

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KONJUGE TİP İYONİK POLİMER BİR EYLEYİCİNİN KONUM VE KUVVET  
KONTROLÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makina Mühendisi Caner SANCAK**

**HAZİRAN 2016  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**KONJUGE TİP İYONİK POLİMER BİR EYLEYİCİNİN KONUM VE KUVVET  
KONTROLÜ**

**Caner SANCAK**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**

**"MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ"**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 02 / 05 / 2016**

**Tezin Savunma Tarihi : 02 / 06 / 2016**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mehmet İTİK**

**Trabzon 2016**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalında  
Caner SANCAK Tarafından Hazırlanan**

**KONJUGE TİP İYONİK POLİMER BİR EYLEYİCİNİN KONUM VE KUVVET  
KONTROLÜ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 10 / 05 / 2016 gün ve 1652 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
olarak kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Muzaffer DOĞAN** .....

**Üye : Doç. Dr. Mehmet İTİK** .....

**Üye : Yrd. Doç. Dr. Youde HAN** .....

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**  
**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Polimer eyleyiciler sahip oldukları özellikleri nedeniyle eyleyici teknolojisinde gelecek vadeden elemanlardır. Özellikle elektro-aktif polimer eyleyiciler doğal kaslar ile benzer çalışma mekanizmasına sahip olmaları nedeniyle bilim dünyasının dikkatini çekmektedirler. Elektro-aktif polimerlerin iyonik bir türü olan konjuge tip polimer eyleyiciler ise düşük aktivasyon gerilimleri ve mikro ölçekte üretilebilme gibi avantajları ile bilinmektedirler. Uygulamalarda bu avantajların etkin bir şekilde kullanılabilmesi için polimer eyleyicinin gürbüz kontrolü önemli bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapılan bu tezde, konjuge tip polimer bir eyleyicinin kuvvet ve mikro ölçekte konum kontrolü farklı kontrol yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve kontrol yöntemleri ile elde edilen performanslar irdelenmiştir.

Öncelikle, çalışmalarım boyunca desteğini benden esirgemeyip değerli yardım ve katkılarıyla bana yol gösteren ve cesaretlendiren danışman hocam Doç. Dr. Mehmet İTİK'e teşekkürlerimi sunarım.

Deney düzeneğinin kurulması ve deneylerin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşım Arş. Gör. Mustafa Y. COŞKUN'a teşekkür ederim.

Ayrıca, anneme ve üzerimde emeği olan bütün aile bireylerime teşekkürü borç bilirim.

Caner SANCAK

Trabzon 2016

## **TEZ ETİK BEYANNAMESİ**

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Konjuge Tip İyonik Polimer Bir Eyleyicinin Konum ve Kuvvet Kontrolü” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Mehmet İTİK’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 02/06/2016

Caner SANCAK

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Elektro-aktif Polimer (EAP) Eyleyiciler.....	3
1.2.1. İyonik EAP Eyleyiciler.....	7
1.2.1.1. Polimer Jeller.....	7
1.2.1.2. Karbon Nanotüpler (KN).....	8
1.2.1.3. İyonik Polimer Metal Kompozit (İPMK) Eyleyiciler.....	9
1.2.1.3.1. İyonik Polimer Metal Kompozitler (İPMK) Uygulama Alanları.....	10
1.2.1.4. Konjuge Elektro-aktif Polimer (KEP) Eyleyiciler.....	11
1.2.1.4.1. Üç Katmanlı Konjuge EAP Eyleyici.....	14
1.2.1.4.2. Üç Katmanlı KEP Eyleyici Üretimi.....	15
1.2.1.4.3. KEP Eyleyicilerin Modellenmesi.....	17
1.2.1.4.4. KEP Eyleyici Uygulama Alanları.....	19
1.2.1.4.5. KEP Eyleyici Kontrolü.....	20
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	22
2.1. Konjuge EAP Eyleyicinin Modellenmesi.....	22
2.1.1. Siyah Kutu Modelleme Yöntemi.....	22
2.1.1.1. ARX Modeli.....	23
2.2. Kontrol Yöntemleri.....	24
2.2.1. PID Kontrolcü.....	24

2.2.2.	Tekrarlamalı Kontrol (Repetitive Control) Yöntemi.....	25
2.2.3.	Kayan Kipli Kontrol (KKK).....	30
2.2.3.1.	Kayan Kipli Gözlemci Tasarımı.....	34
2.2.3.1.1.	Utkin Gözlemcisi.....	34
2.2.3.2.	KKK ile Referans Yörünge İzleme Kontrolü.....	37
2.2.3.3.	Model Dayanaklı KKK.....	39
2.3.	Deney Düzeneği .....	42
2.3.1.	Yer Değiştirme Kontrolü İçin Deney Düzeneği .....	42
2.3.2.	Kuvvet Kontrolü İçin Deney Düzeneği .....	43
2.4.	KEP Eyleyicinin Kuvvet ve Yer Değiştirme Modellerinin Elde Edilmesi .....	44
2.4.1.	Üç Katmanlı KEP Eyleyici Siyah Kutu Modellemesi.....	44
2.4.1.1.	KEP Eyleyici Kuvvet Modellemesi.....	45
2.4.1.2.	KEP Eyleyici Yer Değiştirme Modellemesi.....	47
2.5.	KEP Eyleyiciler İçin Kontrolcü Parametrelerinin Belirlenmesi .....	50
2.5.1.	PID Kontrolcü Parametrelerinin Belirlenmesi .....	50
2.5.2.	Tekrarlamalı Kontrolcü Tasarımı .....	50
2.5.2.1.	Kuvvet Kontrolü İçin Tekrarlamalı Kontrolcü Tasarımı.....	50
2.5.2.1.1.	B(j $\omega$ ) Filtresi Tasarımı.....	50
2.5.2.1.2.	Q(j $\omega$ ) Filtresi Tasarımı .....	51
2.5.2.2.	Yer Değiştirme Kontrolü İçin Tekrarlamalı Kontrolcü Tasarımı.....	53
2.5.3.	KKK Tasarımı .....	54
2.5.3.1.	Yer Değiştirme Referans İzleme Kontrolü İçin KKK Tasarımı.....	54
2.5.3.2.	Yer Değiştirme Kontrolü İçin Model Dayanaklı KKK Tasarımı .....	55
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	58
3.1.	Kuvvet Kontrolü.....	58
3.1.1.	PID Kontrolcü ile Kuvvet Kontrolü .....	58
3.1.2.	Tekrarlamalı Kontrolcü ile Kuvvet Kontrolü .....	59

3.1.2.1.	Basit Tekrarlamalı Kontrolcü ile Kuvvet Kontrolü.....	59
3.1.2.2.	Geliştirilmiş Tekrarlamalı Kontrolcü ile Kuvvet Kontrolü .....	60
3.2.	Yer Değiştirme Kontrolü .....	63
3.2.1.	PID Kontrolcü ile Yer Değiştirme Kontrolü .....	63
3.2.2.	Tekrarlamalı Kontrolcü ile Yer Değiştirme Kontrolü .....	64
3.2.2.1.	Basit Tekrarlamalı Kontrolcü ile Yer Değiştirme Kontrolü.....	64
3.2.2.2.	Geliştirilmiş Tekrarlamalı Kontrolcü ile Yer Değiştirme Kontrolü .....	65
3.2.3.	KKK ile Yer Değiştirme Kontrolü .....	68
3.2.3.1.	Referans İzleme Kontrolü.....	68
3.2.3.2.	Model Dayanaklı KKK ile Yer Değiştirme Kontrolü .....	72
3.2.4.	Kontrolcülerin Karşılaştırılması .....	74
3.3.	Üç Katmanlı KEP Eyleyici İçin Mikro Tutucu Uygulaması.....	76
4.	SONUÇLAR.....	81
5.	ÖNERİLER .....	84
6.	KAYNAKLAR.....	85

## ÖZGEÇMİŞ



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

KONJUGE TİP İYONİK POLİMER BİR EYLEYİCİNİN KONUM VE KUVVET  
KONTROLÜ

Caner SANCAK

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Mehmet İTİK  
2016, 91 Sayfa

Konjuge polimer eyleyiciler sahip oldukları; düşük elektriksel gerilim altında çalışabilme, biyo-uyumluluk ve mikro ölçekte üretilebilme gibi özellikleri ile mikro ölçekli uygulamalarda kullanılmaları için önemli bir potansiyele sahiptirler. Genellikle üç katmanlı olarak üretilen konjuge polimer eyleyicilerin karmaşık yapısı elektromekanik davranışlarının modellenmesini güçleştirmektedir. Ayrıca bu eyleyiciler kuru ortamda çalıştıklarında eyleyici yapısında bulunan iyonik sıvı buharlaşması kaynaklı olarak dinamik davranışlarında büyük değişimler göstermektedirler. Bu durum eyleyicilerin hassas kuvvet ve konum kontrolünü zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada, konjuge tip iyonik polimer bir eyleyicinin mikro ölçekte konum kontrolünde, periyodik referans sinyallerinin takibi için iyi sonuçlar veren tekrarlamalı kontrol yöntemi ve bunun yanında modelleme hataları ve model bozulmaları karşısında iyi sonuçlar veren kayan kipli kontrol yöntemi kullanılmıştır. Eyleyicinin kuvvet kontrolü ise tekrarlamalı kontrol yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Eyleyicilerin genellikle periyodik sinyaller altında çalıştığı göz önüne alınarak bu çalışmada periyodik referans sinyallerinin takip kontrolü yapılmıştır. Ek olarak, tekrarlamalı kontrol sistemi yapısında PI kontrolcü kullanıldığından eyleyici için PI kontrol performansları da belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Konjuge elektro-aktif polimer eyleyici, Tekrarlamalı kontrol, Kayan kipli kontrol, Mikro uygulama

Master Thesis

SUMMARY

POSITION AND FORCE CONTROL OF A CONJUGATED ELECTRO-ACTIVE  
POLYMER ACTUATOR

Caner SANCAK

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Mechanical Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet İtik  
2016, 91 Pages

Conjugated electroactive polymer actuators have unique properties such as, low actuation voltage, biocompatibility and actuating in micro scale, which brings them an important potential to use in micro scale applications. The complex structure of these actuators which are generally manufactured as three layered make it difficult to model their electromechanical behavior. Also, these actuators exhibit significant dynamic behavior changes due to ionic liquid evaporation when working in dry environment. This makes it difficult to control the force and position of these actuators precisely. In this study, repetitive and sliding mode control methodology are used to enhance blocking force and positioning ability of conjugated polymer actuators. In addition to these controllers, PI controller is used in repetitive controller system as a stabilizer controller. By taking into consideration that the actuators generally work under periodic signals, periodic reference signals are used to specify tracking performance of controllers.

**Key Words:** Conjugated electroactive polymer actuators, Repetitive control, Sliding mode control, Micro application

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.1. Tek katmanlı doğrusal KEP eyleyici yapısı .....	13
Şekil 1.2. İki katmanlı KEP eyleyici yapısı.....	13
Şekil 1.3. Üç katmanlı KEP eyleyici yapısı.....	15
Şekil 1.4. Kullanılan üç katmanlı KEP eyleyici yapısı.....	16
Şekil 1.5. Üç katmanlı KEP eyleyici içyapısı.....	16
Şekil 1.6. KEP Eyleyicinin elektrik gerilimi altında hareketi .....	17
Şekil 1.7. KEP Eyleyicinin bir gösterimi .....	17
Şekil 2.1. Siyah kutu modelleme yöntemi şematik gösterimi .....	22
Şekil 2.2. Giriş-çıkış büyüklükleri arasındaki temel ilişki .....	23
Şekil 2.3. PID kontrol sistemi şematik gösterimi.....	24
Şekil 2.4. Periyodik sinyal üretici .....	25
Şekil 2.5. Tipik bir tekrarlamalı kontrolcü yapısı.....	26
Şekil 2.6. Alçak geçiren filtrelerle geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcü yapısı .....	27
Şekil 2.7. İkinci dereceden bir sistem için doğrusal kayma yüzeyi.....	30
Şekil 2.8. Yer değiştirme kontrolü deney düzeneği şematik gösterimi .....	42
Şekil 2.9. Kuvvet kontrolü deney düzeneğinin şematik gösterimi .....	43
Şekil 2.10. Kuvvet deneylerinde kullanılan eyleyicinin şematik gösterimi .....	45
Şekil 2.11. Eyleyiciye uygulanan voltaj girdisi ve bu girdiye karşılık eyleyicinin kuvvet cevabı.....	45
Şekil 2.12. Eyleyicinin deneysel frekans cevabı ile elde edilen modelin frekans cevabının karşılaştırılması .....	46
Şekil 2.13. Eyleyici modelinin basamak cevabının deneysel veri ile karşılaştırılması .....	47
Şekil 2.14. Yer değiştirme deneylerinde kullanılan eyleyicinin şematik gösterimi .....	47
Şekil 2.15. Eyleyiciye uygulanan voltaj girdisi ve bu girdiye karşılık eyleyicinin yer değiştirme cevabı .....	48
Şekil 2.16. Eyleyicinin deneysel frekans cevabı ile elde edilen yer değiştirme modelinin frekans cevabının karşılaştırılması. ....	49
Şekil 2.17. Eyleyici modelinin sinüzoidal girdiye cevabının deneysel veri ile karşılaştırılması.....	49
Şekil 2.18. Kuvvet kontrolü için hassasiyet fonksiyonu $S_o(j\omega)$ ve $Q(j\omega)$ filtresi genlik grafiği.....	51

Şekil 2.19. Kuvvet kontrolü için Rejenerasyon spektrumu .....	52
Şekil 2.20. Yer değiştirme kontrolü için Hassasiyet fonksiyonu $S_o(j\omega)$ ve $Q(j\omega)$ filtresi genlik grafiği.....	53
Şekil 2.21. Yer değiştirme kontrolü için Rejenerasyon spektrumu.....	54
Şekil 3.1. Kuvvet kontrolü için PI kontrolcü ile takip cevabı .....	59
Şekil 3.2. Kuvvet kontrolü için basit tekrarlamalı kontrolcü ile takip cevabı.....	60
Şekil 3.3. Kuvvet kontrolü için geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcü ile takip cevabı .....	61
Şekil 3.4. Geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolde eyleyiciye uygulanan kontrol voltajı .....	61
Şekil 3.5. Kuvvet kontrolü için geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcü ile üçgen sinyal takip cevabı.....	62
Şekil 3.6. Geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolde üçgen referans sinyali takibi için eyleyiciye uygulanan kontrol voltajı .....	62
Şekil 3.7. Yer değiştirme kontrolü için PI kontrolcü ile takip cevabı .....	63
Şekil 3.8. Yer değiştirme kontrolü için basit tekrarlamalı kontrolcü ile takip cevabı.....	64
Şekil 3.9. Yer değiştirme kontrolü için basit tekrarlamalı kontrolde eyleyiciye uygulanan kontrol voltajı.....	65
Şekil 3.10. Yer değiştirme kontrolü için geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcü ile takip cevabı.....	66
Şekil 3.11. Yer değiştirme kontrolü için geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolde eyleyiciye uygulanan kontrol voltajı.....	66
Şekil 3.12. Yer değiştirme kontrolü için geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcü ile üçgen referans sinyali takip cevabı .....	67
Şekil 3.13. Yer değiştirme kontrolü için geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolde üçgen takip referansı için eyleyiciye uygulanan kontrol voltajı .....	67
Şekil 3.14. $\hat{\sigma}_1 = -\rho \operatorname{sgn}(\sigma)$ erişim kuralı ile 0,1 Hz sinüs referans sinyali takip cevabı.....	68
Şekil 3.15. $\hat{\sigma}_1 = -\rho \operatorname{sgn}(\sigma)$ erişim kuralı ile 0,1 Hz sinüs referans sinyali takibi için eyleyiciye uygulanan kontrol voltajı .....	69
Şekil 3.16. $\hat{\sigma}_1 = -\rho \operatorname{sgn}(\sigma)$ erişim kuralı ile 0,05 Hz sinüs referans sinyali takip cevabı.....	69
Şekil 3.17. $\hat{\sigma}_1 = -\rho \operatorname{sgn}(\sigma)$ erişim kuralı ile 0,05 Hz sinüs referans sinyali takibi için eyleyiciye uygulanan kontrol voltajı .....	70
Şekil 3.18. $\hat{\sigma}_2 = -\delta\sigma$ erişim kuralı ile 0,1 Hz sinüs referans sinyali takip cevabı.....	70
Şekil 3.19. $\hat{\sigma}_2 = -\delta\sigma$ erişim kuralı ile 0,1 Hz sinüs referans sinyali takibi için eyleyiciye uygulanan kontrol voltajı .....	71
Şekil 3.20. $\hat{\sigma}_2 = -\delta\sigma$ erişim kuralı ile 0,05 Hz sinüs referans sinyali takip cevabı.....	71
Şekil 3.21. $\hat{\sigma}_2 = -\delta\sigma$ erişim kuralı ile 0,05 Hz sinüs referans sinyali takibi için eyleyiciye uygulanan kontrol voltajı .....	72

Şekil 3.22. İdeal model durumları ve gözlemci ile tahmin edilen durumlar .....	73
Şekil 3.23. Model dayanaklı KKK ile referans takip cevabı .....	73
Şekil 3.24. Model dayanaklı KKK ile referans takibi için eyleyiciye uygulanan kontrol voltajı .....	74
Şekil 3.25. Tutucu mekanizmanın şematik gösterimi.....	77
Şekil 3.26. Tutucunun pasif (a) ve aktif (b) durumları .....	77
Şekil 3.27. Sadece birinci eyleyiciye basamak girdi voltajı uygulanması durumunda tutucu mekanizma ile elde edilen yer değiştirme .....	78
Şekil 3.28. Sadece ikinci eyleyiciye basamak girdi voltajı uygulanması durumunda tutucu mekanizma ile elde edilen yer değiştirme .....	78
Şekil 3.29. İki eyleyiciye aynı anda farklı basamak girdi voltajları uygulanması durumunda tutucu mekanizma ile elde edilen yer değiştirme .....	79
Şekil 3.30. İki eyleyiciye aynı anda sinüzoidal girdi voltajı uygulanması durumunda tutucu mekanizma ile elde edilen yer değiştirme .....	80

## TABLULAR DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1. EAP Malzemelerin sınıflandırılması.....	4
Tablo 2. EAP malzemelerin karşılaştırılması (Bar-Cohen, 2004).....	5
Tablo 3. Eyleyicinin kuvvet kontrolünde kullanılan kontrol yöntemlerinin kalıcı durum RMS hataları.....	75
Tablo 4. Eyleyicinin yer değiştirme kontrolünde kullanılan kontrol yöntemlerinin kalıcı durum RMS hataları. ....	75



## SEMBOLLER DİZİNİ

ARX	: Auto regressive with exogenous input
EAP	: Elektro-aktif polimer
EKKY	: En küçük kareler yöntemi
İPMK	: İyonik polimer metal kompozit
KEP	: Konjuge elektroaktif polimer
KN	: Karbon nanotüp
Li <sup>+</sup> TFSI	: Lithium triflouromethanesulfonimide
PAN	: Poliakrilanitril
PANI	: Polianilin
PC	: Propylene carbonate
PPy	: Polipirol
PVDF	: Polyvinylidene fluoride
RMS	: Root mean square
TCP/IP	: Transmission Control Protocol / Internet Prothocol
$\ \cdot\ _{\infty}$	: $H_{\infty}$ normu
$\hat{x}$	: Tahmini durum değişkeni
$\omega_q$	: Kesme frekansı
$e$	: Hata
$\zeta$	: Sönüm faktörü
$\lambda, \eta, M, \rho, \delta$	: Sabit pozitif bir sayı
$A$	: Sistem matrisi
$B$	: Kontrol matrisi
$G(s)$	: Transfer fonksitonu
$I$	: Birim matris
$L$	: Gözlemci kazanç matrisi
$Q(j\omega), B(j\omega)$	: Alçak geçiren filtre
$R(\omega)$	: Rejenerasyon spektrumu
$S$	: Kayma yüzeyi eğim matrisi
$So(j\omega)$	: Hassasiyet fonksiyonu

$T$	: Dönüşüm matrisi
$g(t)$	: Filtrelenmiş gürültü
$m$	: Girdi değişkeni sayısı
$na$	: Model kutup sayısı
$nb$	: Model sıfırları sayısı
$nk$	: Zaman gecikmesi
$P$	: Gecikme operatörü
$r(t)$	: Referans girdi
$sgn(\cdot)$	: İşaret fonksiyonu
$u(t)$	: Kontrol girişi
$w$	: İdeal model durum değişkeni
$x$	: Durum değişkeni
$y(t)$	: Çıktı değişkeni
$z$	: Dönüştürülmüş durum değişkeni
$v$	: Süreksiz vektör
$\sigma$	: Anahtarlama (switching) fonksiyonu
$\tau$	: Zaman kazancı
$\omega$	: Frekans



## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Eyleyiciler tanım olarak; herhangi bir enerji türünü mekanik enerjiye çeviren elemanlardır. Bir sistemin hareketini sağlamalarının yanı sıra sistemin denetimini sağlamak için de kullanılırlar. Mühendislik açısından bakıldığında performans, verimlilik ve kullanılacağı uygulamaya uygunluk gibi yönlerden incelenmektedirler ve genellikle bu ölçütlerin yüksek seviyede sağlanması istenmektedir. Teknolojinin ilerlemesi, eyleyiciler için yeni uygulama alanları oluşmasının yanı sıra mevcut eyleyicilerin yeni uygulamalar için yetersiz kalması veya kullanılamaması, yeni eyleyicilerin geliştirilmesi için neden olmuştur.

Doğal bir sistemin taklit edilmesi, kullandığımız veya kullanabileceğimiz sistemleri geliştirmek açısından önemli bir potansiyel içermektedir. Örneğin doğal bir kasın yüksek verimliliği ve performansı düşünüldüğünde, taklit bir sistemin de yüksek performans değerlerine ulaşması beklenmektedir. Eyleyici geliştirilmesi süreci de bu durumdan etkilenmiştir. Doğal bir sistemin taklidi olan eyleyicinin diğer eyleyici türlerine göre birçok önemli avantajı olacaktır. Bu kapsam doğrultusunda akıllı bir malzeme olan Elektro-aktif Polimerlerin (EAP) eyleyici olarak kullanımı araştırma konusu olmuştur. EAP eyleyiciler, çalışma prensibi bakımından doğal kaslar ile benzer özellik göstermektedirler. İletken veya yalıtkan polimerlerin ve harekete geçirme için gerekli ek bazı malzemelerin bir araya getirilmesi ile oluşturulan EAP eyleyiciler, elektrik gerilimine veya akımına maruz kaldıklarında doğal kaslardaki kasılma ve gevşeme hareketine benzer hareket gerçekleştirdiklerinden yapay kas olarak da adlandırılmaktadırlar. EAP eyleyicilerin istenilen şekle kolayca getirilebilmeleri, düşük maliyetleri ve esneyebilme kabiliyetleri gibi birçok ayırıcı özelliği barındırmaları, klasik eyleyicilerin kullanılmadığı birçok uygulamada kullanılmalarına olanak tanımaktadır. EAP eyleyiciler üzerinde yapılan ilk çalışmalar, çalışma mekanizmalarının anlaşılması ve bu eyleyicilerin matematiksel olarak modellenmesi üzerine olmuştur. Doğaları gereği doğrusal olmayan bir davranış gösteren bu eyleyicilerin doğrusal olmayan modellerinin de elde edilmesine karşın, modelleme üzerine yapılan çalışmaların çoğu, eyleyicinin belirli bir kısıt altında doğrusal olduğu kabul edilerek doğrusal modellerinin türetilmesi üzerine yapılmıştır. Matematiksel modellerin elde

edilmesiyle beraber bu eyleyiciler için kontrol uygulamalarının önü açılmıştır. Birçok araştırmacı, çeşitli kontrol yöntemlerini EAP eyleyicilerin kontrolünde tatbik etmiş, yeni uygulama alanlarında kullanım potansiyelini ve performansını incelemişlerdir. Ayrıca, matematiksel model gerektirmeyen bulanık mantık ve yapay sinir ağları tabanlı kontrol yöntemleri gibi kontrolcüler de EAP eyleyicilerin kontrolünde kullanılmıştır.

Bu tez kapsamında, EAP eyleyicilerin bir türü olan iyonik EAP eyleyicilerin uygulama alanları ve kontrolü incelenmiş ve bir konjuge EAP eyleyicinin kontrol uygulamaları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Kontrol kapsamında, bir ucu ankastre bir ucu serbest şerit şeklinde eyleyicinin serbest ucunun elektrik gerilimi altında uyguladığı kuvvet ve gösterdiği mikro seviyede yer değiştirme ile ilişkili olan matematiksel modelleri elde edilmiş ve bu modellerden faydalanarak oluşturulan farklı kontrol yöntemleri için eyleyicinin performansı incelenmiştir. Ayrıca, eyleyici için bir mikro tutucu mekanizması tasarlanmış ve elektrik gerilimi altında mikro konumlama yeteneği belirlenmiştir.

Bu çalışmanın bölümleri aşağıda kısaca özetlenmiştir. “GENEL BİLGİLER” ana başlığı altındaki bu bölümde, EAP eyleyiciler ile ilgili ön bilgiler ve bu tez çalışmasının temel hedefleri hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca iyonik EAP eyleyicilerin literatürde mevcut olan kontrol uygulamalarından bazılarına değinilmiştir. “YAPILAN ÇALIŞMALAR” ana başlığı altındaki Bölüm 2 ‘de, tez çalışmasında kullanılan konjuge EAP eyleyicinin modellenmesi ve kontrol edilmesi sırasında kullanılan yöntemlerden bahsedilmiştir. Eyleyicinin modellenmesi siyah kutu modelleme yöntemi ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen modeller sunulmuştur. Eyleyicinin kapalı çevrim kontrolünde periyodik referans sinyali takip performansını incelemek için klasik PID kontrol yöntemi, tekrarlamalı kontrol yöntemi ve kayan kipli kontrol yöntemi eyleyiciye uygulanmıştır. “BULGULAR ve İRDELEME” ana başlığı altındaki Bölüm 3’de, kontrol yöntemlerinden elde edilen sonuçlar verilmiş ve yorumlanmıştır. “SONUÇLAR” ana başlığı altındaki Bölüm 4’te, elde edilen sonuçlar hakkında bilgiler verilmiş ve sonuçlar arasında genel karşılaştırmalar yapılmıştır. “ÖNERİLER” ana başlığı altındaki Bölüm 5’de ise, yapılan tez çalışmasıyla ilgili gelecekte yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmiştir. “KAYNAKLAR” ana başlığı altındaki Bölüm 6’da, tez çalışması boyunca yararlanılan kaynaklar verilmiştir.

## 1.2. Elektro-aktif Polimer (EAP) Eyleyiciler

Polimerlerin elektriksel, kimyasal, optik, termal ve manyetik yollar ile tahrik edilebildiği uzun yıllardır bilinmektedir. Bu tahrik yöntemleri arasında, polimerler üzerinde elastik şekil değiştirme kabiliyeti olan elektriksel tahrik, en çok ilgi gören konulardan biridir. Uzun yıllardır zayıf hareket edebilme kabiliyetleri ve var olan türlerinin azlığı, bu malzemeler üzerine olan ilginin azlığına neden olmuştur. Son 30 yılda ise bu malzemelerin elektrik tahriki ile büyük yer değiştirme kabiliyetleri göstermesi üzerine meydana gelen geliştirmeler ve elektriksel tahrikin diğer yöntemlere göre daha kolay uygulanması EAP malzemelere olan ilgiyi artırmıştır (Bar-Cohen, 2004). EAP malzemelerin üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda üretim yöntemlerinin geliştirilerek daha yüksek performans gösterebilen EAP'ler üretilmiştir. Kimyasal yollarla yapılan geliştirmelerin iyi sonuçlar vermesi ve iki veya daha fazla malzemenin bir araya getirilmesi ile üretilen kompozit EAP'lerle birçok malzemenin farklı özelliklerinden faydalanılabilmesi bu alan ile ilgili araştırmaların çoğalmasına neden olmuştur.

Bu malzemelerin düşük ağırlıkları, kırılmaya karşı yüksek toleransları ve esneyebilme kabiliyetleri gibi cazip karakteristik özellikleri birçok uygulamada kullanılabilme potansiyeli oluşturmaktadır. Ayrıca, neredeyse istenilen her şekle getirilebilmekte ve özellikleri kullanılacağı uygulamaya uygun olarak geniş bir çerçevede değiştirilebilmektedir. Bu durum yeni uygulama alanları içinde EAP malzemelerin kullanılma potansiyelini artırmaktadır. Özellikle bu malzemelerin doğal kas gibi yapıların taklidi olarak kullanılabilmesi bilim dünyasının dikkatini önemli ölçüde çekmektedir (Bar-Cohen, 2004).

