

# Experimental Analysis of Pneumatic Motion Control Application with Piezo Technology

Çiğdem Gündoğan Türker <sup>a,1</sup>, Fikret Kemal Akyüz <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Festo Technology Center, İstanbul, Turkey  
ORCID ID: 0000-0002-9003-0902

<sup>b</sup> Festo Technology Center, İstanbul, Turkey  
ORCID ID: 0000-0003-1584-9421

## Abstract

Piezo technology is used in a large number of sectors thanks to the possibility of switching between electrical energy and motion energy. In particular, Piezo technology provides an important advantage in pneumatic applications with its features such as low energy consumption, accuracy, quiet operation, compact structure, fast switching possibility, quiet operation and lightness. Directional control, proportional pressure control, proportional flow control, positioning, soft-stop and similar basic applications are being transformed into controlled and digitalized Pneumatic System applications. In this paper, piezovalves developed using piezoceramic material are compared with solenoid valves in pneumatic applications. The working methods and advantages of piezo technology in pneumatic applications such as pressure control, flow control, motion control are presented. The experimental test device with a pneumatic cylinder working with piezo valves and position sensors was installed and motion control application was performed. In the experimental results of the application, the system characteristics can be observed graphically and the results can be analyzed.

**Keywords:** “Digitalization, efficiency, controlled pneumatic, piezoelectric, energy saving.”

## 1. Giriş

Elektrikle kontrol edilen pnömatik valfler dünyasında, solenoid valfler neredeyse %100 pazar payıyla standarttır. Bununla birlikte piezo teknolojisini kullanan valfler, solenoid valflere göre avantajlar sunmakta ve tamamen yeni uygulama alanları açmaktadır. Kapalı çevrim çalışan yazılımlar ile pnömatik uygulama alanlarında bu teknoloji düşük enerji tüketimi, hassasiyeti, kompakt yapısı, hızlı anahtarlama imkânı, oransal çalışma, hafiflik gibi özellikler sağlayabilmektedir. Standart bir solenoid valf kullanıldığında bobine sürekli olarak enerji verilmesi gerekmektedir. Piezo valflerde yapılması gereken tek şey başlangıç akımını vermektir. Bir kez şarj olduktan sonra piezo teknolojisi ile çalışan yeni nesil valfin akım tüketimi neredeyse sıfır seviyelerinde gerçekleşmektedir.

Piezo teknolojisi; basınç kontrolü, akış kontrolü, hareket kontrolü gibi pnömatik uygulamalarda büyük avantajlar sunmaktadır. Bu bildiride, piezo teknolojisi kullanılarak kontrollü ve dijitalleşen pnömatik uygulamalardan bahsedilmekte, bir hareket kontrolü uygulaması deneysel olarak analiz edilmektedir. İkinci bölümde piezo elektrik teknolojisi tanıtılmaktadır. Sonraki bölümde piezo valflerin çalışma prensipleri anlatılmaktadır. Dördüncü bölümde piezo teknolojisi ile akış kontrolü ve hareket kontrolü gibi uygulamaların çalışma şekillerinden bahsedilmektedir. En son bölümde ise hareket kontrolü uygulaması için kurulan test düzeneği ve deneysel çalışmaların sonuçları sunulmaktadır.

## 2. Piezo Elektrik Teknolojisi

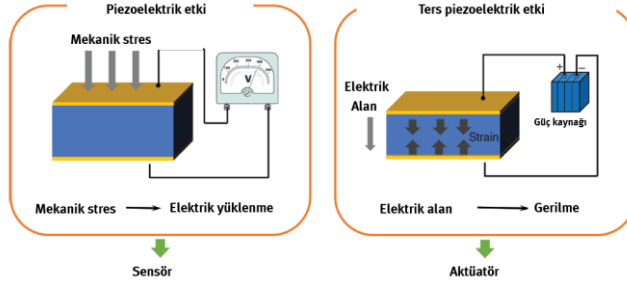
Genellikle iletken olarak kabul edilen yüzeylere sahip özel seramik nesnelere sahip piezoelektrik malzemeler, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmekte ve bunun tersini de yapabilmektedir. Piezo seramiklerdeki moleküllerin kafes yapısı, Curie sıcaklığının altında asimimetrik ve bu nedenle bir dipoldür. Güçlü elektrik alanının etkisi altında, piezo seramiklerini kalıcı olarak polarize etmek veya başka bir deyişle onlara tercih edilen bir yön vermek mümkündür. Seramik malzeme daha sonra piezoelektrik özelliklere sahip olmakta ve bir gerilim uygulandığında şekil değiştirmektedir. 3B deformasyon, alan çizgileri

