

Açık Döngülü Piezo-elektrik Doğrusal Sürücüler için Histerez Telafisi

Shahzad Khan, Ahmet Ozcan Nergiz, Asif Sabanovic, Volkan Patoglu

Mekatronik Mühendisliği Programı
Sabancı Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
{shahzad, ahmetn}@su.sabanciuniv.edu
{asif, vpatoglu}@sabanciuniv.edu

Özetçe

Bu bildiride, açık döngülü piezo-elektrik doğrusal sürücüler için yüksek çözünürlükte histerez telafisi gösterilmektedir. Piezo-elektrik malzemelerde yapıları gereği mevcut olan doğrusalsızlıklar, Bouc-Wen modeli kullanılarak model tabanlı bir kontrol algoritması ile telafi edilmiştir. Telafi için kullanılan yöntemin histerez davranışında zaman, değişen frekans ve farklı hareket genişliği nedenleriyle görülen değişimler altında başarılı sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Piezo-elektrik sürücülerin yer değiştirme bilgilerini elde edebilmek için yüksek çözünürlüklü lazer interferometre sisteme entegre edilmiş ve lazer interferometreden elde edilen ölçümler döngüyü kapatmak üzere bir geri besleme olarak kullanılmıştır. Histerez döngüsünün telafisi sonucu yer değiştirme gerilimi ve gezinme aralığı arasındaki doğrusallaşma davranışını gösteren muhtelif benzetimler ve deneysel sonuçlar sunulmaktadır.

1. Giriş

Piezoelektrik, elektromekanik enerji dönüşümü için temel bir süreç niteliğindedir. Piezoelektrik malzemelerde mekanik gerilim/uzama davranışları ile elektriksel kutuplaşma arasında bağlantı mevcuttur. Direkt etki altında malzeme deforme olduğu anda elektriksel yük gözlemlenebilir. Bunun karşısı bir etki de elektrik alan uygulandığı sırada piezoelektrik malzemelerde oluşabilen mekanik gerilim/uzama şeklinde gerçekleşir. Bu davranışlardan birincisi piezoelektrik etki olarak tanımlanır ve 1880 yılında Pierre ve Marie Curie tarafından bulunmuştur. İkincisi ise ters piezoelektrik etki olarak tanımlanır. "Piezo" kelimesi kökünü, Yunanca'da itmek anlamına gelen "piezen" kelimesinde barındırmaktadır. Bu etki, malzeme üzerine bir itme kuvveti ya da bir başka deyişle basınç uygulamaya çalışılırken keşfedilmiştir. Başlangıçta basınç elektriği ve piezoelektrik kavramları aynı olguyu anlatmak için kullanılmıştır.

Quartz gibi doğal piezoelektrik malzemelerde ters piezoelektrik etki pratikte kullanmak için çok küçüktür. Buna karşın, maksimum uzama değişik özelliklerdeki malzemelerin karışım oranlarıyla ayarlanabildiği için PZT, PLZT ya da PVDF [1] gibi bazı yapay piezoelektrik malzemeler eyleyici olarak kullanıma daha yatkındır.

Piezoelektrik yapıdaki malzemeler elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürüldüğü uygulamaların; yüksek hassasiyet ve yönlendirme hızı gerektiren boyut sınırlamasını da beraberinde getirenlerinde geniş çapta

kullanılmaktadır. Mikro-sensörler, mikro-konumlandırıcılar, hoparlörler, tıbbi teşhis cihazları, obtöratörler ve nokta vuruşu yazıcı kafaları bu uygulamalara çeşitli örnekler olarak sayılabilir. Adı geçen bütün uygulamalar gürbüz kuvvet kontrolü veya kusursuz pozisyon takibi gerektirmektedir. Bu hedeflere ulaşmak, sistemdeki saldı ve küçük ölçeklerde etkisini çok fazla hissettiren Coulomb sürtünmesi nedeniyle zorlaşmaktadır. PZT yığıt eyleyiciler monolitik yapılarından ötürü kayan veya dönen parça içermedikleri için belirgin bir mekanik saldı veya statik sürtünme göstermezler. Buna ek olarak, tipik bir PZT yığıt eyleyici kilohertz seviyesinde bant genişliğine ve nanometrik çözünürlüğe sahip adım hareketleri sergileyebilir. Sonuç olarak PZT eyleyiciler, yüksek duyarlılıkta mikro-eyleyici olarak kullanıma yeterince uygundur.