EAP'ler, elektrik tahriki ile birlikte şekline veya boyutunda büyük değişimler gösteren polimer malzemelerdir. Bu malzemeler çalışma prensiplerine göre iyonik veya elektronik EAP olarak iki ana başlık altında toplanabilirler. EAP malzemelerin sınıflandırılması Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. EAP Malzemelerin sınıflandırılması

<i>Elektronik EAP</i>	<i>İyonik EAP</i>
Ferroelektrik Polimerler	Polimer Jeller
Elektroviskoelastik Elastomerler	İyonik Polimer Metal Kompozitler
Dielektrik Elastomerler	İletken Polimerler
Sıvı Kristal Elastomerler	Karbon Nanotüpler
Elektrostriktif Kâğıt	
Elektrostriktif Graft Elastomerler	

İyonik EAP'ler iyonların veya moleküllerin hareketi ile aktive edilirken elektronik EAP'ler elektrik alanı veya Maxwell kuvvetleri ile aktive edilirler (Bar-Cohen, 2004). Bu iki grup EAP'lerin birbirlerine göre çeşitli üstünlükleri ve zayıflıkları vardır. Elektronik EAP'ler yüksek kuvvet çıktısı gösterirler ve hızlı cevap verirler fakat yüksek çalışma voltajlarına ihtiyaç duyarlar. Bu malzemeler yüksek mekanik enerji yoğunluğuna sahiptirler ve büyük bir kısıtlama olmadan hava ortamında çalışabilirler. İyonik EAP'ler ise düşük çalışma voltajlarında hareket edebilirler fakat uygulayabildikleri kuvvet ve cevap hızları düşüktür. Bu malzemelerin aktivasyonu için iyonik bir çözelti veya içerisinde iyon barındıran başka bir malzeme ile etkileşimde olmaları gerekmektedir. Sabit bir doğru akım voltajı altında elektronik EAP'lerde fiziksel gerilme korunurken iyonik EAP'lerde korunmaz. Her iki EAP grubundaki malzemelerin yer değiştirme hareketi, bu malzemelerin geometrik tasarımı değiştirilerek eğilme (bending), düzlemsel genişleme veya uzama olarak elde edilebilir. EAP gruplarının özelliklerinin karşılaştırılması Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. EAP malzemelerin karşılaştırılması (Bar-Cohen, 2004).

	<b>İYONİK EAP</b>	<b>ELEKTRONİK EAP</b>
<b>Türü</b>	Genelde eğilme tipi eyleyiciler olarak tasarlanırlar ve yüksek eğilme kapasiteleri vardır.	Düzlemsel eyleyiciler olarak tasarlanırlar ve düzlemde büyük deformasyonlar gösterirler
<b>Çalışma koşulu</b>	Çalışmak için elektrolite ihtiyaç duyarlar.	Kuru ortamda çalışırlar.
<b>Aktivasyon voltajı</b>	1-2 volt gibi düşük gerilimlerde çalışabilirler.	Çalışmaları için kilovolt ölçüsünde yüksek gerilimler gereklidir.
<b>Cevap hızı</b>	Cevap hızları düşüktür. Birkaç saniye içinde cevap verirler.	Çalışma hızları yüksektir. Milisaniyeler içerisinde cevap verirler.
<b>Çalışma süresi boyunca kararlılığı</b>	Uzun süre aynı performansı gösterebilen bir eyleyici üretilmesi zordur.	Uygun koşullar altında uzun çalışma sürelerine dayanabilirler.
<b>Elde edilebilme</b>	Pahalıdırlar ve çoğu zaman satın almaya açık değildirler.	Ucuzdurlar ve kolaylıkla temin edilebilirler.
<b>Aktivasyon gerilmesi</b>	Oldukça düşük aktivasyon gerilimlerine sahiptirler. Bir doğru akım gerilimi altında fiziksel gerilimlerini koruyamazlar	Aktivasyon gerilimleri oldukça yüksektir. Bir doğru akım gerilimi altında fiziksel gerilimlerini korurlar
<b>Endüstriyel uygulamalar için uyumluluk.</b>	Daha çok düşük aktivasyon kuvveti gerektiren uygulamalar için uygundurlar. Biyo-uyumlu türlerinin olması biyolojik uygulamalar için kullanılabilirliğini sağlamaktadır.	Yüksek aktivasyon kuvvetlerine ulaşabilmeleri robotik ve mekatronik gibi alanlarda kullanılmalarını sağlamaktadır. Fakat yüksek elektriksel gerilimlerde çalışmaları kullanım alanlarını kısıtlamaktadır.

Yüksek yer değiştirme kabiliyeti, çalışma mekanizmasının biyolojik kaslar ile benzerliği, esnekliği, sessiz çalışması, hasar toleransı ve yüksek çalışma gerinimlerine ulaşabilmesi, EAP'lerin eyleyici olarak kullanılmasında diğer eyleyici türlerine göre avantaj sağlamaktadır. Bu malzemelerin uygulamalarda eyleyici olarak kullanılması ise birçok disiplinin bir arada kullanılmasını gerektirir. Bu disiplinler; kimya, malzeme bilimi, elektromekanik, elektronik ve bilgisayar kullanımı olarak sıralanabilir (Bar-Cohen, 2004). Yapılan çalışmaların çoğunda bu disiplinler temel alınarak EAP eyleyicilerin kuvvet uygulayabilme ve yer değiştirme kabiliyetleri incelenmiştir. Birçok farklı kontrol yöntemi ise bu kabiliyetlerin çeşitli uygulamalarda kontrolü üzerine olmuştur. Kontrol uygulamalarında başarılı performanslar elde edilmesine karşın genel olarak EAP eyleyicinin çalışması esnasında malzemenin doğal yapısından dolayı meydana gelen doğrusal olmayan etkiler, bu eyleyicilerin kontrol uygulamalarında zorluklara neden olmaktadır. Yapılan çalışmalar göstermektedir ki, EAP eyleyicilerin endüstriyel olarak geniş bir alanda kullanılabilmeleri için hala yapısal özelliklerinin ve çalışma kuvvetinin artırılması gerekmektedir.

Günümüze kadar geniş bir uygulama alanında performansı incelenen EAP eyleyicilerin başlıca uygulama alanları; mekatronik, robotik, biyomedikal, haptik, olarak sıralanabilir (Capri vd., 2011). Bu uygulamalara örnek verecek olursak; hafif ve kompakt mekanizmalar, optik ve protez sistemler, manipülatörler, haptik cihazlar, değişken esneklikteki yapılar ve bağlantılar, aktif titreşim kontrol mekanizmaları, biyomedikal cihazlar, ilaç iletim sistemleri, akışkan vanaları ve pompalar gibi birçok sistemde EAP malzemeler eyleyici olarak incelenmiştir (Brochu ve Pei, 2010; Mirfakhrai vd., 2007; Madden vd., 2004; Bar-Cohen, 2004; Carpi ve Smela, 2009; Carpi vd., 2008). Bu malzemelerin, mekanizmaların veya cihazların tahrikinde eyleyici olarak kullanılması, kullanılan EAP malzemenin özellikleri hakkında detaylı bir bilginin sahip olunmasını gerektirmektedir. Bu bilgilerle beraber diğer geleneksel eyleyicilere göre avantajları ve dezavantajları karşılaştırılabilir. Türlerine göre incelendiğinde elektronik EAP'lerin elektromekanik özellikleri klasik test yöntemleri ile kolayca belirlenebilirken iyonik EAP'lerin elektromekanik özelliklerinin belirlenmesi, çalışma mekanizmasının karmaşık yapısından dolayı zorluklara neden olabilmektedir.

Bu tezin ilerleyen kısımlarında iyonik EAP malzemelerin tipleri hakkında kısa bilgiler verilecektir. Bu malzemelerin çalışma mekanizmaları ve kullanıldıkları uygulamalar literatür destekli olarak incelenecektir. Ayrıca bu uygulamalarda kullanılan kontrol

yöntemlerine değinilecektir. Tez kapsamında konjuge tip iyonik EAP malzemenin eyleyici olarak performansı inceleneceğinden konjuge iyonik EAP eyleyiciler üzerinde daha detaylı olarak durulacaktır. Bu eyleyiciler üzerinde yapılan kontrol çalışmaları ve meydana gelen gelişmeler, üretim yöntemi ve uygulama alanları detaylı olarak açıklanacaktır.

### **1.2.1. İyonik EAP Eyleyiciler**

#### **1.2.1.1. Polimer Jeller**

Polimer jeller bir çözücü içerisinde şişen çapraz bağlı polimerlerdir. Aktive edilebilmeleri için bir çözücü içerisinde bulunmaları gerekmektedir. Yapılarına çözücü olarak şişerler veya büzülürler. Bu değişim; sıcaklık, çözücü bileşimi ve elektrik alanı etkisi ile kontrol edilebilmektedir. Elektrik alanı ile kontrolleri daha kolaydır ve elektrik tahriki söz konusu olduğunda bu malzemelerin elektrokimyasal özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Düşük voltajlarda çalışabilmeleri en büyük avantajları iken çalışmaları için bir çözeltiye ihtiyaç duymaları dezavantajlarıdır.

Polimer jellerin elektriksel tahriki ilk olarak Tanaka vd. (1982) tarafından çalışılmıştır. Bu çalışmada poliarkilik bir jel iki elektrotun arasında kalacak şekilde bir çözeltinin içerisine yerleştirilmiştir. Jel, elektroda dokundurduğunda anot kısmında büzülme göstermiş fakat dokundurulmadığında ise yine anot kısmında genişleme göstermiştir. Shiga ve Kurauchi, (1990) tarafından yapılan çalışmada ise akrilik asit-akrilamid kopolimer jelin bir sulu çözelti içerisinde ve iki elektrot arasında elektriksel alan uygulandığında eğilme hareketi yaptığı gözlemlenmiştir. Schreyer vd. (2000) çalışmalarında platin kaplamalı poliakrilonitril (PAN) fiber demetlerinin elektrik tahriki ile hareketini incelemişlerdir. PAN malzeme lifleri anoda yakın olduğu zaman büzülürken katoda yakın olduğu zaman uzamıştır. Bu işlem elektrik geriliminin yönü değiştirilerek tam tersi durum içinde gerçekleştirilebilir. Osada vd. (1992) kompozit bir malzeme olan poli(2-akrilamido 2-metilpropansülfonik asit) filmi üzerine çalışmıştır. Bu malzemeye uygulanan bir elektrik alanı sonucunda film buyunca eğilme meydana gelmektedir. Segalman vd. (1992) çalışmalarında bu eyleyicilerin çalışma mekanizmalarını ve bazı uygulama alanlarını ele almışlardır.

### 1.2.1.2. Karbon Nanotüpler (KN)

Karbon nanotüpler, karbondan meydana gelmiş içi boş silindirlerdir. Tek bir silindirin kalınlığı 0,4 ila 3 nm arasında değişmektedir. Eyleyici olarak genellikle birçok karbon silindirinin bir araya getirilmesiyle kullanılırlar. Elastisite modülleri 1000 GPa gerilme dayanımları ise 45 GPa civarındadır. Çok düşük gerinim göstermelerine karşın uygulayabildikleri kuvvet ve enerji yoğunlukları yüksektir. Ayrıca yüksek iletkenlik özelliğine sahiptirler (Capri vd., 2011).

Bu malzemelerden elektrik tahriki altında hareket elde etmek için iki KN elektrotu bir elektrolit ile temas edecek şekilde konumlandırılır. Bu iki elektrot arasında küçük bir elektriksel gerilim farkı uygulandığında iyonik yükler her bir elektrotun etrafında toplanır. Bu durumda ise elektrotların iç kısmında elektriksel yüklerin dağılımı ile denge durumu oluşur. Bu yük taşınması ve elektrostatik etkiler, KN elektrotlar üzerinde boyutsal değişimlere neden olur ve böylece bir hareket elde edilir (Baughman, 1999).

KN eyleyicilerin gerinimleri düşük olduğundan uygulamalarda daha iyi bir yer değiştirme performansı gösterebilmeleri için gerinimlerinin mekanik olarak artırılması gerekmektedir. Çalışmaları için elektrolite ihtiyaç duymaları bu malzemelerin en büyük kısıtlamasıdır. Ayrıca birçok KN silindirin bir araya getirilmesiyle oluşturulan KN demetinin tek bir silindirin elektrolit ile temasını azaltacağından eyleyicinin etkinliğinin azalmasına neden olur.

Yapılan çalışmalarda KN silindirler genellikle nanotüp yaprak veya kâğıt şeklinde demetler olarak dizilerek kullanılmışlardır. Bu silindirler birbirlerine mekanik bağlanma yolu ile veya van der Waals bağları ile bağlanmışlardır. KN eyleyiciler ince bir bandın önüne ve arkasına şeritler halinde KN silindirlerin yapıştırılması ile oluşturulmuştur. Bu eyleyicilere elektrolit içerisinde bir elektriksel gerilim farkı uygulanarak eğilme hareketi gözlemlenebilmektedir (Baughman, 1996). Bu uygulamada KN şeritleri düzenli olarak dizilemediğinden tek bir KN şeridin kullanılması ile elde edilen mekanik özelliklerden daha kötü sonuçlar göstermektedir.

KN eyleyicilerin üretiminde meydana gelen gelişimler ve bu malzemelerin benzersiz mekanik ve elektriksel özellikleri, bu malzemelerin eyleyici veya algılayıcı olarak gelecekte özellikle tekstil alanında kullanılması adına umut vadetmektedir.



### 1.2.1.3. İyonik Polimer Metal Kompozit (İPMK) Eyleyiciler

İPMK eyleyiciler ilk olarak 1992 yılında Ogura, (1992) tarafından çalışılmıştır. Bu çalışmada bir polielektrolit olan Nafion polimer filmi üzerine iki taraflı olarak platinyum elektrotlar kimyasal yöntemlerle kaplanmıştır. Bir sulu çözelti içerisinde elektrotlara uygulanan düşük (1-5V) voltaj farkı sonucunda iyon dengesinde meydana gelen değişim Nafion filmin yapısındaki suyun elektrotlardan birine doğru çekilmesi ve bu elektrot tarafında bir şekil değişimi meydana getirerek hareket elde edilmesini sağlamıştır (Kim ve Shahinpoor, 2002).

İPMK eyleyiciler ıslak ortamda çalışabildikleri gibi çeşitli geliştirmeler sonucunda hava ortamında da çalışabilmektedirler. Bu eyleyicilerde hareketli iyonlar ile dengelenmiş negatif yüklü sabit polimer ağ yapısından oluşan Nafion ve Flemion iyonomer film yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu malzemeler sabit perfluorinatlı polimer omurgasının doğal iyonik yapısından dolayı elektrik tahriki altında anyonların geçmesine izin vermezken katyonların geçmesine izin verirler (Li and Nemat-Nasser, 2000).

İPMK eyleyicilerde elektrot olarak genellikle yüksek iletkenlik sağlayan altın veya platinyum metalleri kullanılmaktadır. Elektrotlar kimyasal yöntemlerle polimer filmin üzerine çökeltilmektedir. Çökellemeyle beraber metal parçacıklarının bir kısmı polimer yüzey yapısının içerisine karışırken büyük bir kısmı ise yüzeyde birikir. Yeterli iletkenliğin sağlanabilmesi ve dirençlilik açısından çökelleme işlemi oldukça dikkatli olarak yapılmalıdır (Nemat-Nasser ve Thomas, 2004). Çökelleme işleminden sonra polimer yapısındaki anyonların dengelenmesi için potasyum veya sodyum gibi karşıt iyonlar ile IPMC nötrale edilir (Kim ve Shahinpoor, 2003).

Elektrik tahriki altında İPMK eyleyicilerde anot tarafına doğru eğilme gerçekleşir. Bu ilk hareketten sonra ise küçük bir sapma durumu gözlenir. Bu sapma Nafion tabanlı İPMK'lar da katoda doğru olmaktadır. Elektrik gerilimi sıfıra indirildiğinde Nafion tabanlı İPMK'lar katoda doğru hızlı olarak geri gelir. Genellikle geri gelme hareketi sonucunda başlangıç konumlarını tam olarak sağlayamazlar. Flemion tabanlı İPMK'larda ise aktivasyondan sonra geri gelme durumu gözlenmez. Bunun yerine anoda doğru yavaşça ilerleme meydana gelir (Nemat-Nasser ve Zamani, 2006).

Makro ölçekte görülen eğilme hareketi polimerin elektrik tahriki altında iç yapısında bulunan katyonların hareketi ile açıklanabilmektedir. İPMK yapısında sabit negatif yüklü iyonlar ve hareket edebilen pozitif yüklü katyonlar barındırmaktadır (Shahinpoor ve

Schneider, 2008). Ayrıca bu malzemeler yapılarında kayda değer miktarda su molekülü bulundurmaktadırlar. Elektrik gerilimi ile beraber İPMK yapısındaki katyonlar katoda doğru hareket etmektedir. Katyonlar ile beraber bazı su iyonları da katyonların çekimiyle katoda doğru sürüklenmektedir. Bu hareket nedeniyle katot kısmında bir şişme anot kısmında ise büzülme meydana gelmektedir. Böylelikle İPMK eyleyici anoda doğru eğilme hareketi göstermektedir.

İPMK eyleyiciler 7V değerinden küçük elektrik tahriki altında %3'e kadar aktivasyon gerinimleri gösterebilirler (Shahinpoor ve Kim, 2002; Shahinpoor ve Kim, 2005). Eğilme tipi İPMK eyleyiciler ise çok büyük eğilme oranlarına ulaşabilmektedirler. Aktivasyon gerinimleri ise 30 MPa'a ulaşabilmektedir (Shahinpoor ve Kim, 2001; Nemat-Nasser, 2002). Bu malzemelerde gözenekli yapıya sahip polielektrolit kullanılması iyonların hareketini kolaylaştırmaktadır ve böylece 100 Hz gibi aktivasyon frekanslarına ulaşılabilir (Nemat-Nasser ve Wu, 2003).

#### **1.2.1.3.1. İyonik Polimer Metal Kompozitler (İPMK) Uygulama Alanları**

İPMK eyleyicilerin keşfinden beri birçok uygulama alanında bu eyleyicilerin kullanılması çalışma konusu olmuştur. Ayrıca birçok çalışma bu eyleyicilerin getirdiği yeterlilikler ile yeni uygulama alanlarına yönelik olmuştur. Bu alanda yapılan çalışmalar biyo-mekanik, robotik, mikro elektromekanik sistemler gibi sıralanabileceği gibi bu alanların dışında daha birçok uygulama alanı mevcuttur.

İPMK eyleyicilerin kuru ve ıslak ortamda çalışabilmeleri, uygun kesim yöntemleri ile neredeyse her şekilde üretilibilmeleri ve biyo-uyumlu olmaları birçok farklı uygulamada kullanılabilmelerini sağlamaktadır. Günümüzde bu eyleyiciler medikal, elektriksel, mekanik ve uzay mühendisliği gibi uygulama alanları için büyük potansiyel oluşturmaktadırlar. Esnek olmaları kırılma toleranslarının yüksek oluşu ve biyolojik kaslar ile benzer aktivasyon mekanizmasına sahip olmaları bu eyleyicileri biyolojik yapıların taklidinde (biyomimetik), robotik ve mühendislik uygulamalarında kullanılmasında büyük avantajlar oluşturmaktadır (Bar-Cohen ve Zhang, 2008). Yapılan birçok çalışmayla bu malzemelerin havacılık, otomobiller, tıp, robotik, dış iskelet, eklem mekanizmaları, eğlence, oyuncak, giyim, haptik ve dokunsal ara yüzler gürültü kontrolü, dönüştürücüler, güç jeneratörleri ve akıllı yapılar da kullanımı araştırılmıştır. İPMK eyleyicilerin yeni uygulama alanları olarak, toz siliciler (Bar-Cohen, 2000), robotik kollar (Bar-Cohen vd., 2008), mini manipulatörler ve tutucular,

mikro pompalar (Lee, 2006), denizanası benzeri eyleyiciler (Yeom ve Oh, 2009), aktif kataterler (Fang vd., 2007), pompalar için aktif diyaframlar (Lee ve Kim, 2006), enerji depolama (Tiwari ve Kim, 2010) ve mikro konumlama uygulamaları verilebilir.

#### **1.2.1.4. Konjuge Elektro-aktif Polimer (KEP) Eyleyiciler**

Konjuge polimerler elektriksel iletken organik malzeme olma özellikleri ile bilinirler ve iletken polimerler olarak da adlandırılmaktadırlar. Bu malzemeler bir elektrik gerilimi altında şeklinde veya renginde değişim gösterebilmektedirler (Wallace vd., 2003). Konjuge polimer olarak polipirol (PPy) ve polianilin (PANI) KEP eyleyici üretiminde kimyasal kararlılık ve yüksek fiziksel gerinimler gösterebildiğinden en çok araştırılan malzemeler arasındadırlar. Konjuge polimerlerin yapısı, pozitif yük taşımaya olanak veren tek ve çift karbon-karbon bağlarından oluşmaktadır. Bu yapının yük geçişine izin vermesi bu malzemelerde iletkenlik sağlanmaktadır.

Konjuge polimerlerin eyleyici olarak kullanılabilmesi için iki elektrot ve bir elektrolit ortam gereklidir. Elektrolit ortamda bulunan elektrotlara bir elektrik gerilim farkı uygulandığında, elektrolit tipine bağlı olarak, polimer yapısına elektron girişi veya çıkışı meydana gelir. Bu kazanılan veya kaybedilen elektronlar yük dengesinin sağlanabilmesi için polimer zincirine elektrolit ortamdan iyon girmesine veya çıkmasına neden olmaktadır. Bu iyon giriş ve çıkışı polimerde hacim artmasına veya azalmasına ile sonuçlanmaktadır. Bu kimyasal tepkime redoks (yükseltgenme-indirgenme) tepkimesi olarak adlandırılır ve polimer yapısına giren ve çıkan iyonlar, elektrolit sıvısına bağlı olarak anyonlar veya kationlardır. Redoks tepkimesi sırasında iyon hareketi ile meydana gelen bu kütle geçişi konjuge polimerler eyleyicilerin temel aktivasyon mekanizmasıdır (Bar-Cohen, 2004). Bir özel durum olarak; elektrolit ortamda anyonların ve kationların birlikte bulunması durumunda elektriksel gerilim farkı uygulanması ile polimerde öncelikle bir hacim artışı görülmekte ve yükseltgenme durumunun değişmesinin ardından hacim azalması meydana gelmektedir. Bu durum istenmeyen bir sonuçtur ve tuzda kurutma (salt draining) adı verilir.(Pei ve Inganas, 1992; Gandhi vd., 1995; Pei ve Inganas, 1993).

Bu çalışmada kullanılan konjuge polimer eyleyicide PPy polimer malzeme kullanılmıştır. Bir PPy polimer için elektrik tahriki altında redoks tepkimeleri aşağıdaki gibi verilebilir (Hutchison vd., 2000).

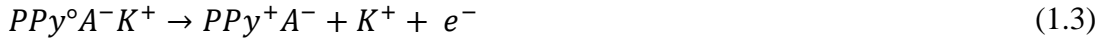
- Elektrolit ortamın anyon içermesi durumunda yükseltgenme;



- Elektrolit ortamın anyon içermesi durumunda indirgenme;



- Elektrolit ortamın katyon içermesi durumunda yükseltgenme;



- Elektrolit ortamın katyon içermesi durumunda indirgenme;

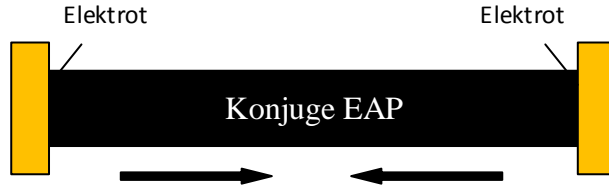


Burada  $A^{-}$  ve  $K^{+}$  anyon ve katyon parçacıkları  $e^{-}$  elektronu  $PPy^{\circ}$  polipirol polimerin normal durumunu  $PPy^{-}$  ise polipirol polimerin yükseltgenmiş durumunu göstermektedir.  $PPy$  polimerle elektrolit arasında anyon geçişi ile yükseltgenme durumunda genişleme indirgenme durumuna ise büzülme meydana gelmektedir. Bu durum katyon içeren elektrolit ortamında tam tersi şekilde olmaktadır.

$PPy$  polimer eyleyiciye eklenen veya çıkarılan iyonların tipi, eyleyicinin performansı açısından büyük öneme sahiptir. Yapılan çalışmalarda trifluoromethanesulfonimide TFSI anyonunun kullanılması polimer geriniminide %30'a kadar ve gerinim oranında %13  $s^{-1}$  değerlerine ulaşılmasını sağlamıştır (Zama vd., 2006; Hara vd., 2005; Hara vd., 2005).

Bu  $PPy$  polimerlere iyonların eklenmesi veya çıkması ile hacminde meydana gelen değişim uygulanan gerilim farkının ayarlanması ile kontrol edilebilmektedir. Genellikle bu polimerler 3 V'a kadar elektrik gerilimi altında çalışırlar ve düzlemde %3 düzlem dışı ise %30 gerinim gösterebilmektedirler. Yüksek elektrik gerilimleri ise bu malzemelerde kalıcı hasarlara yol açmaktadır.

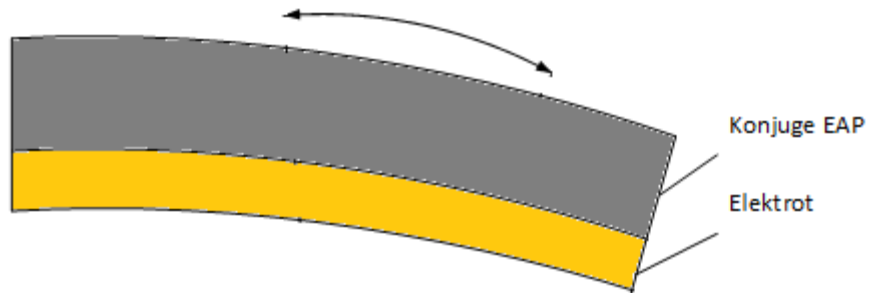
Konjuge polimerler eyleyici olarak birçok şekilde kullanılabilirler. En basit şekil olarak bir elektrolit ortamda iki elektrot arasına konulmuş aksenal (Della Santa vd., 1997) veya boru şeklinde (Ding vd., 2003) eyleyiciler verilebilir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Tek katmanlı doğrusal KEP eyleyici yapısı

Bu şekildeki eyleyiciler elektrik tahriki altında hacim değişimi ile doğrusal kuvvet veya yer değiştirme üretmektedirler.

İkinci olarak çift katmanlı eyleyici şekli verilebilir (Şekil 1.2). Bu eyleyiciler elektrolit ortamda bulunan bir aktif katman ve bir pasif katmandan oluşmaktadır. Aktif katman bir konjuge polimer iken pasif katman polimer veya metal bir katman olabilmektedir. Elektrik tahriki altında aktif katmana iyon girişi veya çıkışı sonucu bu katmanda genişleme veya büzülme meydana gelmektedir. Aktif katmanda görülen bu hareket pasif katman ile arasında bir gerinim farkına neden olmaktadır (Smela, 2003). Bu gerinim sonucunda eyleyici eğilme hareketi göstermektedir. Bu eğilme hareketinden, eyleyici ankastre olarak konumlandırıldığında serbest uça meydana gelen yer değiştirme veya karşı koyma kuvveti (blocking force) olarak faydalanılacağı gibi farklı tasarımlarla da bu hareketten faydalanılabilmektedir. Eğilme hareketi ve pasif gerinimler bu eyleyicilerin analizini tek konjuge polimer eyleyicilere göre daha karışık kılmaktadır.



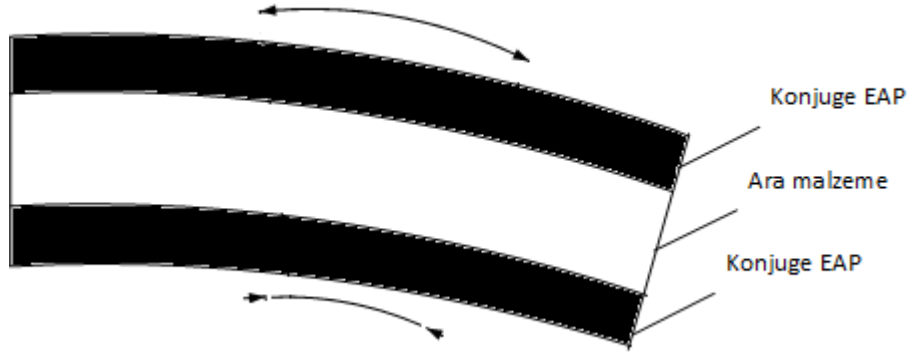
Şekil 1.2. İki katmanlı KEP eyleyici yapısı

Bir diğer eyleyici tipi ise bu tez çalışmasında da kontrolü yapılan üç katmanlı konjuge polimer eyleyicidir. Aşağıdaki kısımda bu tip konjuge polimer eyleyiciler detaylı olarak incelenmiştir. Bu eyleyiciler biyo-uyumlulukları, uygulanan elektrik gerilimine bağlı olarak

diğer iyonik EAP'lere göre çok daha fazla gerinim göstermeleri, sentezlenmesi ve dökümünün kolay olması ve ucuz maliyetleri gibi avantajlarından dolayı diğer iyonik EAP'ler arasında ön plana çıkmaktadırlar.

