedenlerle elektropnömatik valfler üzerine yapılan çalışmaların büyük bir kısmı servo valfler yerine solenoid veya diğer alternatif valflerin geliştirilmesi, bu tür valflerin oransal çalıştırılması ve elektropnömatik sistemlerin denetlenmesi üzerinedir.

Elektropnömatik valflerin tasarımıyla ilgili ilk çalışmalardan biri 1979 yılında Taft ve Harned (1979) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada dört yollu, aç-kapa, elektro-akışkan valf tasarımı ele alınmış, valfin elektriksel kumandası kalıcı ve elektromıknatıstan oluşan bir mıknatıs devresi ile gerçekleştirilmiştir. Cabral ve diğ. (2002) dört yollu, dönel disk elemanlı pnömatik valf tasarımı ve imalatı üzerine yaptıkları çalışmada valfin giriş ve çıkış orifislerini farklı boyutlarda seçerek bir taraftan akışın oransallığını arttırmışlar diğer taraftan da sistemin cevap hızının ve enerji veriminin iyileştirilmesini sağlamışlardır. Elektropnömatik servo valf üzerine diğer bir çalışma da Choi ve diğ. (2000) tarafından yapılmıştır. Çalışmalarında sayısal bir denetleyici ile denetlenen hareketli-bobin eyleyici tarafından doğrudan çalıştırılan oturma elemanlı yeni tür bir elektropnömatik servo valf geliştirmişlerdir. Ayrıca sistemin hareketli elemanlarında kullanılan O-ringlerden dolayı oluşan sürtünmeyi telafi etmek için bir algoritma da uygulamışlardır. Bublitz ve Murrenhoff (2002), Bublitz (2001) sistemin güç gereksinimini azaltmayı hedefleyerek dolaylı kumandalı oransal bir valf geliştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Yaptıkları çalışma ile valfin güç gereksinimini 1 W' ın altına kadar düşürülebilmişlerdir. Sato ve diğ. (2002) soğutucu sıvı yerine  $-10/~-30$  °C llerde soğuk hava kullanan bir kuru kesme/öğütme sistemi için termal yalıtım fonksiyonuna sahip

\* Uludağ Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 16059, Bursa.

elektropnömatik valf geliştirilmesi üzerine çalışmışlardır. Kajima (1993) çalışmasında yüksek hızlı solenoid valf geliştirilmesini ele almış ve bu çalışmada solenoid valflerin enerjilendirilmesi ile ilgili iki farklı yöntem uygulamıştır. Topçu (2005) tarafından yapılan doktora tez çalışmasında ise pnömatik denetim sistemlerinde kullanılacak elektropnömatik bir hızlı anahtarlama valfi geliştirilmiş, statik ve dinamik karakteristikleri incelenmiştir. Valfin zaman oransal akış karakteristiği Darbe Genişlik Modülasyon (DGM) tekniği ile sağlanmıştır. Valf DGM tekniği ile sürülerek doğrusal bir etki sağlanmaya çalışılmıştır. Geliştirilen valfin elektropnömatik konum denetim sisteminde uygulanabilirliğini göstermek için sistemin basamak giriş cevabı çeşitli denetim yordamları kullanılarak incelenmiştir.

DGM tekniği genelde doğrusal olmayan bir anahtarlama elemanı çıkışından doğrusal bağıntılar elde etmek için kullanılan bir yöntemdir. Sabit bir frekansta darbe doluluk/boşluk oranına bağlı olarak anahtarlama elemanı çıkışından zaman ortalaması oransal bir çıkış sinyali elde edilir. Elektropnömatik valfler üzerinde DGM tekniği ile ilgili yapılan ilk çalışmalardan bazıları pnömatik sistemlerin konum, basınç denetimleri üzerinedir (Goldstein ve Richardson, 1968, Noritsugu, 1987). Royston ve Singh (1993) konum denetiminde kullanılan bir döner valf üzerinde DGM tekniğinin uygulanmasını incelemiştir. Shih ve Ma (1998a), Shih ve Ma (1998b) DGM ve modifiye edilmiş farksal DGM tekniklerini çeşitli denetim yordamları ile birlikte kullanarak pnömatik sistemlerin kullanım avantajlarını incelemiştir. Ye ve diğ. (1992) DGM solenoid valfin modellemesini ele alarak benzetim ve denetleyici tasarımı için iki adet kütle akış modeli geliştirmişlerdir. Topçu ve Yüksel (2003) bilgisayar denetimli elektropnömatik bir sistemde konum denetimini aç-kapa tipi denetim ve değişik frekanslarda DGM tekniğini kullanarak incelemiştir. Topçu ve Yüksel (2005a) çalışmalarında elektropnömatik hızlı anahtarlama valfinin tasarımını ve karakteristiklerini incelemiştir. Topçu ve Yüksel (2005b) elektropnömatik hızlı anahtarlama valfinin statik ve dinamik karakteristiklerini ve bu valfin DGM tekniği ile sürülmesini incelemiştir. Topçu ve Yüksel (2005c) yaptıkları diğer bir çalışmada prototip hızlı anahtarlama valfinin pnömatik sistemde uygulanabilirliğini deneysel olarak araştırmışlardır. Imaizumi ve diğ. (2001) yaptıkları çalışmada aç-kapa valflerin oransal sürülmesinde kullanılmak üzere yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Gentile ve diğ. (2002) yaptıkları çalışmada DGM denetimli valfler kullanarak pnömatik sistemin konum denetimini araştırmışlardır. Değişik yük, giriş ve akış denetim şartları altında yapılan deneysel çalışmalar sonucu kullanılan sistemin performansının servo valflerin kullanıldığı sistemlerin performansına yakın olduğunu ortaya koymuşlardır. Messina ve diğ. (2005) aç-kapa solenoid valflerle denetlenen pnömatik eyleyicilerin dinamiğini deneysel ve teorik çalışmalarla incelemiştir. Valflerin sürülmesinde DGM tekniğini kullanmışlardır. Tasarım ve denetim stratejileri için geliştirdikleri matematik model deneysel çalışmalarla desteklenmiş ve sistem benzetimi için oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ahn ve Yokota (2005) elektropnömatik konum denetim sisteminin çeşitli yüklerdeki davranışını inceledikleri çalışmalarında modifiye edilmiş darbe genişlik modülasyon (MDGM) tekniği ile sürülen 2/2, aç-kapa tipi solenoid valfler kullanmışlardır. Denetim parametreleri için yeni bir anahtarlama yordamı geliştirilen bu çalışmada ivme, hız ve konum durum geri beslemeli denetim yordamı uygulanmıştır. MDGM tekniğinin ve geliştirilen yordamın verimliliğinin deneysel olarak incelendiği bu çalışmada farklı yük koşulları altında kullanılan yöntemin sistemin geçici zaman cevabını iyileştirdiği gösterilmiştir.

Elektropnömatik sistemlerin denetimi için denetim tekniklerinin geliştirilmesinin yanında valflerin modellenmesi, geliştirilmesi ve benzetimiyle ilgili çalışmalar da sürdürülmektedir. Vaughan ve Gamble (1996) yaptıkları çalışmada oransal valflerin modellenmesi ve benzetimini incelemiş, bir başka çalışmasında ise oransal valflerin denetiminde kullanılmak üzere kayan kipli bir denetleyici tasarımını ele almışlardır (Gamble ve Vaughan,1996). Pohl ve diğ. (2001) de hızlı anahtarlama 2/2 bir valfin modellenmesi ve benzetimi üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu çalışmada valfin karakteristiklerini elde etmek için yapılan deneysel çalışmalar hidrolik deney düzeneği üzerinde sürdürülmüştür. Kajima (1995) çalışmasında çeşitli varsayımlar altında bilgisayarın denklem çözüm zamanını azaltmak için piston tipi solenoid valflerin enerjiden kesilme durumundaki davranışlarını da içeren dinamik bir model geliştirmiştir. Xiang ve diğ. (2001) geliştirdikleri dolaylı kumandalı dijital servo valfin modelini kurmuşlar, sürgünün statik konumlandırma hassasiyetini ve sistemin dinamik cevabını incelemiştir.