<sup>1</sup> Corresponding Author  
E-mail Address: cigdem.gundoganturker@festo.com

boyunca gerçekleşmektedir. Seramik malzemeler sabit bir hacme sahip olduğundan, malzemede alan çizgilerine dik açılarda büzülme meydana getirmektedir. Piezo tabanlı sürücülerin avantajı, neredeyse sıfır güçle enerjilendirilebilir olmasıdır [1-3].

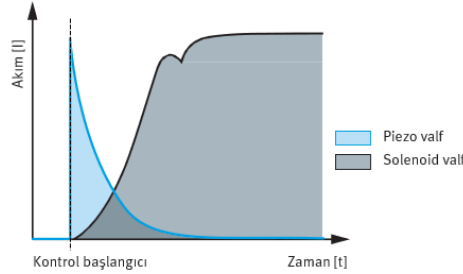
Şekil 1'de gösterildiği gibi piezo elemanlar elektromekanik dönüştürücülerdir. Doğrudan piezoelektrik etki olarak adlandırılan bir piezo elemanı, mekanik kuvvetleri (basınç, çekme gerilmesi veya hızlanma) ölçülebilir bir gerilime dönüştürmektedir. Ters piezoelektrik etki ise tam tersidir; bir gerilim uygulandığında piezo eleman deforme olmakta ve böylece mekanik hareket veya salınımlar oluşmaktadır.

Elektriksel açıdan bir piezo elemanı, iletken iki plaka ve dielektrik olarak işlev gören seramik piezo malzemeden oluşan bir kapasitördür. Akım yalnızca kapasitör şarj olurken akmakta ve şarj tamamlandığında ise sifıra düşmektedir. Bu durumda, daha fazla akım akmazsa elektrik gücü sıfır olacaktır. Sürücü sıfırlandığında şarj enerjisini geri kazanarak enerji verimliliği yüksek uygulamalar yapmak mümkündür.



Şekil 1. Piezoelektrik Etkisi

Piezoelektrik valf uygulamaları, solenoid valf ile kıyaslandığında Şekil 2'de gösterildiği gibi düşük enerji tüketimi sağlamaktadır. Anahtarlama sırasında düşük enerji ihtiyacı duyduğundan yüksek frekanslarda ısı meydana getirmemektedir.



Şekil 2. Piezo valf ve solenoid valf arasındaki enerji tüketim farkı

Piezo valfler, oldukça hızlı olabilmekte ve mikrosaniyenin altındaki aralığa kolayca ulaşabilmektedir. Bu valfler, hızın önemli olduğu uygulamalar için ideal çözüm olmaktadır. Kapalı çevrim çalışmalarda yüksek anahtarlama hızı sayesinde daha iyi performans gösterebilmektedir. Ayrıca, piezo teknolojisi herhangi bir arıza riski olmadan yüksek manyetik ortamlarda da kullanılabilir. Bir sistem doğru bir şekilde tasarlandığında ve kısa tepki süreleriyle birleştiğinde, piezo valflerin orantılılığı sayesinde tüm üst düzey kontrol sistemleri için ideal aktüatörler haline gelmektedirler.