#### 1.2.1.4.1. Üç Katmanlı Konjuge EAP Eyleyici

Üç katmanlı KEP eyleyici ilk olarak Kaneto vd. (1995) tarafından üretilmiştir. Bu eyleyiciler çift katmanlı KEP eyleyicilerin geliştirilmiş şeklidir ve diğer tek ve çift katmanlı KEP eyleyicilerden farklı olarak elektrolit sıvı içinde olmaksızın da çalışabilirler. Hava ortamında çalışabilmeleri için, ara katman olarak iyonik sıvı barındıran yalıtkan bir malzeme kullanılırken alt ve üst katman olarak konjuge polimerler kullanılmaktadır. Ara katman malzemesi pasif bir film (Otero, 1997), gözenekli bir zar (Zhou vd., 2003), jel elektrolit (Madden vd., 2000) veya katı polimer elektrolit (Kaneto vd., 1995) olabilmektedir. Polivinildene Difloride (PVDF) en çok kullanılan ara katman malzemesidir. Bu malzeme gözenekli bir yapıya sahiptir, yalıtandır ve hareket için gerekli olan iyonları barındırmaktadır. Bu malzemenin içinde bulunan iyonik sıvı buharlaşmaya kadar üç katmanlı KEP eyleyici hava ortamında çalışabilmektedir. İyonik sıvı olarak genellikle propylene carbonade (PC) içinde çözülmüş lithium triflourmethanesufonimide ( $\text{Li}^+\text{TFSI}^-$ ) veya tetrabutylammonium hexaflourophosphate ( $\text{TBA}^+\text{PF}_6^-$ ) kullanılmaktadır (Fang vd., 2008). Alt ve üst katman olarak ise genellikle PPy ve PANI iletken polimerleri kullanılmaktadır. İletkenliğin polimer şerit boyunca artırılması amacıyla bazı durumlarda bu katmanlar arasına ince bir altın film çekilebilmektedir. Fakat bu işlem eyleyicinin kırılabilirliğini ve maliyetini artırmaktadır. Şekil 1.3'de üç katmanlı KEP şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1.3. Üç katmanlı KEP eyleyici yapısı

KEP eyleyicinin üst yüzeylerinde bulunan iletken polimerlere bir elektrik gerilimi uygulandığında ara katman içinde bulunan serbest iyonlar harekete geçerek alt ve üst katmanların genişlemesine ve büzülmesine neden olurlar. Bu durumda meydana gelen gerinim farkı ankastre üç katmanlı KEP eyleyicinin eğilme hareketi gerçekleştirmesine neden olur (Şekil 1.3). Burada alt ve üst katmanda bulunan KEP'ler anot ve katot görevi görmektedirler ve PVDF malzemesi iyon deposu konumundadır. PVDF malzemesi içerisinde bulunan iyonik sıvı buharlaşmadığı sürece eyleyici işlevine devam edebilmektedir.

KEP eyleyicilerin düşük gerilimlerde çalışabilme, biyo-uyumluluk, ve istenilen her şekilde eyleyici üretilebilmesi gibi avantajlarının bulunmasına karşı bu eyleyicilerden elde edilen kuvvet endüstriyel uygulamalarda kullanılabilmesi için yeterince yüksek değildir ve geliştirilmesi gereklidir. Ayrıca sürünme histerezis ve iyonik sıvı buharlaşması nedeniyle meydana gelen dinamik değişimler KEP eyleyicinin uygulamalardaki performansını etkilemektedir ve kontrol uygulamaları için kullanılabilir bir matematiksel modelinin elde edilmesini zorlaştırmaktadır.

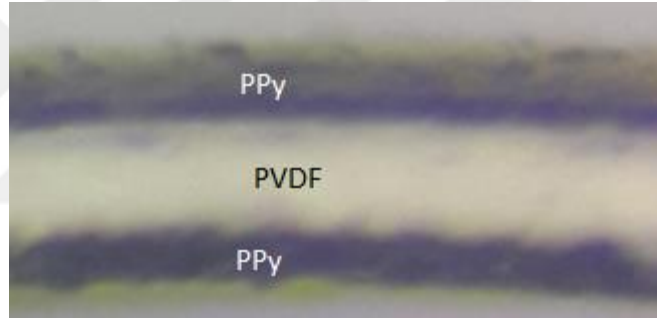
#### 1.2.1.4.2. Üç Katmanlı KEP Eyleyici Üretimi

Bu çalışmada kullanılan üç katmanlı KEP eyleyicide yaklaşık 30  $\mu\text{m}$  kalınlığında iki PPy katman ve yaklaşık 110  $\mu\text{m}$  kalınlığında bir PVDF katman bulunmaktadır. PVDF katman yüzeyleri iletkenliğin artırılması amacıyla 0,2  $\mu\text{m}$  kalınlığında altın ile kaplanmıştır. Bu altın katmanın üzerine ise PPy malzeme elektrokimyasal yöntem kullanılarak

çökertilmiştir. Daha sonra KEP eyleyici (PC) içinde çözünmüş ( $\text{Li}^+\text{TFSI}^-$ ) iyonik çözeltisine daldırılarak eyleyiciye iyonik sıvı katkılanması sağlanmıştır. Üretilen bu KEP film istenilen boyutlarda kesilerek çeşitli amaçlar için kullanılabilir. Çalışmada kullanılan KEP eyleyicinin şematik gösterimi Şekil 1.4’de ve resmi Şekil 1.5’de verilmiştir.

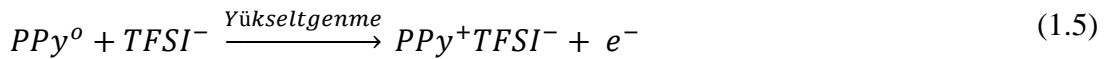


Şekil 1.4. Kullanılan üç katmanlı KEP eyleyici yapısı



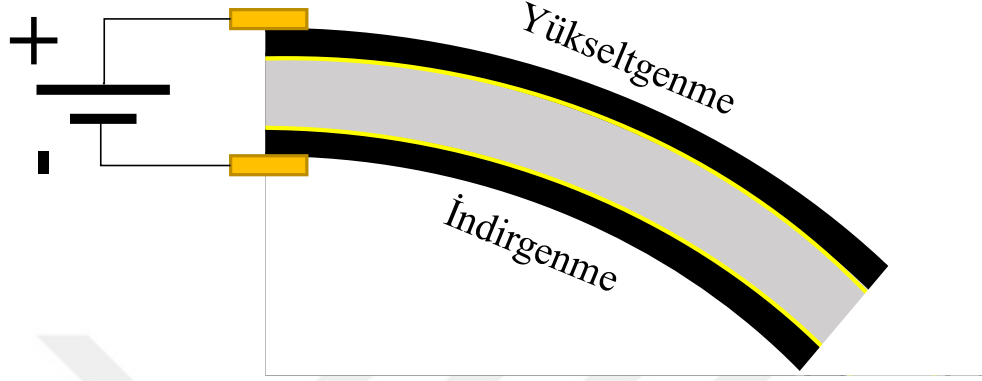
Şekil 1.5. Üç katmanlı KEP eyleyici iç yapısı

KEP eyleyiciye bir elektrik gerilim farkı uygulandığında ise eyleyicinin bir PPy katmanında yükseltgenme meydana gelirken diğerinde indirgenme meydana gelmektedir. Belirtilen redoks tepkimesi aşağıdaki gibi verilmektedir.

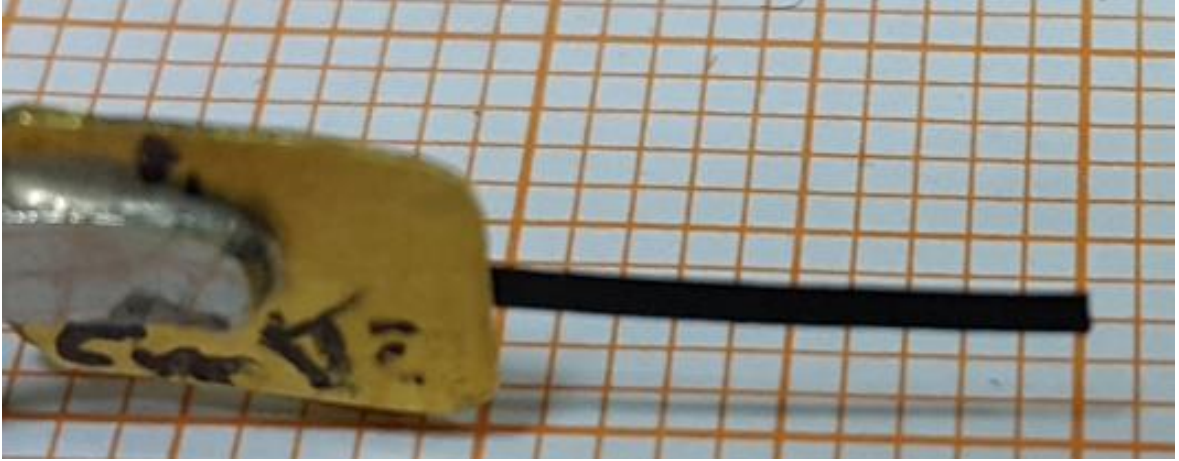




Bu tepkime sonucunda KEP eyleyicide bir eğilme hareketi meydana gelir. Bir uçundan sabitlenmiş bir KEP eyleyici için elektrik tahriki altında meydana gelen eğilme hareketi Şekil 1.6'da verilmiştir.



Şekil 1.6. KEP Eyleyicinin elektrik gerilimi altında hareketi



Şekil 1.7. KEP Eyleyicinin bir gösterimi

#### 1.2.1.4.3. KEP Eyleyicilerin Modellenmesi

KEP eyleyicilerden kontrol uygulamalarda üstün ve tutarlı performans elde edebilmek için bu eyleyicilerin matematiksel modellerinin elde edilmesi gerekmektedir. Birçok uygulamada kullanılan KEP eyleyicilerin hareketinin anlaşılabilmesi ve kontrolünün yapılabilmesi amacıyla uygulanan elektrik gerilimi-konum/kuvvet ilişkisini veren matematiksel modelleri elde edilmiştir. Bu modellerin büyük bir kısmı bir ucu sabit diğer

ucu hareketli şerit bir eyleyicinin serbest ucunun konumu ve karşı koyma kuvveti üzerine olmuştur. Bu modeller zorluk derecelerine göre üç başlık altında toplanabilir. Bunlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Siyah kutu modeli;
- Gri kutu modeli;
- Beyaz kutu modeli;

Siyah kutu modeli en basit modeldir ve sadece modellenen eyleyici için geçerlidir. Sıklıkla ampirik model olarak bilinir. Sisteme verilen bir girdi değerine karşılık sistemin ürettiği çıktı kullanılarak eğri uyumlama yöntemleri ile sistem modeli elde edilir. Gri kutu modeli siyah kutu modeline göre daha karmaşıktır. Ampirik sonuçların yanı sıra kısmi olarak sistemin fiziksel özellikleri de modele dâhil edilir. Beyaz kutu modeli ise bu üç yöntem içerisinde en karmaşık modeldir. Tamamıyla sistemin fiziksel özellikleri kısmi diferansiyel denklemler ile ifade edilerek bu denklemlerin çözümüyle sistem modeli elde edilmeye çalışılır. Fakat bu yöntem ile elde edilen model gerçek zamanlı kontrol uygulamaları için çoğu zaman elverişli değildir. Birçok araştırmacı bu modelleme yöntemlerini kullanarak KEP eyleyici modeli elde etmiştir.

Pei ve Inganas (1992), Christophersen vd. (2006) iki katmanlı bir ankastre KEP eyleyici için mekanik bir yöntem olan eğilme kiriş (bending beam) teorisini kullanarak eğilme yer değiştirmesini modellemişlerdir. Bir elektrik gerilimi altında eyleyicinin gösterdiği eğilme kavisinin yarıçapı kullanılarak gerinim miktarı modellenmiştir. Bu modeli üç katmalı KEP eyleyiciler için genişleten Alici vd. (2006) çalışmalarında ankastre KEP eyleyicilerin elektrokimyasal mekanik modellerinin çeşitli türevlerini; eğilme kavisini, karşı koyma kuvveti ve serbest ucun maksimum yer değiştirmesini belirleyebilmek için oluşturmuşlardır. Ayrıca Alici (2009) doğrusal olmayan etkileri göz önüne alarak eğilme kiriş yöntemini, KEP eyleyicinin doğrusal olmayan kararlı hal eğilme yer değiştirmesi modelini oluşturmak için kullanmışlardır. Bir diğer çalışmada ise Della Santa vd. (1992) KEP eyleyici için bir viskoelastik model sunmuştur.

Elektriksel bir modelleme yöntemi olarak Madden vd. (2001) çalışmasında bir fizik tabanlı “difüzyon-elastik-metal” modelini sunmuştur. Bu çalışma, elektrolit sıvı içerisinde bulunan bir KEP eyleyicinin makro ölçekte gösterdiği hacim değişiminin anlaşılması için

bir ön model ortaya koymuştur. Model yapısı iyonların difüzyon hareketini temel alarak oluşturulmuştur. Fang vd. (2008) bu modeli üç katmanlı KEP eyleyici için geliştirerek geometrik ölçülendirme kurallarını eklemiştir.

Bir siyah kutu modelleme yöntemi olarak Alici vd. (2006) çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemi kullanarak üç katmanlı KEP eyleyici modeli sunmuşlardır. Bu yöntemde matematiksel modelin türetilmesi için eyleyicinin ısı gerinimi ile gerçek gerinimi arasında bir ilişki kurulmuştur. Bu model belirli bir amaç için kullanılacak olan KEP eyleyicilerin geometri optimizasyonunda faydalı olmaktadır. Fakat gerçek model parametrelerinin bulgusal belirlenmesine dayalıdır ve eyleyicilerin geçici davranışının oluşturulması için uygun değildirler. Alici vd. (2008) ise çalışmalarında ankastre üç katmanlı eyleyicinin frekans modeli için siyah kutu modelleme yöntemini kullanmışlardır. Bu çalışmada nümerik yöntem kullanılarak deneysel sonuçlar ile uyum gösteren modeller bulunmuş ve bu modellerin derecelerine göre karşılaştırması yapılmıştır.

Fiziksel modellerin oluşturulması için malzemelerin özelliklerinin bilinmesi gereklidir ve modelleme süreci karmaşık denklemlerin çözülmesini gerektirmektedir. Bu karmaşıklık ve malzeme parametrelerinin fazla olmasından dolayı literatürde elde edilen modeller malzemenin fiziksel davranışını tam olarak yansıtamamaktadır ve belirli bir frekans aralığında veya kararlı halde geçerlidirler. Ayrıca fiziksel modelleme işlemi mekanik, kimya ve elektrik gibi birçok farklı disiplinin bir arada kullanılmasını gerektirmektedir. Bu fiziksel modellemelerin yerine ampirik sonuçlar sunan siyah kutu modelleme yönteminin kullanılması uygulama ve kontrol açısından büyük kolaylık sağlayacaktır.

#### **1.2.1.4.4. KEP Eyleyici Uygulama Alanları**

KEP eyleyiciler tek katmanlı olarak kullanıldıklarında birçok uygulamada kullanılabilirliğine olanak sağlayacak yeterli miktarda kuvvet üretebilmelerine rağmen bu durumda çalışabilmeleri için elektrolit ortama ihtiyaç duymaları ve küçük gerinimler göstermeleri uygulama alanlarını kısıtlamaktadır. Hava ortamında çalışabilen üç katmanlı KEP eyleyiciler ise elektrolit ortam dezavantajını aşmalarına ve yüksek eğilme kavisi gösterebilmelerine rağmen elde edilebilen kuvvetin küçük olması bu tip eyleyicileri mikro seviye uygulamalar için kullanılabilir kılmaktadır. Bu nedenle küçük boyutlu KEP eyleyiciler literatürde mikro hareket ettirme (manipulation), biyoanalitik nano sistemler, veri depolama, mikro valf, mikro anahtar, mikro deklanşör, konsol ışık modülatörleri, mikro-

optik aletler, makro / mikro robotik ve yapay kaslar gibi uygulamalar için incelenmişlerdir. Bu eyleyicilerin elektrik gerilimi altında davranışlarının tam olarak modellenememesi hava ortamında çalışabilen eyleyicilerin ise iyonik sıvı buharlaşması sonucu zamanla dinamik davranışında meydana gelen değişimler bu tip eyleyicilerin henüz endüstriyel uygulamalar için kullanımını engellemektedir.

Yukarıda bahsedilen mikro uygulama alanlarına birkaç örnek verecek olursak Alici ve Huynh (2007) çalışmalarında üç katmanlı KEP eyleyici kullanarak bir mikro tutucu sistemi sunmuşlardır. Ankastre iki KEP eyleyicinin uygulamada kullanılmak üzere kuvvet ve konum modelleri oluşturulmuş ve yükleme altında sistemin performansı incelenmiştir. Elde edilen veriler sistemin kendi ağırlığının elli katına kadar yüklemeyi 1.5 V gibi düşük bir elektrik gerilimi altında kaldırabildiği gözlenmiştir. Smela (2003) çalışmasında o zamana kadar üretilen ve bazı biyomedikal uygulamalar için kullanılan KEP eyleyicilerin bir değerlendirmesini sunmuştur. Sancak vd. (2015) çalışmalarında KEP eyleyicilerin mikro enjeksiyon uygulamaları alanında kullanımı için konum ve kuvvet modellerini analitik olarak elde ederek, bu uygulamalarda kullanılan benzer bir senaryonun takibini gerçekleştirmişlerdir. Naka vd. (2009) çalışmalarında KEP eyleyiciler kullanarak bir mikro pompa sistemi sunmuştur. Bu çalışmada vana kullanmaksızın akışkanın tek yönde iletimi sağlanmış ve sistem için akış oranı ve enerji tüketim oranı gibi temel parametreler belirlenmiştir. Price vd. (2014) çalışmalarında KEP eyleyiciyi optik uygulama alanında düz bir aynanın konum açısını kontrolü için kullanmışlardır. Bu çalışmada ilk olarak istenilen performansı sağlayabilecek bir KEP üretilmiş ve daha sonra deneysel olarak sistem incelenerek karakterize edilmiştir. Yapılan bu çalışmalar ile KEP eyleyicilerin küçük ölçekli uygulamalar için yeterli olduğu görülmüş fakat uzun çalışma sürelerinde meydana gelen dinamik davranış değişimi istenmeyen sonuçlar oluşturmuştur. Uzun süreli kontrol uygulamalarında gürbüz kontrol yöntemlerinin kullanılmasının yanı sıra eyleyicinin çalışması için gerekli olan iyonik sıvının da eyleyici içerisinde muhafaza edilmesini sağlayan geliştirmelerin yapılması kararlı bir çalışma performansı için faydalı olacaktır.

#### **1.2.1.4.5. KEP Eyleyici Kontrolü**

KEP eyleyiciler genellikle mikro boyutta uygulamalar için uygun olmaları nedeniyle bu tip eyleyicilerin hassas kontrolü kritik öneme sahiptir. Literatürde bu eyleyicilerin modellenmesi ve geliştirilmesi üzerine birçok çalışma yer alırken kontrolü üzerine az sayıda

çalışma yer almaktadır. Bunun nedeni olarak hala KEP eyleyicilerin aktivasyon mekanizmasının tam olarak modellenememesi ve hava ortamında çalışabilen KEP eyleyicilerde meydana gelen iyonik sıvı buharlaşmasından kaynaklanan model bozulmaları verilebilir. Bu durumu kontrol açısından aşmak için sırasıyla ampirik modeller oluşturarak doğrusal kontrol yöntemleri ile bu eyleyicilerin kontrolü gerçekleştirilebilir ve iyonik sıvı buharlaşması engellenerek elde edilen modelin uzun süre geçerliliği sağlanabilir.

Sınırlı sayıda olsa da bu eyleyicilerin kontrol uygulamaları mevcuttur. Qi vd. (2002) PANI eyleyicinin geçici cevabını artırmak için orantısal kontrol yöntemini kullanmıştır. Madden (2003) ise bir PPy eyleyici ve algılayıcı için kapalı çevrim kontrol yönteminin var olduğunu göstermek adına PPy eyleyicinin kontrolünü klasik PID kontrol yöntemi ile gerçekleştirmiştir. Bir diğer benzer çalışmada PID kontrolcü kullanılarak ankastre üç katmanlı KEP eyleyicinin konumlama kabiliyeti geliştirilmiş ve drift problemi giderilmiştir (Yao vd. 2008). Yapılan bu çalışmalarda KEP eyleyicinin uzun süreli kapalı çevrim konumlama kontrolünün geliştirilmesi vurgulanmıştır. Bu amaçla Fang ve Tan (2010) gürbüz uyarlamalı kontrol yöntemi kullanarak KEP eyleyicide uzun süreli çalışmalar sonucu meydana gelen model bozukluklarının neden olduğu konumlama bozuklukları giderilmeye çalışılmıştır. Yine aynı amaçla gürbüz bir kontrol yöntemi olan uyarlamalı kayan kipli kontrol yöntemi KEP eyleyicilerin konumlama ve konum takibi performansları için uygulanmıştır (Wang vd., 2012).

Eyleyicilerin çoğunun periyodik referanslar altında çalıştığı düşünüldüğünde KEP eyleyicilerin periyodik konum takibi kontrolü için periyodik referansların takibinde iyi sonuçlar veren tekrarlamalı kontrol yöntemi önerilmiştir (İtik, 2013). Konumlama kontrolünün dışında bu eyleyicilerin karşı koyma kuvvetinin kontrolü model gerektirmeyen en iyilenmiş bulanık mantık yöntemiyle gerçekleştirilmiştir (İtik vd., 2014). Yukarıda verilen geri beslemeli kontrol yöntemlerinin dışında, geri besleme olanağı bulunmayan uygulamalarda istenilen takip performansına erişebilmek için John vd., (2010) KEP eyleyicilerin kontrolünde ileri beslemeli ters kontrol yöntemini sunmuşlardır.

KEP eyleyici alanında yapılan geliştirmeler hala bu eyleyicilerin uzun sürelerde geri beslemeli kontrolü için tam olarak yeterli değildir ve bu alanda daha iyi sonuçların elde edilebilmesi için yeni geliştirmelerin yapılması gereklidir.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Konjuge EAP Eyleyicinin Modellenmesi

#### 2.1.1. Siyah Kutu Modelleme Yöntemi

Kompleks sistemlerin dinamiğinin fiziksel yöntemler ile modellenmesi zordur ve çoğu zaman tam bir model elde edilmesi olanaksızdır. Siyah kutu modelleme yöntemi ise sistemin fiziksel özellikleri bilinmeden sadece girdi/çıkı ilişkisi kullanılarak sistemin dinamik davranışının modellenmesine olanak tanımaktadır. Bu yöntemde sistem bir siyah kutu olarak düşünülmekte ve bilinen bir girdi değerine karşılık sistemin çıkıtısı toplanarak sistemin matematiksel modeli elde edilmektedir. Ayrıca bu yöntem sistem tanılama olarak da bilinmektedir. Bir siyah kutu sisteminin şematik gösterimi Şekil 2.1’de verilmiştir.

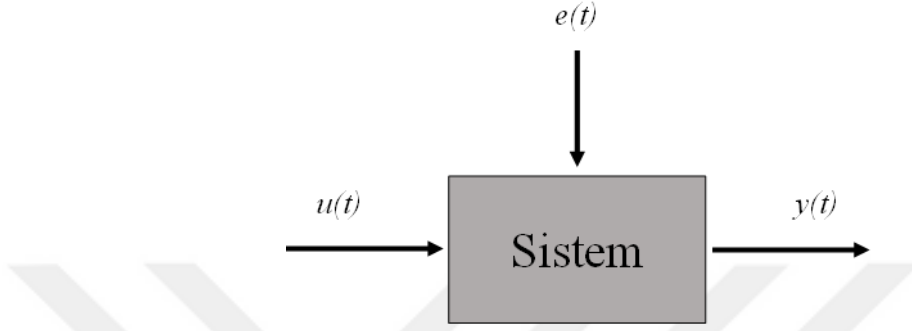


Şekil 2.1. Siyah kutu modelleme yöntemi şematik gösterimi

Bu tez çalışmasında deneysel kontrol ve benzetim uygulamalarında eyleyicinin modeline ihtiyaç duyulmuştur. Bu nedenle, fiziksel modellemesi zor olan ankastre EAP eyleyicilerin serbest ucunun konum ve kuvvet değişkenlerinin dinamik davranışının modeli siyah kutu modelleme yöntemi ile elde edilmiştir. Bu yöntemde EAP eyleyicilerin doğrusal zamanla değişmeyen (linear time invariant-LTI) transfer fonksiyonlarının elde edilmesi amacıyla (Auto Regressive with Exogenous input) ARX modeli kullanılmıştır. ARX modelinin parametrelerinin bulunması amacı ile En Küçük Kareler Yöntemi (EKKY) kullanılmıştır.

### 2.1.1.1. ARX Modeli

Doğrusal bir süreç modeli olan ARX modelinin giriş-çıkış büyüklükleri arasındaki temel ilişki aşağıdaki şekildeki gibi verilebilir.



Şekil 2.2. Giriş-çıkış büyüklükleri arasındaki temel ilişki

Bu model aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$A(p)y(t) = B(p)u(t - nk) + g(t) \quad (2.1)$$

$$na: \quad A(p) = 1 + a_1p^{-1} + \dots + a_{na}p^{-na} \quad (2.2)$$

$$nb: \quad B(p) = b_1 + b_2p^{-1} + \dots + a_{nb}p^{-nb+1} \quad (2.3)$$

$$p^{-nk}u(t) = u(t - nk) \quad (2.4)$$

burada  $u(t)$  giriş büyüklüğü,  $y(t)$  çıkış büyüklüğü,  $g(t)$  filtrelenmiş gürültü,  $nk$  zaman gecikmesi,  $na$  model kutup sayısı ve  $nb$  model sıfırları sayısı,  $p$  gecikme operatörü,  $A(p)$  ve  $B(p)$  ise yukarıda verildiği üzere ARX modelin polinom fonksiyonlarıdır. Gecikme operatörü ise (2.4) eşitliğini sağlamaktadır.

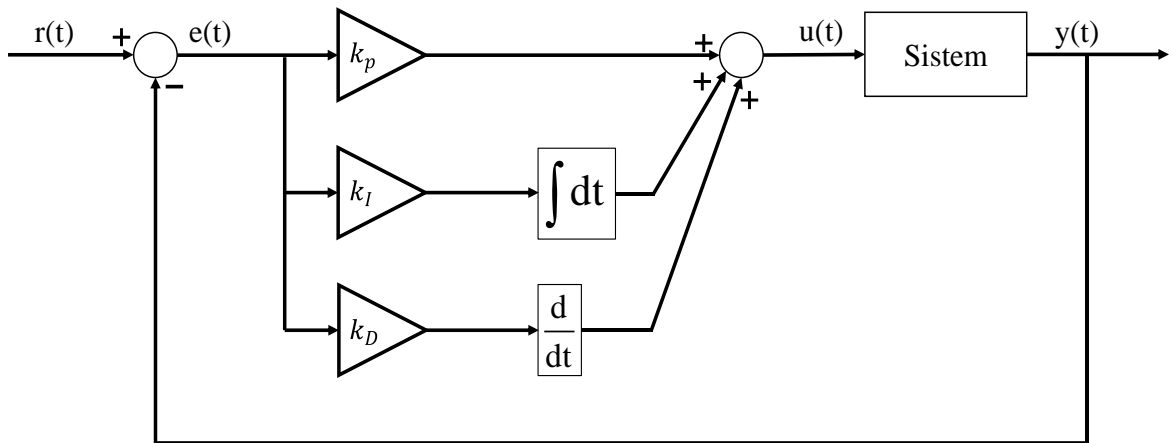
Bu verilen denklemden  $A(p)$  ve  $B(p)$  polinomlarının parametreleri EKKY ile çözdürülerek bulunabilmektedir. Böylelikle bir sistemin girdi ve çıktısı arasındaki doğrusal transfer fonksiyonu elde edilmiş olur.

## 2.2. Kontrol Yöntemleri

### 2.2.1. PID Kontrolcü

PID kontrolcü en sık kullanılan geri beslemeli kontrol yöntemidir. Bu tez çalışmasında, KEP eyleyicinin geri beslemeli kontrol performanslarının incelenmesi ve uygulanan diğer kontrol yöntemlerinin performanslarının karşılaştırılması amacıyla kullanılmıştır.