Histerez, piezoelektrik eyleyicilerde (PEA) içsel ve orandan bağımsız bir doğrusalsızlıktır. Yer değiştirme çıktısı, halihazırdaki voltaj girdisine ve geçmişteki girdilerin ne şekilde uygulandığına bağlı olmakla beraber geçmişteki voltaj girdisi değerlerine bağlı değildir. Histerez davranışı kontrol sistem tasarımında dikkatlice ele alınmadığı takdirde limit döngülere ve durağınsızlığa sebep olabilir [2]. Histerez doğrusalsızlığı çıktının %15-20'lik oranına tekabül ettiği için eyleyici performansında ciddi bir azalmaya sebebiyet vermektedir. Histerezi ortadan kaldırmanın etkili yollarından biri, onun nasıl davrandığını açıklayan bir model yaratıp, bu modeli tersten uygulayarak voltaj girdisini yeniden şekillendirmektir. Literatürdeki ters dinamik kontrole benzeyen bu telafi yönteminin ne kadar etkili olacağı kullanılan sistem modelinin doğruluğuyla bağlantılıdır.

Modelinin tersi kullanarak histerez telafisi için yapılan çalışmalar histerezin modellemesi konusunda da kapsamlı araştırmaları beraberinde getirmiştir. Örneğin doğrusal olmayan diferansiyel denklemler ya da Duhem Madelung modeli olarak bilinen metot kullanılarak histerez modellemesi yapılabilmektedir [3]. Birçok sonsuz temel histerez operatörünün ağırlıklı üstdüşümleri şeklinde yapılandırılan histerez modelleri de literatürde sunulmuştur. Seçilen histerez operatörüne göre, oluşan model Preisach [4], Krasnoselskii-Pokrovskii ya da Ishlinskii tiplerinde olabilir [5, 6]. Bu histerez modelleri piezoelektrik eyleyicinin doğrusal dinamiği ile matematiksel olarak birleştirilerek sistemin bütün olarak modelini oluşturmaktadırlar. Yukarıda ele alınan modeller sistem karakteristiğinin fiziksel gerçekliğine vurgu yapmazlar. Buna karşın Goldfarb ve Celanovic [7] tarafından önerilen PEA modeli tamamen fiziksel prensipler üzerine kuruludur.

Bu model elektriksel ve mekanik olmak üzere iki etki alanından oluşmaktadır ve bu alanlar arasında enerji transferi gerçekleşmektedir. Burada histerez, "Generalized Maxwell Slip" [8] kullanılarak, elektriksel etki alanının dirençsel-kapasitif bir elemanı olarak modellenmiştir. Model davranışı, deneysel olarak elde edilen eğrinin ilk artışı gösteren kısmına örtülerek parametrisasyon tamamlanır.

Yukarıdaki modelleme ve tanımlama yaklaşımları 3 temel sınırlamaya tabidir. Birincisi, bu yaklaşımlar başlangıçta piezoelektrik eyleyicide bulunan yüklerin etkisini yok saymakta ya da voltaj uygulanmadan önce eyleyicinin tamamıyla boşta olduğunu varsaymaktadır [7]. İkincisi, bu modellerce üretilen histerez döngüleri anti-simetrik olacak şekilde kısıtlanmıştır. Bu kısıt piezoelektrik eyleyicilerin pratikte gösterdiği davranışlarla uyumsuzdur. Üçüncü olarak ise, nihai model davranışının bütün esas ve tali histerez döngülerini aynen tekrarlayabileceği yönünde bir garanti yoktur.

Bu bildiriye yüksek doğrulukta bir model [9] kullanılarak, yukarıdaki engel teşkil eden durumların üstesinden gelinmeye ve histerez davranışı yok edilmeye çalışılmıştır. Esas uygulama alanımız mikromanipülasyon konusuna odaklandığı için çalışmalarımız olabildiğince düşük ve sabit hızlar gerektirmektedir. Dolayısıyla bu bildiri kapsamında girdi frekansı sabitlenmiştir. Buna ek olarak, açık-döngüli piezoelektrik eyleyiciden pozisyon değişim geri beslemesinin alınması sırasında lazer interferometre kullanılarak deneysel bir sorunun da üstesinden gelinmiştir.