Elektropnömatik sistemlerde kullanılan valflerin öncelikle cevap hızlarının ve debilerinin yüksek buna karşılık da boyutlarının mümkün olduğunca küçük olması istenmektedir. Belforte ve diğ. (2002) büyük boyutlu servo sistemlerde hızlı cevap ve geniş bant aralığı sağlamak amacı ile küçük debili/hızlı valflerin büyük debili/yavaş valflerle birlikte kullanılabilirliğini incelemiştir. Virvola (2001) yaptığı bir çalışmada farklı boyutlardaki servo valflerin pnömatik konum servo sistemi üzerindeki etkilerini de-

neysel olarak incelemiştir. Servo valf büyüklüğünün hareketin düzgünlüğü ve silindirin genel performansı üzerindeki etkilerini araştırmıştır.

Yukarıda çalışmaların dışında değişik yapıda valflerle ilgili yapılan çalışmalar bugün de sürdürülmektedir. Bunlardan bazıları fırçasız DA motorlu servo valf, optopnömatik ve piezopnömatik valflerdir. Akagi ve diğ. (2002) tehlikeli ortamlarda güvenle kullanılacak optik aç-kapa elemanı ile akışkan kuvvetlendiricisi içeren bir optik aç-kapa valf geliştirerek valfin yapısını, çalışma ilkelerini ve valfin temel karakteristiklerini incelemiştir. Dohta ve diğ. (2000) yaptıkları başka bir çalışmada geliştirdikleri optik servo valfin performansını iyileştirmek için çalışmalar yapmış ve bu valfin analitik modelini çıkarmışlardır. Stoll (2001) ve Belforte (2000) yaptıkları bir araştırma çalışmasında pnömatik sistemlerdeki son gelişmeleri araştırmışlardır.

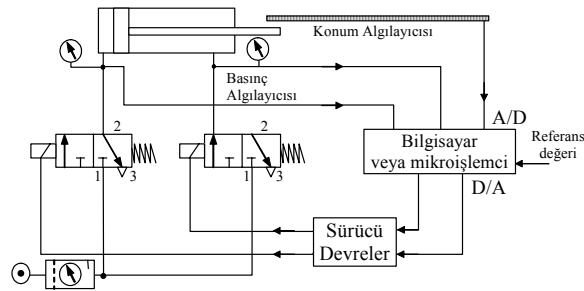
Yukarıda yapılan incelemelerin ışığı altında, pnömatik sistemlerde kullanılan valfler üzerinde yapılan yenilik ve değişiklik çalışmalarının bir kısmının valflerin boyutlarının küçültülmesi, yeni valf modellerinin geliştirilmesi, sürtünmenin azaltılması gibi konuları içine aldığı görülmektedir. Bugün gelen aşamada elektropnömatik sistemlerde kullanılan çeşitli valfleri servo valfler, oransal solenoid valfler, basit aç-kapa tip valfler, hızlı anahtarlama valfleri ve bu valflere alternatif pnömatik valfler (optopnömatik, piezopnömatik vb.) olarak sınıflandırabiliriz.

Bu çalışmada elektropnömatik denetim sistemlerinde kullanılan valflerin gelişimi ve karakteristikleri incelenmiştir. Öncelikle servo valfler, solenoid valfler ve alternatif pnömatik valfler araştırılmış ve elektropnömatik sistemlerin denetimi hakkında bilgi verilmiştir.

## 2. PNÖMATİK SERVO SİSTEMLERİN GENEL YAPISI

Günümüzde elektronik, denetim ve yazılım teknolojilerinin gelişimi ve maliyetlerinin düşmesi bu teknolojilerin pnömatik, hidrolik, mekanik gibi sistemlerle bütünleşmelerini kaçınılmaz hale getirmiş ve bu sistemlerin daha hızlı gelişmesine de neden olmuştur.

Pnömatik servo sistemlerde kullanılan havanın sıkışabilirliği, valflerin doğrusalsızlığı ve eyleyicilerdeki sürtünme kuvveti etkileri bunların hassas denetim sistemlerinde kullanımını kritik hale getirmektedir. Pnömatik sistemlerde denetimi zorlaştıran bu faktörlerin etkisini azaltmak için valfler, eyleyiciler ve denetim yordamları üzerine yapılan çalışmalar günümüzde devam etmektedir. Pnömatik denetim sistemlerinde salt oransal, PID, adaptif, bulanık mantık ve sinir ağları (neural network) gibi değişik denetim yordamları da kullanılmakta ve yeni yordamlar üzerine yapılan çalışmalar sürmektedir. Şekil 1' den de görüldüğü gibi elektropnömatik bir sistemin genel yapısı gerekli yazılım programları ile birlikte bilgisayar veya mikroişlemcili bir denetim birimi ve elektropnömatik valf silindir sistemi olmak üzere iki alt kısımdan oluşmaktadır.



Şekil 1:  
Elektropnömatik konum denetim sistemin şematik gösterimi

## 3. ELEKTROPNÖMATİK ve ALTERNATİF VALFLER

### 3.1. SERVO VALFLER

Servo valfler hidrolik ve pnömatik sistemlerde hassas denetimin gerekli olduğu özel yerlerde kullanılmaktadırlar. Servo valfler genellikle askeri teçhizat ve havacılık (sivil havacılık, uzay taşıtları vb.)

alanlarında kullanılmak da olup son zamanlarda özellikle hassas test cihazlarında da yer almaktadır. Servo valflerin en önemli özelliği elektriksel giriş işareti ile çıkış işareti olarak alınan akışkan debisi işareti arasında tam doğrusal bir bağıntı sağlaması ve çok küçük bir giriş sinyaline karşılık büyük bir çıkış işareti vermesidir.

Servo valfler daha çok elektrohidrolik sistemlerde kullanılmakta olup iki kademeli pnömatik servo valflere literatürde pek rastlanmamaktadır. Servo valflerin düşük basınçlı (<0.8 MPa) pnömatik servo denetim için uygun olmadığı belirtilmiştir (Xiang ve diğ., 2001).

Maliyetlerinin çok yüksek, imalat işlemlerinin çok karmaşık olmasının yanında çok sıkı işlem toleransı gerektirmesi ve pnömatik sistemlerde düşük basınçlar için uygun olmaması gibi dezavantajlardan dolayı endüstriyel alanda servo valflerin yerine daha çok oransal solenoid veya diğer türden solenoid valfler yaygın olarak kullanılmaktadır.

### **3.2. SOLENOİD VALFLER**

Elektropnömatik denetim sistemlerinde geniş kullanım olanağına sahip DC solenoid valfler genelde oransal solenoid valfler, basit aç-kapa tipi valfler ve hızlı anahtarlama valfleri olarak sınıflandırılabilirler.

#### **3.2.1. Basit Aç-kapa Tipi Solenoid Valfler**

Piyasada yaygın olarak kullanılan aç-kapa tipi solenoid valfler uyarı şekline göre genellikle doğrudan kumandalı aç-kapa tipi veya debi talebinin arttığı durumlarda kullanımı uygun olan dolaylı kumandalı aç-kapa tipi solenoid valfler olarak sınıflandırılabilirler.

##### **3.2.1.1. Doğrudan Kumandalı Aç-Kapa Tipi Solenoid Valfler**

Doğrudan kumandalı elektropnömatik valflerde akış denetimi hareketli elemanın (piston, disk vb.) hareketi ile sağlanır. Şekil 2a'da gösterilen doğrudan kumandalı aç-kapa tipi solenoid valf temel olarak bobin, mıknatıs, bobinin iç tarafına yerleştirilmiş piston tipi bir oturma elemanı (hareketli eleman), lüle ve yay elemanlarından oluşur. Oturma elemanı normal konumda yay elemanı tarafından verilen ön gerilme kuvveti ile basınçlı havanın geldiği yüzeye doğru bastırılır. Sızdırmazlık oturma elemanının basınçlı hava ile temas eden yüzeyinde kullanılan lastik malzeme ile sağlanır. Bobine uygulanan gerilim sinyali ile oluşan mıknatıs kuvveti yay kuvvetini yendiği anda oturma elemanı yukarı çekilerek basınçlı havanın çıkış hattına geçişine izin verilir. Bu durumda egzoz çıkışı kapanır. Sisteme uygulanan gerilim sinyali kesildiğinde ise oturma elemanı yay elemanı vasıtasıyla geri itilir ve hava akışı kesilir. Çıkış hattı yeniden egzoz hattına açılır.