Bir PID kontrolcü oransal ( $k_p$ ), integral ( $k_I$ ) ve türev ( $k_D$ ) olmak üzere üç temel parametre den oluşmaktadır.  $k_p$  mevcut hataya bağlı bir parametre,  $k_I$  geçmiş hataların toplamı ve  $k_D$  gelecekteki hataların bir tahmini olarak tanımlanabilir. Bir sürecin kontrolünde bu üç parametrenin ağırlıklı toplamı, sistem çıktısı  $y(t)$  ile referans değer  $r(t)$  arasındaki hatayı  $e(t)$  minimum seviyede tutmak için bir kontrol girdisini  $u(t)$  üretmektedir. Bazı uygulamalarda bu üç parametreden ikisi veya biri kullanılmaktadır.  $k_D$  parametresi gürültülü sinyallere hassas olduğundan gürültülü sinyal içeren uygulamalarda genellikle  $k_p$  ve  $k_I$  parametreleri kullanılmaktadır. Parametrelerin değerleri sistem cevabına bakılarak manüel olarak belirlenebileceği gibi çeşitli yöntemler kullanılarak da optimize edilebilmektedir. Bu kontrolcünün parametrelerinin uygunsuz seçilmesi ise kararsız sistem davranışına neden olabilmektedir. PID kontrolcü şematik gösterimi ve transfer fonksiyonu aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.3 PID kontrol sistemi şematik gösterimi.

$$\left[ \frac{U(s)}{E(s)} \right] = G_c(s) = k_p + \frac{k_I}{s} + k_d s \quad (2.5)$$

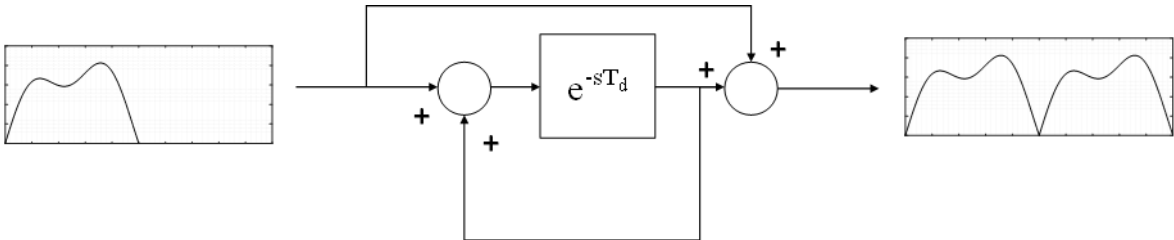


### 2.2.2. Tekrarlamalı Kontrol (Repetitive Control) Yöntemi

Tekrarlamalı kontrol yöntemi, bir sistemin kontrolünde periyodik referans sinyallerinin takibi ve/veya periyodik bozucu etkilerin elenmesinde iyi sonuçlar veren bir kontrol yöntemidir (Hara vd., 1988). Bu kontrol yöntemi; periyodik çalışan bir sistemin önceki döngüsünde meydana gelen hatadan faydalanarak bir sonraki döngüde hatayı düzeltmek için kontrol sinyali üreten, öğrenen bir kontrol yöntemidir (İtik, 2013). Bir geri besleme kontrol sisteminde üç farklı durum için iyi sonuçlar vermektedir (Longman, 2010). Bu durumlar;

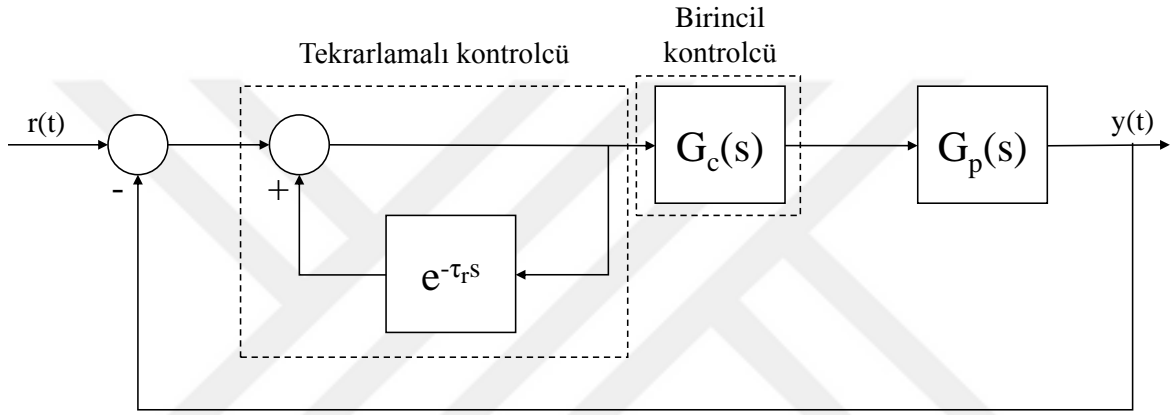
- Periyodik referans sinyallerinin sifıra yakın hata ile takip edilmesi,
- Sabit bir referans sinyalinin takibinde periyodik bozucu sinyallerin elenmesi
- Periyodik bir sinyalin takibinde meydana gelen bozucu periyodik sinyallerin elenmesidir.

Tekrarlamalı kontrol sistemi tasarımında dâhili model (internal model) prensibi önemli oranda yer almaktadır. Bu prensip kullanılarak, bir kapalı çevrim sisteminde yer alan modelin, referans sinyalini üretmesi durumunda sistem çıktısı, kalıcı hal (steady-state) hatası olmaksızın referans sinyalini takip edilebilmektedir. Kapalı çevrimde periyodik sinyalin üretilmesi Şekil 2.4'de verildiği üzere bir zaman gecikmesi (time delay) sistemi kullanılarak gerçekleştirilebilir.



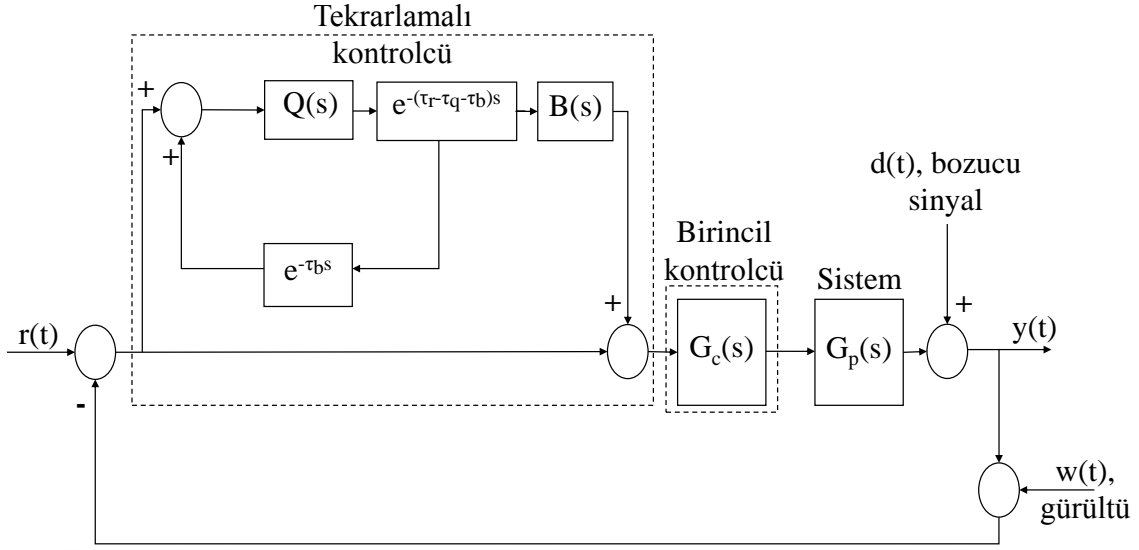
Şekil 2.4. Periyodik sinyal üretici

Tipik bir tekrarlamalı kontrol sistemi ise Şekil 2.5'te verilmiştir. Bu sistemde tekrarlamalı kontrolcünün transfer fonksiyonu  $1/(1-e^{-\tau_r s})$  dir. Bu transfer fonksiyonunun kutupları ( $s = jk\omega_n$  ;  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , ve  $\omega_n = 2\pi/\tau_r$ ) sonsuz sayıdadır ve  $\tau_r$  periyodundaki her periyodik sinyalin zaman gecikmeli dâhili model yapısını oluşturma yeteneğine sahiptir (Cuiyan vd., 2004). Bu zaman gecikmesi sistemini içeren kontrolcü tekrarlamalı kontrolcü olarak ve bu kontrolcüyü içeren sistem ise tekrarlamalı kontrol sistemi olarak adlandırılmaktadır (Hara vd., 1988).



Şekil 2.5. Tipik bir tekrarlamalı kontrolcü yapısı

Burada birincil kontrolcü herhangi bir kontrol yöntemi olarak seçilebilir. Uygulamada, sadece dâhili model içeren tipik (basit) tekrarlamalı kontrol yöntemi, dâhili model prensibinin geniş faz kaymasından dolayı, sıklıkla çok dar bir kapalı döngü bant genişliği verir. Böyle bir sistem kalıcı hal durumunda periyodik referans sinyalini mükemmel bir şekilde takip etse dahi geçici hal cevabı (transient response) yavaş olur ve zayıf takip performansı gösterebilir (Tsai ve Yao, 2002). Bu durumda tekrarlamalı kontrolcünün uygulamada iyi bir tırmanma performansı gösterebilmesi için kapalı çevrim bant genişliği artırılmalıdır. Bant genişliğinin artırılması için ek olarak alçak geçirenlikte filtreler kullanılan tekrarlamalı kontrol yöntemleri geliştirilmiştir (Tsai ve Yao, 2002; Tomizuka vd., 1989; Srinivasan ve Shaw, 1991; Demirel ve Guvenc, 2010). Bu tez çalışmasında da bu geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcülerden biri kullanılmıştır. Kullanılan geliştirilmiş tekrarlamalı kontrol yöntemi hakkında detaylı bilgiye (Necipoglu vd., 2011; Choi vd., 2002) çalışmalarından ulaşılabilir. Bu yöntemin blok diyagramı Şekil 2.6'daki gibidir.



Şekil 2.6. Alçak geçiren filtrelerle geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcü yapısı

Burada;  $G_c(s)$  birincil kontrolcü,  $Q(s)$  ve  $B(s)$  alçak geçiren filtreler,  $\tau_r$  referans sinyalinin periyodu,  $\tau_q$  ve  $\tau_b$   $Q(s)$  ve  $B(s)$  filtrelerinden dolayı kaynaklanan zaman gecikmelerini dengelemek için kullanılan zaman kazançlarıdır.

Tekrarlamalı kontrolcü genellikle bir birincil kontrolcü ile birlikte kullanılmaktadır. Birincil kontrolcü; tekrarlamalı kontrolcünün kararlılığını ve geçici hal cevabını artırmak için kullanılan bir geri beslemeli kontrolcüdür. Birincil kontrolcü olarak genellikle PID kontrolcü seçilmektedir.

$Q(s)$  alçak geçiren filtresi  $Q(s \rightarrow 0)$  iken birim kazanca sahiptir ve yüksek frekansa sahip gürültüyü ve model belirsizliklerini filtrelemek için kullanılmaktadır. Kontrol sisteminin kontrol bant genişliği ve yüksek frekanslarda sistemin kararlılığıyla doğrudan ilişkilidir.

$B(s)$  filtresi ise tekrarlamalı kontrol sisteminin performansını ve kararlılığını geliştiren bir alçak geçiren filtredir.

$Q(s)$  ve  $B(s)$  filtrelerinin sistem kararlılığı ve performansı üzerine olan etkileri büyüktür. Bu etkiler rejenerasyon spektrumu  $R(\omega)$  adı verilen bağıl kararlılık ölçütünden açıkça çıkarılabilir (Srinivasan ve Shaw, 1991).

$$R(\omega) = \left| Q(j\omega)(1 - B(j\omega))\bar{G}(j\omega) \right| \quad (2.6)$$

Burada;

$$\bar{G}(j\omega) = \frac{G_p(j\omega)G_c(j\omega)}{1 + G_p(j\omega)G_c(j\omega)} \quad (2.7)$$

Rejenerasyon spektrumu kararlı kapalı döngü dinamiklerini sağlamak için  $R(\omega) < 1$  şartını bütün  $\omega$  değerleri için sağlamalıdır. Bu şart,  $B(s)$  filtresinin aşağıdaki yöntemle oluşturulmasıyla sağlanabilir.

$$B(j\omega) = \frac{1 + G_p(j\omega)G_c(j\omega)}{G_p(j\omega)G_c(j\omega)} \quad (2.8)$$

Eşitlik (2.8)'de verildiği üzere B filtresi sadece  $\bar{G}(j\omega)$  fonksiyonunun tersidir. Ancak  $\bar{G}(j\omega)^{-1}$  transfer fonksiyonu pay/payda derecelerinden dolayı gerçekleştirilebilir bir transfer fonksiyonu olmayabilir. Bu sorunu ortadan kaldırmak (2.8) eşitliği genellikle uygun bir alçak geçiren filtre ile birlikte kullanılmaktadır.

Şekil 2.6. Alçak geçiren filtrelerle geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcü yapısı (Şekil 2.6) için hassasiyet fonksiyonu aşağıdaki gibi verilebilir.

$$S_0(s) = 1 / (1 + G_p(s)G_c(s)) \quad (2.9)$$

Burada, sistemin kararlılığının garanti edilebilmesi için;

$$Q(j\omega_s) < \frac{1}{M_s} \quad (2.10)$$

sağlanmalıdır ve  $M_s \triangleq \|S_0\|_\infty$  ve  $|S_0(j\omega_s)| = 1$  olarak tanımlıdır.  $\|\cdot\|_\infty$  fonksiyonu kararlı transfer fonksiyonunun  $H_\infty$  normunu göstermektedir.

Bir alçak geçiren filtre olan  $Q(j\omega)$  filtresi istenilen özelliklere göre tasarlanabilmektedir. Yüksek kesme frekansları hızlı tepki vermeyi sağlar fakat bu durumda tekrarlamalı kontrolcü tarafından üretilen kontrol sinyali gürültülü olabilir ve bu durum sistemde kararsızlık oluşturabilir (Necipoglu vd., 2011). Eğer  $Q(j\omega)$  filtresinin derecesinin

2 olarak seçilmesi göz önüne alınırsa  $Q(s)$  filtresinin tasarımı kesme frekansı  $\omega_q$ 'nin seçimine, sönüm faktörü  $\zeta_q$  ve küçük zaman kazancı  $\tau_q$  tarafından belirlenen filtre kazancının eğimine bağlı olarak verilebilir. İkinci dereceden bir  $Q(s)$  alçak geçiren filtresi;

$$Q(s) = \frac{1}{s^2 / \omega_q^2 + 2\zeta_q s / \omega_q + 1} \quad (2.11)$$

Sönüm faktörü  $\zeta_q$  filtrede düzgün genlik ve doğrusal faz kayması karakteristikleri elde etmek için 1,4142 seçilebilir (Srinivasan ve Shaw, 1991). Kesme frekansının üst sınırı ise kararlılık açısından aşağıdaki eşitliği sağlayacak şekilde seçilmelidir.

$$\omega_q < \sqrt{\sqrt{\left(\frac{\omega_s^2 - 2\zeta^2 \omega_s^2}{M_s^2 - 1}\right)^2 + \frac{\omega_s^4}{M_s^2 - 1}} - \frac{\omega_s^2 - 2\zeta^2 \omega_s^2}{M_s^2 - 1}} \quad (2.12)$$

Küçük zaman dengeleme katsayıları  $\tau_b$  ve  $\tau_q$ , ise  $Q(s)$  ve  $B(s)$  filtrelerinin faz diyagramları kullanılarak seçilebilir.

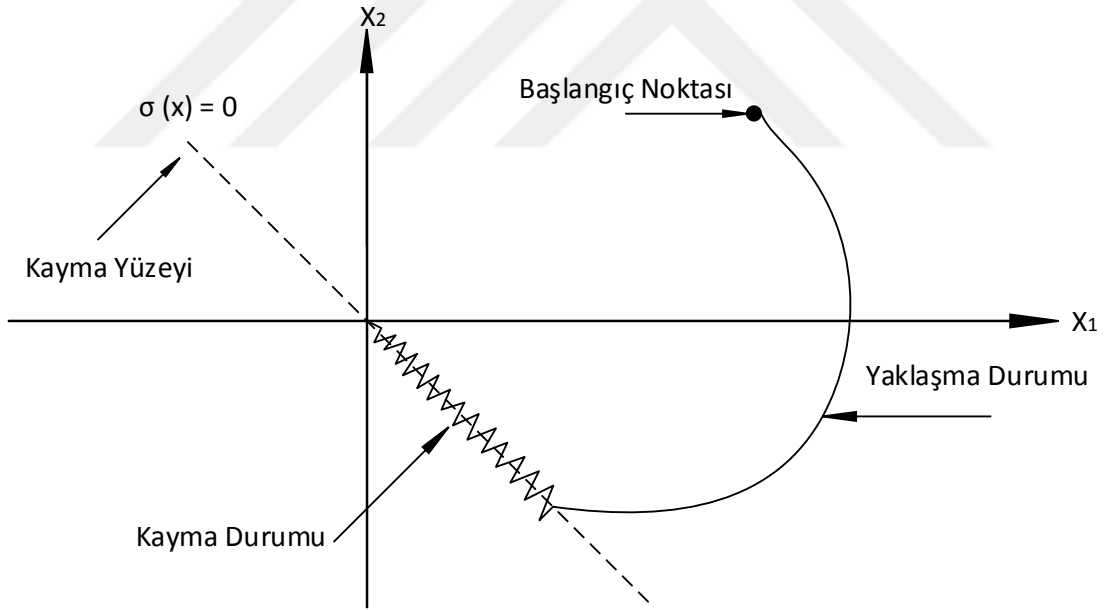
Tekrarlamalı kontrolcüyü rejenerasyon spektrumuna göre tasarlamamanın bir başka avantajı ise spektrumun tepe değerinden  $\|R(j\omega)\|_\infty$  takip hatasının azalma oranının bulunabilmesidir. Eğer  $\|R(j\omega)\|_\infty$  küçültülebilirse sistem daha iyi takip performansı gösterir.  $Q(s)$  filtresi ise referans giriş sinyalinin sadece bazı harmoniklerinin geçmesine izin verdiği için kalıcı hal hatası her zaman sıfır olmayabilir. Teorik olarak kalıcı hal hatası  $Q(s)$  filtresinin bant genişliğini artırarak azaltılabilir.  $\omega_q$  değerinin artırılması kalıcı hal hatasının azalmasını sağlar fakat bu durumda sistemin kararlılığı ve gürbüzlük azalabilir. Buda tekrarlamalı kontrol yönteminde kararlılık ve performans arasındaki ters ilişkiyi gösterir (Necipoglu vd., 2011).

Tekrarlamalı kontrol yöntemi yapısı gereği sistemin ilk periyodundan sonra aktif olmaktadır. Ayrıca iyi bir takip performansı için referans sinyalinin veya bozucu elenmesi için bozucu girdinin periyodunun bilinmesi gerekmektedir.

### 2.2.3. Kayan Kipli Kontrol (KKK)

Değişken yapıli kontrol (Variable structure control) sistemlerinin bir alt türü olarak KKK, sistem belirsizlikleri ve bozucu etkilere karşı etkin sonuçlar vermesi ile bilinmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan eyleyicinin tam olarak modellenmesinin imkânsızlığı düşünüldüğünde eyleyicinin kontrolü için KKK kullanılması etkin sonuçlar ortaya koyacaktır.

KKK yöntemi kısaca; bir sistemin durum vektörünün istenilen bir dinamik davranışa çekilmesi ve bu davranışın korunarak denge durumuna ulaşılması temeline dayanmaktadır. Bu dinamik davranış sistemin faz düzleminde belirlenen bir kayma yüzeyi etrafında gerçekleşmektedir (Edwards ve Spurgeon, 1998). Error! Reference source not found.'de ikinci dereceden bir sistem için kayma yüzeyi, çekilme durumu ve kayma durumu verilmiştir.



Şekil 2.7 İkinci dereceden bir sistem için doğrusal kayma yüzeyi

KKK yönteminde amaç; sistemin durum vektörünün bu yüzeye çekilmesi ve bu yüzey etrafında belirlenen dinamik davranışı sergilemesi için iki ayrı kontrol kuralı oluşturmaktır. Bu kontrol kuralları sırasıyla uygun bir geri besleme kuralı ve bir karar verme kuralından oluşmaktadır.

KKK tasarımında ilk olarak, sistemin denge noktasına ulaşmasını sağlayan ve  $\sigma = 0$  ile tanımlanan bir kayma yüzeyinin tasarımı yapılmalıdır. Bu tasarımın yapılmasının bir yolu sistemin düzenli yapıya getirilerek kontrol teriminin olduğu ve olmadığı iki alt sistem haline ayrılmasıdır. Düzenli yapının meydana getirilmesi ise uygun bir koordinat dönüşüm matrisi seçilerek yapılabilmektedir. Bundan sonra kayma yüzeyi kontrol teriminin olmadığı alt yapıyı kararlı yapacak şekilde tasarlanmaktadır (Utkin, 1977; Utkin, 1978). Doğrusal bir sistem için kayma yüzeyi tasarımı aşağıdaki şekilde ele alınabilmektedir.

Bir dinamik sistem eşitlik (2.13) gibi verilsin;

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \xi(t, x) \quad (2.13)$$

burada sistem;  $n$  dereceden ve  $m$  girişli doğrusal zamanla değişmeyen bir sistem olmak üzere  $A \in R^{n \times n}$ ,  $B \in R^{n \times m}$ ,  $x \in R^n$ ,  $u \in R^m$  olarak tanımlıdır.  $\xi(t, x)$  fonksiyonu alt ve üst sınırları bilinen bozucu ve model belirsizliklerini belirtmektedir. Böyle bir sistemin kayma yüzeyi  $(n - m)$  boyutlu doğrusal bir yüzey olmaktadır. Bu kayma yüzeyi durum değişkenlerine bağlı olarak  $S \in R^{m \times n}$  ile tanımlı olan bir yüzey eğim matrisi ile aşağıdaki şekilde verilebilmektedir.

$$\sigma(x) = Sx = 0 \quad (2.14)$$

burada bir Lyapunov fonksiyonu olarak seçilen  $\sigma(x)$  fonksiyonu, kararlılığın ve yüzeye çekilme durumunun sağlanması amacıyla (2.15) eşitsizliğini sağlamalıdır.

$$\sigma(x)\dot{\sigma}(x) < 0 \quad (2.15)$$

Kayma yüzeyi eğim matrisinin oluşturulabilmesi amacıyla bir  $z = Tx$  koordinat dönüşümü kullanılarak sistemin düzenli yapıya getirilebildiği kabul edilsin. Burada  $T \in R^{m \times n}$  matrisi ortogonal simetrik, tersi var olan ve dinamik sistemi kontrol girişinin bulunduğu  $(n - m)$  boyutlu ve kontrol girişinin bulunmadığı  $(m)$  boyutlu iki alt sisteme ayırabilecek şekilde seçilmelidir. Bu dönüşümün uygulanması ile sistem aşağıdaki denklemler ile tanımlanan kontrol girdisinin olduğu ve olmadığı iki alt sisteme ayrılmıştır.

$$\dot{z}_1 = \bar{A}_{11}z_1 + \bar{A}_{12}z_2 \quad (2.16)$$

$$\dot{z}_2 = \bar{A}_{21}z_1 + \bar{A}_{22}z_2 + \bar{B}u \quad (2.17)$$

burada;  $\bar{A}_{11} \in R^{(n-m)x(n-m)}$ ,  $\bar{A}_{12} \in R^{(n-m)x(m)}$ ,  $\bar{A}_{21} \in R^{(m)x(n-m)}$ ,  $\bar{A}_{22} \in R^{(n-m)x(n-m)}$ ,  $\bar{B} \in R^{(n-m)x(m)}$ ,  $z_1 \in R^{(n-m)}$ ,  $z_2 \in R^{(m)}$ ,  $u \in R^{(m)}$  ve  $\bar{A} = TAT^{-1}$  ve  $\bar{B} = TB$  olarak tanımlıdır.

Dönüşümün yapılması ve sistemin iki alt yapıya ayrılmasından sonra kayma yüzeyi;

$$\sigma(z) = Sz = 0 \quad (2.18)$$

$$\sigma(z) = [S_1 \ S_2] \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (2.19)$$

burada  $S_1 \in R^{1x(n-m)}$ ,  $S_2 \in R^1$  şeklinde tanımlıdır ve  $S_1 \neq 0, S_2 \neq 0$  olmalıdır. Bu tanımlarla aşağıdaki denklemler elde edilebilir.

$$\sigma(z) = S_1z_1 + S_2z_2 = 0 \quad (2.20)$$

$$z_2 = -S_2^{-1}S_1z_1 \quad (2.21)$$

burada  $S_2^{-1}S_1 = M$  tanımı yapılırsa ve (2.21) eşitliği (2.16)'de yerine konularak aşağıdaki indirgenmiş (reduced) sistem elde edilir.

$$\dot{z}_1 = \underbrace{[\bar{A}_{11} - \bar{A}_{12}M]}_{A_{red}} z_1 \quad (2.22)$$

Bu aşamadan sonra indirgenmiş sistemde kararlı davranışını sağlanması için bu sistemin kutuplarının negatif gerçek kısımlara sahip olması yeterlidir. Bu amaçla, kök yerleştirme metodu veya doğrusal karesel düzenleyici (linear quadratic regulator-LQR) metodu kullanılarak kayma yüzeyi parametreleri belirlenebilmektedir.



LQR, durum geri besleme kontrol probleminin özel bir tipidir. Bu yöntem kullanılarak kontrol edilebilir ve başlangıç koşulları verilen sistemin durumlarını orijine çekecek olan kontrol girişi, aşağıdaki maliyet (cost) fonksiyonun minimize edilmesiyle belirlenebilmektedir.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \{x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)\} dt \quad (2.23)$$

burada  $Q$  ve  $R$  sırasıyla pozitif tanımlı simetrik durum ağırlık matrisi ve pozitif tanımlı simetrik kontrol ağırlık matrisidir. Optimal kontrol girdisi ise aşağıdaki şekilde belirlenebilir.

$$u(t) = -Kx(t) = -R^{-1}B^T X x(t) \quad (2.24)$$

burada  $X$  Riccati denkleminin (2.25) simetrik ve pozitif tanımlı ( $X \geq 0$ ) çözümüdür.

$$A^T X + XA - XBR^{-1}B^T X + Q = 0 \quad (2.25)$$

Kayma yüzeyinin belirlenmesinden sonra KKK için ikinci durum kontrolcü tasarlanması sürecidir. Kontrolcü tasarımı sistemi kayma yüzeyi dinamiği ile eşdeğerleyen kontrol girişi ve sistemi kayma yüzeyi üzerine çeken ve tutan kontrol girişi olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır.

Eşdeğerleyen kontrol girişi  $u_{eq}$ , kayma yüzeyi türevinin sıfıra eşitlenmesi ile belirlenebilmektedir. Kayma yüzeyi fonksiyonundaki  $S_2$  terimi genel olarak girdi büyüklüğünde birim matris olarak alınabilmektedir. Bu seçim ile birlikte tek girdili bir sistem için kayma yüzeyi fonksiyonunun (2.20) türevi alınarak elde edilen  $\dot{z}_1$  ve  $\dot{z}_2$ , eşitlik (2.16) ve (2.17)'te yerine konulup kontrol girdisi aşağıdaki şekilde belirlenir.

$$u_{eq}(t) = -\bar{B}^{-1}[(S_1 \bar{A}_{11} + \bar{A}_{21}) + (S_1 \bar{A}_{12} + \bar{A}_{22})z_2] \quad (2.26)$$

Sistemi kayma yüzeyinde çeken kontrol kuralı ise eşitlik (2.27) şeklinde bir fonksiyon olabilmektedir.

$$u_n(t) = -\rho \operatorname{sgn}(\sigma) \quad (2.27)$$

burada;  $\rho$  sabit katsayısı kontrol performansından istenilen sonuçlara göre belirlenebilmektedir ve tek girdili tek çıktılı bir sistem için pozitif bir sayıdır.  $\operatorname{sgn}$  işaret fonksiyonudur. Toplam kontrol girdisi ise aşağıdaki gibidir.

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_n(t) \quad (2.28)$$

### 2.2.3.1. Kayan Kipli Gözlemci Tasarımı

KKK tasarımında birçok yaklaşım, durum vektörlerinin elde edilebilir olması temeline dayanmaktadır. Fakat bazı durumlarda durum vektörlerinin elde edilmesi imkânsızdır veya çok pahalı olmaktadır. Böyle bir durumda sistemden elde edilen çıktı yardımıyla sistem durum vektörlerinin gözlenmesi uygun bir yöntem olmaktadır. Bu amaçla bir gözlemci tasarımı yapılarak sistem durumları tahmin edilmektedir. Bu gözlemcilerin bir türü Utkin gözlemcisidir.

#### 2.2.3.1.1. Utkin Gözlemcisi

Bir kayan kipli gözlemci olan Utkin gözlemcisi tasarımında aşağıdaki yöntemler izlenebilir (Utkin, 1992).