2. Piezoelektrik Eyleyici Modeli

Kolay uygulanabilirlik ve eyleyicilerin pratikteki davranışlarını yüksek doğruluk ile sergileyebilmesi nedeniyle bu çalışmada gerçeğine oldukça yakın bir piezo-düzenek modeli seçilmiştir [10]. Piezo-düzenek, statik ve dinamik sürtünmeyi sıfıra indirmeye yönelik olarak tasarlanmış esnek kılavuzlu bir piezo-sürücünden oluşmaktadır. Ayrıca bu esnek yapılar yüksek yük kapasitesine ve bükülmezliğe sahip olmakla birlikte sarsıntı ve darbelerle karşı da duyarlı değildir. Şekil 1'de piezo yığıtın yapısı, Şekil 2'de ise PZT eyleyiciye ait elektromekanik model gösterilmektedir. Histerez ve piezoelektrik etkiler birbirlerinden ayrılmıştır. H histerez etkisini gösterirken, u_h bu etkiden kaynaklanan voltaja tekabül etmektedir. Piezoelektrik etki ise dönüştürme oranı T_{em} bir dönüştürücü ile temsil edilmektedir. Elektriksel olarak paralel bağlı durumda bulunan PZT yonga plakalarının kapasitansları toplamı C_e olarak gösterilmektedir. Devredeki toplam akım \dot{q} iken, q ise PZT eyleyicideki toplam elektrik yükünü anlatır. q_p de dönüştürücünün mekanik taraftaki yüküdür. Piezoelektrik etki sonucu oluşan voltaj u_p olarak, PZT eyleyicideki toplam voltaj da u_{in} olarak adlandırılmıştır. F_p dönüştürücünün elektriksel taraftaki kuvveti, F_{ext} da dışarıdan uygulanan kuvvettir. PZT eyleyicideki nihai uzama ise x olarak verilmiştir. F_p ve x arasında M mekanik ilişkisi bulunmaktadır. Etkileşim portlarında, mekanik enerji ve elektrik enerjisi birbirlerine eşit durumdadırlar ($u_p q_p = F_p x$). Piezoelektrik seramiğin elastik modülü E , viskozitesi η , kütle yoğunluğu ise ρ olarak verilmiştir. Bunlara ek olarak PZT eyleyicinin geometrik yapısını açıklamak için L uzunluğu ve A_p kesit alanı kullanılmaktadır. Etkin kütle m_p , etkin bükülmezlik k_p ve

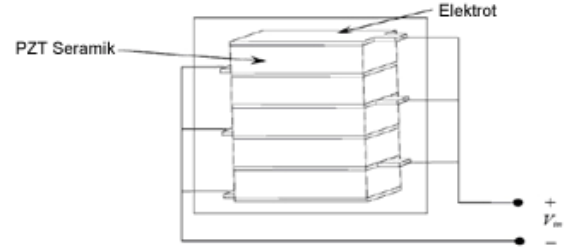
sönüm katsayısı c_p aşağıda belirtilen şekillerde hesaplanmaktadır:

$$\begin{aligned} m_p &= \rho A_p L \\ k_p &= \rho A_p / L \\ c_p &= \eta A_p / L \end{aligned}$$

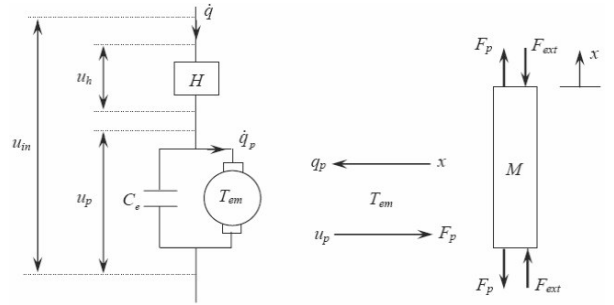
Sisteme ait elektromekanik denklem şu şekilde yazılabilir:

$$m_p \ddot{y} + c_p \dot{y} + k_p y = T_{em}(u_{in}(t) - H(y, u_{in})) - F_{ext} \quad (2.1)$$

Burada y yerdeğişimini, $H(y, u_{in})$ ise y ve u_{in} değişkenlerine bağlı doğrusal olmayan histerezi göstermektedir [10]. Vurgulamak gerekir ki, PZT eyleyicinin sürekli doğasını hesaba kattığı için kısmi diferansiyel denklemler mekanik kısmın modellenmesinde kullanılmak için daha uygundur. Fakat, eyleyicinin birinci doğal frekansı bizim ulaşabildiğimiz bant genişliğinin çok üstünde olduğu için ve uygulamayı basitleştirmek adına (2.1)'de verilen kümelenmiş denklemin kullanımı sistemin mekanik davranışını açıklamak için yeterli olacaktır.



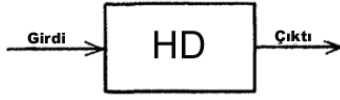
Şekil 1: Piezo yığıt illüstrasyonu



Şekil 2: PZT eyleyicinin elektromekanik modeli

3. Histerez Modeli

Histerez olgusuyla bilimin bir çok alanında karşılaşılabilmektedir. Fakat, bu kavramın yorumlanış biçimi hangi alanda olduğuna bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Sonuç olarak, karışıklık oluşmaması için özenli matematiksel modellerle histerezin tanımlanması gerekmektedir. Bu modeller iki önemli amaca yönelik yarar sağlar. Birincisi, yeterince belirli olmayan kavramsal tanımlamaların yerine geçebilmeleri, ikincisi ise matematiksel ispatlar için araç teşkil etmeleridir.



