

Tasarlanan Düzlemsel Paralel Esnek Bağlantılı Mekanizmanın Kayan Kipli Kontrolü

Merve Acer¹, Asif Şabanoviç²

¹Makina Mühendisliği Bölümü
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

acerm@itu.edu.tr

²Mekatronik Mühendisliği Bölümü
Sabancı Üniversitesi, İstanbul

asif@sabanciuniv.edu

Özetçe

Günümüzde mikro/nano teknolojileri geliştikçe bildiğimiz rijit mekanizmaların yerini esnekliği ayarlanabilir, yeniden yapılandırılabilir yüksek hassasiyetli konum kontrollerine elverişli esnek bağlantılı mekanizma tasarımları öne çıkmıştır. Bu mekanizmalar malzemelerin esnekliğinden yararlanarak yer değişim ve kuvvet transferlerini sürekli, kararlı ve mikron seviyede yapılmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada da yeni bir düzlemsel paralel esnek bağlantılı mekanizma tasarlanıp konum kontrolü yapılmıştır. Esnek bağlantılı mekanizma tasarımında göz önünde bulundurulması gereken önemli noktalar sunulmuştur. Hassas konum kontrolü için kayan kipli bozan etken gözlemleyicisi ile kayan kipli konum kontrolü metoduyla hassas konum kontrolü metodu sunulmuş deney sonuçları açık çevrim kontrol ve bilinen PID kontrol yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak önerilen kontrol yöntemi ile mekanizmanın mikron seviyede kontrolü sağlanmıştır.

1. Giriş

Modern teknoloji gelişimi ile hücre manipülasyonu, cerrahi işlemler, mikro optik sistemler, uzay sistemleri, mikro işleme ve mikro montajlama gibi uygulamalarda mikron ve mikron altı konumlandırma platformlarının önemi artmıştır [1-2]. Bunun için yüksek hassasiyetli mekanizmaların tasarımında yeni tasarım ve kontrol yöntemlerine ihtiyaç duyulmuştur. Geleneksel rijit mekanizmalarda kullanılan mafsalların yeterince hassas olmaması, bu mafsalların bir zaman sonra eski performanslarını gösterememeleri, montajlama işlemlerinde yapılan hatalar, boyutlarının bazı mikro/nano uygulamalar için elverişli oranda küçültülememesi gibi nedenlerden dolayı gerekli mikron seviyede konumlandırma, hassaslık ve kararlılığı kolayca sağlayamamaktadır. Bundan dolayı hareket ve kuvvet transferleri için malzeme esnekliğinden yararlanan esnek bağlantı elemanları (flexure) tasarlanmıştır [3]. Esnek bağlantı elemanlı mekanizmaların (compliant mechanisms) avantajları şu şekilde sıralanabilir: yüksek kararlılık, sürtünmesiz ve sürekli hareket sağlamaları, simetrik olarak tasarlanırsa sıcaklık değişimlerine karşı dirençli, hafif, montajlama gereksinimi olmadan tek parça şeklinde işlenebilirlikleri, kolayca küçültülebilir olmaları ve

yüksek hassasiyetteki geleneksel bağlantı elemanlarının kullanılmasından daha az maliyetli olmalarıdır.

Bu çalışmada mikro konumlandırmada kullanılabilecek 3-PRR (eklemler 1 prizmatik 2 döner mafsaldan oluşur) kinematik zincirine sahip düzlemsel paralel esnek bağlantılı bir mekanizma tasarımı yapılmıştır. Literatürde çeşitli paralel kinematik zincirli yapılar esnek bağlantılı mekanizma tasarımında kullanılmıştır. Bunlardan en çok yaygın olanlarından biri 3-RRR kinematik zincirli esnek mekanizmalardır [4-5]. Bu mekanizmalarda üçgenel bir platformun köşelerine bağlı üç esnek döner mafsallı eklemlere bağlıdır. Platform x-y ekseninde hareket ederken aynı zamanda z ekseninde dönme hareketi yapmaktadır. Literatürde 3-PRR kinematik zincirli esnek bağlantı elemanlarına sahip bir mekanizma tasarlanmıştır [6]. Ancak mekanizmada prizmatik mafsalsız esnek bağlantılı olmak yerine doğrusal bir eyleyici kullanılarak sağlanmıştır. Bu çalışmada ise prizmatik döner mafsalsız da esnek bağlantılı mafsalsız olarak tasarlanmıştır.

Esnek bağlantılı mekanizmaların konum kontrolleri de yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda kullanılacağından önemlidir. Bu tip mekanizmaların modellenmesi karmaşık olduğundan belirsizlikleri veya doğrusal olmayan davranışları göz ardı edebilen kontrol tekniklerine ihtiyaç duyulmuştur. Literatürde kullanılabilir basitleştirilmiş modeller kullanılarak yapılan kontroller bulunmaktadır [7-9]. Bunun dışında modelleme yerine uyarlanabilir kontrol yöntemleri de kullanılmıştır [10-12]. Bu çalışmada da kullanılabilir bir model kullanılması yerine tasarlanan esnek bağlantılı mekanizmanın deneysel verileri kullanılarak kayan kipli pozisyon kontrolü uygulanmıştır. Ayrıca sistemdeki belirsizlikleri göz ardı edebilmek için de kayan kipli gözlemleyici de eklenmiştir.