Aşağıdaki yapıda doğrusal bir sistem verilsin;

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.29)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (2.30)$$

Burada  $A \in R^{(n \times n)}$ ,  $B \in R^{(n \times m)}$ ,  $C \in R^{(p \times n)}$ ,  $p \geq m$  ve  $(A, C)$  çifti gözlemlenebilir olarak tanımlanmaktadır. Çıktıların, durum değişkenleri ile gösterilebilmesi için bir  $x \rightarrow T_c x$  dönüşümü yapılır.

$$T_c = \begin{bmatrix} N_c^T \\ C \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Burada  $N_c^T \in R^{n \times (n-p)}$  matrisinin sütunları  $C$  matrisinin sıfır uzayını kapsamaktadır ve dönüşüm tekil değildir. Bu dönüşüm ile birlikte yeni çıktı dağıtım matrisi;

$$\bar{C} = CT_c^{-1} = [0 \quad I_p] \quad (2.32)$$

olarak tanımlanır. Diğer sistem matrisleri ise aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\bar{A} = T_c A T_c^{-1} \quad (2.33)$$

$$\bar{B} = T_c B \quad (2.34)$$

Dönüşümün uygulanmasıyla nominal sistemin kanonik formu aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\dot{x}_1(t) = A_{11}x_1(t) + A_{12}y(t) + B_1u(t) \quad (2.35)$$

$$\dot{y}_1(t) = A_{21}x_1(t) + A_{22}y(t) + B_2u(t) \quad (2.36)$$

burada  $T_c x$  ;

$$T_c x = \begin{bmatrix} x_1 \\ y \end{bmatrix} \begin{matrix} \downarrow n-p \\ \uparrow p \end{matrix} \quad (2.37)$$

olarak tanımlıdır. Utkin tarafından sunulan gözlemci ise aşağıdaki formdadır.

$$\dot{\hat{x}}_1(t) = A_{11}\hat{x}_1(t) + A_{12}\hat{y}(t) + B_1u(t) + Lv \quad (2.38)$$

$$\dot{\hat{y}}(t) = A_{21}\hat{x}_1(t) + A_{22}\hat{y}(t) + B_2u(t) - v \quad (2.39)$$

burada  $(\hat{x}_1, \hat{y})$  tahmin edilen durumları,  $L \in R^{(n-p) \times p}$  gözlemci kazanç matrisini ve süreksiz vektör (2.40) eşitliğindeki gibi tanımlıdır.

$$v_i = M \operatorname{sgn}(\hat{y}_i - y_i), \quad M \in R_+ \quad (2.40)$$

Tahmin edilen durumlar ve gerçek durumlar arasındaki hata  $e_1 = \hat{x}_1 - x$  ve  $e_y = \hat{y} - y$  olarak verilirse hata sistemi aşağıdaki gibi belirlenir.

$$\dot{e}_1(t) = A_{11}e_1(t) + A_{12}e_y(t) + Lv \quad (2.41)$$

$$\dot{e}_y(t) = A_{21}e_1(t) + A_{22}e_y(t) - v \quad (2.42)$$

Eğer  $(A, C)$  çifti gözlemlenebilir ise  $(A_{11}, A_{21})$  çifti de gözlemlenebilir olmaktadır. Sonuç olarak  $L$  kazanç matrisi  $A_{11} + LA_{21}$  sistemi kullanılarak kök yerleştirme yöntemleri ile bulunabilmektedir. Koordinat sistemi  $L$  ye bağlı olarak bir  $\tilde{T}$  dönüşüm matrisi ile bir başka dönüşüme tabi olursa;

$$\tilde{T} = \begin{bmatrix} I_{n-p} & L \\ 0 & I_p \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

ve  $\tilde{e}_1 = e_1 + Le_y$  olarak tanımlanırsa hata sistemi aşağıdaki eşitlikler ile belirlenir.

$$\dot{\tilde{e}}_1(t) = \check{A}_{11}\tilde{e}_1(t) + \check{A}_{12}e_y(t) \quad (2.44)$$

$$\dot{e}_y(t) = A_{21}\tilde{e}_1(t) + \check{A}_{22}e_y(t) - v \quad (2.45)$$

burada  $\check{A}_{11} = A_{11} + LA_{21}$ ,  $\check{A}_{12} = A_{12} + LA_{22}$  ve  $\check{A}_{22} = A_{22} - A_{21}L$  olarak tanımlıdır. Erişim koşulu ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$e_y^T \dot{e}_y < -\eta \|e_y\| \quad (2.46)$$

Herhangi bir  $\eta < M$  küçük skaler büyüklüğü için erişim sağlanmaktadır. Sonuç olarak kayma hareketinin yer alacağı kayma yüzeyi (2.47) eşitliğindeki gibi belirlenebilir.

$$\sigma_o = \{(e_1, e_y) : e_y = 0\} \quad (2.47)$$

Bu koşullarla birlikte sistem izleme hatası sonlu zaman içerisinde sıfır değerine ulaşacaktır. Böylelikle eşitlik (2.44) aşağıdaki forma indirgenebilir.

$$\dot{\tilde{e}}_1(t) = \tilde{A}_{11}\tilde{e}_1(t) \quad (2.48)$$

$L$  kazanç matrisinin uygun olarak seçilmesi sistemin kararlılığı açısından yeterli olmaktadır ve  $\tilde{e}_1 \rightarrow 0$  sağlanmaktadır.

### 2.2.3.2. KKK ile Referans Yörünge İzleme Kontrolü

Bir referans değerinin KKK yöntemi ile takibini açıklamak için aşağıdaki gibi bir dinamik sistem ele alınsın;

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.49)$$

burada,  $u \in R$  kontrol girişi,  $x \in R$  kontrol edilecek çıkış ve  $x = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]^T \in R$  durum vektörüdür. Sistem belirsizliklerinin ise sınırlandırılmış olduğu kabul edilmektedir. Bu sistemin referans değerini takip etmesini sağlamak için sistem durumları ile referans olarak belirlenen durum vektörü arasındaki farkın sifıra yaklaşması istenilmektedir. Yani hata vektörü;  $e = x - x_r = [e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)}]^T = 0$  olması sağlanmalıdır (Slotine, 1991). Bu amaç için KKK yönteminde ikinci mertebeden bir sistem için zamanla değişen kayma yüzeyi aşağıdaki gibi tasarlanabilmektedir.

Daha önceden bahsedildiği gibi KKK tasarımı kayma yüzeyi ve yüzey dışı dinamikler olmak üzere iki ayrı kısımda incelenmektedir. Yüzey dışı dinamikler sistemin kayma yüzeyine ulaşmasını sağlayacak şekilde aşağıdaki yapıda olabilir (Fernández, ve Hedrick., 1987).

$$\dot{\sigma} = -f(\sigma) \quad (2.50)$$

burada  $f(\sigma)$  azalmayan tek bir fonksiyondur. Buradan anlaşılacağı üzere mevcut durumun kayma yüzeyine olan mesafesini veren  $\sigma$  fonksiyonundaki değişim, daima  $\sigma$  fonksiyonunun zıttı işarete sahiptir. Bu denklem kararlı bir kontrolün uygulanması için gereklidir ve bu şekilde bir kontrolün uygulanabilmesi için  $\dot{\sigma}$  fonksiyonu, kontrol girdisinin bir fonksiyonu olmalıdır. Bu durumun uygulanabilmesi için  $\dot{\sigma}$ , hatanın ikinci türevinin bir fonksiyonu olmalıdır. Böyle bir durumda  $\sigma$  fonksiyonu; yalnızca hata ve hatanın birinci türevini içeren bir fonksiyonu olabilmektedir. Bir başka ifade ile erişilebilirlik kistası;

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} \sigma^2 \leq -\mu |\sigma| \quad (2.51)$$

sağlanmalıdır. Burada  $\mu$  sabit pozitif bir sayıdır.

En basit şekilde, zaman sonsuza giderken hata değerinin sıfıra gitmesini garantileyen kayma yüzeyi fonksiyonu ise aşağıdaki gibi seçilebilmektedir.

$$\sigma = \dot{e} + \lambda e = 0 \quad (2.52)$$

burada  $\lambda$  sabit bir pozitif katsayıdır. Sonuç olarak eğer  $\sigma$  sıfıra götürülürse tırmanma hatası da sıfıra gidecektir.

İkinci mertebeden bir sistemin kontrol sinyalinin bulunması amacıyla sistem aşağıdaki şekilde ifade edilirse;

$$\ddot{x} = -a_1 \dot{x} - a_2 x + bu \quad (2.53)$$

burada  $x$  çıktı,  $u$  ise girdi değeridir. Kayma yüzeyi ise aşağıdaki şekilde hata ve türevinin bir fonksiyonu olarak verilebilir.

$$\sigma = \dot{e} + \lambda e = \dot{x} - \dot{x}_r + \lambda(x - x_r) \quad (2.54)$$

Kontrol değerinin bulunabilmesi için yüzeyin türevi sıfıra eşitlenirse

$$\dot{\sigma} = \ddot{x} - \ddot{x}_r + \lambda(\dot{x} - \dot{x}_r) = \dot{x} - a_1\dot{x} - a_2x + bu - \ddot{x}_r + \lambda(\dot{x} - \dot{x}_r) = 0 \quad (2.55)$$

Erişim kuralı olarak denklem (2.50)'deki gibi bir fonksiyon belirlenirse; eşitlik (2.50) ve (2.55) kullanılarak toplam kontrol sinyali denklemindeki gibi elde edilir.

$$u = \frac{1}{b} [\ddot{x}_r - \lambda(\dot{x} - \dot{x}_r) - f(\sigma) + a_1\dot{x} + a_2x] \quad (2.56)$$

Bu tez çalışmasında erişim kuralı olarak; eşitlik (2.57) ve (2.58) ile verilen fonksiyonlar kullanılacaktır.

$$f(\sigma)_1 = -\delta\sigma \quad (2.57)$$

$$f(\sigma)_2 = -\rho \operatorname{sgn}(\sigma) \quad (2.58)$$

burada  $\delta$  ve  $\rho$ , tek girdili ikinci mertebeden bir sistem için pozitif sabit bir katsayıdır ve istenilen kontrol performansına göre seçilebilmektedir.

### 2.2.3.3. Model Dayanaklı KKK

Bu yöntemde amaç sistem dinamiklerini belirlenen bir ideal modelin dinamiklerini takip etmesine zorlamak için bir kontrol şeması oluşturmaktır. Kontrolcü ideal model ve sistem durumları arasındaki hatayı sifira ulaştırmak için kontrol sinyali üretmektedir. Böylelikle ideal modele verilen bir referans girdisine karşılık modelin ürettiği çıktı ile sistem çıktısı arasındaki hata sifira ulaşması sağlanabilmektedir.

Bu yöntem kullanılarak genellikle optimal kontrol yöntemleri ile giderilemeyen, değişken yapılı sistemlerin doğrudan tasarımında meydana gelen performans indeksine göre tasarım hedefi belirleme ve yüksek sistem parametresi değişimlerinin getirdiği zorlukların giderilmesi amaçlanmaktadır. Doğrusal bir model takibi yaklaşımı performans kriterlerini belirlemede fayda sağlamaktadır fakat parametre belirsizlikleri hala sistem üzerinde etkili olmaktadır (Edwards ve Spurgeon, 1998).

Model dayanaklı KKK yöntemi tasarımı durum vektörleri kullanılarak aşağıdaki şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

Doğrusal zamanla değişmeyen bir sistem aşağıdaki gibi tanımlansın;

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.59)$$

ve ilgili ideal model (2.60) eşitliğindeki gibi verilsin;

$$\dot{w}(t) = A_m w(t) + B_m r(t) \quad (2.60)$$

Burada  $x \in R^n$  ve  $w \in R^n$  sırasıyla sistemin ve modelin durum vektörleri  $u \in R^m$  kontrol vektörü ve  $r \in R^r$  girdi vektörüdür. Burada  $(A, B)$  çiftinin kontrol edilebilir ve ideal modelin öz değerlerinin negatif gerçekte kısımlara sahip olduğu kabul edilmektedir. Bu durumda durum hata vektörü (2.61) eşitliğindeki gibi tanımlanır.

$$e(t) = x(t) - w(t) \quad (2.61)$$

Kontrolcü tasarlanmadan önce ilk adım olarak kayma yüzeyi belirlenmelidir. Kayma yüzeyi aşağıdaki şekilde seçilebilir.

$$\sigma(e) = Se \quad S_e = \{e \in R^n : Se = 0\} \quad (2.62)$$

Eğim matrisi  $S$   $(A_m, B)$  çifti kullanılarak daha önceden verilen LQR metodu ile bulunabilmektedir.

Kontrol girdisi ise hatanın sifira ulaşmasını sağlayacak şekilde tasarlanmaktadır ve aşağıdaki şekilde tanımlanabilmektedir.

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t) + u_n(t) \quad (2.63)$$

burada;

$$u_1(t) = Ke(t) \quad (2.64)$$

ile tanımlıdır ve eşdeğer kazanç matrisi  $K$  (2.65) eşitliği yardımı ile bulunabilmektedir.



$$K = -\text{inv}(\sigma B)\sigma A_m \quad (2.65)$$

Bu matrisin seçimi ile hatanın ayarlama süresi kontrol edilebilmektedir. Bir diğer kontrol bileşeni aşağıdaki şekilde verilmektedir.

$$u_2(t) = Fx(t) + Gr(t) \quad (2.66)$$

Bu kısım toplam kontrolün ileri besleme kısmıdır. Burada  $F, G$  matrisleri (2.67) ve (2.68) eşitliklerini sağlamaktadır.

$$A - BF = A_m \quad (2.67)$$

$$BG = B_m \quad (2.68)$$

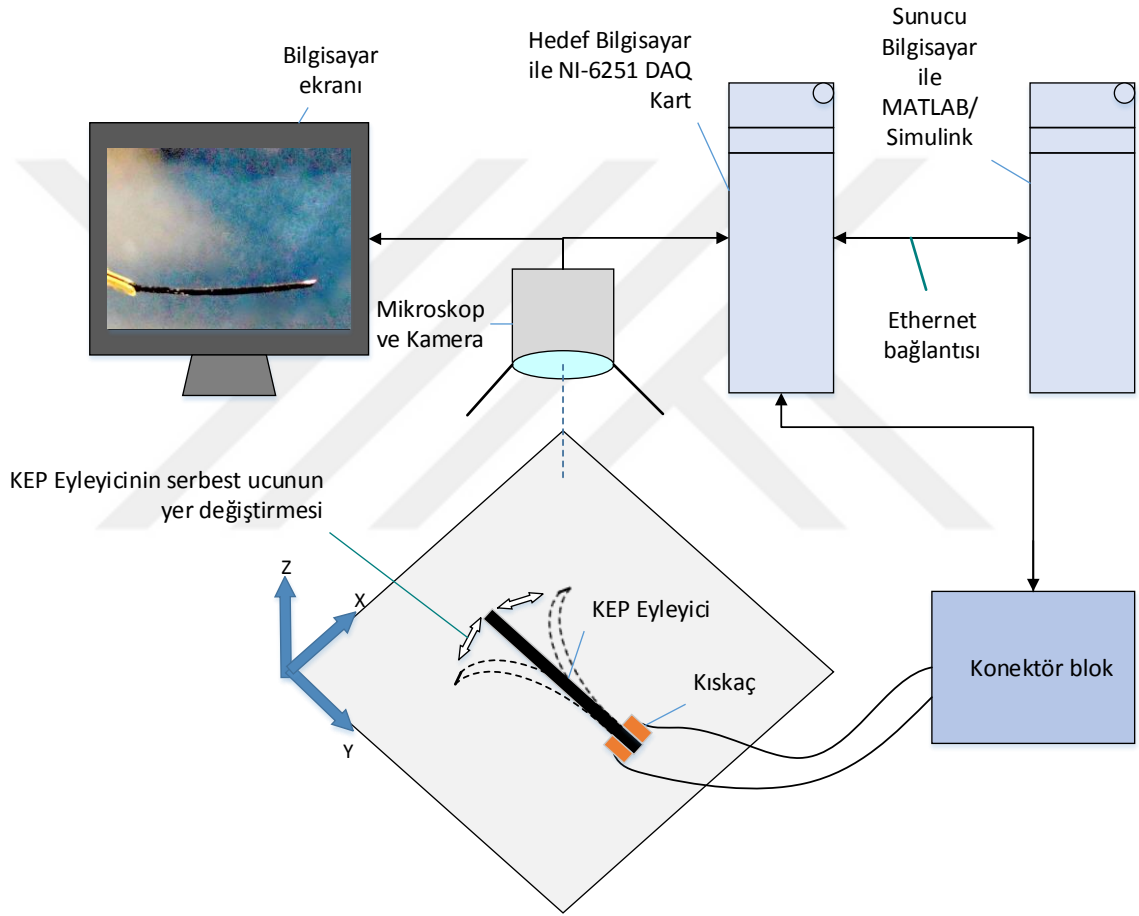
Son kontrol girişi kısmı olarak, kayma yüzeyine çeken ve tutan kontrol girdisi daha önceden bahsedildiği üzere (2.69) eşitliğindeki gibi seçilebilmektedir.

$$u_n(t) = -\rho \text{sgn}(\sigma) \quad (2.69)$$

## 2.3. Deney Düzenegi

### 2.3.1. Yer Değiştirme Kontrolü İçin Deney Düzenegi

Ankastre KEP eyleyicinin yer değiştirme kontrolünün yapılması amacıyla kurulan deney düzeneginin şematik gösterimi Şekil 2.8’de verilmiştir.



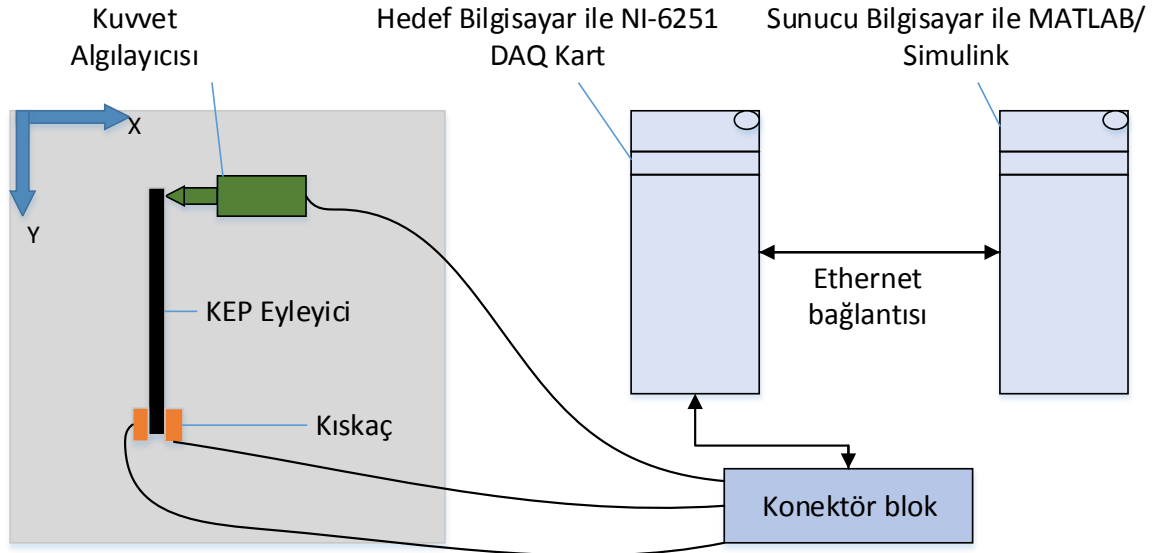
Şekil 2.8. Yer değiştirme kontrolü deney düzenegi şematik gösterimi

Serbest uç kısmının elektrik gerilimi altında yer değiştirme kontrolü yapılacak olan (1x15x0.17) mm boyutlarında KEP eyleyici, altın kaplama uçlardan oluşan bir kıskaç yardımıyla ankastre olarak deney düzenegine bağlanmıştır. Bu kıskaçlara kontrol girdisi olarak elektrik gerilimi NI-SC 2345 konektör blok üzerinden sağlanmıştır. Deney düzeneginde sunucu ve hedef bilgisayar olmak üzere iki bilgisayar kullanılmıştır. Konektör blok hedef bilgisayarda bulunan NI-6221 PCI veri toplama kartına bağlıdır. Yer değiştirme

verileri mikroskop üzerine takılan Logitech C310 web kamerası yardımıyla elde edilmiştir. Bu kamera direkt olarak hedef bilgisayara bağlıdır ve görüntüden elde edilen 1 piksel değeri yaklaşık olarak 1  $\mu\text{m}$  ye karşılık gelmektedir. Piksel başına mikrometre değeri kalibrasyon levhası kullanılarak elde edilmiştir. Yer değiştirme verisinin kamera kullanılarak elde edilmesi yöntemi hakkında daha detaylı bilgi bir önceki çalışma olan (Sancak vd., 2015) kaynağında bulunabilir. Sunucu bilgisayarda ise kontrol şemalarının hedef bilgisayara aktarılmasını sağlayan MATLAB Simulink Real-Time ara yüzü kuruludur. Elde edilen kontrol sinyali ve yer değiştirme verileri ise bu ara yüz kullanılarak sunucu bilgisayara aktarılmıştır. Hedef ve sunucu bilgisayarlar arasındaki bağlantı TCP/IP bağlantısı yardımıyla sağlanmıştır.

### 2.3.2. Kuvvet Kontrolü İçin Deney Düzeneği

Yer değiştirme kontrolü deney düzeneğinden farklı olarak kuvvet kontrolü deney düzeneğinde kamera yerine kuvvet algılayıcısı yer almaktadır. Çalışmada kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.9. Kuvvet kontrolü deney düzeneğinin şematik gösterimi

Kuvvet deneyinde KEP eyleyiciden, kullanılan algılayıcının ölçebileceği büyüklükte kuvvet değerleri elde edebilmek için boyutları (2x20x0.17) mm olan KEP eyleyici kullanılmıştır. Sabit uçtan KEP eyleyiciye uygulanan elektriksel gerilim farkı kontrol sisteminde giriş değişkeni olarak ve serbest ucun bu elektriksel gerilim yükü altında ürettiği kuvvet çıkış değişkeni olarak kullanılmıştır. Kuvvet algılayıcısı olarak Millinewton (IPR EPFL, Switzerland) kullanılmıştır. 0-3 V aralığında analog sinyal üreten bu kuvvet algılayıcısı konektör yardımıyla hedef bilgisayar üzerindeki veri toplama kartına bağlıdır.

## **2.4. KEP Eyleyicinin Kuvvet ve Yer Değiştirme Modellerinin Elde Edilmesi**

### **2.4.1. Üç Katmanlı KEP Eyleyici Siyah Kutu Modellemesi**

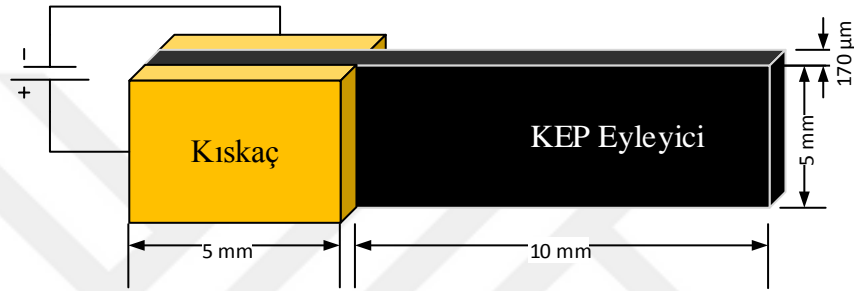
Üç katmanlı ankastre KEP eyleyicinin serbest ucunun yer değiştirme ve kuvvet modellerinin elde edilebilmesi için aşağıdaki adımlar uygulanmıştır.

- İlk olarak KEP eyleyici ilgili deney düzeneğine bağlanmış ve uygulanan bir voltaj girdisine karşılık eyleyicinin serbest ucundan yer değiştirme (mm) ve kuvvet (mN) değerleri elde edilmiştir.
- Elde edilen bu veriler ilgili modellerin elde edilmesinde kullanılmak üzere MATLAB sistem tanılama (System Identification Toolbox) ortamına yüklenmiştir.
- Yüklenen veriler için ARX modeli EKKY ile çözdürülerek sistemin LTI transfer fonksiyonu elde edilmiştir.
- LTI modeller bir doğrulama verisiyle karşılaştırılarak sistem için en uygun sürekli zaman transfer fonksiyonu modeli belirlenmiştir.

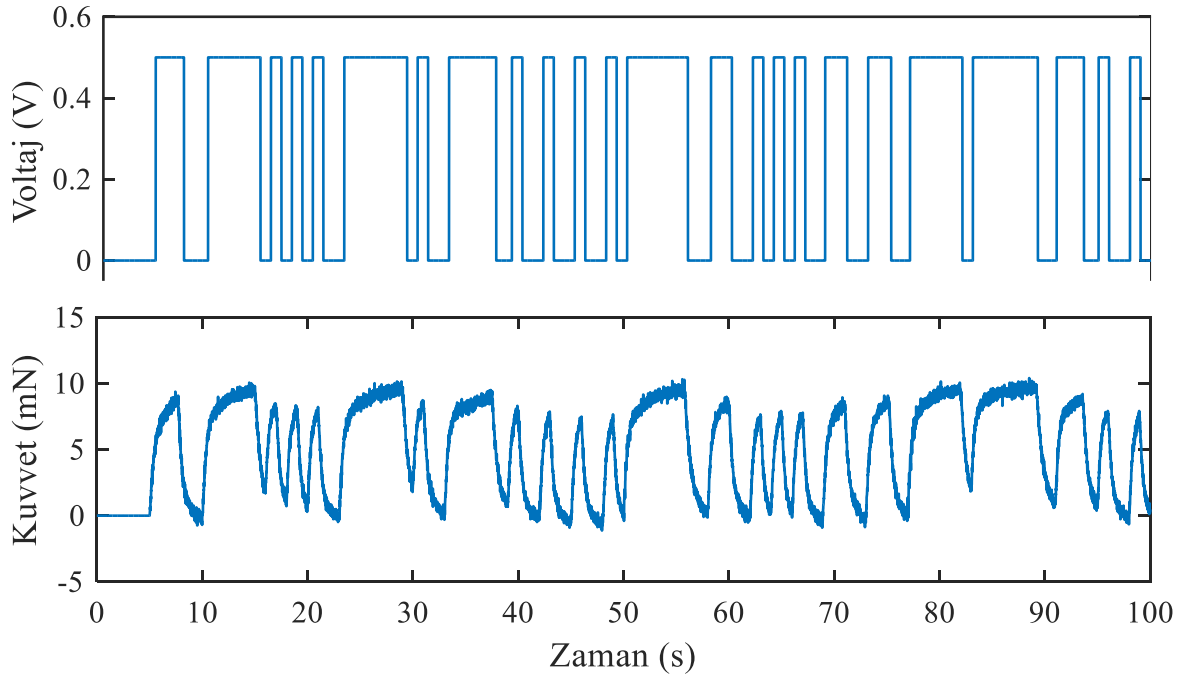
Modelleme sonucu elde edilen transfer fonksiyonundan istenilen frekanslarda doğru genlik değerleri elde edebilmek için modelleme işleminde kullanılan giriş sinyalinin frekansı ve genlik değerleri uygulama değerlerine yakın olarak seçilmiştir.

### 2.4.1.1. KEP Eyleyici Kuvvet Modellemesi

Kuvvet modellemesinde giriş sinyali olarak kullanılan rastgele bit dizisi (Pseudorandom binary sequence, PRBS) sinyali 0,5 V genliğinde ve 0,2 Hz frekansında olacak şekilde belirlenmiştir. Bu giriş sinyaline karşılık gelen çıktı değeri kuvvet algılayıcısı ile 0,01 s örnekleme zamanıyla toplanmıştır. Kuvvet modellemesinde kullanılan eyleyici boyutları aşağıdaki Şekil 2.10’da verilmiştir. Eyleyiciye uygulanan girdi sinyaline karşılık kuvvet çıktı değeri Şekil 2.11’de verilmiştir.