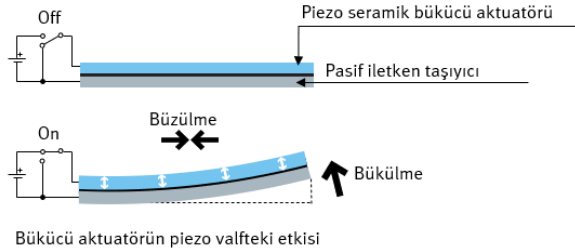
### 3. Piezo Valflerin Çalışma Prensipleri

Piezo valf; ince piezo seramik tabakadan oluşan bir aktüatördür. Seramik malzemeye voltaj uygulandığında bükülmektedir. Bu hareket, akış hızını veya basıncını düzenlemek için kullanılan bir bükülmüdür. Sapma, uygulanan gerilim ile orantılıdır ve akış hızının veya basıncın orantılı olarak düzenlenmesini sağlamaktadır. Belirli bir uygulamanın gereksinimlerine bağlı olarak piezo etkisi, çeşitli transdüser türleri olarak kullanılabilir. Disk transdüserleri, bükücü aktüatörler ve piezo yığın transdüserleri piezo elemanlarla türetilen temel formlardır.

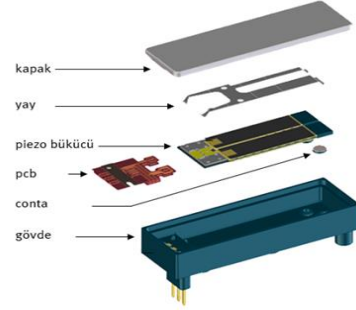
Bükme aktüatörü (bender actuator) dikdörtgen bir şekle sahiptir. Birincil eleman, her iki yüzeyi de iletken hale getirilmiş bir piezo seramik malzeme parçasıdır. Bu seramik malzeme, aynı zamanda iletken olan bir alt tabakaya tek tarafından tamamen birleştirilmiştir. Seramik tabakanın ve alt tabakanın iletken yüzeyleri elektrot görevi görmektedir. Elektrotlara gerilim uygulanırsa, seramik malzeme elektrik alanı yönünde genişlemektedir. Çoğu uygulamada bükme aktüatörleri bir uca sabitlendiğinden, Şekil 3'teki gibi serbest uçta bir bükülme hareketiyle sonuçlanmaktadır.

Tipik karakteristik veriler arasında milimetrenin onda biri kadar sapma ve 1 N'a kadar kuvvetler bulunmaktadır. Sıklıkla kullanılan özel bir değişken, alt tabakanın diğer tarafında ikinci bir seramik katmana sahip olan trimorfudur. Bu özellik; dönüştürücünün performansını arttırmakta ve simetrisi sayesinde daha geniş bir sıcaklık aralığında kullanılabilir. Bükücü aktüatörleri, farklı kuvvetler ve hareketlerde özellikle basınç ve akış kontrolü için pnömomatik valflerde kullanım için oldukça uygundur.

Şekil 4'te görüldüğü gibi piezo valf tasarımı oldukça basittir. İçinde enjeksiyonla kalıplanmış contaları bulunan bir muhafazadan oluşmaktadır. Aktüatör olarak bükücü piezo seramik ve onun üzerinde geri dönüş hareketini sağlayan bir yay bulunmaktadır.