Bu çalışma şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2’de esnek bağlantılı mekanizma tasarımı hakkında bilgi verilmiş, tasarlanan 3-PRR esnek mekanizma, kullanılan deney düzeneği tanıtılmış ve mekanizmanın kinematiklerinden bahsedilmiştir, Bölüm 3’te mekanizmaya uygulanan kontrol metodu açıklanmıştır, Bölüm 4’te deney sonuçları sunulmuş ve son olarak Bölüm 5’te çalışma özetlenip çıkarılan sonuçları sunulmuştur.

2. Esnek Bağlantılı Mekanizma

Esnek bağlantılı mekanizma tasarımında esas olan rijit kinematik zincirler seçilip, rijit bağlantı elemanları yerine mekanizmaya gerekli serbestlik derecelerini sağlayan esnek bağlantı elemanlarını tasarlamaktadır. Esnek bağlantılı mekanizmaların tasarımını yaparken sonlu elemanlar analizi yöntemi kullanılmış olup aşağıdaki önemli noktalar göz önünde bulundurulmuştur:

- *Hareket menzili:* Esnek mekanizmaların hareketi kullanılan malzemenin esnekliğine bağlı olduğundan malzemelerin akma dayanımı ile sınırlandırılmıştır. Akma dayanımını geçen gerilmelerde kullanılan esnek bağlantı elemanları plastik şekil değişimine uğrayacağından artık mekanizmanın hareketi tahmin edilemez ve eski performansını gösteremez. Bu yüzden gerekli hareket menziline gerçekleşmesine izin veren esneklikte malzeme seçimi yapılmalıdır.

- *İstenmeyen (Parazitik) hareketler:* Esnek mekanizmalarda mekanizma istenmeyen serbestlik derecelerinde hareket edebilir. Bunun nedenlerinden biri tasarlanan esnek bağlantı elemanının serbestlik derecesinin istenen yönde hareket katmasına rağmen göz ardı edilebilir ya da kontrol yöntemi ile iyileştirilebilir parazitik hareketlere neden olmasıdır. Bir başka nedeni ise tasarlanan mekanizmada serbestlik derecelerinin birbirlerine bağımlı olmasından dolayıdır. Ayrıca bu mekanizmaların imalatında ya da eyleyicilerin montajında yapılan hatalar da istenmeyen hareketlere neden olmaktadır.

- *Eksen dışı rijitlik:* Esnek bağlantı elemanlarını tasarlarken istenmeyen yönlerdeki serbestlik derecelerini engellemek için elemanın esnekliğe izin verdiği eksen dışındaki eksenlerde yeterince katılığı olmalıdır.

- *Gerilme Dağılımı:* Esnek bağlantılı mekanizmalarda gerilme dağılımı mekanizmanın performansını önemli ölçüde etkiler. Çünkü bağlantı elemanlarında oluşan maksimum gerilim miktarı ve dağılımı elemanın sağladığı serbestlik derecesinin miktarını ve doğruluğunu etkilemektedir.

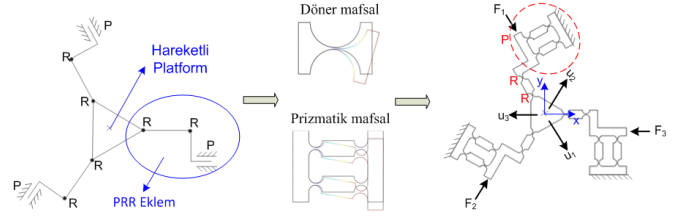
- *Kompaktlık:* Tasarlanacak olan mekanizmanın kompaktlığı da kullanım alanına uyum sağlaması için gerekli boyutlandırılmalarının yapılması önemlidir.

2.1. 3-PRR Esnek Bağlantılı Mekanizma

Tasarlanan düzlemsel esnek bağlantılı mekanizma Şekil 1'de gösterildiği gibi üçgensel hareketli platforma bağlı üç adet biri prizmatik ikisi döner mafsaldan oluşan (3-PRR) eklemlerden oluşmaktadır. Mekanizmadaki esnek prizmatik mafsallar F_1 , F_2 ve F_3 kuvvetleriyle tahrik edilirken üçgensel platformun merkezi sırasıyla Şekil 1'de gösterildiği gibi u_1 , u_2 ve u_3 vektörleri doğrultusunda hareket etmektedir. Mekanizma x-y yönlerinde hareket ederken aynı zamanda z eksenine etrafında dönmektedir. Ancak bu çalışmada mekanizma kontrolü yapılırken kullanılan sensör kısıtından dolayı sadece x-y eksenlerindeki konum kontrolü üzerinde çalışılmıştır.