Şekil 2.10. Kuvvet deneylerinde kullanılan eyleyicinin şematik gösterimi

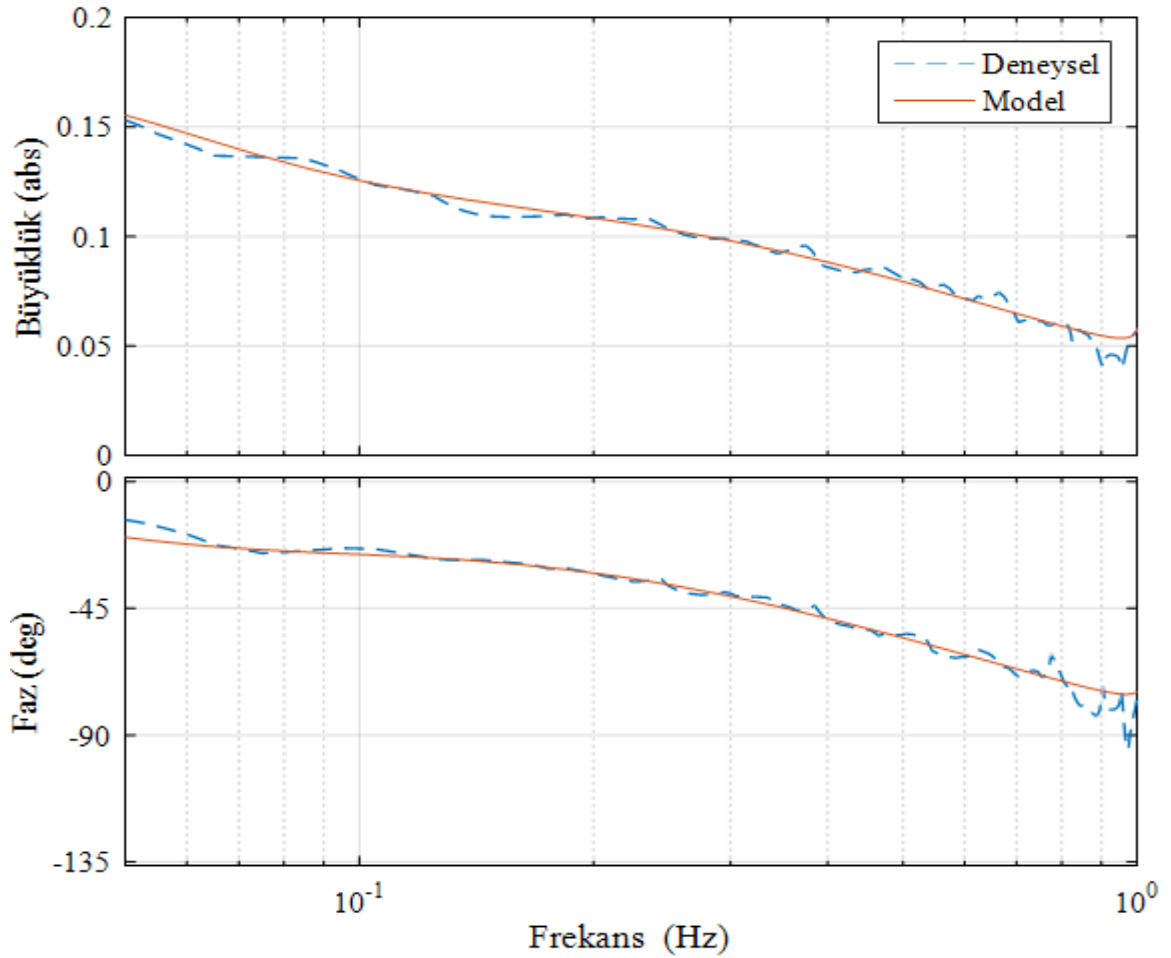


Şekil 2.11. Eyleyiciye uygulanan voltaj girdisi ve bu girdiye karşılık eyleyicinin kuvvet cevabı

Toplanan veriler ile MATLAB yazılımında kısım 2.1.1’de açıklanan sistem tanılama yöntemi kullanılarak eyleyiciye ait voltaj-kuvvet ilişkisini veren LTI transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

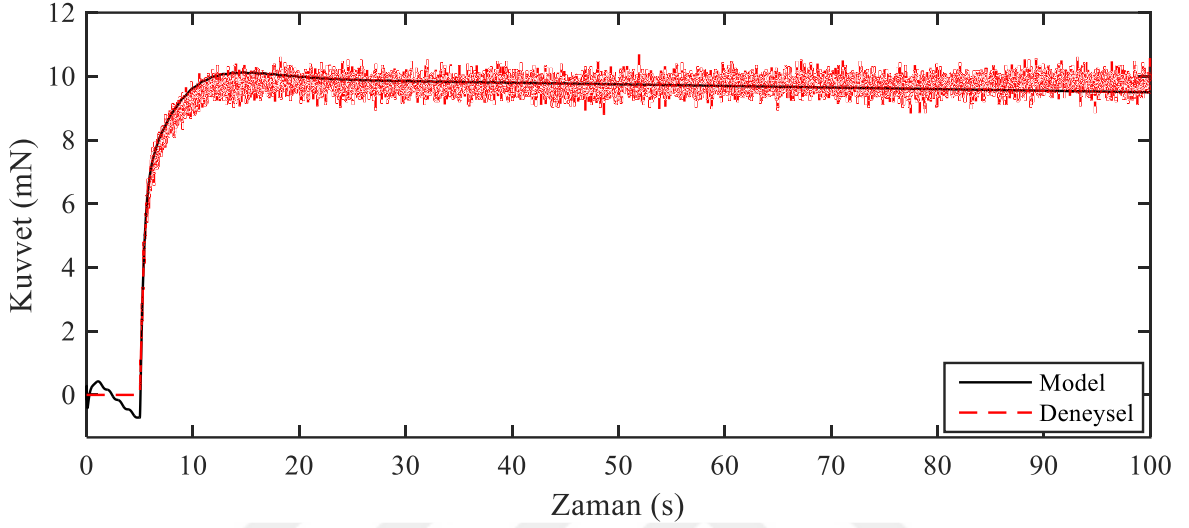
$$G_k(s) = \frac{1124s^5 + 839s^4 + 47208s^3 + 31523s^2 + 7201s + 1.233}{s^8 + 124s^7 + 3753s^6 + 17105s^5 + 159572s^4 + 490058s^3 + 223778s^2 + 42117s + 30} \quad (2.70)$$

Elde edilen modelin frekans cevabı ile deneysel olarak elde edilen frekans cevabı frekans alanındaki uyumun belirlenmesi için karşılaştırılmıştır. Deneysel frekans cevabı MATLAB yazılımı Sistem Tanılama aracında girdi-çıkı verileri kullanılarak belirlenmiştir. Aşağıdaki şekillerde eyleyicinin kuvvet modeline ait deneysel frekans cevabı ve elde edilen modelin frekans cevabı karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 2.12. Eyleyicinin deneysel frekans cevabı ile elde edilen modelin frekans cevabının karşılaştırılması

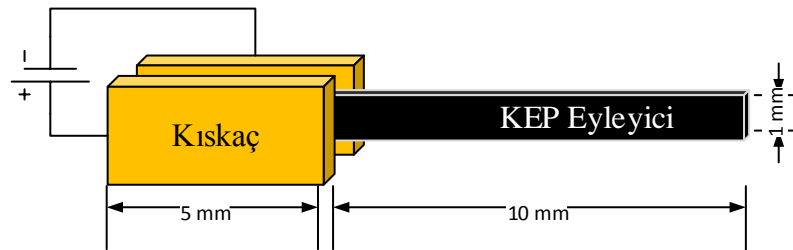
Modelin zaman alanında da doğrulanması amacıyla 0,5 V değerindeki basamak girdi değeri elde edilen modele ve deneysel olarak eyleyiciye uygulanmıştır. Elde edilen veriler Şekil 2.13’de karşılaştırılmıştır.



Şekil 2.13. Eyleyici modelinin basamak cevabının deneysel veri ile karşılaştırılması

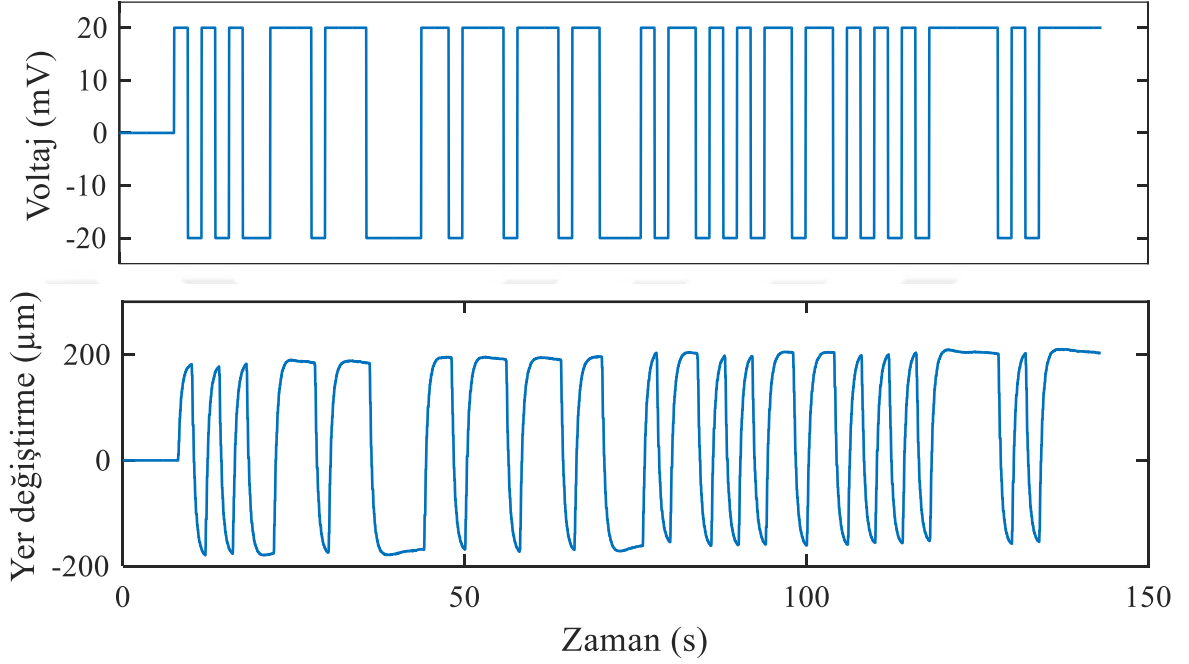
#### 2.4.1.2. KEP Eyleyici Yer Değiştirme Modellemesi

Yer değiştirme modellemesinde kullanılan KEP eyleyici boyutları Şekil 2.14’te verilmektedir.



Şekil 2.14. Yer değiştirme deneylerinde kullanılan eyleyicinin şematik gösterimi

Modelleme giriş sinyali olarak 0,5 Hz ve 20 mV genliğinde PRBS sinyali seçilmiştir. Bu giriş sinyaline karşılık gelen çıktı değeri kamera yardımı ile 0,04 s örnekleme zamanıyla toplanmıştır. Eyleyiciye uygulanan girdi sinyaline karşılık yer değiştirme çıktı değeri Şekil 2.15’de verilmiştir.



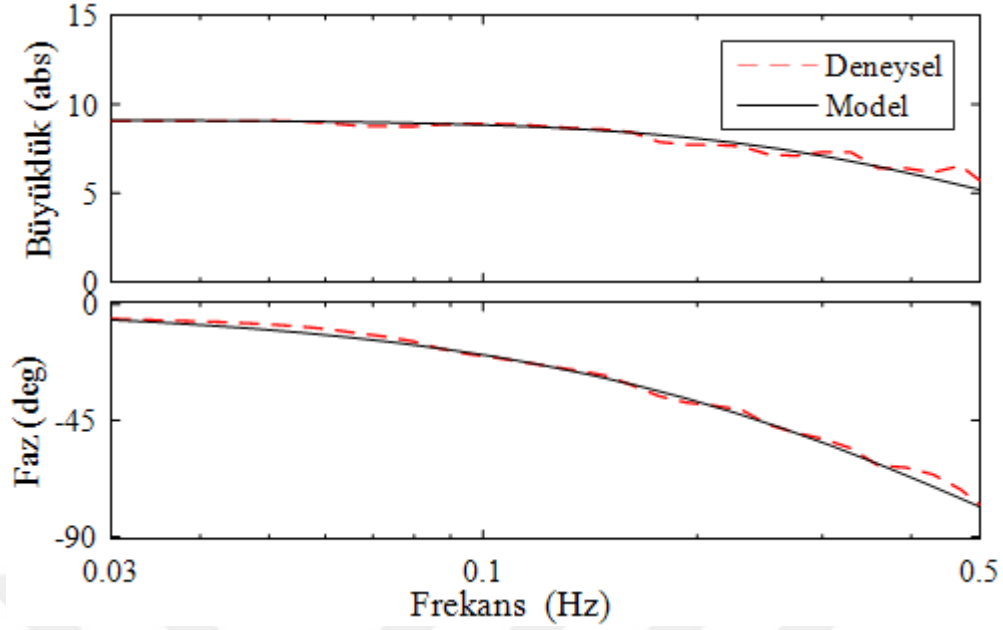
Şekil 2.15. Eyleyiciye uygulanan voltaj girdisi ve bu girdiye karşılık eyleyicinin yer değiştirme cevabı

Sistem tanılama yöntemi kullanılarak eyleyiciye ait (voltaj-yer değiştirme) ilişkisini veren LTI transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$G_y(s) = \frac{138.9}{s^2 + 8.34s + 15.2} \quad (2.71)$$

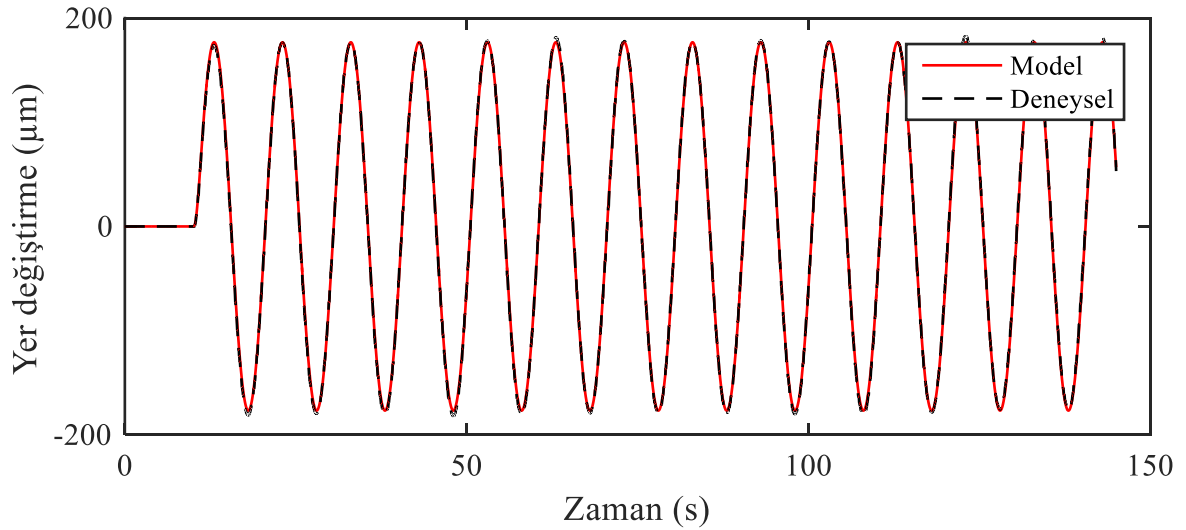
Elde edilen modelin frekans cevabı ile deneysel olarak elde edilen frekans cevabı karşılaştırılması Şekil 2.16’da verilmiştir.





Şekil 2.16. Eyleyicinin deneysel frekans cevabı ile elde edilen yer değiştirme modelinin frekans cevabının karşılaştırılması.

Model doğrulanması ayrıca 20 mV genliğinde ve 0,1 Hz frekansında sinüs girdi değeri modele ve deneysel olarak eyleyiciye uygulanarak elde edilen verilerin karşılaştırılması yapılmıştır. Elde edilen verilerin karşılaştırılması Şekil 2.17’de verilmiştir.



Şekil 2.17. Eyleyici modelinin sinüzoidal girdiye cevabının deneysel veri ile karşılaştırılması

## 2.5. KEP Eyleyiciler İçin Kontrolcü Parametrelerinin Belirlenmesi

### 2.5.1. PID Kontrolcü Parametrelerinin Belirlenmesi

PID kontrolcü parametrelerinin belirlenmesinde elde edilen eyleyici modelleri MATLAB/PID Tunnig ara yüzünde kullanılarak sistem cevabını kararlı yapacak uygun parametreler manüel olarak belirlenmiştir. PID kontrolcünde, D parametresinin gürültülü sinyallere hassas olması ve kuvvet algılayıcısından alınan verinin gürültü içermesi sebebiyle D parametresi kullanılmamıştır. Uygulamada tekrarlamalı kontrolcü sistemi ve PI kontrolcü kullanılarak elde edilen cevaplar arasındaki farkın daha kolay belirlenebilmesi amacıyla PI parametreleri iyi bir şekilde optimize edilmemiştir. Bu bağlamda PI parametreleri kuvvet kontrolü için;  $k_p = 50$ ,  $k_I = 0,8$  olarak ve yer değiştirme kontrolü için;  $k_p = 0,3$ ,  $k_I = 0,1$  olarak belirlenmiştir.

### 2.5.2. Tekrarlamalı Kontrolcü Tasarımı

#### 2.5.2.1. Kuvvet Kontrolü İçin Tekrarlamalı Kontrolcü Tasarımı

Eyleyici kontrolü için basit ve alçak geçiren filtrelerle geliştirilmiş olmak üzere iki tip tekrarlamalı kontrol yöntemi tasarlanmıştır. Basit tekrarlamalı kontrolcünde, birincil kontrolcüye ek olarak sisteme referans sinyali periyoduna sahip hafıza döngüsü eklenmiştir. Geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcü ise aşağıdaki şekilde tasarlanmıştır. Tekrarlamalı kontrol sisteminin geçici hal karakteristiklerini iyileştirmesi amacıyla birincil kontrolcü olarak PI kontrolcü seçilmiştir

##### 2.5.2.1.1. $B(j\omega)$ Filtresi Tasarımı

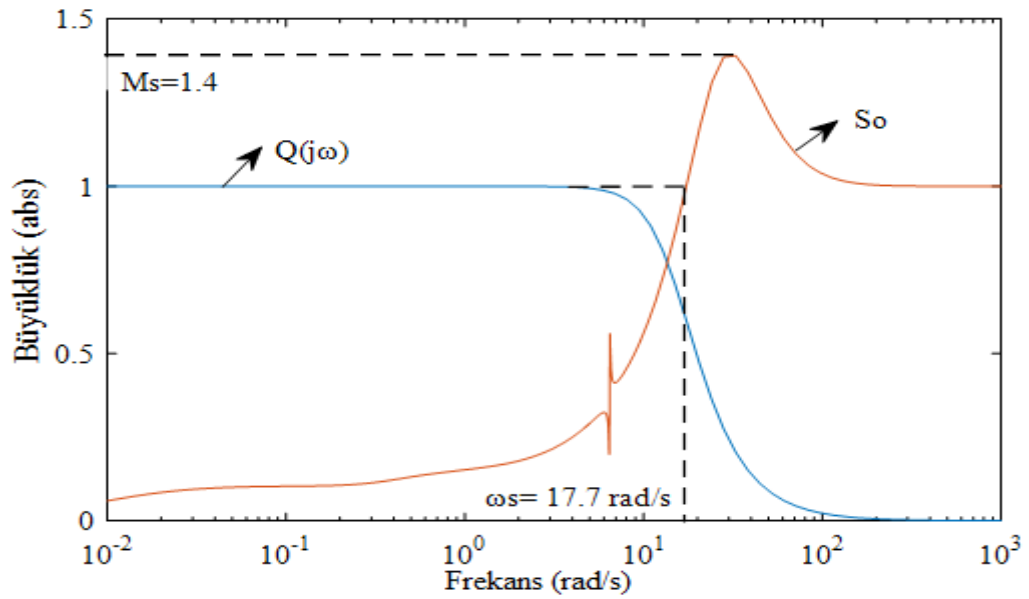
$B(j\omega)$  filtresi,  $R(\omega) < 1$  eşitsizliğini sağlaması için  $\bar{G}(j\omega)$  fonksiyonunun tersi olarak tanımlanır. KEP eyleyici kuvvet modeli için bu fonksiyonun tersi, kutup sayısı kök sayısından fazla olduğu için yüksek frekanslarda sonsuz kazanç değeri üretmektedir ve bu durum gerçekleştirilebilir olmamaktadır. Bu durumun düzeltilmesi için  $\bar{G}(j\omega)^{-1}$  fonksiyonunun uygun bir alçak geçiren filtreyle seri bağlanmıştır. Bu kapsamda kesme

frekansı 15 Hz olan dördüncü dereceden bir  $F_b(j\omega)$  alçak geçiren filtresi tasarlanmıştır. Böylece  $B(j\omega)$  filtresi eşitlik (2.72) gibi belirlenmiştir.  $B(j\omega)$  filtresi için zaman kazancı;  $\tau_b = 0.9$  s olacak şekilde faz diyagramı kullanılarak belirlenmiştir.

$$B(j\omega) = \frac{71.115s^9 + 8.862s^8 \times 10^3 + 2.669s^7 \times 10^5 + 5.213s^6 \times 10^6 + 1.439s^5 \times 10^7 + 2.027s^4 \times 10^8 + 1.306s^3 \times 10^8 + 3.039s^2 \times 10^7 + 4.162s \times 10^5 + 70.148}{5620s^{10} + 5.197s^9 \times 10^5 + 4.748s^8 \times 10^6 + 2.748s^7 \times 10^7 + 1.069s^6 \times 10^8 + 2.451s^5 \times 10^8 + 3.284s^4 \times 10^8 + 1.603s^3 \times 10^8 + 3.165s^2 \times 10^7 + 4.717s \times 10^3 + 79 \times 10^3} \quad (2.72)$$

### 2.5.2.1.2. Q(j $\omega$ ) Filtresi Tasarımı

$Q(j\omega)$  filtresi, giriş sinyalinin istenmeyen harmoniklerinden dolayı tekrarlamalı kontrolcü tarafından üretilen sonsuz kazancı ve gürültüyü elemek için kullanılmıştır ve ikinci dereceden bir alçak geçiren filtre olarak seçilmiştir. Bu filtrenin performansı alçak geçiren filtre olması nedeniyle kesme frekansı ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle kesme frekansı kısım 2.2.2'de verilen izlek göz önüne alınarak  $So(j\omega)$  fonksiyonunun genlik grafiğinden (Şekil 2.18)  $\omega_s = 17.7$  rad/s  $M_s = 1.4$  olarak bulunan değerlere karşılık (2.12) eşitsizliği kullanılarak kesme frekansının maksimum değeri 40.77 rad/s olarak belirlenmiştir.



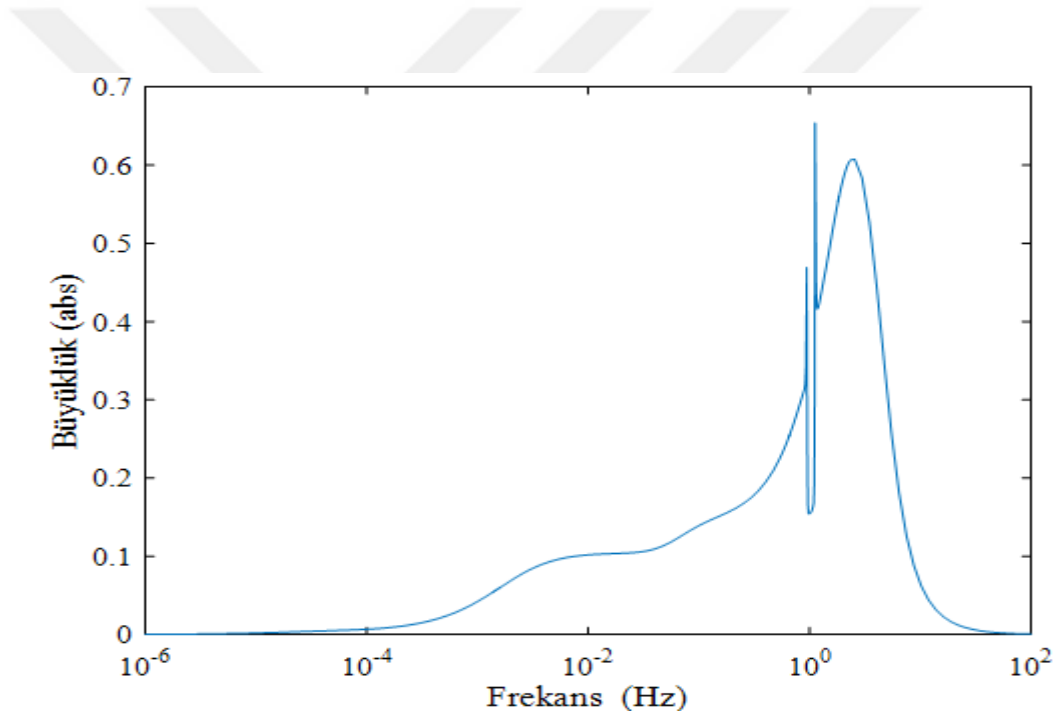
Şekil 2.18. Kuvvet kontrolü için hassasiyet fonksiyonu  $So(j\omega)$  ve  $Q(j\omega)$  filtresi genlik grafiği

Bu sınırlama koşulu dikkate alınarak eyleyicinin takip etmesi istenilen referans frekansa etki etmeyecek şekilde  $Q(j\omega)$  filtresi için  $\omega_q = 15$  rad/s seçilmiştir. Bu durumda  $Q(j\omega)$  filtresi aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$Q(s) = \frac{225}{s^2 + 21.2s + 225} \quad (2.73)$$

$Q(j\omega)$  filtresi için zaman dengeleme sabiti ise  $\tau_q = 0.02$  s olarak faz diyagramı kullanılarak belirlenmiştir.

Bu verilen değerler için rejenerasyon spektrumu Şekil 2.19'da gösterilmektedir.



Şekil 2.19. Kuvvet kontrolü için Rejenerasyon spektrumu

Görüldüğü üzere rejenerasyon spektrumu tüm frekans değerleri için  $R(\omega) < 1$  eşitsizliğini sağlamaktadır.

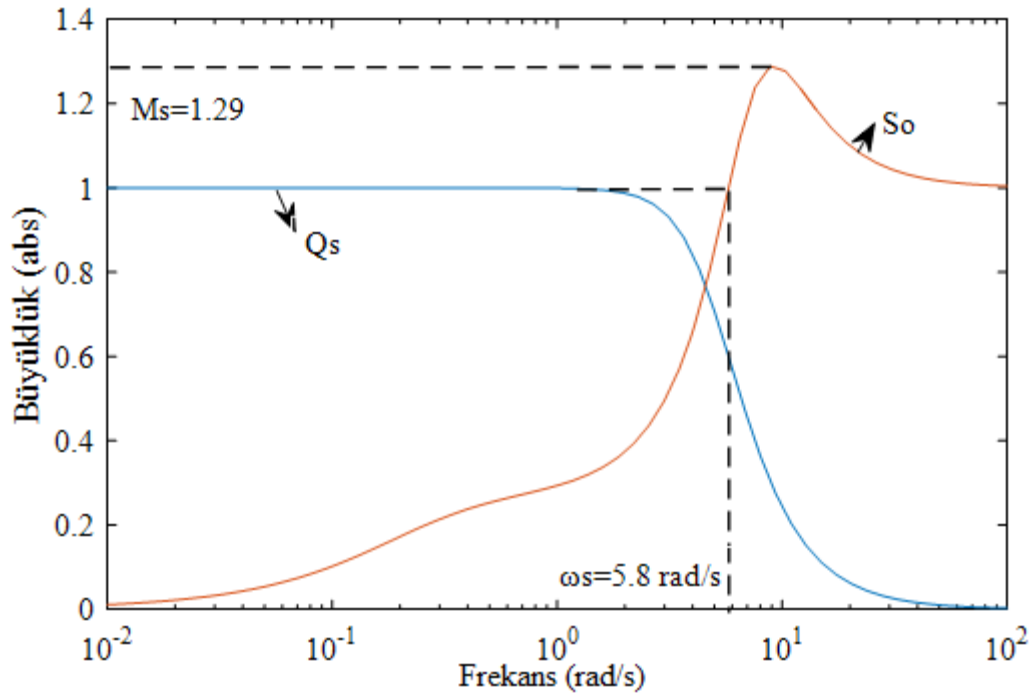
### 2.5.2.2. Yer Değiştirme Kontrolü İçin Tekrarlamalı Kontrolcü Tasarımı

Tekrarlamalı kontrolcü kullanılarak eyleyici için yer değiştirme kontrolcüsü tasarlanmasında, eyleyicinin tekrarlamalı kuvvet kontrolünde bahsedilen adımlar uygulanmıştır.

İlk olarak basit tekrarlamalı kontrolcü tasarlanmış ve ardından geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Birincil kontrolcü olarak PI kontrolcü kullanılmıştır. Geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcü için belirlenen parametreler aşağıda verilmiştir.

$B(j\omega)$  filtresi ise  $\omega_q = 3$  rad/s kesme frekansına sahip ikinci dereceden bir alçak geçiren filtre ile birlikte aşağıdaki gibi belirlenmiştir.  $B(j\omega)$  filtresi için zaman kazancı 0.6 s olarak belirlenmiştir.  $Q(j\omega)$  filtresi kesme frekansının maksimum değerini bulmak için kullanılan hassasiyet fonksiyonu genlik grafiği Şekil 2.20'de verilmiştir.