Şekil 3: Histerez dönüştürücü

Bir $u(t)$ girdisi ve $f(t)$ çıktısı ile karakterize edilebilen bir dönüştürücüyü ele alalım (Şekil 3). Eğer girdi-çıkı ilişkisi, girdi her ekstreme ulaştığında bir kısımdan diğerine geçiş yaşanan çok kısımlı bir doğrusalsızlık ise bu dönüştürücüye histerez dönüştürücüsü (HD) denir (Şekil 4). Bundan sonraki kısımda yalnızca statik histerez doğrusalsızlığı tartışılacaktır. Burada “statik” kelimesinden kasıt, histerez doğrusalsızlığının kısımlarının geçmişteki girdi ekstremeleri tarafından belirlenmeleridir. Ekstrem noktalar arasındaki girdi değişimindeki hızın duruma etkisi yoktur. Verilen tanıma göre kısımlara ayrılma durumu histerezin özünü oluştururken, döngüler bu durumun sonucudur.

Sonuç olarak, girdi başlangıçta bilinmemekle birlikte; dönüştürücünün, sistemin geri kalanı ile oluşan etkileşimi ile belirlenmektedir. Bu sebeple, yapısı gereğince girdi ekstremelerini saptayıp biriktirecek ve bu birikimin ışığında histerez doğrusalsızlığının uygun kısmını belirleyecek bir matematiksel model gerekmektedir. Böyle modeller kullanılarak histerez içeren sistemleri matematiksel olarak açıklamaya çalışmak mümkündür [3, 4, 5, 6]. Histeretik sistemlerin geniş bir kesimine yönelik genel kontrol dizayn algoritmalarında başarıyla uygulanabildikleri için bu modellere özel bir ilgi gösterilmektedir. Mekanik yapıların dinamiğinin karakterizasyonu amaçlandığında Bouch-Wen [9] doğrusalsız histerez modeli yapısı (kütle-yay-amortisör sistemine denk diferansiyel hareket denklemi) ve çok yönlülüğü nedeniyle iyi bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebeple, bu çalışma kapsamında açık-döngülü Piezo eyleyicide açığa çıkan histerez döngüsünü telafi etmek için bu model kullanılmıştır. Geçmişte de çeşitli araştırmacılar aynı modeli başarıyla kullanmışlardır. [11] doğrusalsız histeretik yalıtkanlarla ilgili çalışmalarında, [12] adaptif uygulama için, [13] ise gevşek davranış gösteren ve gerileyen histeretik bağlantı noktalarına yönelik optimizasyon yaklaşımı kapsamında bu modeli kullanmışlardır. Bouch-Wen histerez modeli aşağıdaki şekilde tanımlanan bir doğrusalsız diferansiyel denklemler sistemidir:

$$\dot{z} = \alpha \dot{x} - \beta |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \gamma \dot{x} |z|^n \quad (3.1)$$

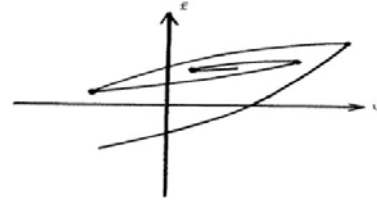
Denklemdaki parametrelerden α geri çağırıcı kuvvet genliğini, β ve γ histerez döngüsünün şeklini, n ise elastik tepkiden plastik tepkiye geçişteki düzgünlüğü kontrol etmektedir. Elastik yapı ve malzemeler kullanıldığını varsayarak n parametresinin değerini 1 olarak belirlediğimiz takdirde ($n=1$) denklem aşağıdaki şekli almaktadır :

$$\dot{z} = \alpha \dot{x} - \beta |\dot{x}| z - \gamma \dot{x} |z| \quad (3.2)$$

Burada durum değişkeni olan z ve tahrik x arasındaki histerez ilişkisi temsil edilmektedir. Histeretik değişken z , gerçek yer değiştirmeyi gösteren x değişkenine bağlıdır fakat “sanal” bir

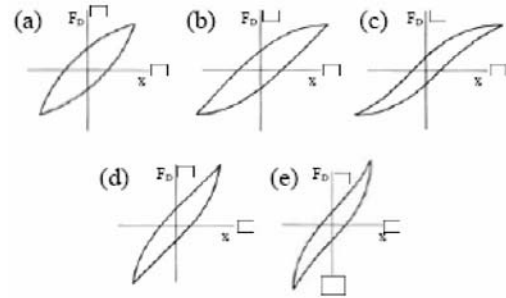
yer değiştirme konumundadır. Bu parametrelerin çeşitli kombinasyonları kullanılarak birbirinden farklı şekillerde histerez döngüleri elde etmek mümkündür. Bunu göstermek için $n=1$ kabul edelim ve yalnızca β ile γ parametreleri ile oynayalım. Oluşması muhtemel birbirinden farklı ve durağan histerez eğrileri Şekil 5’te gösterilmiştir [14]. Böylelikle (3.2)’de gösterilen diferansiyel denklem sisteminin çok yönlülüğü de gözlenmiş olur. Durum değişkeni z ’yi (2.1)’de yerine koyduğumuz takdirde histerezli piezoelektrik dinamik denklemi aşağıdaki şekli alır:

$$m_p \ddot{y} + c_p \dot{y} + k_p y = T_{em} u(t) - T_{em} z - F_{ext} \quad (3.3)$$