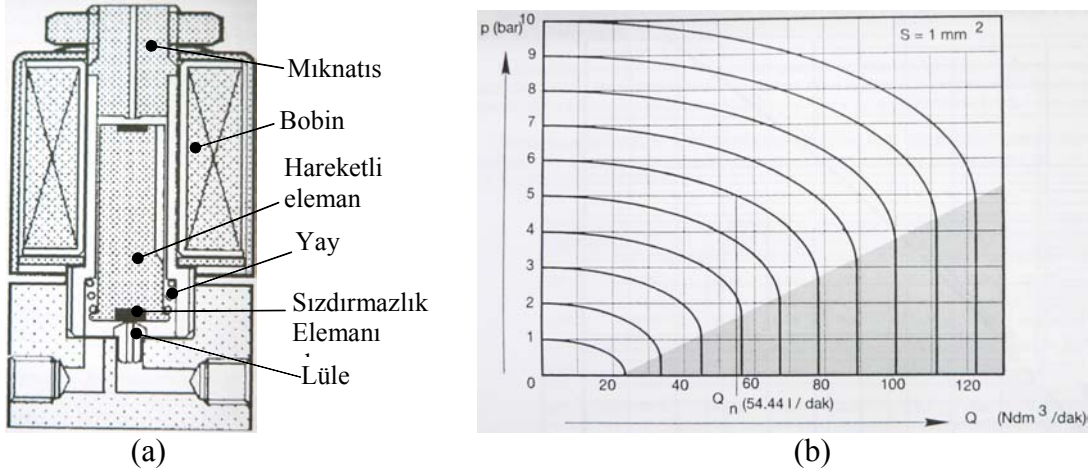
Valfin akış kapasitesi genellikle standart akış ile belirtilir. Bu debi 6 bar giriş ve 5 bar çıkış basıncında dakikadaki litre olarak serbest havadır. Akış kapasitesi, akış kesitine ve valfteki basınç düşümüne göre hesaplanabilen bir değerdir (Baumann ve Lancaster, 2002). Valfteki basınç-debi değişimini birim alana göre veren akış karakteristikleri eğrisi Şekil 2b' de verilmiştir.

##### **3.2.1.2. Dolaylı (Pilot, ön uyarı) Kumandalı Aç-kapa Tipi Solenoid Valfler**

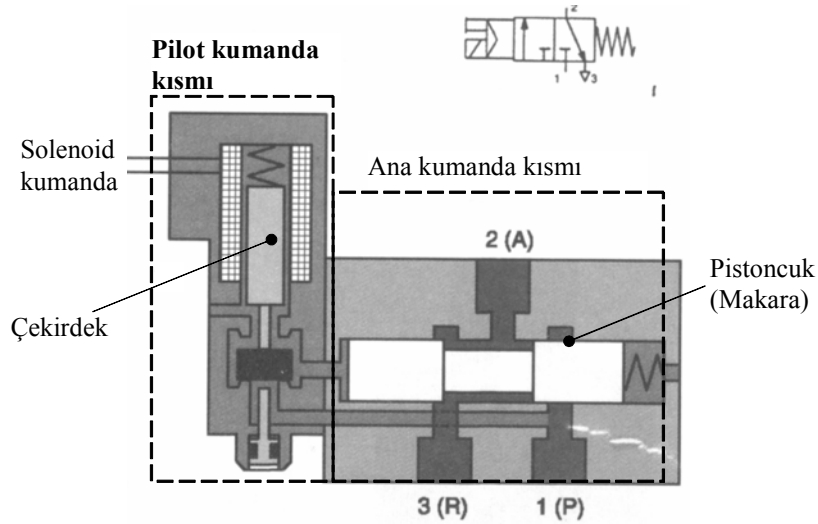
Debi talebi arttıkça doğrudan kumandalı valflerin çalıştırılması için gereken güç talebi de artmaktadır. Bu durumda valflerin boyutlarının büyük tutulması gerekir. Yüksek debi ihtiyaçlarını daha az güç girişi ile karşılamak için dolaylı kumandalı (pilot, ön uyarılı) aç-kapa tipi solenoid valfler kullanılırlar.

Şekil 3'de örnek olarak gösterilen 3/2 aç-kapa tipi solenoid valf doğrudan denetimli valflere ilave bir yapı içermektedir. Pilot kumandalı veya ön uyarılı elektropnömatik valf diye adlandırılan bu valf ana kumanda ve pilot kumanda kısmı olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır. Ön uyarı valfi kuvvetlendirici bir eleman gibi düşünülebilir. Bu şekilde bir yapı ile daha az güç girişi ile yüksek anahtarlama kuvveti sağlanır.

Şekil 3'de görüldüğü gibi normal konumda çıkış hattı egzoz hattına açık olup besleme hattı kapalıdır. Bobine enerji verildiğinde bobin çekirdeği çekilerek pilot havasının valfin pilot haznesine geçişi sağlanır. Pistoncuk oluşan basınç kuvvetinin etkisiyle itilir ve basınçlı havanın çıkış ağzına geçişi (1 den 2 ye doğru) sağlanır. Egzoz hattı ise kapanır (2 den 3 e doğru). Enerji kesildiğinde ise ön uyarı valfinin hareketli elemanı yay kuvveti ile eski haline döner ve pilot havasının geçişini kapatır. Valf pistonunun üst kısmına uygulanan basınçlı hava tahliye olur ve valf piston eski konumuna itilir (TMMOB, 2001).



Şekil 2:  
Doğrudan kumandalı piston tipi oturma elemanlı elektropnömatik valf  
(TMMOB, 2001, Baumann ve Lancaster, 2002)



Şekil 3:  
Ön uyarılı 3/2 Elektropnömatik valf (TMMOB, 2001)

### 3.2.2. Oransal Elektropnömatik Solenoid Valfler

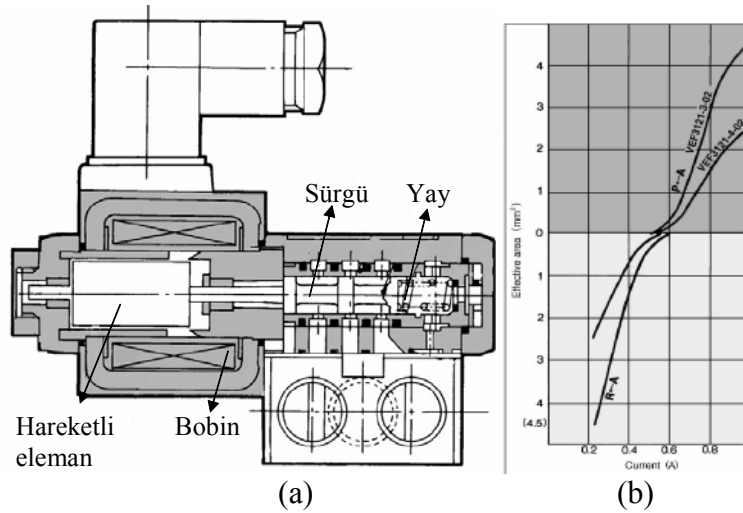
Oransal valfler aç-kapa solenoid valfler ile servo valfler arasında yer alan bir valf türüdür. Bu valflerden elde edilen debi ile valf giriş gerilimi veya akım değeri belli bir bölge içinde kısmen doğrusaldır. Bu nedenle bu valfler oransal valf adını alır. Oransal elektropnömatik valfler temel olarak iki şekilde karşımıza çıkarlar. Bunlar giriş akımına göre çıkış basıncını oransallaştıran oransal basınç kontrol valfleri ve giriş akımına göre debiyi değiştiren oransal akış kontrol valfleridir. Elektropnömatik oransal valfler ilk olarak hava hatlarındaki basıncı ayarlamak için kullanılmışlar ve 1980'lerin ortalarında piyasaya oldukça yüksek fiyatlarla sunulmuşlardır. Elektropnömatik oransal akış ve yön denetim valfleri ise 1990'ların başında satışa çıktığı söylenmektedir (DeRose, 2003).

Oransal basınç ayarlama valfleri bir eyleyicinin basıncını ayarlamak, değiştirmek için kullanılırlar. Plastik, kağıt, tekstil gibi endüstrilerde, gergi denetimi, boyama işlemleri ve test düzeneklerinde kademeli silindirik kuvvetleri üretmek vb. gibi çeşitli yerlerde kullanılırlar. Oransal akış denetim valfleri genelde silindirik konumlandırılması ve silindirik hızının ayarlanması işlemlerinde kullanılır (Festo, 2005). Bu valfler iki veya daha çok yön denetim valfiyle denetlenen çok konumlu silindirlerin kullanımını da kolaylaştırırlar.