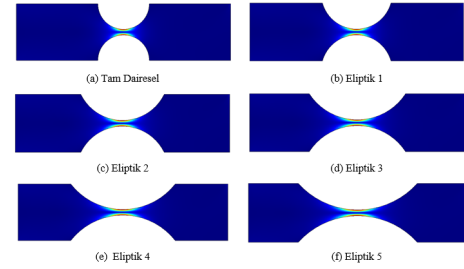
2.2. Esnek Bağlantı Elemanı Seçimi

Rijit kinematik zincirde kullanılmış olan döner mafsallar yerine dairesel esnek bağlantı elemanı (circular flexure) prizmatik mafsala yerine ise basit doğrusal yay mekanizması olarak



Şekil 1: Tasarlanan 3-PRR esnek bağlantılı mekanizma.

adlandırılan döner mafsallardan oluşan 4 kol mekanizması kullanılmıştır. Şekil 2'de gösterilen çeşitli esnek bağlantı eleman şekilleri sonlu elemanlar analizi ile incelenmiştir. Analizi yapılan esnek bağlantı elemanlarının boyun kalınlığı imalat kısıtından dolayı en düşük 0.8 mm olarak alınmıştır. Analizler sonucu bu çalışmada esnek bağlantı elemanı olarak tam dairesel esnek eleman seçilmiştir. Bunun nedeni eliptik bağlantı elemanlarının maksimum gerilimi azaltıp daha fazla esneklik kazandırmasına karşın gerilim yayılı olduğundan elemanın dönme noktası bir doğru üzerinde değişebilmektedir ve parazitik hareketlere izin vermektedir.

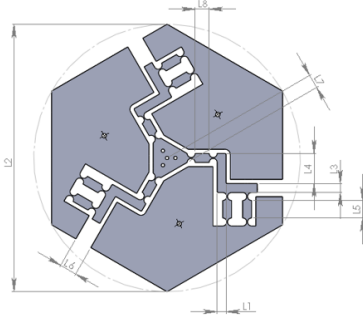


Şekil 2: Esnek bağlantı elemanlarının gerilim dağılımları.

2.3. Mekanizma Boyutları ve Deneysel Düzenek

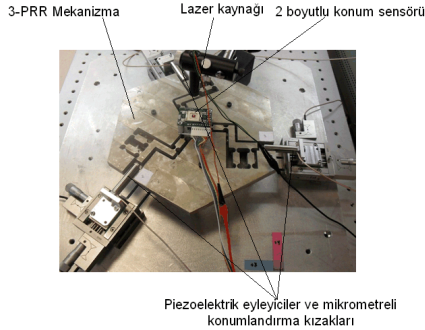
Mekanizmaya deneysel düzeneğine montajını sağlayabilmek için Şekil 3'te gösterilen altıgen bir yapı oluşturulmuştur. Malzeme olarak işleme kolaylığından ve gerekli esnekliği sağladığından dolayı Alüminyum 7075 seçilmiştir. Mekanizmanın boyutları $40 \times 40 \mu\text{m}^2$ 'lik alanda hareket sağlayabilecek şekilde sonlu elemanlar analizi ile belirlenmiş olup boyutlar Tablo 1'de sunulmuştur.

Mekanizma tel elektro erozyon işleme yöntemi ile imal edilmiştir. Şekil 4'de imal edilmiş mekanizma, üç piezoelektrik eyleyici ve mikrometrelili konumlandırma kızakları, lazer kaynağı ve iki boyutta konum ölçen sensörden oluşan deneysel düzeneği görülmektedir. Kullanılmış olan piezoelektrik eyleyiciler (Piezomechanik GmbH PST 150/5/40 VS10) -30 V/150 V (bipolar) ile tahrik edildiğinde maksimum $55 \mu\text{m}$ yer değişimi sağlarken 0 V/150 V (unipolar) ile tahrik edildiklerinde maksimum $40 \mu\text{m}$ yer değişimi sağlamaktadır. Piezoelektrik eyleyicilerin tahriki için gerekli olan 3 kanallı yükseltici (Piezomechanik SVR 150/3) kullanılmıştır. Eyleyicilerin ön yüklemelerinin yapılması ve farklı boyutlardaki es-



Şekil 3: 3-PRR esnek bağlantılı mekanizmanın geometrik parametreleri.

nek mekanizmalara montajını sağlamak için mikrometre platformları (Physik Instrumente P-853) kullanılmıştır. Konum ölçümü için mekanizmanın merkezine 0.06 μm hassaslığında 4x4 mm² aktif alanı olan lazer diyot algısı ile iki boyutta konum ölçebilen sensör (DL 16-7PCBA3) yerleştirilmiştir. Mekanizmanın merkezinde bulunan sensörün de merkezine denk gelecek şekilde bir lazer kaynağı kullanılmıştır. Konum ölçümü için gerekli kalibrasyonlar yapıp 2. dereceden bir Butterworth filtresi tasarlanmıştır. Ayrıca sensör okumalarını, piezoelektrik eyleyici tahrikini ve önerdiğimiz kontrol algoritmalarını C kodlama metodu ile uygulayarak test etmemizi sağlayan dSPACE 1103 kontrol paneli kullanılmıştır.