Şekil 4: Örnek bir çok kısımlı doğrusalsızlık

Denklemler (3.2) ve (3.3) bir araya geldiklerinde, 3 katmanlı bimorf piezo eyleyicinin doğrusalsız dinamik modelini oluştururlar. Test sonuçlarımızda da görüleceği gibi α , β ve γ parametreleri için uygun değerler seçildiği takdirde bu model piezoelektrik eyleyicinin davranışlarına iyi bir tarif teşkil edebilir.

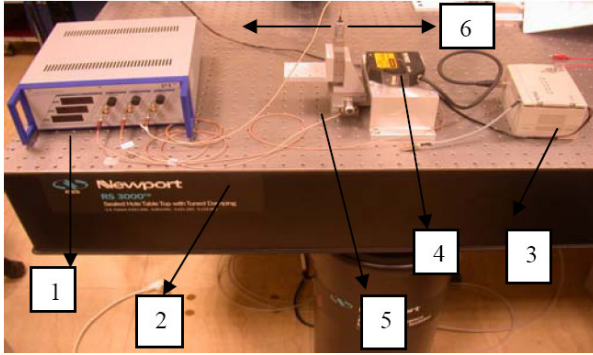


Şekil 5: β ve γ değiştirilerek elde edilen histerez döngüleri

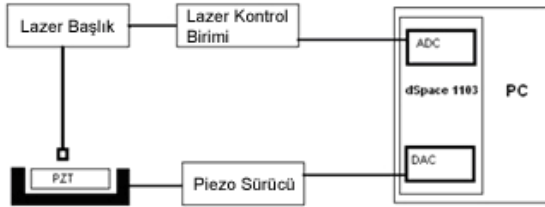
4. Deney Düzenegi

Kurulu modeli teyit etmek amacıyla Physik Instrumente™ ürününü açık döngülü mikrometrik bir piezoelektrik sürücü olan Piezo-Mike PI854 kullanılmıştır. Bu üründe yüksek çözünürlüklü doğrusal piezo sürücüler entegre durumdadır. Manuel olarak 1 mikrometre çözünürlükte hareket ettirilmeleri mümkündür. Piezo voltajı kontrol edilerek ise mikrometrik uç manuel olarak ayarlandığı pozisyonlardan içe ve dışa doğru 25 mikrometre kadar otomatik olarak hareket

ettirilebilmektedir. Piezoelektrik hareketin çözünürlüğü nanometre altı seviyelerdedir. Piezoelektrik eyleyiciler bir PI ürünü olan E-663 alçak voltajlı piezo sürücüsü ile harici kontrol modunda sürülmektedir. Harici kontrol modunda voltaj girdisi dSpace™ 1103'ün DAC modülünden -2 ve +2 volt aralığında verilmektedir. Bu voltajın 10 katına yükseltilmiş hali ile piezo eyleyiciler beslenmektedir. Piezo eyleyicideki yer değişimini ölçebilmek için Keyence™ ürünü bir lazer interferometre olan LK-2001 kullanılmıştır. Işın spotundaki ışık miktarı dağılımına bağlı olmaksızın gerçeğe çok yakın ölçümler verebilen bir ışık alıcısı olan CCD bu cihazda mevcuttur. 1 mikron çözünürlüğe ve 30 milimetre menzile sahiptir. Deney düzeneği Şekil 6'da, şematığı ise Şekil 7'de görülmektedir. Yer değiştirme sonucu oluşan voltaj ise dSpace™ 1103'ün ADC modülünden okunmaktadır. Dahil edilen model referans sinyal olarak gerekli voltajı yaratarak histerezi yok etmekte ve referans yörüngeyi takip etmektedir.