Şekil 3. Bükücü aktüatörlerde bükülme

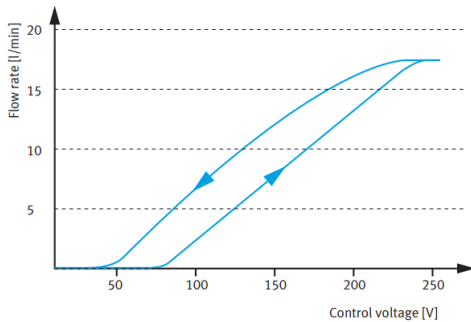


Şekil 4. Piezo valf tasarımı

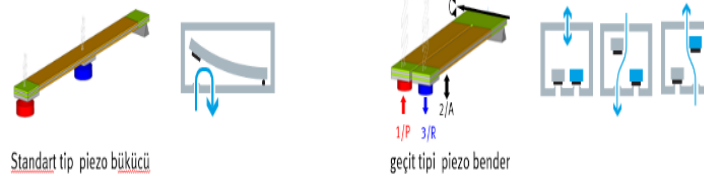
Piezo valflerin performansı, elektrik alanının gücüne bağlıdır. Alan gücü ne kadar büyükse, aktüatörün ve vananın performansı o kadar iyi olmaktadır. Solenoid valflerle karşılaştırıldığında, piezo valflerin anahtarlama durumunu korumak için tutma akımına ihtiyacı yoktur. Solenoid valflere kıyasla piezo valflerin ihtiyaç duyduğu daha yüksek besleme gerilimi, yalnızca çalıştırma aşamasında önemlidir. Tüketilen açma enerjisi, pnömattikte normal olan çalıştırma gücü seviyelerinin oldukça altındadır. Piezo valflerin çalıştırma enerjisi, yalnızca miliwat saniye cinsinden belirtilmektedir. Solenoid valflerde olduğu gibi güç değerlerinin watt cinsinden belirtilmesi mümkün değildir.

Bir piezo valf açıldığında ve ardından güç kaynağı bağlantısı kesildiğinde, valf durumu korunur, çünkü yük taşıyıcıları kesinti nedeniyle artık akamamaktadır. Vanayı sıfırlamak için yük, dönüştürücüden aktif olarak çıkarılmalıdır. Bu da başka bir sistemde tampon depolama (enerji geri kazanımı) veya enerjinin ısıya dönüştürülmesi (kısa devre) yoluyla sağlanabilmektedir. Bu nedenle vanayı çalıştırmak için açma-kapama anahtarı yerine bir değiştirme anahtarı gerekmektedir.

Bir solenoid valfte bobine her zaman enerji verilmelidir. Armatürü valf yuvasından uzaklaştıran manyetik alan, bu şekilde oluşturulmaktadır. Öte yandan, bir piezo valfin sürekli olarak enerjilendirilmesine gerek yoktur. Piezo teknolojisi ile mevcut tüketimin düşürülmesi büyük bir farklılıktır. Oransal solenoid valflerle karşılaştırıldığında %95'e varan enerji tasarrufu sağlanabilmektedir. Şekil 5'te görüldüğü gibi çok basit bir akış kontrolü için bir bükücü ve iki portlu tasarımıyla 2/2 yollu valf uygulanan gerilim ile orantılı olarak açılmaktadır. Şekil 6'daki gibi üç portlu ve iki bükücülü 3/3 yollu bir valf çözümü ile eksiksiz bir basınç düzenleme sistemi kurulabilmektedir. Basınçlandırma için bir bükücü ve hava tahliye için ikinci bir bükücü kullanılabilir.



Şekil 5. Akış kontrolünde bükücü aktüatör karakteristiği



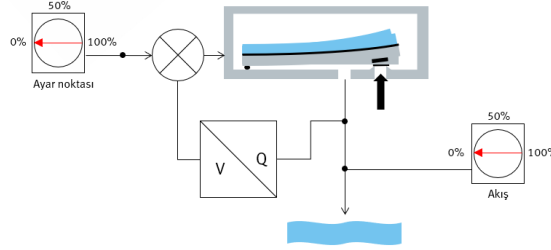
Şekil 6. 2/2 ve 3/3 yollu valfler

Solenoid valflerle karşılaştırıldığında diğer bir fark, elektriksel olarak da tamamen farklı şekilde çalıştırılmasıdır. Solenoid valfler 12 volt veya 24 volt besleme ile çalıştırılabilirken, piezo valflerin 310 volta kadar gerilimlere ihtiyacı vardır ve bu nedenle piezo elektronik sürücülerine gereksinim duyulmaktadır. Günümüzde bu sürücüler, gerilim kaynaklı ve akım sınırlamalı 2 kanallı gibi özelliklerde açık döngü çalışmalarda kullanılmaktadır. Dezavantaj olarak; kısa devre riski nedeniyle piezo seramiğin sıvılara maruz kalmaması gerekmektedir. Piezo etkisi seramik malzemede bir polarizasyon oluşturmaya dayanmaktadır. Bir sıvı veya

yoğunlaşan nem, yükün hemen dağılmasına neden olmaktadır. Bu nedenle piezo valfler bu tür uygulamalar için doğru seçim değildir [4-6].