Çok konumlu bir denetim için ilave valfler ve özel silindirler kullanmak yerine standart bir silindir ile oransal bir elektropnömatik akış denetim valfi kullanmak daha uygun olur.

Şekil 4'te oransal akış denetim valfinin yapısı ve karakteristik eğrisi verilmiştir. Doğrusal solenoidde bobine uygulanan elektrik akımına karşılık oluşan kuvvet valfi kapalı konumda tutan yaylar tarafından dengelenir. Bu noktadan sonra valfin ne kadar açık kalacağı uygulanan akım ile belirlenir. Böylece valf sürgüsü akım girişine orantılı biçimde konumlandırmaya çalışılır.

Oransal solenoid valflere ait tipik akış karakteristiklerinin solenoide uygulanan akıma ve akışın olduğu efektif alana göre değişimi Şekil 4b'de verildiği gibidir. Şekilden de görüldüğü gibi valfin elektriksel sinyaline karşılık gelen efektif alan dolayısıyla debi çıkış değerleri arasında tam bir doğrusallık yoktur. Aslında bu tür valfler solenoidi doğrusal çalışan akışkan denetim valfleridir. Oransal solenoid valflerde elektriksel giriş işareti ile akışkan çıkış işareti arasında tam bir doğrusallık sağlanamaz. En büyük doğrusalsızlık ise valfin ilk hareketinde ortaya çıkar. Bu bölgede valfe giriş sinyali değişimine karşılık akışkan çıkışı sağlanamaz. Bunun temel nedeni ise yay geri dönüşlü solenoidlerin karakteristik yapısına dayanır. Bu tür solenoidlerde uygulanan bir gerilim girişine karşılık gelen akım değişimi yay kuvvetini yenecek mıknatıs kuvvetini anlık olarak oluşturamaz. Bu nedenle valf yay ve sürtünme kuvvetlerini yenecek mıknatıs kuvveti oluşmadan açılmaz. Bu durum dinamik davranış açısından bir ölü zaman gecikmesi ile sonuçlanır ve bu da solenoid türü elektromekanik aygıtlarda oluşan doğrusalsızlığın en önemli kaynağıdır. Bu durum oransal solenoid valflerde azaltılmış olup valfin belli bir çalışma bölgesi içinde oransal çalışması sağlanmıştır. Buna karşılık aç-kapa tipi çalışan solenoid valflerde elektriksel giriş işareti ile akışkan çıkış işareti arasında doğrusal bir bağıntı olmayıp belli bir akım değerinde açılır belli bir akım değerinin altında da kapanır.



Şekil 4:

Oransal valflerin yapısı ve karakteristikleri (SMCworld\_web)

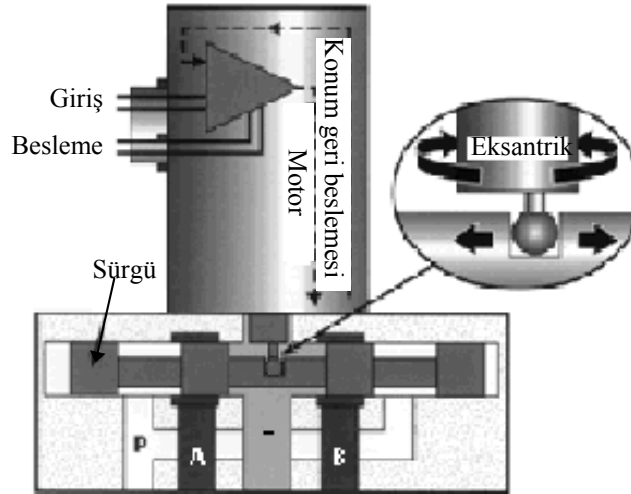
Oransal solenoid valflerin cevap hızları sağladıkları debiye bağlı olmakla beraber aynı debide hızlı anahtarlama valflerinden daha düşüktür. Oransal valflerin cevap süreleri valfin büyüklüğüne bağlı olarak 30-50 ms arasında olmakla beraber akış kapasitesi düşük (100 lt/dak) valflerde 8 ms (125 Hz)'lere kadar çıkabilmektedir. Standart büyüklükteki oransal valfin akış kapasitesi 2000-2500 lt/dak'ya ulaşabilmektedir. Histeresiz % 0.4-3 arasında değerler alabilmektedir (Festo, 2005, SMCworld\_web, 2005). Valflerin cevap hızında ölü zaman gecikmesinin rolü büyüktür. Valf harekete başlama anında bir ölü zaman gecikmesi vermektedir. Ölü zaman gecikmesi ne kadar düşük olursa solenoidin doğrusallığı o kadar iyileşir. Aç-kapa valflerde ölü zaman gecikmesi daha yüksek olup hemen hemen toplam cevap süresinin 2/3'ünü teşkil eder.

### 3.2.3. Alternatif Valfler

Alternatif bir valf türü olarak özellikle ABD piyasasında yer alan ve servo valf olarak sunulan Şekil 5'deki valf ele alınabilir. Bu valfler pnömatik sistemlerde olduğu kadar hidrolik sistemlerde de kullanılır. Kapalı döngü denetim sistemleri için tasarlanan bu R-DDV valf (döner doğrudan sürülen servo valf) 80

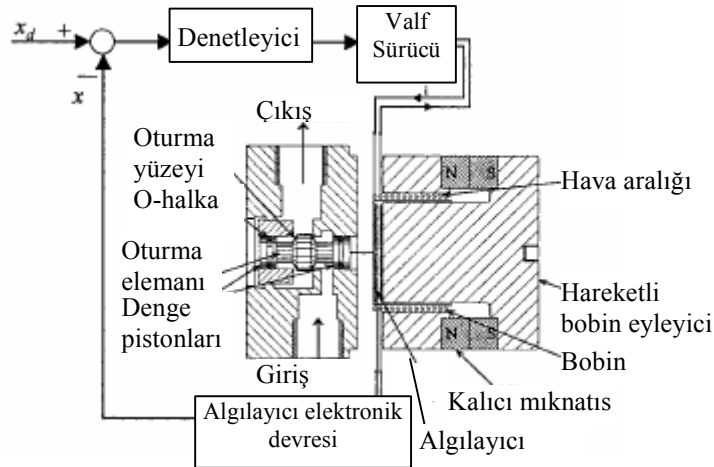
Hz frekansta  $C_v$ : 0.018-0.9 arasında akış kapasitesi sağlayabilmektedir. Valf tek kademeli olup sistem basıncından bağımsız çalışmaktadır. Bu tür valflerde kirleticilere, aşınmaya maruz kalabilecek bakım gerektirecek orifis, yay ve filtre bulunmamaktadır. Sınırlı dönen bir DA motoru valf sürgüsünü doğrudan hareket ettirerek akışkan akışını sağlar. Motorun açısal hareketi motor milinde yer alan bir eksantrik ile öteleme hareketine dönüştürülür. Bu valflerde motor kılıfı içerisine yerleştirilmiş gelişkin bir denetim yordamına sahip elektronik denetleyici devresi de yer alır. Denetleyici elektronik olarak algılanan sürgü konumunu kapalı döngü denetim yolu ile arzu edilen değerde tutmaya çalışır.

Diğer bir alternatif elektroprnömatik servo valf de Şekil 6'da şematik gösterimi verilen doğrudan kumandalı oturma elemanlı valf sistemidir. Bu valf dengeleme pistonlu bir oturma elemanına, hareketli bobin eyleyicisine, kapasitans tipli bir konum algılayıcısına ve denetleyiciye sahiptir. Sızıntıyı önlemek için dengeleme pistonları üzerine çevresel O-halkalar yerleştirilmiş ve oturma elemanı kapalı konumda akışkan akışını kesen bir lastik elemanla kaplanmıştır. Oturma elemanını hareket ettiren hareketli bobin eyleyicisi güçlü bir mıknatıs alanına sahip hava aralığı meydana getirmek için sürekli mıknatısın kullanımını sağlar. Bu mıknatıs alan içinde bobinde oluşan akımın mıknatıs kuvvetine oransal olması sağlanır. Valfin kirliliğe karşı duyarlılığı oldukça düşük olup, sızdırmazlığı oldukça iyi ve düşük maliyetlidir. Buna karşılık oturma elemanında yer alan O-halkalardan dolayı yüksek sürtünme kuvvetlerine maruzdur. Sürtünmeyi dengelemek için geliştirilen teknikle valfin doğrusallığı ve histerezis davranışı iyileştirilmiştir. Bu tür bir valf 6 bar basınç farkında 700 Nl/dak'lık bir debi sağlamaktadır (Choi ve diğ., 2000).