Şekil 4: İmal edilmiş mekanizma ve deney düzeneği.

Tablo 1: 3-PRR esnek bağlantılı mekanizmanın boyutları

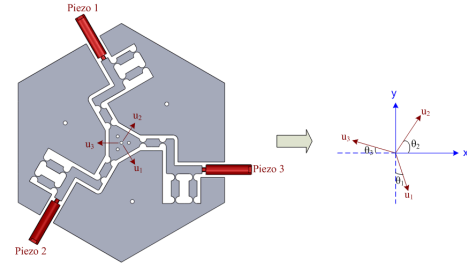
Parametreler	Boyutlar [mm]	Parametreler	Boyutlar [mm]
L ₁	8	L ₆	15.6
L ₂	240	L ₇	25
L ₃	8	L ₈	12.6
L ₄	27	t (kalınlık)	12.6
L ₅	15.6		

2.4. Mekanizmanın Deneysel Kinematığı

3-PRR esnek bağlantılı mekanizmanın deneysel olarak kinematığını bulabilmek için her piezoelektrik eyleyici için sırasıyla 30, 60, 90, 120 ve 150 V verilerek tahrikleri yapılmıştır. Bütün eyleyicilerin mekanizmaya montajı yapılarak ön yüklemeleri yapılmıştır. Mekanizmanın merkezine yerleştirilmiş olan sensörden x-y eksenindeki hareket değişimleri gözlemlenmiştir. Mekanizmanın z eksenini etrafındaki dönme hareketi sensör kısıtından dolayı hesaba katılamamıştır.

Şekil 5'te eyleyicilerin mekanizmaya sağladığı yer değişimini gösteren u_1 , u_2 ve u_3 vektörleri gösterilmektedir. Bu vektörlerin oluşturduğu x-y eksenlerindeki hareket ise denklem (1) de gösterilen A transfer matrisi ile ilişkilendirilebilir. Deneysel sonuçta u vektörlerinin açıları $\theta_1 = 25^\circ$, $\theta_2 = 26^\circ$ ve $\theta_3 = 1.5^\circ$ şeklinde bulunmuştur.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \overbrace{\begin{pmatrix} \sin(\theta_1) & \cos(\theta_2) & -\cos(\theta_3) \\ -\cos(\theta_1) & \sin(\theta_2) & \sin(\theta_3) \end{pmatrix}}^A \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$



Şekil 5: 3-PRR mekanizmaya uygulanan hareket vektörleri.

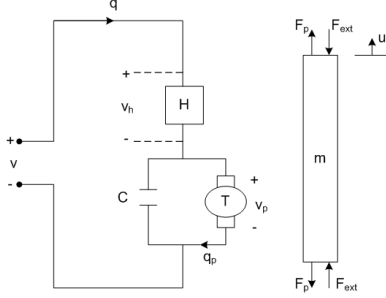
3. Mekanizma Kontrol Metodu

Mekanizmaya uygulanmış olan konum kontrol metodu kayan kipli kontrol (KKK) olarak seçilmiştir. Bunun nedeni kayan kipli kontrol parametre değişkenliklerine karşı hassas değildir. Bunun yanında kayan kipli bozucu etken (BEG) gözlemleyicisi eklenerek sistemde belirlenememiş olan parametrelerin etkisi engellenerek mekanizmanın konum kontrolünün gürbüzlüğü artırılmıştır. 3-PRR paralel mekanizmada motorlara düşen katılık her hareket yönünde (u_1 , u_2 ve u_3) birbirinden bağımsız olduğundan sistem üç ayrı tek giriş tek çıkışlı sistem olarak düşünülmüştür. Öncelikle eyleyici olarak kullanılan piezoelektrik eyleyicilerin modellenmesi gerçekleştirilmiş ardından kayan kip tabanlı bozucu etken gözlemleyicisinin tasarımı yapılmıştır. Son olarak konum kontrolü için kayan kipli kontrol uygulaması gösterilmiştir.