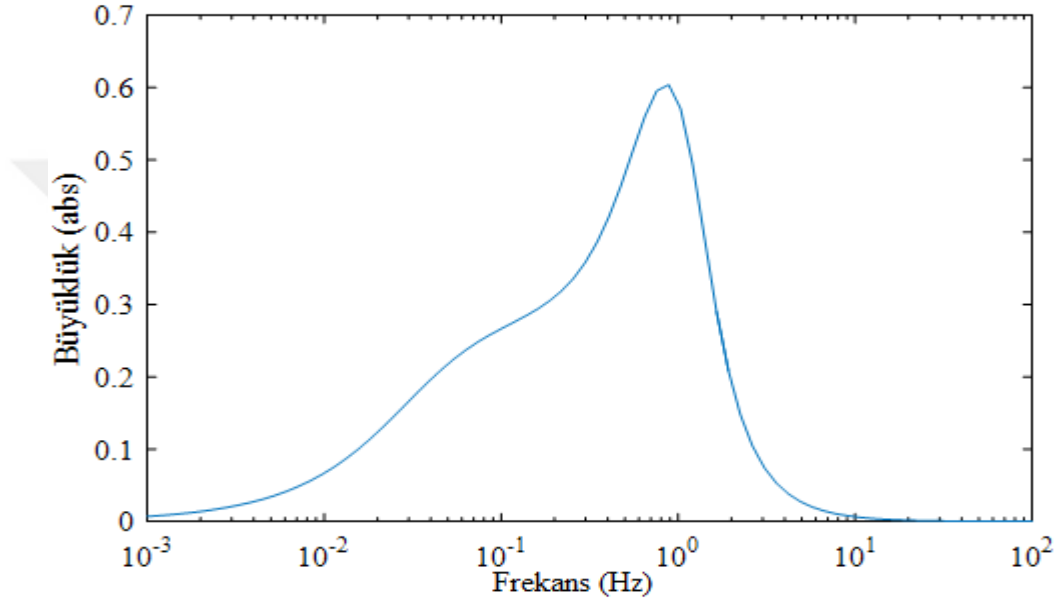
$$B(j\omega) = \frac{9s^3 + 75.11s^2 + 512s + 125}{41.68s^3 + 190.7s^2 + 434.1s + 125} \quad (2.74)$$



Şekil 2.20. Yer değiştirme kontrolü için Hassasiyet fonksiyonu  $S_o(j\omega)$  ve  $Q(j\omega)$  filtresi genlik grafiği

Bu veriler kullanılarak maksimum kesme frekansı  $\omega_q = 7.85$  rad/s olarak belirlenmiş ve  $Q(j\omega)$  filtresi için kesme frekansı  $\omega_q = 5$  rad/s olarak seçilmiştir.  $Q(j\omega)$  filtresi için zaman kazancı 0.2 s olarak belirlenmiştir.

Bu değerler ile elde edilen rejenerasyon spektrumu Şekil 2.21’de verilmektedir ve rejenerasyon spektrumu kararlılık ölçütünü sağlamaktadır.



Şekil 2.21. Yer değiştirme kontrolü için Rejenerasyon spektrumu

### 2.5.3. KKK Tasarımı

#### 2.5.3.1. Yer Değiştirme Referans İzleme Kontrolü İçin KKK Tasarımı

Yer değiştirme kontrolü için KKK tasarımında eyleyici için elde edilen ikinci dereceden yer değiştirme modelinden faydalanılmıştır. Kontrolcü tasarımı kısım 2.2.3.2’de verildiği üzere gerçekleştirilmiştir. İlk adım olarak kayma yüzeyi;

$$\sigma = \dot{e} + \lambda e = \dot{x} - \dot{x}_r + \lambda(x - x_r) \quad (2.75)$$

burada  $\lambda$  değeri deneysel çalışmalar sonucunda uygun değer olarak 10 seçilmiştir.

Erişim kuralı için ise iki farklı yaklaşım kullanılmıştır. Bunlar; (2.76) ve (2.77) eşitliklerindeki gibi belirlenmiştir.

$$\dot{\sigma}_1 = -\delta\sigma \quad (2.76)$$

$$\dot{\sigma}_2 = -\rho \operatorname{sgn}(\sigma) \quad (2.77)$$

Burada  $\delta$  değeri 5 ve  $\rho$  değeri 300 olarak deneysel çalışmalar sonucu seçilmiştir. Model parametreleri ve kontrolcü tasarımında seçilen değerler ile farklı kayma kuralları için elde edilen toplam giriş sinyalleri aşağıda sırasıyla verilmiştir.

$$u_{\delta\sigma} = \frac{1}{b} [\ddot{x}_r - \lambda(\dot{x} - \dot{x}_r) - \delta\sigma + a_1\dot{x} + a_2x] \quad (2.78)$$

$$u_{\rho\operatorname{sgn}(\sigma)} = \frac{1}{b} [\ddot{x}_r - \lambda(\dot{x} - \dot{x}_r) - \rho \operatorname{sgn}(\sigma) + a_1\dot{x} + a_2x] \quad (2.79)$$

### 2.5.3.2. Yer Değiştirme Kontrolü İçin Model Dayanaklı KKK Tasarımı

Eyleyici için model dayanaklı KKK yöntemi durum besleme tabanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Sistemin durumlarının ölçülmesi olanaksız olduğundan, bir kayan kipli gözlemci kullanılarak sistem durumları tahmin edilmiştir.

Gözlemci tasarımında, eyleyici için elde edilen ikici dereceden transfer fonksiyonu durum uzayı gösteriminde kullanılmıştır.

Gözlemci için kayma yüzeyi aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$\sigma_o = \{(e_1, e_y) : e_y = 0\} \quad (2.80)$$

Kısım 2.2.3.1’de yer alan yöntem uyarınca kayan kipli gözlemci için kazanç matrisi;  $Q = 0,1$  ve  $R = 1000$  olarak seçilen ağırlık matrisleri kullanılarak LQR yöntemi ile aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$L = [8,2671]10^{-4} \quad (2.81)$$

ve süreksiz vektör eşitliği ise  $M = 1$  seçilerek aşağıdaki denklemdeki gibi belirlenmiştir.

$$v = \text{sgn}(\hat{y} - y) \quad (2.82)$$

Sistem için denetçi tasarımı kısım 2.2.3'de verilen yöntem ile yapılmıştır. İdeal model matrisleri ise (2.83) ve (2.84) eşitliklerindeki gibi belirlenmiş;

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -3.3166 & -4.3166 \end{bmatrix} \quad (2.83)$$

$$B_m = BG \text{ ve } C_m = C \quad (2.84)$$

F ve G ileri besleme matrisleri ise aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$F = \text{inv}(B^T B) B^T (A_m - A) = [11,8927 \quad 4,0287] \quad (2.85)$$

$$G = -\text{inv}(C_m \text{inv}(A_m) B) = [0,0239] \quad (2.86)$$

Kayma yüzeyi aşağıdaki şekilde seçilmiştir.

$$\sigma(e) = Se \quad (2.87)$$

Kayma yüzeyi eğim matrisi  $S$  kısım 2.2.3'de verildiği üzere ;  $Q = 100$  ve  $R = 1$  ağırlık matrisleri için LQR yöntemi kullanılarak belirlenmiştir.

$$S = [10 \quad 1] \quad (2.88)$$

Eşdeğer kazanç matrisi ise aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$K = -\text{inv}(\sigma B) \sigma A_m = [3.3166 \quad -5.6834] \quad (2.89)$$



Kayma yüzeyinde tutan kontrol girdisi için  $\rho = 2$  seçilmiştir ve aşağıdaki gibi ifade edilebilmektedir.

$$u_n = -2sgn(\sigma) \quad (2.90)$$

Toplam kontrol girdisi ise eşitlik (2.91) gibidir.

$$u = Ke(t) + Fx(t) + Gr(t) - \rho sgn(\sigma) \quad (2.91)$$

LQR yöntemi kullanılarak yapılan tasarımda ağırlık matrisi seçimleri deneysel sonuçlar dikkate alınarak yapılmıştır. Seçimler yapılırken eyleyicinin gösterdiği performansın artırılması amacıyla birkaç farklı değer denenmiş ve uygun değerler olarak yukarıda verilen değerler seçilmiştir. İdeal model seçiminde ise eyleyicinin aynı referans girdisine vereceği cevaba yakın cevap veren bir model, bilgisayar ortamında yapılan benzetim çalışmaları sonucu belirlenmiştir. Aynı referans girdisine gerçek sistem ile ideal model yaklaşık olarak aynı genlik değerinde cevaplar üretmesine karşın sistem cevabı ile ideal model cevabı arasında bir faz farkı olduğu belirlenmiştir.

### 3. BULGULAR VE İRDELEME

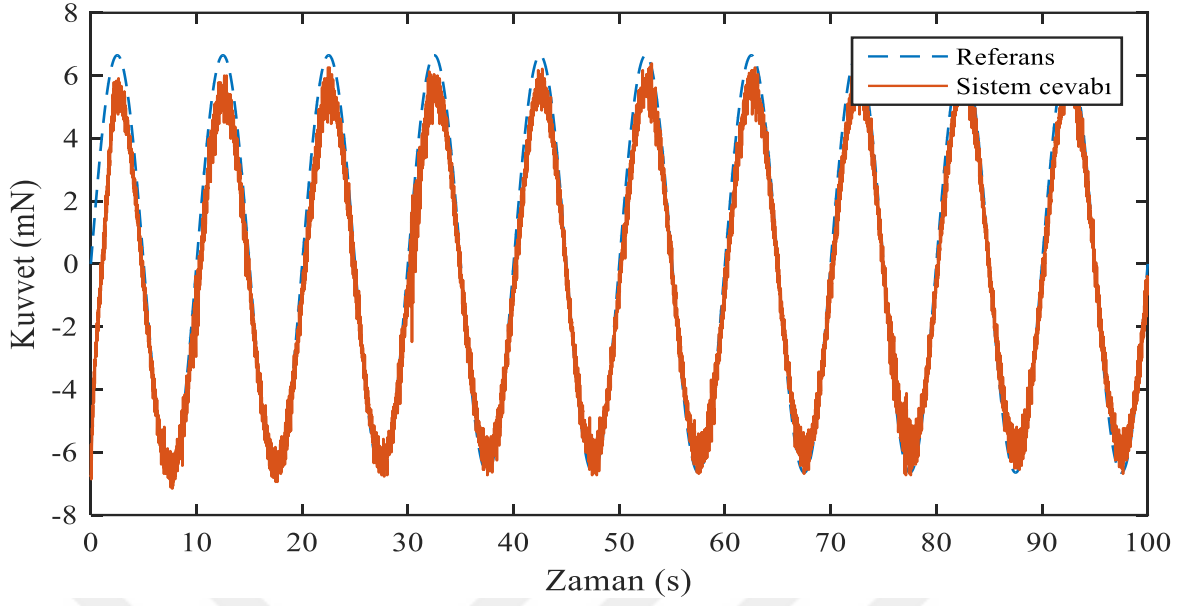
Bu kısımda, önceki kısımlarda tasarımı yapılan kontrol yöntemleriyle eyleyicinin serbest ucunun konum ve kuvvet kontrolünde elde edilen bulgular verilmiştir. Kontrol uygulamalarında referans takip sinyali olarak periyodik sinyaller seçilmiştir. Bu sinyallerin takibinde farklı kontrolcüler için elde edilen takip cevapları aşağıdaki kısımlarda grafiklerle verilmiştir. Son olarak; kontrol yöntemlerinin karşılaştırılması elde edilen kalıcı durum hataları üzerinden yapılmıştır.

#### 3.1. Kuvvet Kontrolü

##### 3.1.1. PID Kontrolcü ile Kuvvet Kontrolü

Kısım 2.33'te boyutları verilen eyleyicinin serbest ucunun kuvvet kontrolü için ilk olarak PID kontrolcü kullanılmıştır. Çalışmada kuvvet algılayıcısından alınan verilerin çok gürültülü olması nedeniyle gürültüye hassas olan  $k_D$  parametresi kontrolcüye eklenmemiştir.

PI kontrol yöntemi bu çalışmada karşılaştırma kontrolcüsü olarak kullanılmış ve tekrarlamalı kontrolcü ile birlikte kullanılması durumunda sistemin takip performansında meydana gelen değişimin rahatlıkla belirlenebilmesi amacıyla kontrolcü parametrelerinin belirlenmesi optimal bir şekilde gerçekleştirilmemiştir. Bu kapsamda PI kontrolcü parametreleri;  $k_p = 50$ ,  $k_I = 0,8$  olarak seçilmiştir. Seçilen bu parametre değerleri için elde edilen referans takip sonucu Şekil 3.1'de verilmektedir. Grafikte görüldüğü üzere eyleyici, belirlenen PI kontrolcü parametreleri için referans değerini tam olarak takip edememekte kalıcı durum hatası ve faz farkı gözlenmektedir.



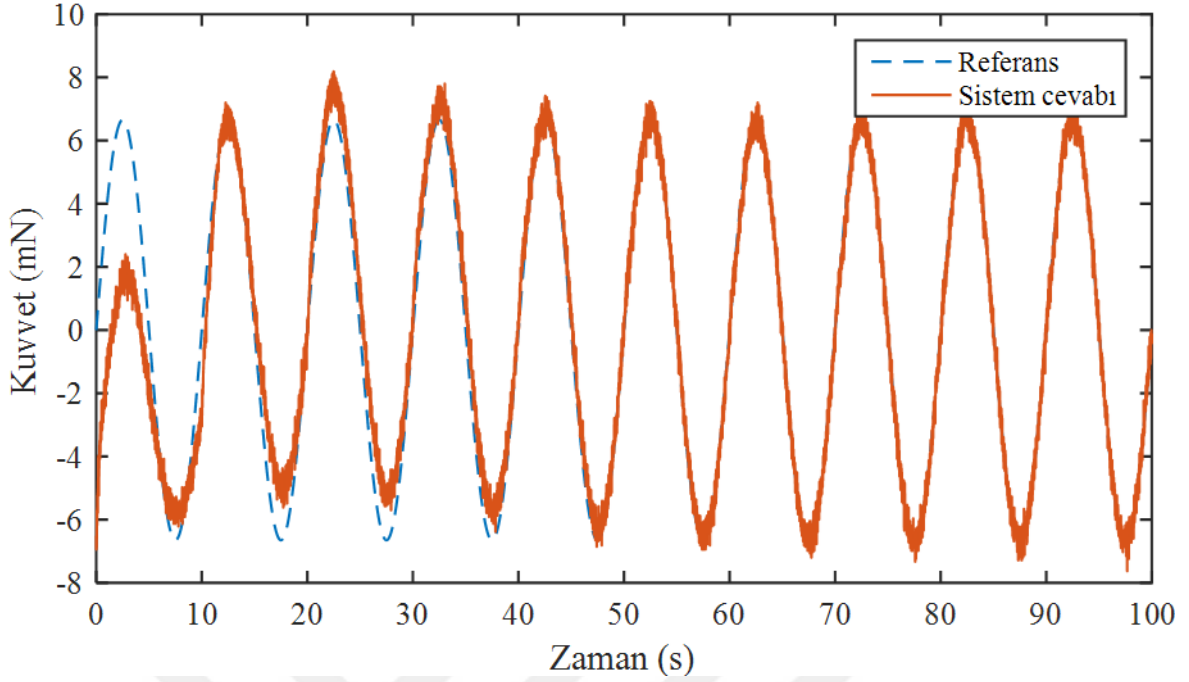
Şekil 3.1. Kuvvet kontrolü için PI kontrolcü ile takip cevabı

### 3.1.2. Tekrarlamalı Kontrolcü ile Kuvvet Kontrolü

Bu kontrolcünün eyleyiciye uygulanmasında referans takip sinyali olarak 0,1 Hz frekansında ve 6,65 mN genlikli sinüs ve üçgen sinyal kullanılmıştır. İlk olarak basit tekrarlamalı kontrolcü ve daha sonra geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcü sisteme uygulanmıştır. Deneylerde, kuvvet algılayıcısından periyodik cevapların alınabilmesi için eyleyici algılayıcıya bir ön kuvvet uygulayacak şekilde bağlanmıştır.

#### 3.1.2.1. Basit Tekrarlamalı Kontrolcü ile Kuvvet Kontrolü

Basit tekrarlamalı kontrol yöntemiyle eyleyicinin kontrolü için PI kontrolcüye ek olarak kontrol sistemine bir hafıza döngüsü eklenmiştir (Şekil 2.5). Bu döngüye referans sinyalinin periyoduna eşit olan 10 s'lik bir gecikme süresi verilmiştir. Yöntemin sisteme uygulanması ile elde edilen sonuç Şekil 3.2'de verilmiştir.

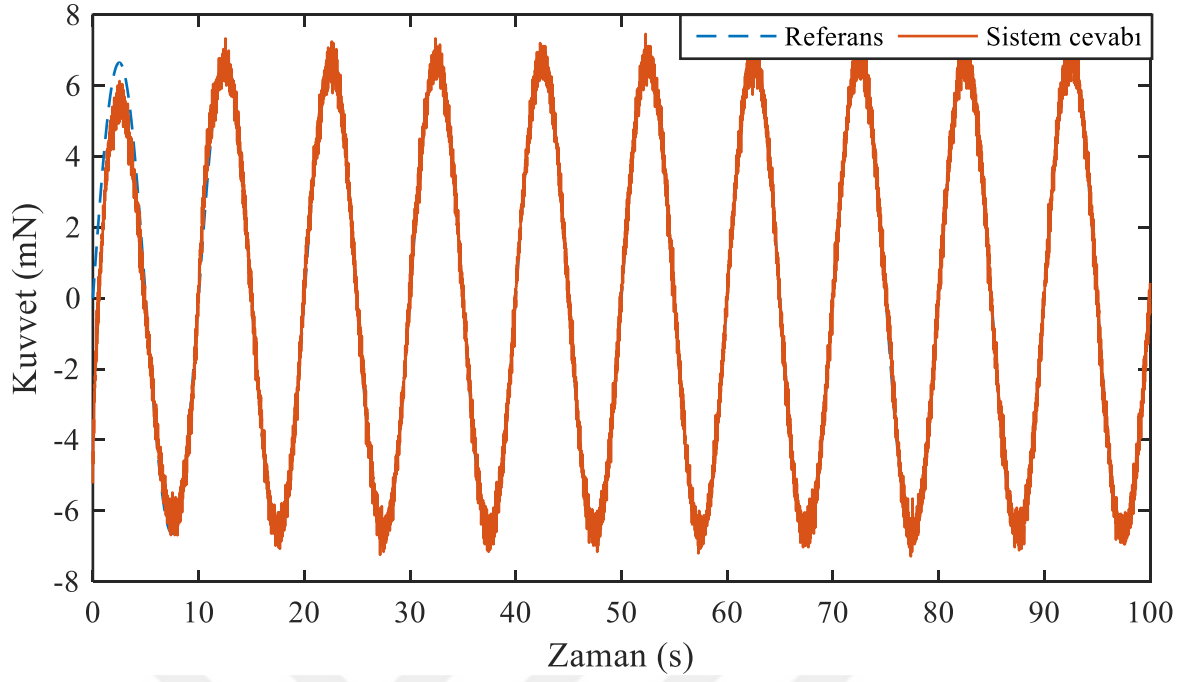


Şekil 3.2. Kuvvet kontrolü için basit tekrarlamalı kontrolcü ile takip cevabı

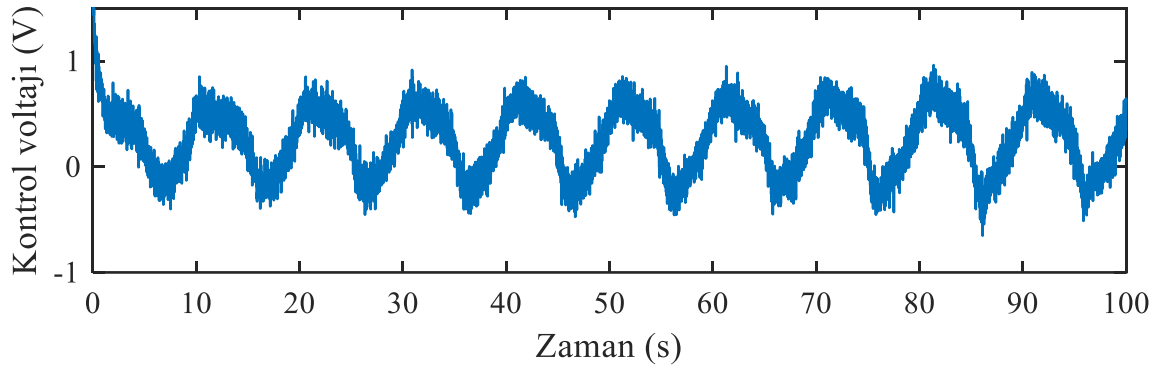
Şekilde görüldüğü üzere basit tekrarlamalı kontrol yöntemi ile kalıcı durum hatası büyük oranda giderilmiştir. Fakat bu durum sistemin ilk periyodundan sonra aktif olan tekrarlamalı kontrol yöntemi ile ancak 5. Periyottan sonra mümkün olmuştur. Yani sistemin geçici hal cevabı uzun sürmektedir. Ayrıca yapılan deneyler sonucu yukardaki grafikte ilk 100 s için kararlı olarak görünen sistem ilerleyen sürede kararlılığını koruyamamış ve sistem kararsız davranış göstermiştir.

### 3.1.2.2. Geliştirilmiş Tekrarlamalı Kontrolcü ile Kuvvet Kontrolü

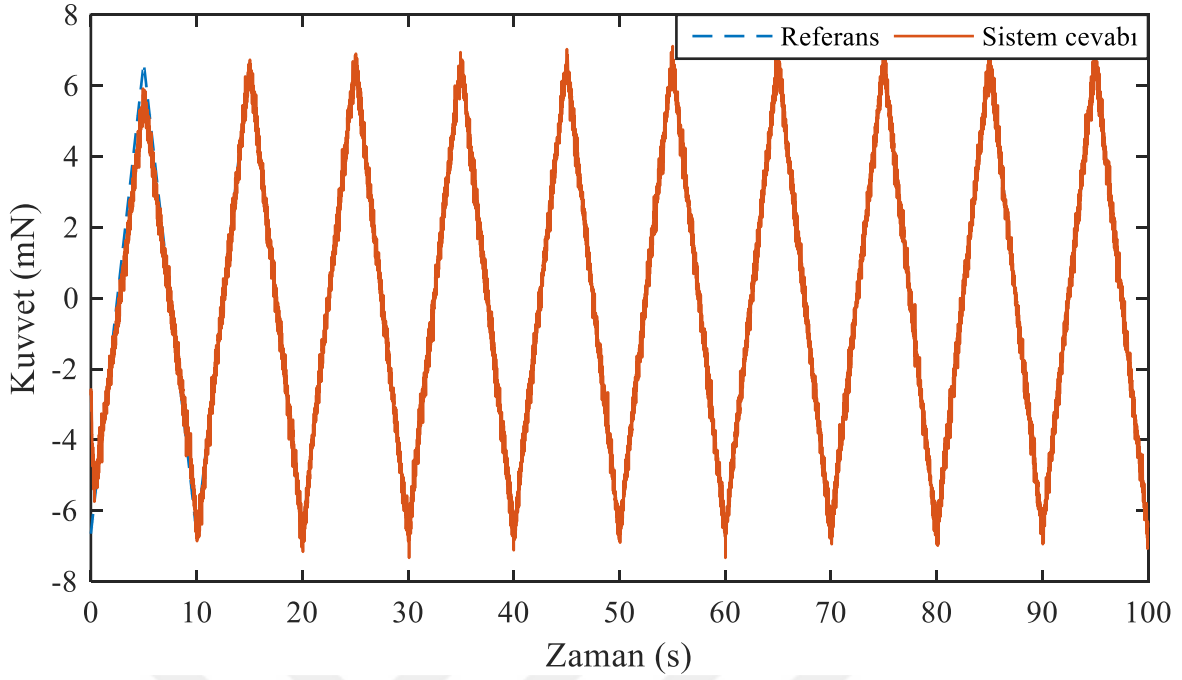
Tekrarlamalı kontrol sistemine alçak geçiren filtrelerin eklenmesi ile elde edilen geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcü için eyleyicinin cevabı ve kontrol voltajı aşağıda verilmiştir. Kontrolcü tasarımı kısım 2.2.2’de verildiği gibidir. Bu yöntem kullanılarak eyleyicinin kuvvet kontrolü, sinüs ve üçgen referans takip sinyali için uygulanmıştır.



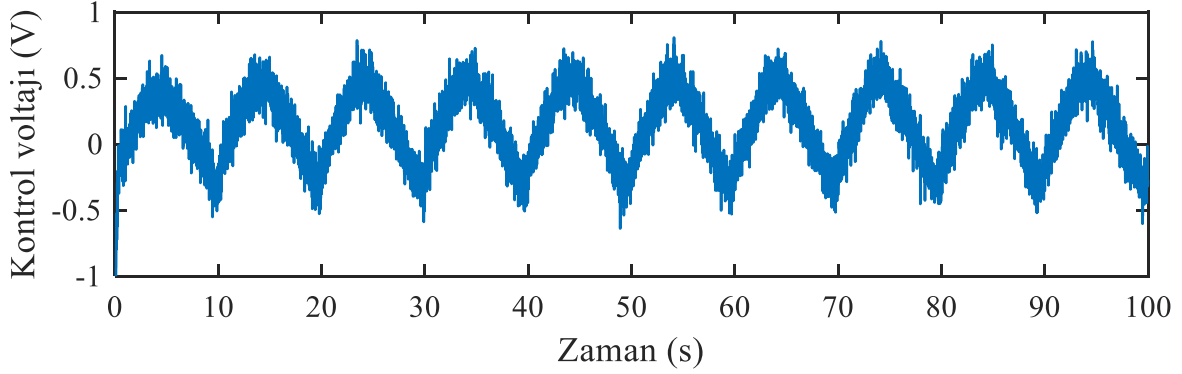
Şekil 3.3. Kuvvet kontrolü için geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcü ile takip cevabı



Şekil 3.4. Geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolde eyleyiciye uygulanan kontrol voltajı



Şekil 3.5. Kuvvet kontrolü için geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcü ile üçgen sinyal takip cevabı



Şekil 3.6. Geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolde üçgen referans sinyali takibi için eyleyiciye uygulanan kontrol voltajı

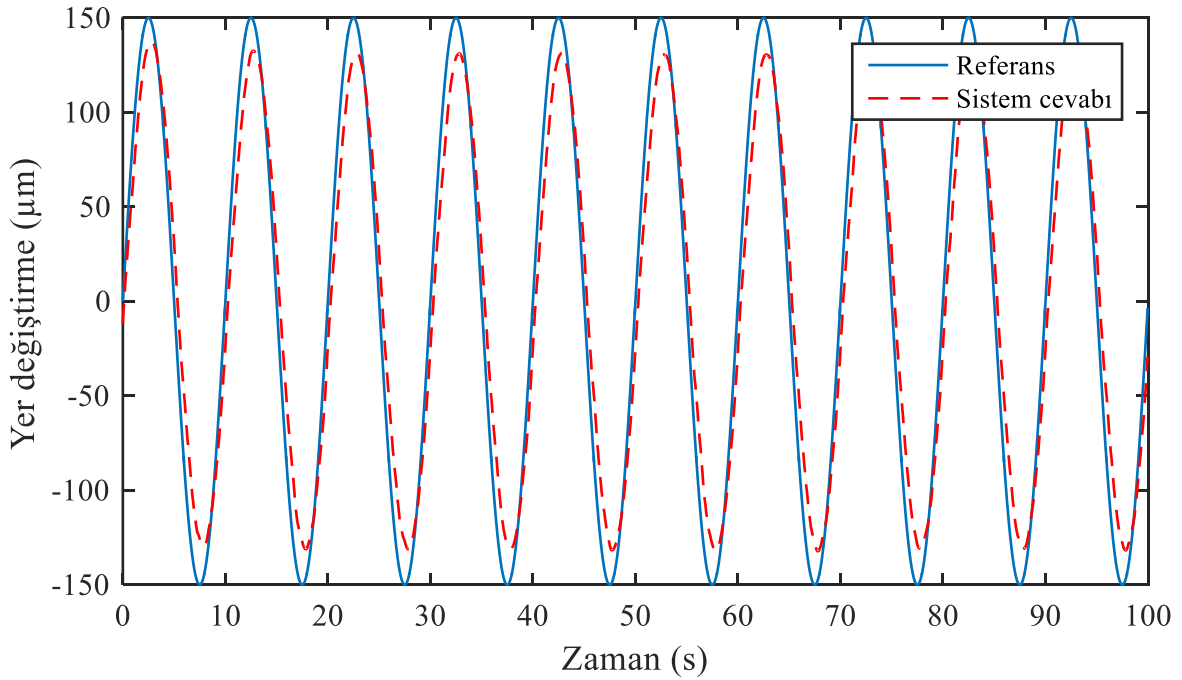
Sistemde ilk döngüde sadece parametreleri verilen PI kontrolcü kontrol sinyali üretmektedir. Şekillerde görüldüğü üzere geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcü aktif hale geldiği ikinci döngüde ilk döngüde meydana gelen hatadan faydalanarak takip hatasını ve faz farkını büyük ölçüde azaltmıştır. 3. döngüde ise sistem kalıcı hal durumuna geçmiş ve 2. döngüde görülen küçük takip hataları büyük oranda giderilmiştir. Ayrıca geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcünün rejenerasyon spektrumu bağıl kararlılık ölçütüne göre tasarlanmış

olması sistemin kararlılığını sağlamış ve grafikte verilenden daha uzun süreli deneyler sonucunda sistem kararlı davranışını sürdürmüştür. Sistemde meydana gelen yüksek gürültü ise algılayıcı kaynaklıdır ve daha iyi bir algılayıcı kullanılması ile giderilebilir.