#### 4. Piezo Teknolojisi ile Pnömatik Uygulamalar

Piezo teknolojisinin kullanımı oransal debi ürünleri için önemli bir inovasyondur. Gaz akışının sorunsuz bir şekilde aktarılması ve enerji ihtiyacının karşılanması noktasında piezo malzemenin rolü oldukça kritiktir. Kompakt tasarımıyla birlikte akış oranını kontrol altında tutma işleminde miktar ayarlanmasını ve basınç düzenlenmesini daha etkili bir şekilde yapmak mümkündür. Aynı zamanda diğer teknolojilerden farklı olarak piezonun enerjiler arasında geçiş fırsatı sunması, basıncın dağıtımında yön değişikliklerini hassas ve verimli bir şekilde yapmayı sağlamaktadır. Akış hızını ölçen ve ardından elektronik kontrol ile kontrol döngüsünü sağlayan bir sensör kullanarak akış hızı düzenlenebilmektedir.

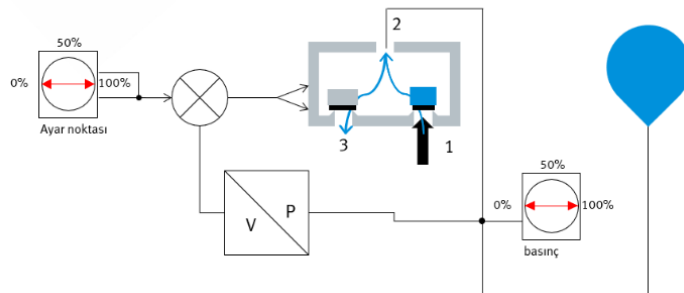


Şekil 7. Akış kontrolü devresi

Şekil 7'deki akış kontrolü devresinde valf, sıfır ayar noktasında kapalıdır. Ayar noktası ile %0-100 arasında orantılı ve lineer akış hızı sağlanmaktadır. Akış hızı ayarlama yöntemi için 2 bar giriş basıncında dakikada 17 litreye kadar akış hızları ve 6 bar'da dakikada 50-80 litre akış hızlarının ayarlanması mümkün olmaktadır. Akış kontrol valfi; piezo valfi, akış sensörü ve kontrol devresinden oluşan kompakt bir çözüm olmaktadır. Bu çözümle, giriş gerilimi ile orantılı bir çıkış akış hızı elde edilebilmektedir. Ayrıca uygulama; hassas, sessiz ve enerji tasarruflu olmaktadır.

Oransal regülatörler de akışkan havanın basıncını kontrol altında tutmak için piezo teknolojisinden aktif olarak yararlanan ürünler arasında yer almaktadır. Kontrol hassasiyetinin yükselmesi ile pratik kullanım, uzun ömür, düşük ses seviyesi, tepki süresi ve düşük enerji tüketimi gibi avantajlar sunmaktadır.

Basınç kontrolü de akış kontrolüne benzer şekilde çalışmaktadır. Şekil 8'de verilen basınç kontrolü devresinde içinde iki bükücü aktüatör bulunan bir piezo valf ve basınçlı hava bağlantısı ile ayar noktası ile valf basıncı arttırılmaktadır. Valfin basınç sensörü sinyaline göre kontrol döngüsü çalışmaktadır. %100'lük bir ayar noktasında, hedef basınca ulaşılan kadar basınçlandırma devam etmektedir. Ardından vana tekrar kapatılmaktadır. Bu, basıncın korunduğu anlamına gelmektedir. Basınç azaltılmak istenirse, ayar noktası düşürülmekte ve hedef basınca düşürülene kadar diğer bükücü aktüatör aktif olmaktadır. Valf tekrar kapatılarak sıfıra kadar düşürülürse ortam basıncına ulaşılan kadar valf tamamen tahliye edilmiş olmaktadır. Sadece bir valf kullanılarak uygulanan bu çözüm, solenoid valfler ile yapılsaydı iki valfe ihtiyaç duyulacaktır.