Şekil 6 : Deney düzeneğinin genel görünümü
1-PZT yükseltici, 2-Titreşim yalıtımlı masa, 3-Lazer kontrol birimi, 4-Lazer başlığı, 5- Üç eksenli açık-döngülü PZT, 6-Hareket eden eksenin yönü



Şekil 7: Deney düzeneği şematığı

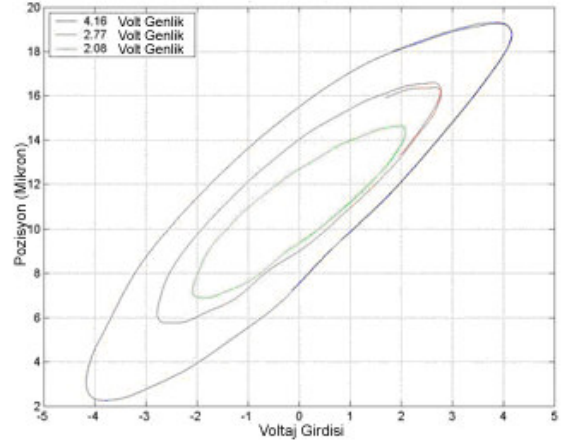
5. Deneysel Sonuçlar

Yapılan ayarlamalar sonucunda Bouch-Wen modelinin α , β ve γ parametreleri için bütün deneylerde aşağıdaki değerler kullanılmıştır:

$$\begin{aligned}\alpha &= 0.014 \\ \beta &= 1.1115 \\ \gamma &= -1.0387\end{aligned}$$

Histeretik davranışın hareket menzili ile doğru orantılı olarak arttığı bilinen bir gerçektir ve sinüsoidal girdi frekansının 1 Hz olduğu genliğin ise değişken olduğu Şekil 8'de de bu

durum sergilenmiştir. Belirtmek gerekir ki PZT eyleyiciye uygulanan voltaj girdisi x-ekseninde gösterilenin 10 katıdır.



Şekil 8: 1 Hz frekansa ve değişken genliğe sahip sinüsoidal girdi için histerez döngüsü

Histeretik davranış frekansların artması sonucunda da artar. Bu durum sinüsoidal girdi frekanslarının 0.5 Hz, 1 Hz ve 2 Hz genliğin ise sabit olduğu Şekil 9'de görülmektedir. Bu şekilde de PZT eyleyiciye uygulanan voltaj girdisi x-ekseninde gösterilenin 10 katıdır. Sabit frekans (1 Hz) ve değişken genlikte sinüsoidal girdi kullanılarak histerez kompanzasyonu yapılmıştır. Frekansın 1 Hz olarak belirlenmesinin en önemli nedeni mikromanipülasyon uygulamalarında bütün hareketlerin çok yavaş olma zorunluluğudur. Şekil 10-11-12-13-14 sırasıyla 20 V, 50 V, 60 V, 70 V ve 80 V voltaj girdilerine ait histerez kompanzasyonlarını göstermektedirler. Bu şekiller, model uygulandıktan sonra histerez davranışının azaldığını ve PZT eyleyici dinamiğinin doğrusallaştığını açık biçimde göstermektedir. Böylelikle, PZT eyleyici dinamiğinin yeni hali kullanılarak referans oluşturmak mümkündür. PZT eyleyicinin pozisyon takibi Şekil 15'de, ardışık hatalarsa Şekil 16'da gösterilmiştir.

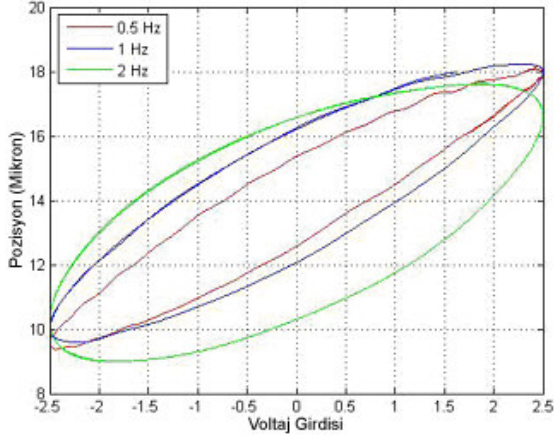
6. Sonuçlar

Bu bildiriye Bouch-Wen histerez modelinin uygulaması ile açık döngülü piezo-elektrik doğrusal sürücüler için yüksek çözünürlükte histerez telafisi gösterilmiştir. Histerez döngüsünden kaynaklanan doğrusalsızlıkları kompanse edebilmek için gereken voltajı yaratmak amacıyla histerez modeli ve piezoelektrik model birleştirilmiş ve model tabanlı bir kontrol algoritması ile histerez davranışı büyük ölçüde telafi edilmiştir. PZT'den yüksek çözünürlükte pozisyon geri beslemesi almak amacıyla lazer interferometre kullanılmıştır. Histerez davranışının frekans ve menzile bağlı olduğu ve telafi için kullanılan yöntemin histerez görülen değişimler altında başarılı sonuçlar verdiği deneysel olarak gösterilmiştir. Uygulanan yöntemin etkinliği, değişken genlikli sinüsoidal girdiler kullanıldığı durumlarda histerez telafisi yapılarak ortaya konulmuştur. Buna ek olarak sinüsoidal referans için pozisyon takibi, yaklaşık 1 mikron hata payı ile sunulmuştur.