Şekil 5:

R-DDV servo valfin şematik gösterimi (Flowprod\_web)



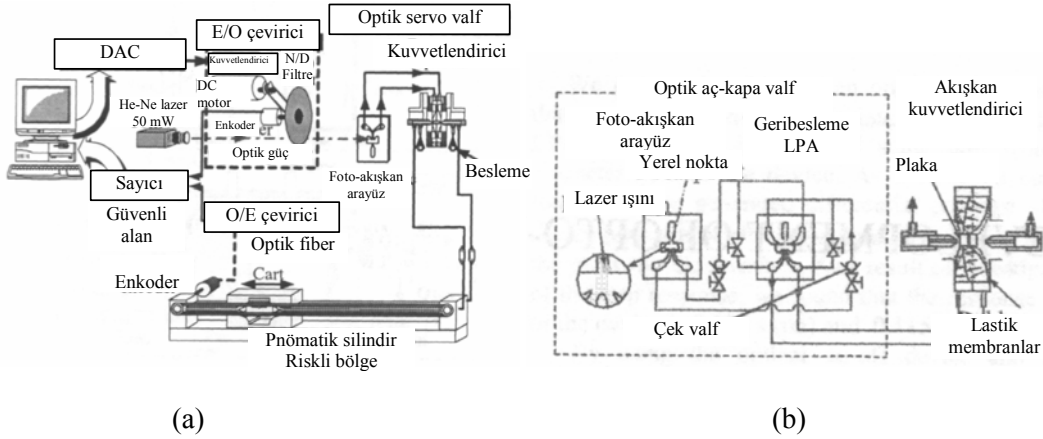
Şekil 6:

Hareketli bobin eyleyicili elektroprnömatik servo valf yapısı (Choi ve diğ.,2000)

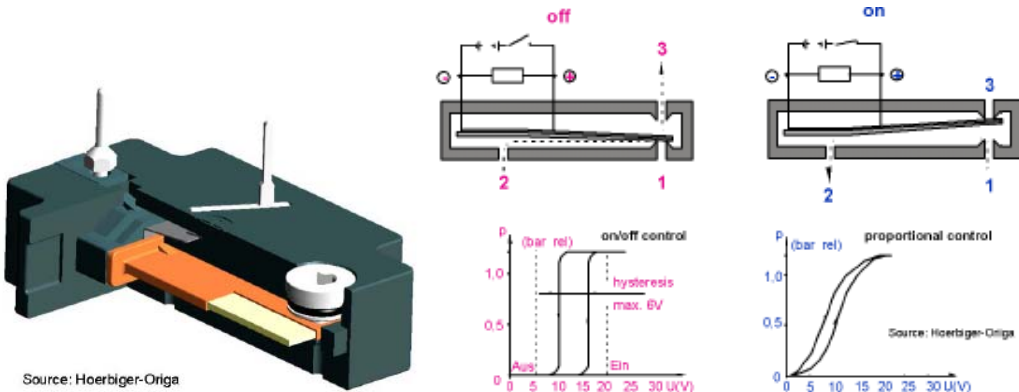
Elektropnömatik alanındaki gelişmelere paralel olarak bir taraftan da optopnömatik, piezopnömatik ve mikro teknolojisindeki gelişmeler sürmektedir. Elektromanyetik, radyasyon vb. gibi tehlikeli ortamlar için optik servo sistemler geliştirilmiştir. Optik valflerin de aç-kapa veya oransal çalışan çeşitleri bulunmaktadır (Akagi ve diğ., 2002, Dohta ve diğ., 2000). Optik valfler temel olarak ışık enerjisini akışkan basıncına çeviren foto-akışkan (foto-fluidic) arayüz ve akışkan çıkışını kuvvetlendiren elemanlardan oluşmaktadır. Optik servo valflerin cevap hızı oldukça düşük olup aç-kapa bir optopnömatik valfin açma anahtarlama süresi  $\sim 137$  ms, kapama anahtarlama süresi 146 ms civarındadır. Dolayısıyla optik valf kullanan sistemlerin cevap süresi bilinen elektropnömatik denetim sistemlerin cevap süresinden düşüktür. Şekil 7'de optik denetim sistemi ve bu sistemde yer alan optik aç-kapa valf şematik olarak gösterilmiştir (Akagi ve diğ., 2002, Dohta ve diğ., 2000).

Diğer bir alternatif valf tipi olan piezopnömatik valflerle çok az enerji ( $\sim 0.014$  mWs) ile oldukça düşük anahtarlama zamanları ( $\sim 2$  ms) elde edebilmek mümkündür. Ayrıca bu valflerde oransal, aç-kapa veya darbe genişlik modülasyon tekniği ile denetim yapılabilir. Standart pnömatik valfler de piezo elemanı dolaylı kumanda için kullanıldığı gibi minyatür valf olarak (nominal debi 1.5 l/dak) doğrudan anahtarlama elemanı gibi de kullanılabilir (Murrenhoff, 2003, Hoerbiger\_Origa\_web,2005). Şekil 8'de pilot kumanda için kullanılan düşük güçlü piezopnömatik valfin şematik gösterimi ve karakteristikleri gösterilmiştir. Bu tür bir valf elektronik devresinde ve lüle kısmında yapılan değişikliklerle aç-kapa veya oransal halde çalıştırılabilmektedir (Murrenhoff, 2003).

Silikon dağlama (silicon etching) teknolojisindeki gelişmeler mikro valflerin gelişmesini de hızlandırmıştır. Bu tür valflerle elde edilen debiler oldukça düşük ( $\sim 0.3$  Nl/dak) olmakla beraber cevap hızları ( $\sim 1$  ms) oldukça yüksektir. Daha yüksek debiler sağlamak için bu tür valflerde kuvvetlendirici bir ünite (booster) kullanılarak debi artırılabilir. Şekil 9'da kuvvetlendirici ünitesi ve bütünlük elektronik devresi ile birlikte elektrostatik prensibine göre çalışan bir mikrovalf gösterilmiştir. Mikro valflerin değişik bir çeşidi olarak geliştirilen ısıl prensipli mikro valflerden elektrostatik valflere göre daha büyük strok ( $40 \mu\text{m}$ ) elde edilebildiği için daha yüksek debiler sağlanabilir. Bu nedenle bu tür valfler kuvvetlendirici ünitesi olmadan pilot kumanda olarak da kullanılabilir (Murrenhoff, 2003).

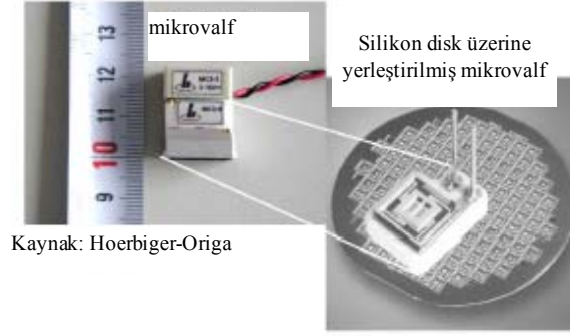


Şekil 7: (a) Optik denetim sistemi, (b) Optik aç-kapa valf (Akagi ve diğ., 2002, Dohta ve diğ., 2000)



Şekil 8: Düşük güçlü piezo valfin kesit resmi ve karakteristik eğrileri (Murrenhoff, 2003)





Şekil 9:  
Kuvvetlendirici ünitesi ve bütünleşik elektronik devresi ile birlikte  
bir mikrovalf (Murrenhoff, 2003)

### 3.2.4. Hızlı Anahtarlama Valfleri

Hızlı anahtarlama valfleri cevap zamanları 3-5 ms veya daha az olan ve genellikle oturma elemanı tipinde aç-kapa çalışan valflerdir. Günümüzde Festo, Matrix gibi üretici firmalar da bu tür valflerin geliştirilmesi üzerine çalışmalarını sürdürmektedirler. Festo'nun üretmiş olduğu hızlı anahtarlama valfleri ile valfin debi kapasitesine göre ve uygun elektronik devrelerin kullanılmasıyla 2 ms (100 lt/dak)- 4 ms (400 lt/dak) gibi düşük açma anahtarlama süreleri elde edebilmektedir.