Şekil 8. Basınç kontrol devresi

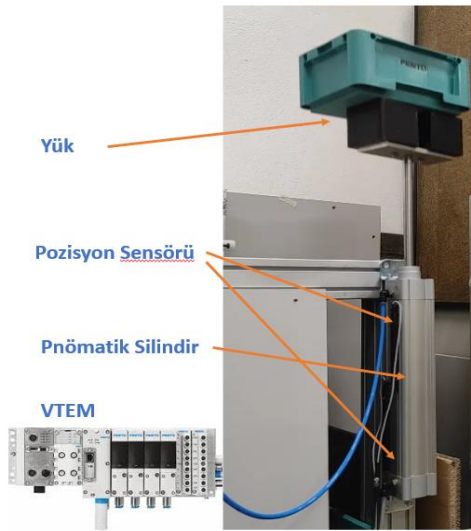
Basınç ve debi kontrolü yanında piezo valfler ve uygun kontrol algoritmaları kullanılarak pnömatik tahrik elemanlarında hareket kontrolü yapılabilmektedir. Konum sensörleri kullanılarak "Soft Stop", tanımlı hareket zamanı ve pozisyonlama uygulamaları örnek gösterilebilmektedir.

“Soft Stop”, endüstriyel uygulamalarda en hızlı çevrim zamanı ve en düşük sarsıntı istenen uygulamalardır. Çevrim zamanında %70’e kadar hızlanma sağlamaktadır. Sarsıntısız olarak dinamik hareket gerçekleşirse servis süresi kısalmakta ve ürünlerin ömrü uzamaktadır. Silindir, sensörle belirlenen son konuma yaklaştığında piezo valf silindire ters yönde hava verilerek hassasiyetle hareketini tamamlayacak şekilde ramplandırılmaktadır. Pnömatik harekette en sık karşılaşılan sorunlardan biri silindirin hareket zamanının tanımlanamamasıdır. Zamanla hareket zamanı değişmektedir. Bu yöntem ile hareketin tanımlanan sürede, örneğin 1000 ms’de tamamlanması istenmektedir. Kapalı çevrim çalışan sistem zamanla değişen şartlara rağmen hareket zamanını sabit tutmaya çalışmaktadır [7-10].

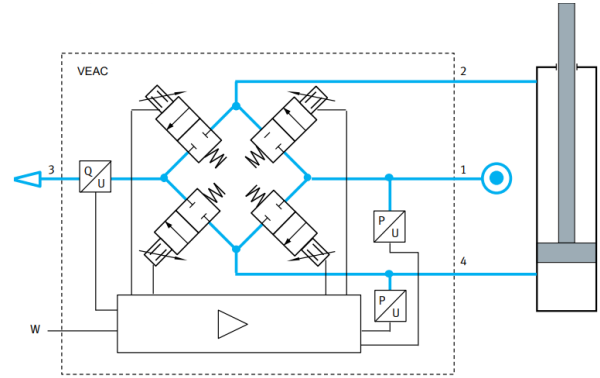
## 5. Hareket Kontrolü Uygulaması Test Sistemi

Hareket kontrolü uygulaması için kurulan test düzeneği Şekil 9’da görülmektedir. Sistemde hız kontrol cihazı olarak Festo’nun VTEM çift etkili pnömatik silindiri kullanılmaktadır. Şekil 10’da çalışma yapısı görülen dört piezo valf, bir kontrol ünitesi ile birleştirilerek sisteme bağlanabilmektedir. Hız, sabit bir silindirle egzoz akış oranı korunarak kontrol edilmektedir. Piezo valfleri hız kontrolü; yumuşak, sarsıntısız ve yer değiştirme kodlayıcısı olmadan sağlayabilmektedir. Her valf diliminde dört adet piezo valf bulunmakta ve bu valfler oransal olarak kontrol edilebilmektedir. Kurulan devre bağlantıları ile silindire giden ve silindirden boşalan hava kontrol edilmektedir. Bunun için her iki hatta da debi ve basınç sensörleri kullanılmıştır ve bu sensörlerden alınan veri, kontrol algoritması için geri besleme olarak kullanılmaktadır. Ayrıca sistemde kullanılan pnömatik silindirin son konumlarının belirlenmesi için düzeneğe pozisyon sensörleri yerleştirilmiştir.