3.1. Piezoelektrik Eyleyici Modellemesi

Piezoelektrik eyleyicilerin çalışma prensibi malzemenin piezo etkisini kullanarak tedarik edilen voltaja göre malzemenin deforme olmasıyla gerçekleşmektedir. Piezoelektrik eyleyicinin elektromekanik modeli Şekil 6'da gösterilmiştir ve (2)-(7) denklemlerindeki gibi tanımlanabilir [12]. Denklemlerdeki v ey-

leyici üzerindeki toplam voltajı gösterirken, v_p piezoelektrik voltajı ve v_h histerezis voltajını göstermektedir. T modelin elektrik ve mekanik tarafını birbirine bağlayan elektromekanik transformasyon oranıdır. q eyleyicideki toplam elektriksel yük iken q_p mekanik hareketten dolayı oluşan piezoelektrik yüküdür. H toplam elektriksel yüke bağlı olan eyleyicinin histerezis fonksiyonu, F_p piezoelektrik etki ile ortaya çıkan kuvvet ve F_{ext} eyleyici üzerindeki harici kuvvettir. Denklem (7) de gösterilen u eyleyicinin yer değişimini gösterip, m_p , c_p ve k_p sırasıyla eyleyicinin eşdeğer kütle, sönüm ve katılık katsayıları olup, F_c kontrol kuvveti ve F_d bozan etken kuvvetleri olarak tanımlanmıştır.



Şekil 6: Piezoelektrik eyleyici modeli.

$$v_p = v - v_h \quad (2)$$

$$v_h = H(q) \quad (3)$$

$$q = Cv_p + q_p \quad (4)$$

$$q_p = Tu \quad (5)$$

$$F_p = Tv_p \quad (6)$$

$$m_p \ddot{u} + c_p \dot{u} + k_p u = \underbrace{Tv}_{F_c} - \underbrace{Tv_h - F_{ext}}_{F_d} \quad (7)$$

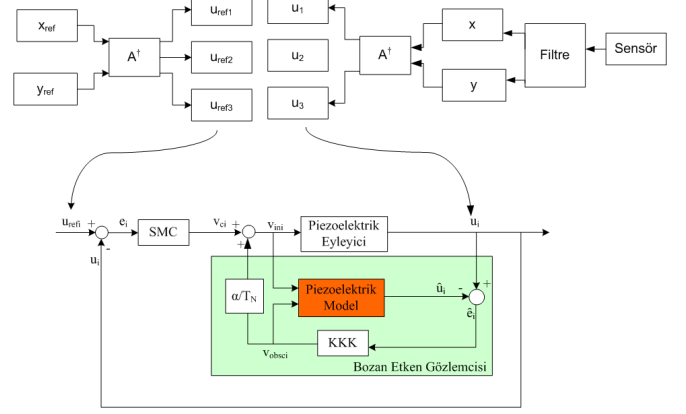
3.2. Bozan Etken Gözlemleyicisi ve Pozisyon Kontrolü

Şekil 7'de 3-PRR esnek bağlantılı mekanizmaya uygulanan kayan kipli bozan etken gözlemcisi ve kayan kipli pozisyon kontrollü kontrol şeması gösterilmiştir.

Mekanizmadaki üçgenel platformun merkezinin konumunun kontrolü için kayan kipli kontrol tabanlı bozan etken gözlemleyicisi ve kayan kipli pozisyon kontrolü kullanılmıştır. Mekanizmanın deneysel kinematığı kullanılarak hesaplanmış olan A matrisinin pseudo tersi kullanılarak her bir piezoelektrik eyleyicinin yer değişimi (u_1 , u_2 ve u_3) mekanizmanın merkezinin konumu (x - y) ile ilişkilendirilmiştir.

$$\begin{bmatrix} u_1 & u_2 & u_3 \end{bmatrix}^T = A^+ \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (8)$$

Kayan kip kontrol tabanlı gözlemleyici ve kayan kipli kontrol ayrıntılı hesaplamaları [13]'deki gibi hesaplanmıştır. Sistemin bozan etkenleri, denklem (7)'de tanımlanmış piezoelektrik eyleyici modeli, piezoelektrik eyleyicinin nominal parametreleri (Tablo 2) ve sistemdeki parametrelerin belirsizlikleri kullanılarak oluşturulan kayan kipli kontrol tabanlı bir gözlemci tasarlanmıştır.



Şekil 7: 3-PRR esnek bağlantılı mekanizmaya uygulanan pozisyon kontrolü ve gözlemcisi.

Tablo 2: Piezoelektrik eyleyicinin nominal parametreleri

Parametreler	Boyutlar
m	$6.6 \times 10^6 [kg]$
c_n	$1027.5 [Ns/m]$
k_n	$12 \times 10^6 [N/m]$
T_n	$4.7388 [N/V]$

i her piezoelektrik eyleyici yönünü belirlemek üzere bozan etken gözlemleyicisinin modeli aşağıdaki gibidir:

$$m_{ni} \ddot{\hat{u}}_i + c_{ni} \dot{\hat{u}}_i + k_{ni} \hat{u}_i = T_{ni} v_{ini} - T_{ni} v_{obsi} \quad (9)$$