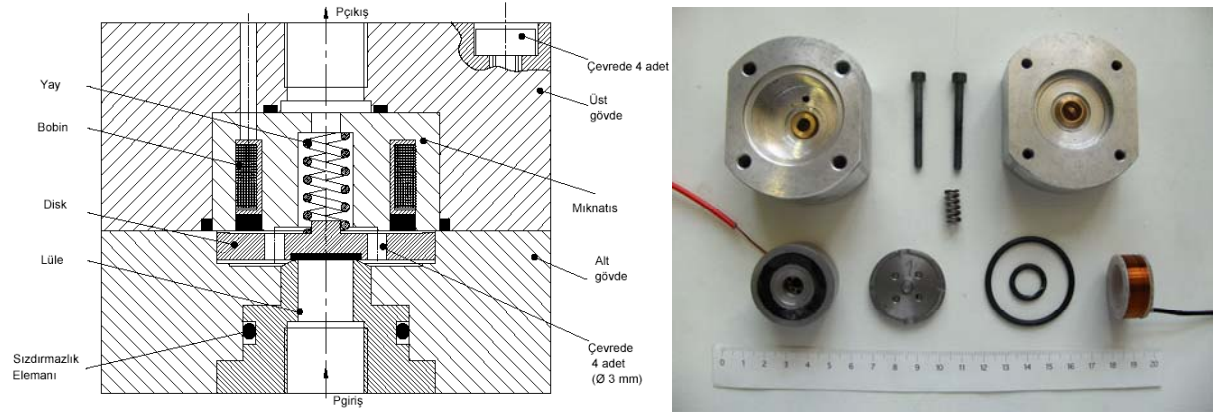
Oturma elemanlı valflerde oturma yüzeyi ile oturma elemanı arasındaki çevresel alana bağlı olarak çok küçük yer değiştirmelerde yüksek akışkan debisi ve yüksek cevap hızı elde etmek mümkündür (Yüksel, 1993, Yüksel, 1981). Doktora tez çalışması kapsamında geliştirilen prototipi imal edilmiş, özel solenoid devresi ile temel olarak disk, yay ve lüle elemanlarından oluşan 2/2 doğrudan kumandalı elektropnömatik hızlı anahtarlama valfi (Şekil 10) ise  $7 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup> besleme basıncında  $1 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup> basınç düşümünde 460 lt/dak'lık ( $10 \cdot 10^{-3}$  kg/s) bir debiye sahip olacak şekilde tasarlanmıştır (Topçu, 2005). Bu valfin solenoid kısmının en önemli karakteristiği küçük disk yerleştirmelerinde yüksek çekim kuvveti sağlarken yer değiştirmenin artışına bağlı olarak çekim kuvvetinde düşme göstermesidir. Dolayısıyla bu tür solenoidler oturma tipi elemanlı hızlı anahtarlama valfleri için uygun olmaktadır. Bu valfin yapısı, imalatı, montajı oldukça basit olup, cevap hızı da oldukça yüksektir.

Elektropnömatik valfin çalışması sırasında yay tarafından oluşturulan ön gergi kuvveti ile giriş basıncından dolayı disk üzerinde oluşan akışkan kuvveti yenilerek valfin kapalı konumda kalması sağlanmaktadır. Mıknatıs devresine uygulanan elektrik akımı ile üretilen mıknatıs kuvveti yayın oluşturduğu ön gergi kuvvetini yendiğinde disk mıknatıs devresine doğru çekilerek valfin açık konuma geçmesi sağlanmaktadır. Valfin açık konuma geçmesi ile disk-lüle sisteminin arasında kalan çevresel alandan akış gerçekleşmektedir.

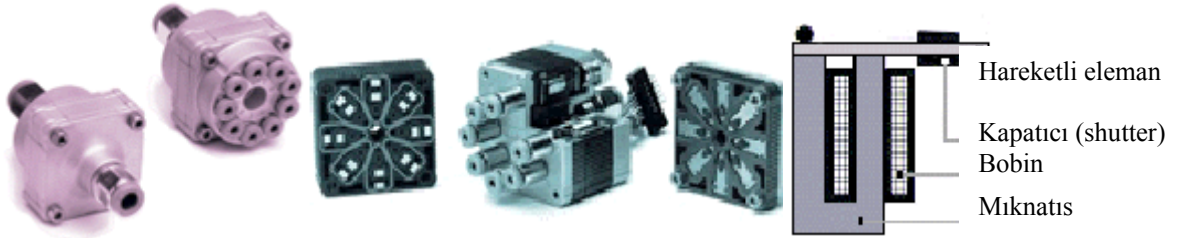
Prototip valfin  $7 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup> basınç altındaki cevap süresi 3 ms' dir. Valfin kapama süresi ise yaklaşık 6.5 ms' dir. Bu değerlere göre valfin toplam cevap süresi yaklaşık 9.5 ms civarındadır. Valfin toplam açma-kapama anahtarlama süresi 10 ms (100 Hz) civarında kalmaktadır. Valf sahip olduğu bu özelliklerden dolayı kendi kategorisi içinde (debi) hızlı anahtarlama valfi olarak nitelendirilebilmektedir.

Matrix firması tarafından geliştirilen elektropnömatik valfin hareketli elemanının kütlelerinin ve sistemdeki sürtünme kuvvetlerinin azaltılmasıyla valfin cevap zamanı arttırılmıştır. 24 VDC denetimli standart solenoid valflerin toplam anahtarlama zamanları 7-10 ms (açma: 5-7 ms, kapama: 2-3 ms) arasında değişirken, speed-up denetim tekniğinin kullanıldığı valflerin anahtarlama zamanları 2-4 ms (açma: 1-2 ms, kapama: 1-2 ms) arasında değişmektedir. Dolayısıyla farklı uyarı sinyallerinin uygulanmasıyla valflerin cevap zamanları düşürülebilmektedir.

Matrix valflerin akışkan debileri 50 lt/dak ile 1620 lt/dak arasında değişim göstermektedir. Şekil 11'de gösterildiği gibi birkaç tane küçük debili valfin kompakt bir şekilde aynı gövde içine yerleştirilmesiyle yüksek cevap hızı ve yüksek akışkan debisi elde edilmesi mümkün hale getirilmiştir (Matrix\_web).



Şekil 10:  
Prototip elektropnömatik valfin modeli



Şekil 11:  
Matrix firmasının geliştirdiği hızlı anahtarlama valfi (Matrix\_web)

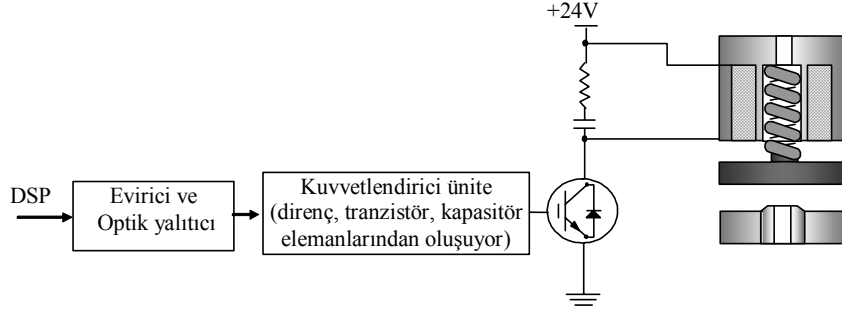
Hızlı anahtarlama valfleri ile ilgili yapılan başka bir çalışmada da hızlı anahtarlama valflerinin enerjilendirme yöntemleri incelenerek bu yöntemlerin valfin anahtarlama zamanı üzerindeki etkileri incelenmiştir (Kajima, 1993). Pnömatik servo sistemin bant genişliğini arttırmak için yapılan bir başka çalışmada ise cevap hızı 1 ms, debisi 60 (lt/dak.bar) olan hızlı anahtarlama valfleri ile cevap zamanı 20 ms, debisi 138 (lt/dak.bar) olan düşük frekanslı valfler bir arada kullanılmıştır. Sistemin dinamik performansını arttırmak için yapılan çalışmada denetim yordamı olarak DGM ve bulanık mantık denetim yordamı kullanılmıştır (Belforte ve diğ., 2002). Piston tipi hareketli elemana sahip 2/2 doğrudan kumandalı elektropnömatik bir valf üzerinde yapılan bu çalışmada valfin DGM tekniği ile sürülmesi incelenmiştir (Ye ve diğ. 1992). Hızlı anahtarlama valfleri ile ilgili yapılan bir çalışmada ise modifiye edilmiş farksal DGM yöntemi geliştirilmiş ve bu yöntem kayan kipli denetim yordamı ile pnömatik sistem üzerinde denenmiştir (Shih ve Ma, 1998b).