“Soft-Stop” hareket kontrol düzeneği ile, tanımlı hareket zamanı ve pozisyonlama uygulamaları 10 kg yük ile test edilmiştir. Yapılan uygulamaların hız karakteristikleri osiloskop ekranı ile analiz edilmiştir. Şekil 11’de aktüel kuvvet (basınç) grafiği, Şekil 12’de hız grafiği, Şekil 13’te hedeflenen ve gerçekleşen pozisyon grafikleri ve Şekil 14’te deney çalışması resmi verilmektedir.



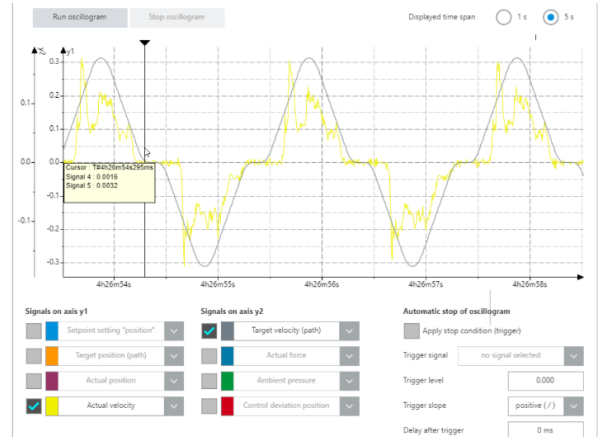
Şekil 9. Hareket kontrolü test düzeneği



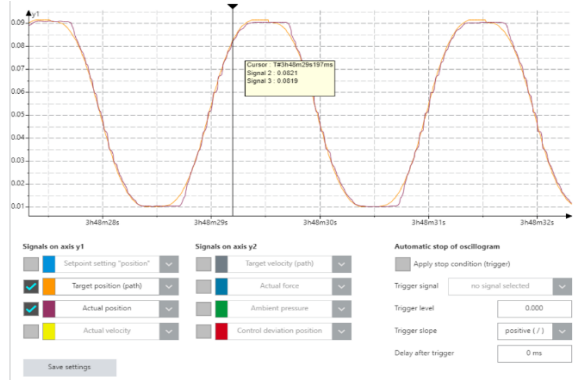
Şekil 10. Piezo valfler çalışma yapısı



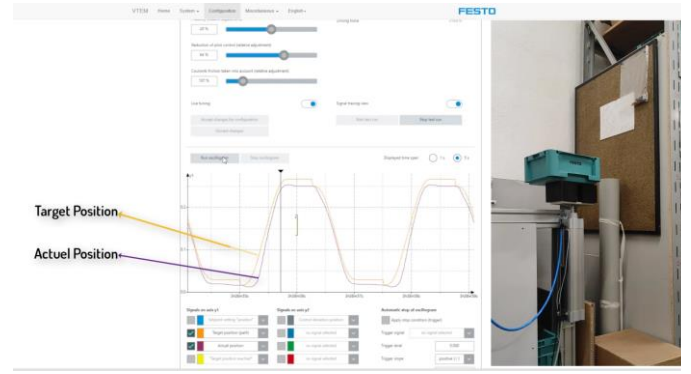
Şekil 11. Aktüel kuvvet grafiği



Şekil 12. Hız Grafiği



Şekil 13. Hedeflenen ve gerçekleşen pozisyon grafikleri



Şekil 14. Pozisyon kontrolü deneysel çalışma

Yapılan testlerde, sistemin ilk başta çok stabil çalışmadığı gözlemlenmiş, ancak kontrol parametrelerinin optimizasyonu ile sistem stabil hale getirilmiştir. 10 kg yüke rağmen sistem oldukça dinamik ve başarılı bir şekilde çalıştırılmıştır. Elektrikli sistemlere yakın bir performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Pozisyonlama hassasiyeti, kabaca 0,1- 0,3 mm olarak ölçülmüştür. Ancak, elektrikli sistemlerde bu değer 0,05- 0,1 mm olmaktadır. Bu anlamda bir dezavantaj gözlenmektedir. Ayrıca, düşük hızlarda hız kontrolü zorlaşmakta ve yörünge hassasiyeti düşmektedir.