\hat{u}_i tahmini konum olup, v_{ini} kontrol çıkış voltajı ve v_{obsi} gözlemleyici kontrol çıkış voltajıdır. Kayan kip kontrollü bozan etken gözlemleyicisinin kayan kip manifoldu σ_{obsi} ve modeli denklem (10) ve (11)'deki gibidir.

$$\sigma_{obsi} = \dot{u}_i - \dot{\hat{u}}_i + C_{obsi}(u_i - \hat{u}_i) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} (\ddot{u}_i - \ddot{\hat{u}}_i) + (C_{obsi} + D_{obsi})(\dot{u}_i - \dot{\hat{u}}_i) + C_{obsi} D_{obsi}(u_i - \hat{u}_i) = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

C_{obsi} ve D_{obsi} gözlemleyici katsayıları olup kayan kipli kontrolün sisteme uygulanmış ayrık formdaki hali ise $v_{obsi(k)}$ aşağıdaki gibidir. Denklem (11)'deki K_{obsi} kontrol parametresi olup dT ayrık zaman kontrolündeki zaman örnekleme sıklığıdır.

$$v_{obsi(k)} = v_{obsi(k-1)} + K_{obsi} \left(D_{obsi} \sigma_{obsi(k)} + \frac{\sigma_{obsi(k)} - \sigma_{obsi(k-1)}}{dT} \right) \quad (12)$$

Aynı şekilde sistemin konum kontrolü için kayan kip manifoldu her u_1 , u_2 ve u_3 yönü için seçilmiştir. Her piezoelektrik eyleyici için ($i=1,2,3$) u_{refi} referans konumu, C_{xi} , D_{xi} ve K_{xi} konum kontrolü parametreleri olup kayan kip kontrollü sistemin manifoldu σ_{xi} denklem (13)'de, modeli denklem (14)'de gösterilmiş ve KKK'nın ayrık hali $v_{xi(k)}$ denklem (15)'deki gibi uygulanmıştır.

$$\sigma_{xi} = \dot{u}_{refi} - \dot{u}_i + C_{xi}(u_{refi} - u_i) \quad (13)$$

$$(\dot{u}_{refi} - \dot{u}_i) + (C_{xi} + D_{xi})(\dot{u}_{refi} - \dot{u}_i) + C_{xi}D_{xi}(u_{refi} - u_i) = 0 \quad (14)$$

$$v_{xi(k)} = v_{xi(k-1)} + K_{xi} \left(D_{xi}\sigma_{xi(k)} + \frac{\sigma_{xi(k)} - \sigma_{xi(k-1)}}{dT} \right) \quad (15)$$

Son olarak gözlemleyici ve konum kontrolünden oluşan eyleyiciye giren kontrol çıkışı denklem (16)'daki gibidir. α_i hesaplanan kontrol voltajını dSPACE kontrolörüne giriş olarak vermek için kullanılan bir katsayıdır.

$$v_{ini} = v_{xi} + \frac{\alpha_i}{Tni} v_{obsi} \quad (16)$$

4. Deneysel Sonuçları

3-PRR esnek bağlantılı mekanizmanın konum kontrolü üç piezoelektrik eyleyicinin konum kontrolleri yapılarak gerçekleştirilmiştir. Mekanizmanın merkez noktasının belirli bir dairesel bir yörüngeyi takip etmesi amaçlanmıştır.

Referans olarak verilen dairesel yörünge $20\mu\text{m}$ çapında olup x-y eksenlerine karşılık gelen referans yörüngeler aşağıdaki gibi belirtilmiştir.

$$x_{ref} = 10 + 10 \sin 0.2\pi t \quad y_{ref} = 10 + 10 \cos 0.2\pi t \quad (17)$$

Mekanizmanın deneysel kinematik analizinde denklem (1) deki gibi oluşturulan **A** transfer matrisinin pseudo tersi alınarak piezoelektrik eyleyicilere karşılık gelen konum referansları (u_{ref1} , u_{ref2} ve u_{ref3}) belirlenmiştir. Öncelikle mekanizmanın açık çevrim kontrolü yapılmış daha sonra PID kontrol yöntemi kullanılarak kapalı çevrim kontrolü yapılmıştır. Son olarak kayan kipli bozan etken gözlemleyicisi ile kayan kipli pozisyon kontrolü uygulanmıştır.

4.1. Açık Çevrim Kontrolü

Mekanizmanın performansını gözlemleyebilmek için öncelikle mekanizmanın açık çevrim kontrolü gerçekleştirilmiştir. Piezoelektrik eyleyicinin nominal modeli kullanılarak gerekli olan voltaj değerleri hesaplanmıştır.

Açık çevrim kontrol için Şekil 8'de gösterilen x yönündeki hatalar $3\mu\text{m}$ ve $8\mu\text{m}$ arası iken Şekil 9'da gösterilen y eksenindeki hatalar $2\mu\text{m}$ ve $-8\mu\text{m}$ 'dur. Sonuçlara göre açık çevrim kontrolü mekanizmanın mikron seviyede hassas konum kontrolünün yapılmasına imkan vermemektedir.