Motor eleman olarak servo valf yerine 100 Hz çalışma frekansında iki adet hızlı anahtarlama valfi kullanılmış ve sistem performansı açısından olumlu sonuçlar alınmıştır. Yüksek hızlı, küçük boyutlu hızlı anahtarlama valfleri ile ilgili yapılan bir çalışmada özel bir malzeme kullanılarak ve miknatıs devresinin optimizasyonu yapılarak geliştirilen valfin cevap zamanının uygulanan giriş gerilimine ve çalışma basıncına bağlı olarak 1-5 ms arasında değiştiği tespit edilmiştir (Kallenbach ve diğ., 1999).

### 3.3. ELEKTROPNÖMATİK VALFLERİN ELEKTRONİK DENETİMİ ve UYGULAMASI

Elektropnömatik valflerin geribeslemeli denetim sistemi içinde zayıf bir elektrik sinyali ile sürülmesi ve denetlenebilmesi için elektronik devrelere ihtiyaç vardır. Bu devreler ise benzeşik (analog) ve sayısal (dijital) olmak üzere iki şekilde karşımıza çıkar. Analog devrenin en önemli kısmını ise sürücü devre teşkil eder. Analog devre kullanılacak olan valfin türü ve kullanım alanına göre karşılaştırıcı, giriş sinyali ve denetim birimini de içine alabilir. Ancak bilgisayar ve mikroişlemcili sistemlerin gelişmesiyle birlikte denetim, karşılaştırma ve başvuru girişi sayısal halde kullanılabilir. Bu sinyallerin analog hale veya algılayıcılardan gelen sinyallerin sayısal hale dönüştürülmesi için DAC ve ADC çevirici üniteleri kullanılmaktadır.

Mikrodenetleyicinin veya bilgisayarın çıkışı zayıf gerilim işareti olup görece yüksek akım gerektiren bir valf bobininin sürülmesi için yetersiz kalır. Bunun için temel elemanı tranzistör olan benzeşik bir elektronik yükseltici devreye gerek vardır. Güç sürücüsü veya akım sürücüsü adını alan bu eleman düşük güçlü gerilim işareti ile orantılı yüksek güçlü akım üretir. Basit bir akım sürücüsü devrenin temel elemanları dirençler ve tranzistörlerdir. Prototip elektro pnömatik valfleri sürmek için tasarlanıp kurulmuş olan bir akım sürücüsü devrenin kurulum şeması Şekil 12’de gösterilmiştir. Bazı uygulamalarda toplama kuvvetlendiricisi ve akım sürücüsü devre valf üzerinde valf ile birlikte sunulmaktadır.



Şekil 12:  
Akım sürücüsü devre genelleştirilmiş şeması (Topçu 2005)

Havanın sıkıştırılabilirlik etkisi, silindir ve valflerdeki sürtünme, valflerdeki akışın doğrusalsızlığı gibi etkilerden meydana gelen doğrusalsızlık problemleri bu sistemlerin denetimini zorlaştırmaktadır. Bu gibi olumsuz etkileri ortadan kaldırmak veya en aza indirerek sistemin denetimini en iyi şekilde yapabilmek için günümüzde bir çok denetim tekniği kullanılmakta ve geliştirilmektedir. Bulanık mantık, kayan kipli denetim, genetik algoritmalar, sinir ağları (neural network) algoritmaları vb. gibi gürbüz denetim yordamları ve bu algoritmaların bileşik bir şekilde kullanılması ile elektro pnömatik sistemlerin denetimi yapılabilmektedir.

### 3.4. SONUÇ

Kapalı döngü denetim sistemi içinde kullanılan elektro pnömatik valfler bir elektriksel giriş işareti sonucu pnömatik akışkan çıkışı sağlarlar. Böylece valflerin sağladığı bu akışkan çıkışı ile bir eyleyicinin konum, hız veya ivmesinin hassas bir şekilde denetlenmesi sağlanabilmektedir.

Elektro pnömatik denetim sistemlerinde gerek valflerde meydana gelen gelişmelerle gerekse elektronik devrelerin yardımı ile valflerin başarımları gün geçtikçe iyileşmektedir. Piyasada yaygın olarak kullanılan elektro pnömatik solenoid valfler ile oransal solenoid valfler maliyet açısından karşılaştırıldığında genellikle basit aç-kapa tipi solenoid valfler baz alınmaktadır ve oransal solenoid valflere göre oldukça düşük maliyetlidirler. İmalat kolaylığı açısından ise en sıkı toleranslı olan valfler servo valflerdir. Daha sonra oransal solenoid valfler ve basit aç-kapa tipi solenoid valfler gelmektedir. Ancak servo valfler hidrolik uygulamalarda daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Pnömatik uygulamalarda servo sistemlere pek rastlanmamaktadır ve bunların yerine daha çok oransal ve aç-kapa solenoid valfler kullanılmaktadır.

Hızlı anahtarlama valfleri uygun denetim stratejileri ile birlikte kullanıldıklarında pahalı oransal valflere iyi bir alternatif oluşturmaktadır. Bu stratejilerden DGM tekniği son senelerde hızlı anahtarlama valflerinin oransal sürülmesinde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir.

Yapılan çalışmalara bakıldığında gerek hızlı anahtarlama valfleri gerekse alternatif valfler belli uygulama alanlarında yer alabilecek gibi görünmektedirler. Bu valflerin geliştirilmesiyle ilgili yapılan çalışmalar akademik ve endüstriyel alanda devam etmektedir. Sonuç olarak endüstriyel alanda daha basit yapıda, kullanımı kolay, dinamik başarımları yüksek, düşük maliyetli valfler her zaman kabul görecektir.

Yapılan bu çalışmada elektro pnömatik valflerin gelişimi ve karakteristikleri incelenmiştir. Ayrıca Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde tamamlanmış olan doktora çalışması çerçevesinde tasarımı tamamlanarak prototipleri imal edilen hızlı anahtarlama valfi hakkında bilgi verilerek valfin karakteristikleri incelenmiştir.