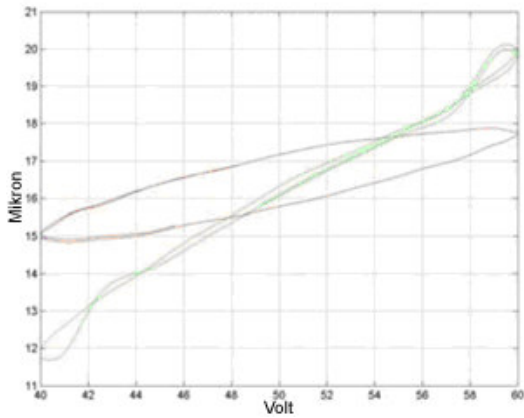
Gelecekteki çalışmalarda 3-eksenli açık-döngülü piezo eyleyicilerin mikromanipülasyon uygulamalarında kullanımına yönelik çaba sarf edilecektir.

7. Teşekkür

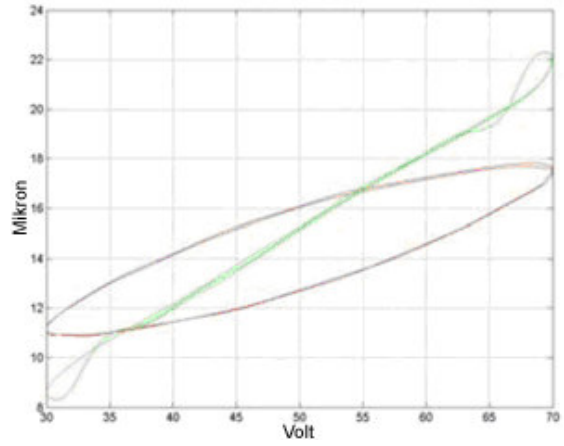
Yukarıda bahsedilen deneysel çalışmalar TÜBİTAK, Ankara ve Yousef Jameel, Berlin burslarınca finansal olarak desteklenmektedir.



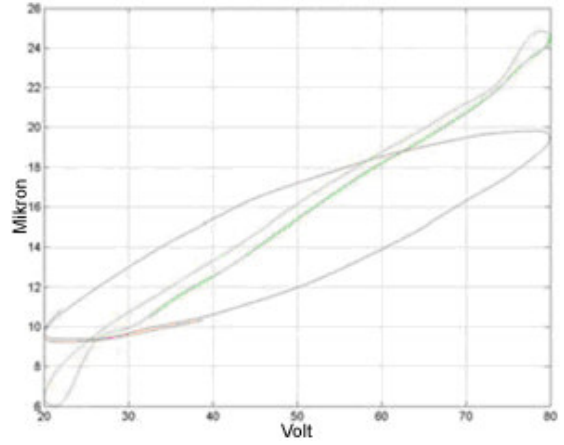
Şekil 9: Sabit genliğe ve değişken frekanslara (0.5 Hz, 1 Hz, 2 Hz) sahip sinüsoidal girdiler



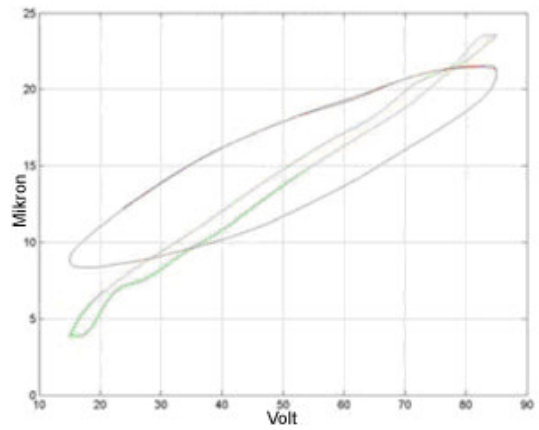
Şekil 10: 20 V genliğe ve 1 Hz frekansa sahip sinüsoidal girdi



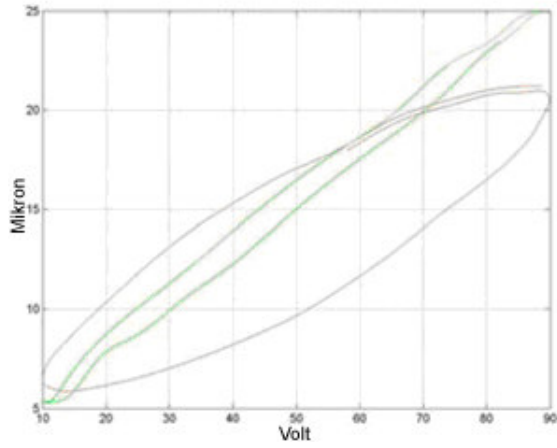
Şekil 11 : 50 V genliğe ve 1 Hz frekansa sahip sinüsoidal girdi