4.2. PID Kontrol

Önerilen kontrol metodu ile karşılaştırmak için mekanizmanın PID kontrolü yapılmıştır. Her piezoelektrik eyleyici için ayrı PID kontrol aşağıdaki denklemlere göre uygulanmıştır ($K_p=0.005$, $K_i=0.0001$, $K_d=0.0001$).

$$v_i(t) = K_p e_i(t) + K_i \int_0^t e_i(t) dt + K_d \frac{de_i(t)}{dt} \quad (18)$$

$$e_i(t) = u_{refi}(t) - u_i(t) \quad (19)$$

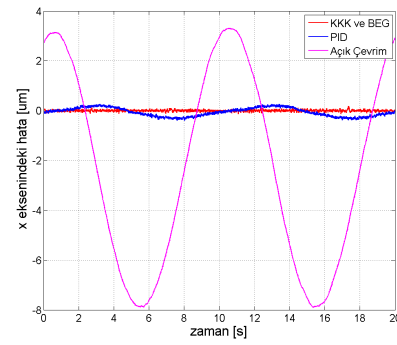
Sonuçlara göre mekanizmanın merkezinin Şekil 8'de gösterilen x eksenindeki hareketinde $0.3\mu\text{m}$ ve $-0.4\mu\text{m}$ arasında hata olurken Şekil 9'da gösterilen y eksenindeki hareketinde $0.1\mu\text{m}$ ve $-0.25\mu\text{m}$ hata bulunmaktadır.

4.3. KK Bozucu Etken Gözlemleyicisi ve KKK

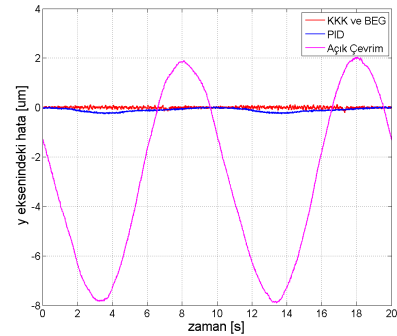
Önerilen kontrol metodu her piezoelektrik motor için Tablo 3'de sunulan kontrol parametreleri kullanılarak uygulanmıştır. Mekanizmanın Şekil 8'de gösterilen x eksenindeki hareketindeki hata $\pm 0.12\mu\text{m}$ iken Şekil 9'da y eksenindeki hata $0.17\mu\text{m}$ ve $-0.13\mu\text{m}$ arasındadır.

Tablo 3: Kayan kipli bozan etken gözlemleyicisi ile Kayan Kipli Pozisyon kontrolün parametreleri.

KK'li BEG		KKK	
K_{obs}	2e-6	K_x	2e-2
C_{obs}	1	C_x	40
D_{obs}	50	D_x	3e3



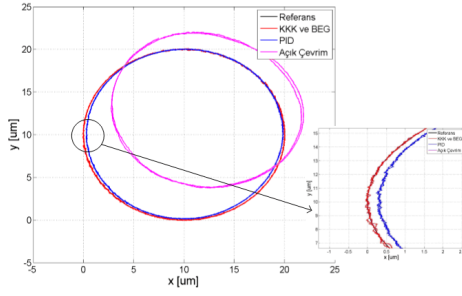
Şekil 8: 3-PRR mekanizmasının KKK ve BEG, PID ve Açık çevrim yöntemleri ile kontrollerinin x eksenindeki hataları.



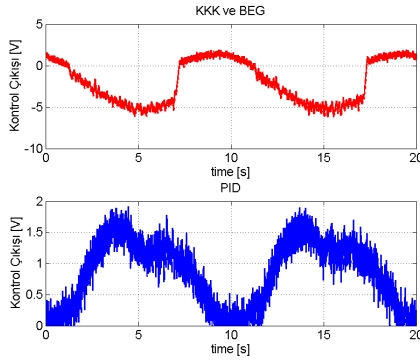
Şekil 9: 3-PRR mekanizmasının KKK ve BEG, PID ve Açık çevrim yöntemleri ile kontrollerinin y eksenindeki hataları

$20\mu\text{m}$ 'lik çapındaki dairesel yörünge referans verilerek gerçekleştirilen kontrollere göre mekanizmanın merkezi noktasının hareketi Şekil 10'da sunulmuştur. Uygulanan kontrollerin referansı takip etmede başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Önerilen kontrolün (KKK ve BEG) PID kontrolü ile karşılaştırılması yapılabilmesi için Şekil 10'da mekanizmanın hareketi büyütülmüştür ve önerilen kontrolün referansı takip etmede x-y eksenlerindeki hatayı azaltarak daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda Şekil 11'de sadece bir

piezoelektrik eyleyici için önerilen kontrol (KKK ve BEG) ile PID kontrolü kontrol sinyali çıkışları gösterilmiştir.