#### 4. KAYNAKLAR

1. TMMOB (2001) Pnömatik Devre Elemanları ve Uygulama Teknikleri. İstanbul.
2. Ahn, K. and Yokota, S. (2005) Intelligent Switching Control of Pneumatic Actuator Using On/Off Solenoid Valves. *Mechatronics*, 15, 683-702.
3. Akagi, T., Dohta, S., Matsushita, H., Takechi, K. (2002) Development of Opto-Pneumatic On- Off Valve. *Proceedings of 5th JFPS International Symposium on Fluid Power*, Nara, Japan, 95-100.
4. Andersen, B. W. (1968) *The Analysis and Design of Pneumatic Systems*. John Wiley. New York. 302 p.
5. Baumann, A. R. ve Lancaster, V. T. (2002) *Elektropnömatik Temel Seviye Eğitim Kitabı*. ENTEK Pnömatik San. ve Tic. Ltd. Şti.
6. Baumann, A. R. ve Lancaster, V. T. (2002) *Pnömatik Teknolojisi Eğitim Kitabı*. ENTEK Pnömatik San. Ve Tic. Ltd. Şti.
7. Belforte, G. (2000) New Developments and New Trends in Pneumatics. *Proceedings of Sixth Triennial International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization*, Canada. [http://fluid.power.net/techbriefs/hanghzau/1\\_5.pdf](http://fluid.power.net/techbriefs/hanghzau/1_5.pdf)
8. Belforte, G., Mattiazzo, G., Mauro, S. (2002) Fast Response Pneumatic Systems with Digital Valves. *5th JFPS International Symposium on Fluid Power*. Nara, Japan.
9. Bublitz, R. (2001) Development of a Continuous-Action Pneumatic Valve with Minimized Energy Input. *O+ P>> Ölhydraulik und Pneumatik*<<. 45 (10).
10. Bublitz, R. ve Murrenhoff, H. (2002) Intelligent Proportional Pneumatic Valves and Drives for Field and Bus Applications. *Fifth JFPS International Symposium on Fluid Power*. Nara. Japan.
11. Cabral, E. L., Hunold, M. C., Tu, C. C. (2002) Air Flow in a Plate Valve with Unequal Upstream and Downstream Orifice Sizes. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers Part C. Journal of Mechanical Engineering Science*. 216, 459-471.
12. Choi, S. H., Lee, C. O., Cho, H. S. (2000) Friction Compensation Control of an Electropneumatic Servo Valve by Using an Evolutionary Algorithm. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers Part 1. Journal of Systems and Control Engineering*. Vol. 214 (13), 173-184.
13. DeRose, D. (2003) The Expanding Proportional and Servo Valve Marketplace. *Fluid Power Journal*. pp. 30-36.
14. Dohta, S., Akagi, T., Matsushita, H., Nakanishi, N. (2000) Optical Servo Valve and Its Optimal Design. *Proceedings of Sixth Triennial International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization*, pp. 1-6. Canada. [http://www.tsuyama-ct.ac.jp/honkou/kojin/sei/akagi/paper/FI\\_068\\_FLUCOME2000.pdf](http://www.tsuyama-ct.ac.jp/honkou/kojin/sei/akagi/paper/FI_068_FLUCOME2000.pdf)
15. Gamble, J. B., Vaughan, N. D. (1996) Comparison of Sliding Mode Control With State Feedback and PID Control Applied to a Proportional Solenoid Valve. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 118, 434-438.
16. Gentile, A., Giannoccaro, N. I., Reina, G. (2002) Experimental Tests on Position Control of A Pneumatic Actuator Using On/Off Solenoid Valves. *IEEE ICIT '02*. 1, Bangkok, Thailand. 1, 555-559.
17. Goldstein, S. R., Richardson, H. H. (1968) 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.
18. Imaizumi, T., Oyama, O., Yoshimitsu, T. (2001) Study of Pneumatic Servo System Employing Solenoid Valve Instead of Proportional Valve by Keeping the Solenoid Valve Plunger to be Floating. *Proceedings of Sixth Triennial International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization*. Canada. [http://www.callisto.si.usherb.ca/~fluo2000/PDF/FI\\_073.pdf](http://www.callisto.si.usherb.ca/~fluo2000/PDF/FI_073.pdf)
19. Kajima, T. (1993) Development of a High- Speed Solenoid Valve: Investigations of the Energizing Circuits. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 40 (4), 428-435.
20. Kajima, T. (1995) Dynamic Modeling of the Plunger Type Solenoids at Deenergizing State. *IEEE Transactions on Magnetics*. 31 (3), 2315-2323.
21. Kallenbach, E., Kube, H., Zoppig, V., Feindt, K., Hermann, R., Beyer, F. (1999) New Polarized Electromagnetic Actuators as Integrated Mechatronic Components- Design and Application. *Mechatronics*. 9, 769-784.
22. McCloy, D., Martin, H. R. (1980) *Control of Fluid Power: Analysis and Design*. Ellis Harwood Limited. New York.
23. Messina, A., Giannoccaro, N. I., Gentile, A. (2005) Experimenting and Modelling the Dynamics of Pneumatic Actuators Controlled by the Pulse Width Modulation (PWM) Technique. *Mechatronics*. 15, 859-881.
24. Murrenhoff, H. (2003) Trends in Valve Development. *O+P > Ölhydraulik und Pneumatik*< 46 (4), 1-36.

25. Noritsugu, T. (1987) Development of PWM Mode Electropneumatic Servomechanism, Part II: Position Control of a Pneumatic Cylinder. *Journal of Fluid Control*, 17(2), 7-31.
26. Pohl, J., Sethson, M. M., Krus, P., Palmberg, J. (2001) Modeling and Simulation of a Fast 2/2 Switching Valve. The 5th International Conference on Fluid Power Transmission and Control, Hangzhou, China. [http://fluid.power.net/techbriefs/hanghzau/2\\_22.pdf](http://fluid.power.net/techbriefs/hanghzau/2_22.pdf)
27. Roters, H. C. (1941) *Electromagnetic Devices*. John Wiley & Sons. Inc., 7<sup>th</sup> Edition, New York, USA.
28. Royston, T., Singh, R. (1993) Development of a Pulse Width Modulated Pneumatic Rotary Valve for Actuator Position Control. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 115, 495-505.
29. Sato, Y., Cai, S., Hashimoto, N. (2002) Development of Electro-Pneumatic Valve for Cold Air Flow Control. Fifth JFPS International Symposium on Fluid Power. Nara. Japan.
30. Shih, M., Ma, M. (1998a) Position Control of a Pneumatic Cylinder Using Fuzzy PWM Control Method. *Mechatronics*, 8 (3), 241-253
31. Shih, M., Ma, M. (1998b) Position Control of a Pneumatic Rodless Cylinder Using Sliding Mode M-D-PWM Control the High Speed Solenoid Valves. *JSME International Journal*, 41 (2), 236-241.
32. Stoll, K. (2001) New Developments in Pneumatics. 5th International Conference on Fluid Power Transmission and Control. Hangzhou, China. [http://fluid.power.net/techbriefs/hanghzau/1\\_5.pdf](http://fluid.power.net/techbriefs/hanghzau/1_5.pdf)
33. Taft, C. K., Harned, T. J. (1979) Electro- Fluid Four Way On-Off Pneumatic Valve. ASME. 1-8.
34. Topçu, E. E. (2005) Elektropnömatik Bir Sistem İçin Valf Tasarımı ve Denetim Tekniklerinin Araştırılması. Doktora Tezi. Uludağ Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü.s. 107. Bursa.
35. Topçu, E. E., Yüksel, İ. (2003) Elektropnömatik Bir Sistemde Konum Denetiminin Araştırılması. III. Ulusal Hidrolik ve Pnömatik Kongresi ve Sergisi. syf. 439-449. İzmir.
36. Topçu, E. E., Yüksel, İ. (2005a) Alternatif Bir Elektropnömatik Valf Tasarımı ve Karakteristiklerinin Araştırılması. *Mühendis ve Makine Dergisi*. 46(542):19-28.
37. Topçu, E. E., Yüksel, İ. (2005b) Elektropnömatik Hızlı Anahtarlama Valfi Tasarımı ve DGM Tekniği ile Sürülmesinin Araştırılması. TOK'05. Türkiye Otomatik Kontrol Bilimsel Toplantısı. 4-5 Eylül 2005. İstanbul. 403 - 409.
38. Topçu, E. E., Yüksel, İ. (2005c) Elektropnömatik Sistemler için Tasarlanan Hızlı Anahtarlama Valfi ile Konum Denetiminin Araştırılması. IV. Ulusal Hidrolik-Pnömatik Kongresi. İzmir. 289-297.
39. Vaughan, N. D., Gamble, J. B. (1996) The Modeling and Simulation of a Proportional Solenoid Valve. *Journal of Dynamic System, Measurement, and Control*. 118, 120-125.
40. Virvalo, T. (2001) The Influence of Servo Valve Size on the Performance of a Pneumatic Position Servo. 5th International Conference on Fluid Power Transmission and Control. Hangzhou, China. [www.fluid.power.net/techbriefs/hanghzau/3\\_13.pdf](http://www.fluid.power.net/techbriefs/hanghzau/3_13.pdf)
41. Xiang, P., Jiajin, Z., Jilong, Y., Jian, R. (2001) 2D Pneumatic Digital Servo Valve. 5th International Conference on Fluid Power Transmission and Control. Hangzhou, China. [http://fluid.power.net/techbriefs/hanghzau/3\\_1.pdf](http://fluid.power.net/techbriefs/hanghzau/3_1.pdf)
42. Ye, N., Scavarda, S., Betemps, M., Jutard, A. (1992) Models of a Pneumatic PWM Solenoid Valve for Engineering Applications. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*. 114, 680-688.
43. Yüksel, İ. (1981) An Investigation of Electro- Hydraulic Floating Disc Switching Valves. PhD Thesis, University of Surrey.
44. Yüksel, İ. (1993) Elektrohidrolik Valflerin Genel Karakteristiklerinin İncelenmesi ve Karşılaştırılması, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 4 (1), 67-81.
45. Yüksel, İ., Şengirgin, M. (2001) Elektrohidrolik Valflerin Gelişimi ve Karakteristiklerinin İncelenmesi. II. Ulusal Hidrolik- Pnömatik Kongresi, 265-280. İzmir.
46. Festo, Proportional Pneumatic Valves kataloğu, 2005.
47. Festo\_web, <http://www.festo.com>
48. Matrix\_web, <http://www.matrix.to.it>
49. Flowprod\_web, <http://www.flowprod.com>
50. Hoerbiger-Origa\_web, <http://www.hoerbiger-origa.co.uk>
51. SMCworld\_web, <http://www.smcworld.com>