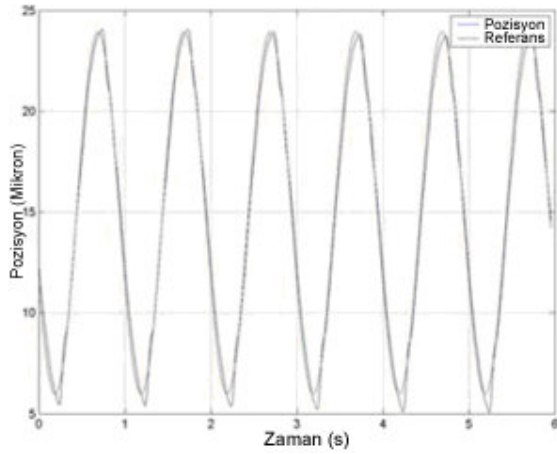
Şekil 12 : 60 V genliğe ve 1 Hz frekansa sahip sinüsoidal girdi



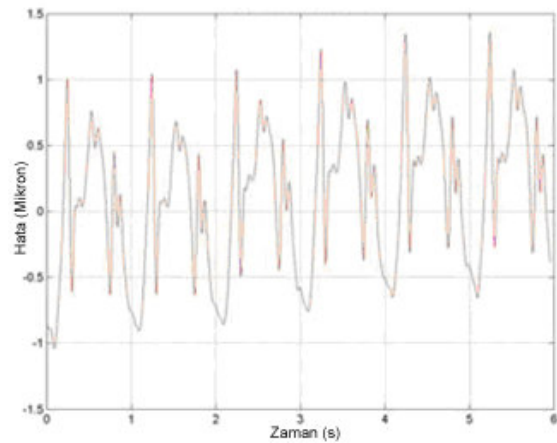
Şekil 13 : 70 V genliğe ve 1 Hz frekansa sahip sinüsoidal girdi



Şekil 14 : 80 V genliğe ve 1 Hz frekansa sahip sinüsoidal girdi



Şekil 15 : Sinüsoidal girdi için pozisyon takibi



Şekil 16 : Sinüsoidal girdi için pozisyon takip hatası

8. Kaynakça

- [1] T. S. Low and W. Guo, "Modeling of a three-layer piezoelectric bimorph beam with hysteresis," *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 4, pp. 230–237, 1995.
- [2] Adriaens, H., de Koning, W. L., and Banning, R., 2000, "Modeling Piezoelectric Actuators," *Mechatronics*, **5**, pp. 331–341.
- [3] Stepanenko, Y., and Su, C.-Y., 1998, "Intelligent Control of Piezoelectric Actuators," *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control*, Vol. 4, pp. 4234–4239.
- [4] Song, D., and Li, C. J., 1999, "Modeling of Piezo Actuator's Nonlinear and Frequency Dependent Dynamics," *Mechatronics*, **9_4_**, pp. 391–410.
- [5] Kuhnen, K., and Janocha, H., 2000, "Real-time Compensation of Hysteresis and Creep in Piezoelectric Actuators," *Sens. Actuators, A*, **79**, pp. 83–89.
- [6] Krasnosel'skii, M. A., and Pokrovskii, A. V., 1983, *Systems with Hysteresis*, Nauka, Moscow.
- [7] Goldfarb, M., and Celanovic, N., 1997, "Modeling Piezoelectric Stack Actuators for Control of Micromanipulation," *IEEE Control Syst. Mag.*, **17**, pp. 69–79.
- [8] Lazan, B. J., 1968, *Damping of Materials and Members in Structural Mechanics*, Pergamon, London.
- [9] Y.-K. Wen, "Method for random vibration of hysteretic systems," *J. Engr. Mech.*, v. 102, pp. 249(263), 1976.
- [10] Michael Goldfarb, and Nikola Celanovic, "Modeling Piezoelectric Stack Actuators for Control of Micromanipulation," *IEEE Contr. Sys. Mag.*, Vol. 17, pp. 69–79, 1997.
- [11] Constantinou, M.C. Tadjbakhsh, I.G. 1998. Hysteretic dampers in Base Isolation: Random Approach. *J. of Struct.Engr, ASCE* 111(ST4): 705-721.
- [12] Smyth, A.W., et al. 2002. Development of adaptive modeling techniques for non-linear hysteretic systems. *Intl. J. of Non-Linear Mech.* 37:1435-1451.
- [13] Heine, C.P. 2001. Simulated Response of Degrading Hysteretic Joints With Slack Behavior. Ph.D. diss., Virginia Polytech. Inst. and State Univ.
- [14] Spencer, B.F. 1986. *Reliability of Randomly Excited Hysteretic Structures*. Springer-Heidelberg, New York.