## 6. Sonuç

Hareket teknolojisinde sıklıkla kullanılan servomotor ve sürücüler dahi, dinamik hareketlerde iyi takip davranışı sağlayan güçlü yol kontrolüne sahip olmalıdır. Basınçlı hava sıkışabilir bir enerji türüdür ve kontrol edilebilirlik özelliği zayıf olduğu açıktır. Buna rağmen piezo (servo) valfler ile pnömatik tahrik elemanları; uygun güç-ağırlık oranı, yüksek dinamikler ve maliyet yönü gibi avantajları nedeniyle şimdiki kadar ağırlıklı olarak kullanılan elektrikli tahriklere iyi bir alternatif olabilmektedir.

Özellikle, yükün ağır olduğu ve sürekli yüklemenin mevcut olduğu uygulamalar daha ilginç hale gelmektedir. Bu uygulamalarda artan güç ile elektrikli çözümlerin fiyatı da artmaktadır. Pnömatikte ise güç değişimine karşın çözüm değişmemekte ve yatırım maliyeti çok değişmemektedir.

Yüksek statik sürtünme ve doğrusal olmayan davranıştan kaynaklanan kontrol güçlüğü söz konusudur ve özel kontrol algoritmaları kullanılmaktadır. Bu nedenle, genellikle deneyde yapıldığı gibi PtP (noktadan noktaya) hareket uygulamalarında kullanılmaktadır. Model tabanlı kontrol yöntemlerinin yardımıyla, piezo valfler ile pnömatik teknolojinin yörünge takibi davranışını, robotik alanındaki zor uygulamalarda kullanılabilir şekilde iyileştirmek mümkündür.

Ağır yüklerde ve dakikada 2- 3 çevrim yapan bir sistemde pnömatik silindirin enerji maliyeti, elektrikten daha ekonomik olabildiği gibi daha sık çevrim yapan bir pnömatik silindir, sürekli hava tüketeceği için yatırım maliyeti çok düşük olsa bile elektrige göre çok pahalı kalabilmektedir. Bu nedenle, enerji tüketimi ve verimliliği açısından sistem değerlendirmesinin iyi yapılması gerekmektedir.

## Referanslar

- [1] A. Arnau, D. Soares, "Piezoelectric Transducers and Applications", Springer-Verlag Berlin, 2008
- [2] R. Cartes, R. Kensley, "Introduction to piezoelectric transducers", piezo.com
- [3] J. Holterman, P. Groen, "An Introduction to Piezoelectric Materials and Applications", Stichting Applied Piezo, 2013
- [4] M. Simic, N. Herakovic, "Piezoactuators for the use in hydraulic and pneumatic valves", International Conference Fluid Power, 2017
- [5] B. Najjari, M. Barakati, A. Mohammadi, M.J. Fotuhi, "Modelling and Controller Design of Electropneumatic Actuator Based on PWM", International Journal of Robotics and Automation (IJRA), Vol.1, No.3, pp. 125-136, Sep. 2012.
- [6] "Piezo Technology in pneumatic valves Festo", Festo Whitepaper.
- [7] P. Harris, G. O'Donnell, T. Whelan, "Energy Efficiency in Pneumatic Production Systems: State of the Art and Future Directions", Jan. 2012
- [8] A.Zaim, H. Aras, "Energy Efficiency in Pneumatic Systems", Engineer and Machinery, vol. 61, no. 698, p. 31-45, 2020, Review Article
- [9] M.Ling, X.He, M.Luu, L.Cao, "Dynamic Design of a Novel High Speed Piezoelectric Flow Control Valve Based on Compliant Mechanism", Vol.27, issue 6, pp. 4942-4950, May.2022
- [10] N.Bruno, Y. Zhu, C.Li, Q.Gao, Y.Li, "Development of a piezoelectric high speed on/off valve and its application to pneumatic closed-loop position control system", Journal of Mechanical Science and Technology, 33, 2747-2759, 2019.