Şekil 10: 3-PRR mekanizmasının verilen referans yörüngeye göre hareketinin KKK ve BEG, PID ve Açık çevrim yöntemleri ile sonuçları.



Şekil 11: Bir piezoelektrik eyleyici için KKK ve BEG ile PID kontrolü sinyal çıkışları.

5. Sonuç

Bu çalışmada tahriki piezoelektrik eyleyicilerle yapılmış yeni bir 3-PRR kinematik zincire sahip esnek bağlantılı bir mekanizmanın tasarımı yapılarak mikro konum kontrollü platform olarak kullanılması için kayan kipli kontrol metodu önerilmiştir. Mekanizmada esnek dairesel bağlantı elemanları 4 kol mekanizmasında kullanılarak esnek bir prizmatik mafsallı tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan prizmatik mafsallar aktif olarak kullanılarak piezoelektrik eyleyiciler ile tahriki yapılmıştır.

Kullanılan kinematik yapı piezoelektrik eyleyiciler üzerindeki katılığı birbirinden ayırmakta olduğundan mekanizmanın merkezinin x-y eksenlerindeki referans konumları bir transfer matrisi kullanılarak 3 piezoelektrik eyleyicinin referans yer değişimlerine dönüştürülmüştür. Daha sonra da hesaplanan referans yer değişimlerine göre kayan kipli bozan etken gözlemleyicisi ile kayan kipli konum kontrolü kullanılarak piezoelektrik eyleyicilerin kontrolleri yapılarak mekanizmanın merkezinin istenen referans yörüngeyi izlenmesi sağlanmıştır.

Deneyler öncelikle mekanizmanın açık çevrim kontrolü ile başlanmıştır. Kullanılan eyleyici modeli kullanılarak mekanizmanın kontrolünün yapılamayacağı anlaşılmıştır. Daha sonra

önerilen kontrolün performansını karşılaştırmak için eyleyiciler PID kontrol ile kontrol edilmiştir. Deney sonuçlarına göre önerilen kontrol yöntemi x ve y eksenindeki hataları PID yöntemine göre düşürdüğü görülmüştür.

6. Kaynakça

- [1] A. H. Slocum, *Precision Machine Design*, New Jersey, USA: Prentice Hall, 1992.
- [2] D. G. Chetwynd, S. T. Smith, *Foundations of Ultra-precision Mechanism Design*, North Carolina, USA: CRC Press, 1994.
- [3] N. Lobontiu, *Compliant Mechanisms: Design of Flexure Hinges*, CRC Press, 2003.
- [4] B. Shirinzadeh, D. Zhang Y. Tian, "Design and dynamics of a 3-DOF flexure-based parallel mechanism for micro/nano manipulation," *Microelectronic Engineering*, vol. 87, no. 2, pp. 230-241, Feb. 2010.
- [5] D. C. Handley, Y. K. Yong, C. Eales, T.F. Lu, "A three-DOF compliant micromotion stage with flexure hinges," *Industrial Robot: An International Journal*, vol. 31, no. 4, pp. 355-361, 2004.
- [6] X. Zhang, J. K. Mills, W. L. Cleghorn, "Dynamic Modeling and Experimental Validation of a 3-PRR Parallel Manipulator with Flexible Intermediate Links", *Journal of Intelligent Robotic Systems*, vol. 50, no. 4, pp. 323-340, 2007.
- [7] L. L. Howell, A. Midha, "A loop closure theory for the analysis and synthesis of compliant mechanisms", *Journal of Mechanical Design*, Vol. 118, pp: 121-5 (1996).
- [8] W. J. Zhang, J. Zou, G. Watson, W. Zhao, G. Zong, S. Bi, "Constant-Jacobian method for kinematics of a 3-DOF planar micro-motion stage", *Journal of Robotic Systems*, Vol. 19, No 2, pp. 63-79, 2002.
- [9] K. Fite, M. Goldfarb, "Position control of a compliant mechanism based micromanipulator," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.2122-2127 vol.3, 1999.
- [10] H. C. Liaw, B. Shirinzadeh, J. Smith, "Robust motion tracking control of piezo-driven flexure-based four-bar mechanism for micro/nano manipulation", *Mechatronics*, vol. 18, no.2 pp. 111-120, Marc 2008.
- [11] S. H. Chang, C. K. Tseng, H. C. Chien, "An ultra-precision XYTheta piezo-micropositioner. Part II. Experiment and performance", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, pp. 906-912, 1999.
- [12] N. Celanovic, M. Goldfarb, "Modeling Piezoelectric Stack Actuators for Control of Micromanipulation", *IEEE Control Systems*, vol. 17, no. 3, pp. 69-79, June 1997.
- [13] M. Acer, A. Şabanoviç, "Motion Control of Redundant Flexure Based Mechanism Using Piezoelectric Actuators", *Automatika- Journal of Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, vol. 54, no. 1, pp. 114-125, 2013.