### 3.2. Yer Değiştirme Kontrolü

#### 3.2.1. PID Kontrolcü ile Yer Değiştirme Kontrolü

Yer değiştirme kontrolünde PID kontrolcü sadece PI parametrelerini içerecek şekilde kuvvet kontrolünde izlenen yöntemle benzer olarak tasarlanmıştır. Tekrarlamalı kontrol yönteminde birincil kontrolcü olarak da kullanılacak olan PI kontrolcünün parametreleri çok iyi bir şekilde optimize edilmemiştir. Bu yöntem kullanılarak 0,1 Hz frekansına ve 150  $\mu\text{m}$  genliğe sahip sinüs referans takip sinyali için elde edilen takip cevabı Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Yer değiştirme kontrolü için PI kontrolcü ile takip cevabı

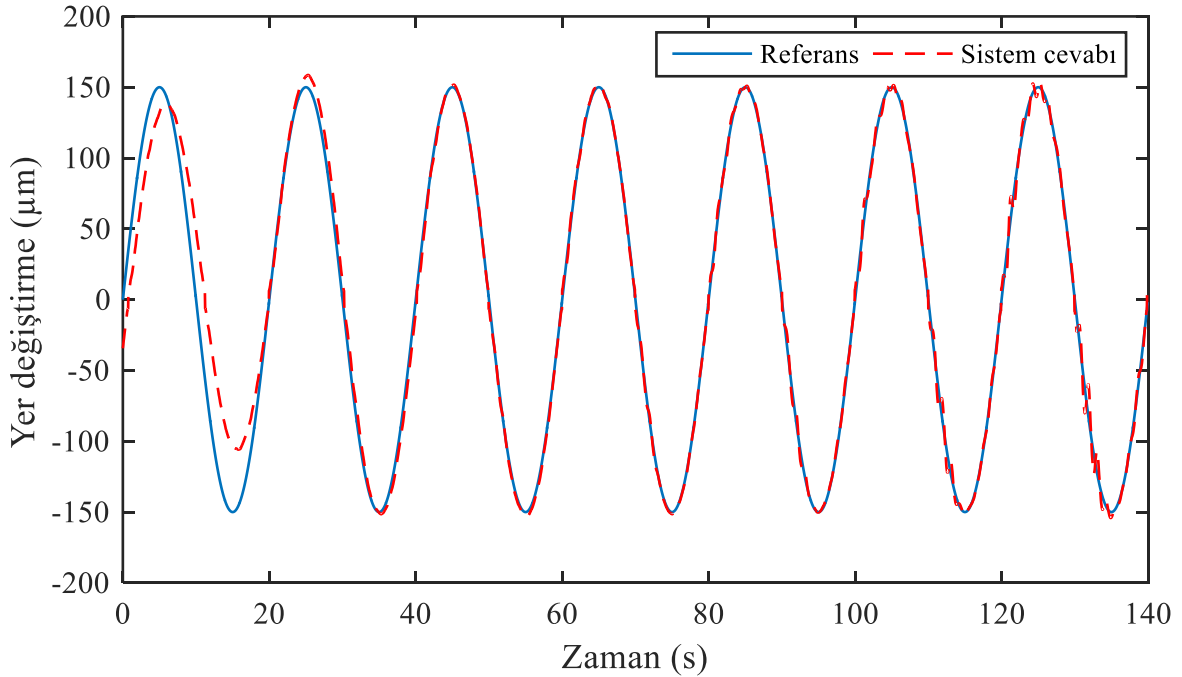
Belirlenen PI kontrolcü parametreleri için sistem referans takip sinyalini iyi bir şekilde takip edememektedir. Kontrol sisteminde kalıcı durum hatası oldukça yüksektir ve faz farkı görülmektedir.

### 3.2.2. Tekrarlamalı Kontrolcü ile Yer Değiştirme Kontrolü

Eyleyicinin serbest ucunun yer değiştirmesini kontrol etmek amacıyla basit ve geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcü olmak üzere iki tip tekrarlamalı kontrol yöntemi uygulanmıştır. Referans takip sinyali olarak sinüs ve üçgen sinyali uygulanmıştır.

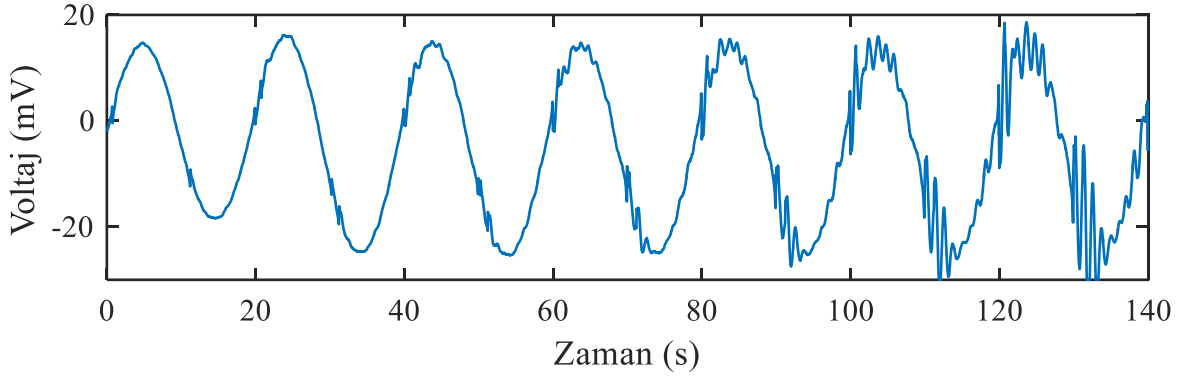
#### 3.2.2.1. Basit Tekrarlamalı Kontrolcü ile Yer Değiştirme Kontrolü

Sadece bir hafıza döngüsü ve birincil kontrolcüden oluşan tekrarlamalı kontrol sistemi için 0,05 Hz frekansına ve 150  $\mu\text{m}$  genliğine sahip sinüs referans sinyali takip cevabı Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8. Yer değiştirme kontrolü için basit tekrarlamalı kontrolcü ile takip cevabı



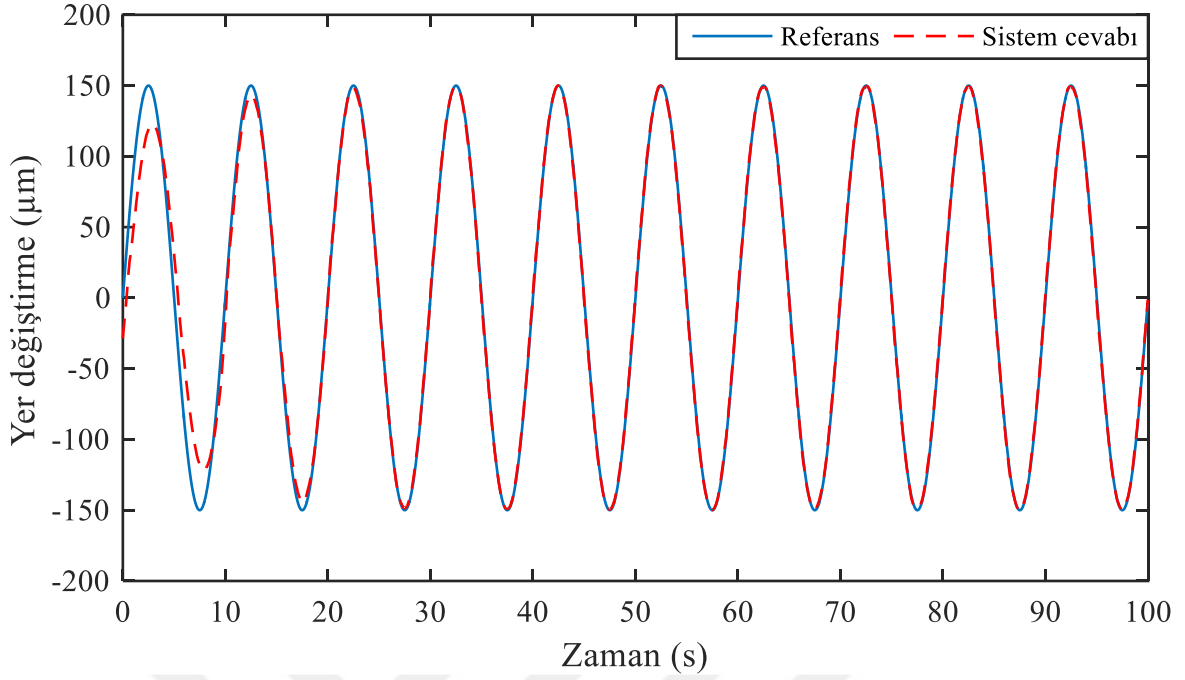


Şekil 3.9. Yer değiştirme kontrolü için basit tekrarlamalı kontrolde eyleyiciye uygulanan kontrol voltajı

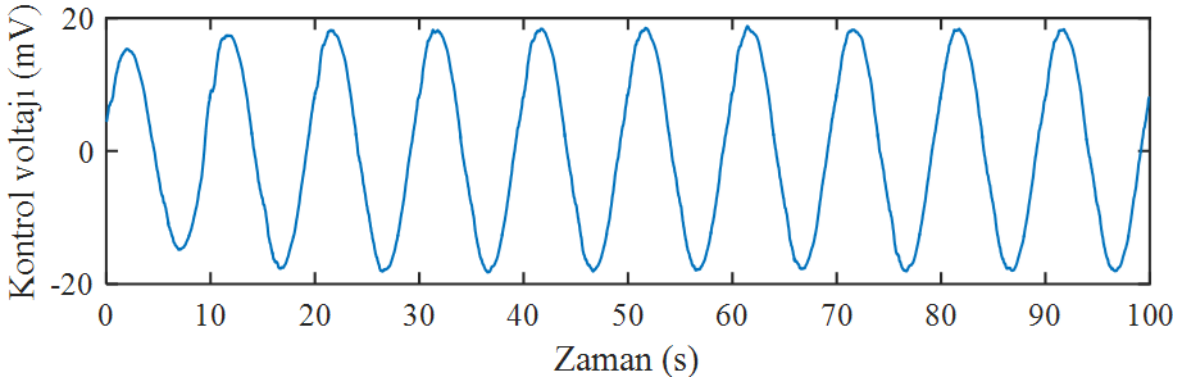
Basit tekrarlamalı kontrolcü şekilde görüldüğü üzere ilk döngüden sonra takip hatasını azaltmıştır fakat ilerleyen döngülerde sistem cevabından ve kontrol voltajından da anlaşılacağı üzere sistem kararlı davranışını koruyamamıştır.

### 3.2.2.2. Geliştirilmiş Tekrarlamalı Kontrolcü ile Yer Değiştirme Kontrolü

Yer değiştirme kontrolünde, bir önceki kısımda basit tekrarlamalı kontrolcü ile elde edilemeyen kararlı sistem cevabı ve daha iyi bir geçici hal cevabı elde etmek için geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcü sisteme uygulanmıştır. Sistem takip cevabı Şekil 3.10'da verilmektedir.

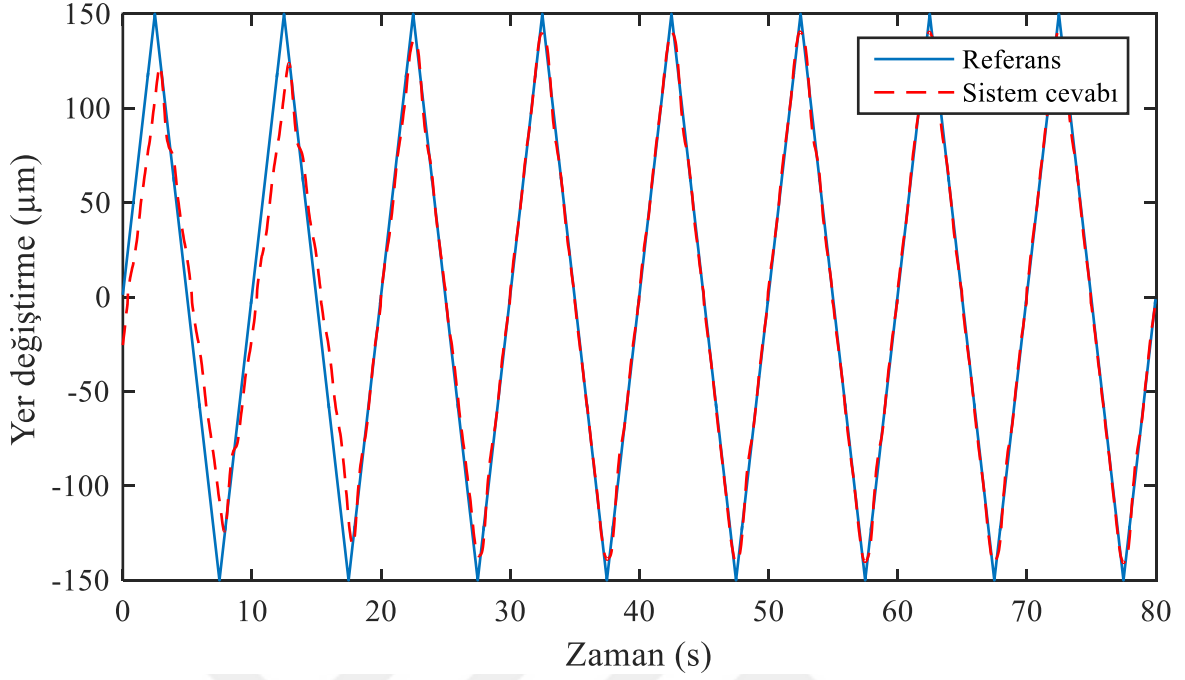


Şekil 3.10. Yer değiştirme kontrolü için geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcü ile takip cevabı

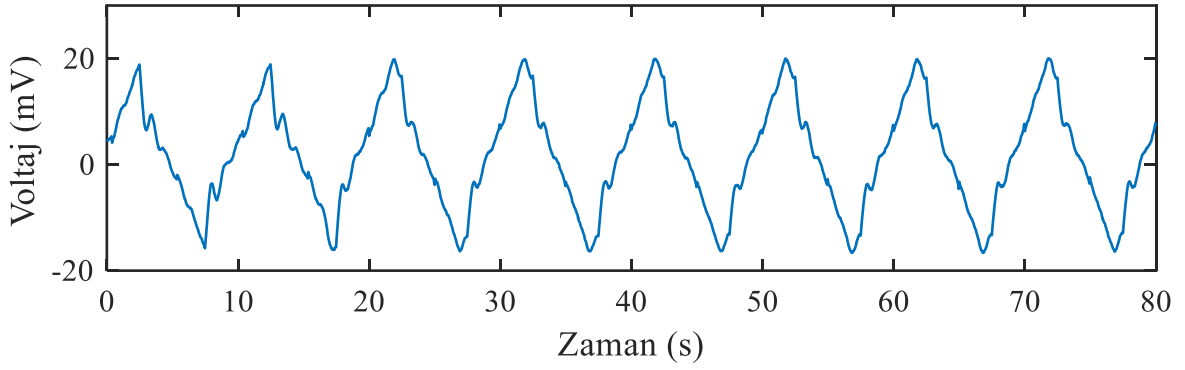


Şekil 3.11. Yer değiştirme kontrolü için geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolde eyleyiciye uygulanan kontrol voltajı

Şekillerden anlaşılacağı üzere eyleyici üçüncü döngüden itibaren referans sinyalini belirgin bir faz farkı veya kalıcı durum hatası olmaksızın takip etmiş ve sistem kararlı durumunu korumuştur. Şekil 3.12'de eyleyicinin geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcü ile üçgen sinyal takibi cevabı verilmiştir.



Şekil 3.12. Yer değiştirme kontrolü için geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcü ile üçgen referans sinyali takip cevabı



Şekil 3.13. Yer değiştirme kontrolü için geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolde üçgen takip referansı için eyleyiciye uygulanan kontrol voltajı

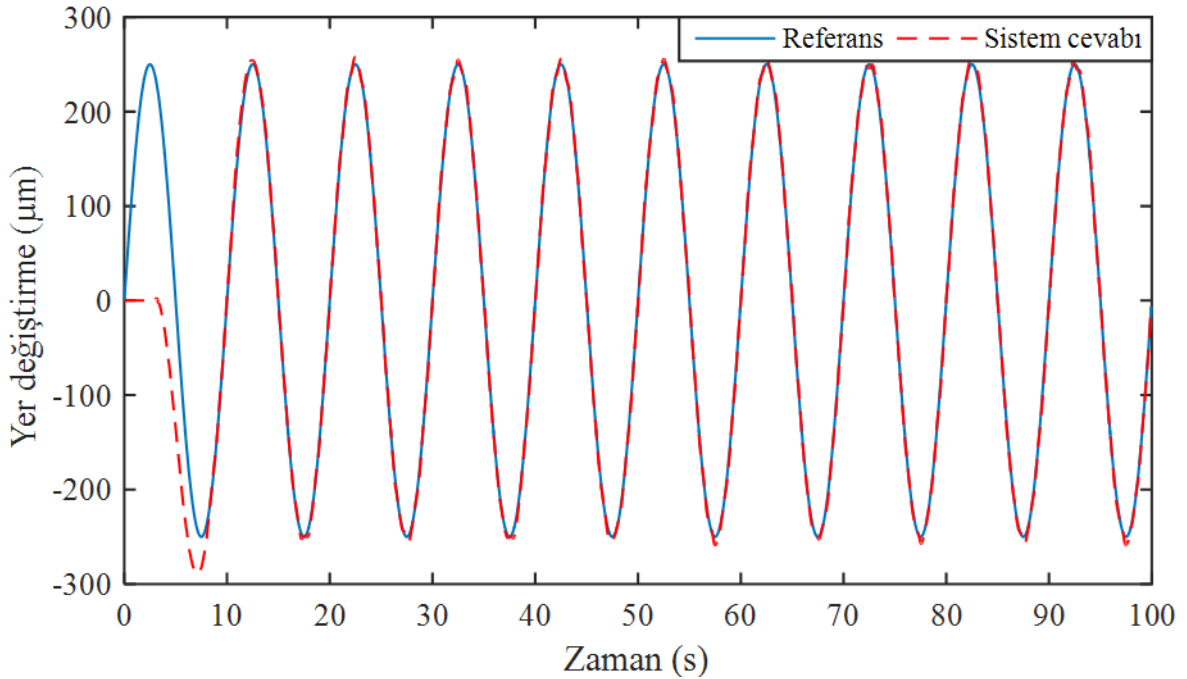
Üçgen referans takip sinyali için eyleyici, sinüs takibinde gösterdiği performansı gösterememiş ani değişimlerin olduğu uç noktalarda nispeten zayıf kalmıştır. Bu durumun dışında sistem kararlı davranış göstermektedir ve faz farkı giderilmiştir.

### 3.2.3. KKK ile Yer Değiştirme Kontrolü

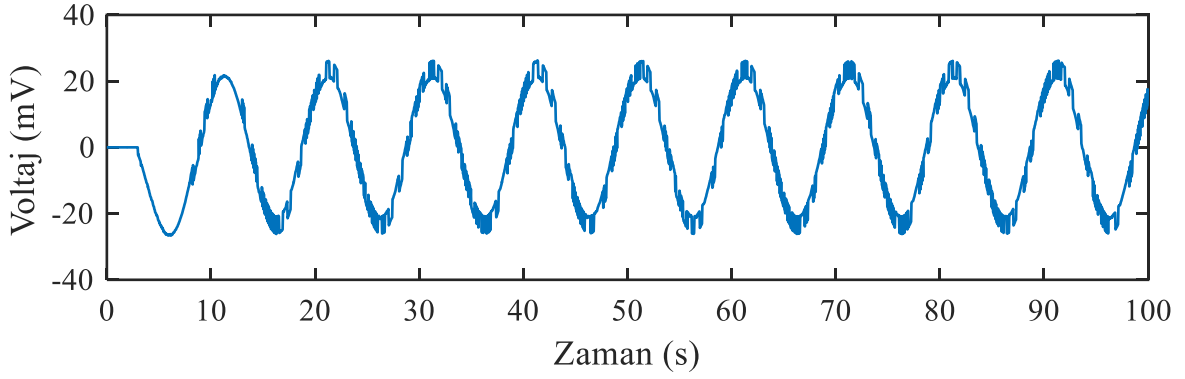
Eyleyicinin KKK yöntemi ile kontrolünde referans takip kontrolü için iki ayrı erişim kuralı ve durum beslemeli model dayanaklı KKK yöntemi kullanılmıştır. Aşağıdaki kısımlarda bu farklı yaklaşımlar için eyleyiciden elde edilen cevaplar farklı frekanslardaki periyodik referanslar için verilmiştir.

#### 3.2.3.1. Referans İzleme Kontrolü

İlk olarak erişim kuralının  $\dot{\sigma}_1 = -\rho \operatorname{sgn}(\sigma)$  olarak seçilmesi durumu için elde edilen sistem cevabı Şekil 3.14'te verilmektedir. Referans takip sinyali 0,1 Hz frekansında ve 250  $\mu\text{m}$  genliğinde sinüs sinyalidir. Bu kontrol uygulamasında eyleyicinin kayma yüzeyine ulaşma kısmı dinamiklerinin görülebilmesi için kontrolcü, referans sinyalinin üretilmesinden üç saniye sonra aktif hale getirilmiştir. Böylece kontrolün direk kayma yüzeyinde başlaması engellenmiştir.

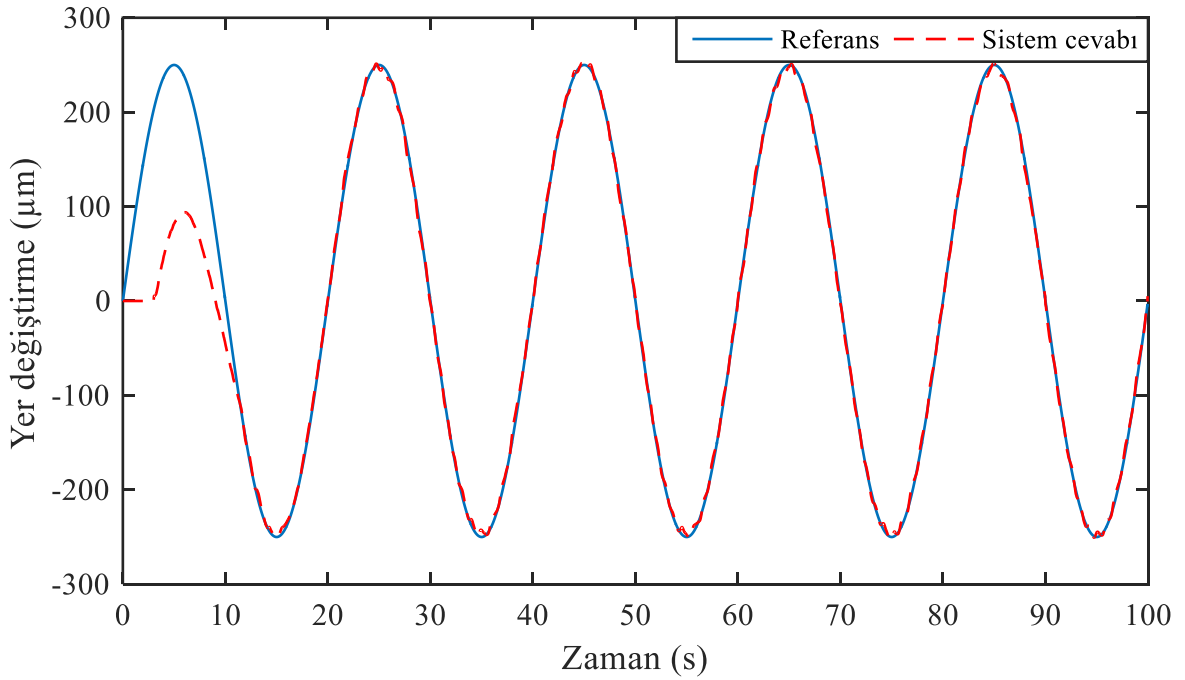


Şekil 3.14.  $\dot{\sigma}_1 = -\rho \operatorname{sgn}(\sigma)$  erişim kuralı ile 0,1 Hz sinüs referans sinyali takip cevabı

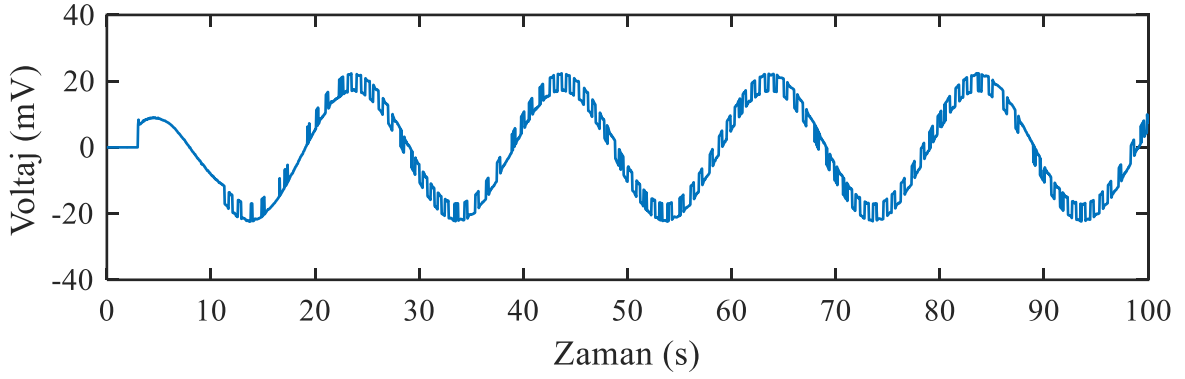


Şekil 3.15.  $\dot{\sigma}_1 = -\rho \operatorname{sgn}(\sigma)$  erişim kuralı ile 0,1 Hz sinüs referans sinyali takibi için eyleyiciye uygulanan kontrol voltajı

Şekilde görüldüğü üzere kontrolcü üçüncü saniyede devreye girdikten sonra sistemin kayma yüzeyine ulaşması için yaklaşık altı saniyelik bir süre geçmiştir. Sistem kayma yüzeyine ulaştıktan sonra kayma kuralı dinamiklerini göstermektedir. Bu durum sistemin kontrol voltajında meydana gelen ani değişimlerden görülebilmektedir. Kayma yüzeyine ulaşıldıktan sonra sistem yüzeyde tutularak verilen referans sinyali takip edilmiştir. Şekil 3.16'da 0,05 Hz sinüs referans sinyali için sistem cevabı verilmiştir.



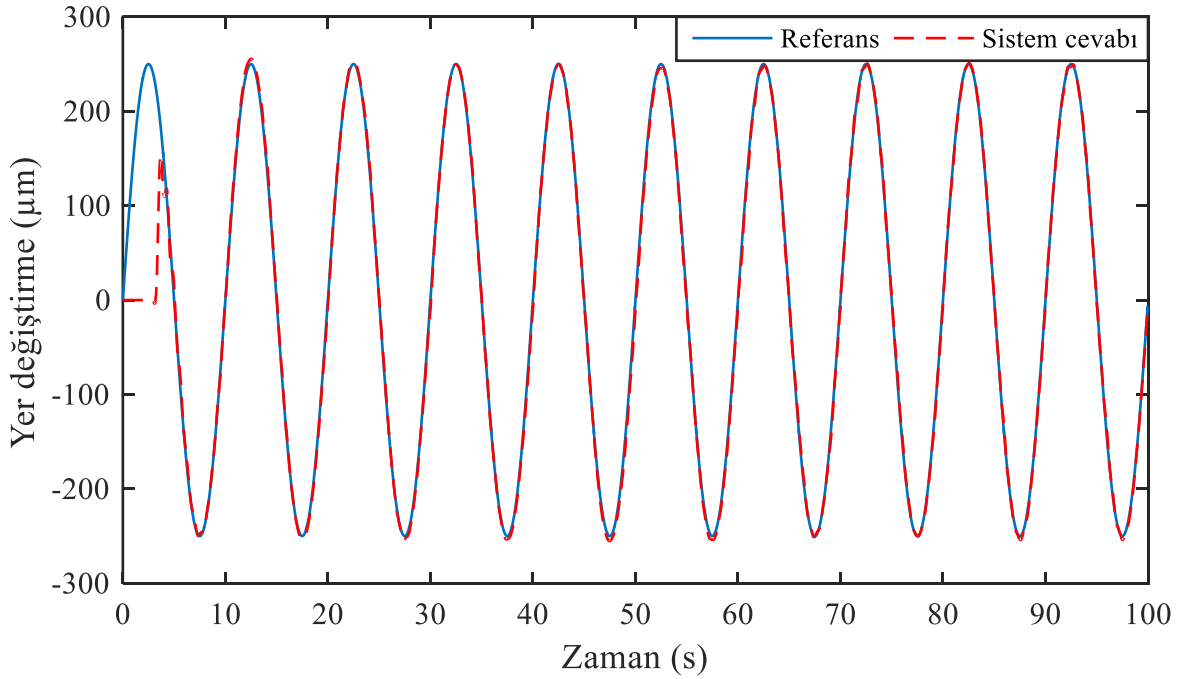
Şekil 3.16.  $\dot{\sigma}_1 = -\rho \operatorname{sgn}(\sigma)$  erişim kuralı ile 0,05 Hz sinüs referans sinyali takip cevabı



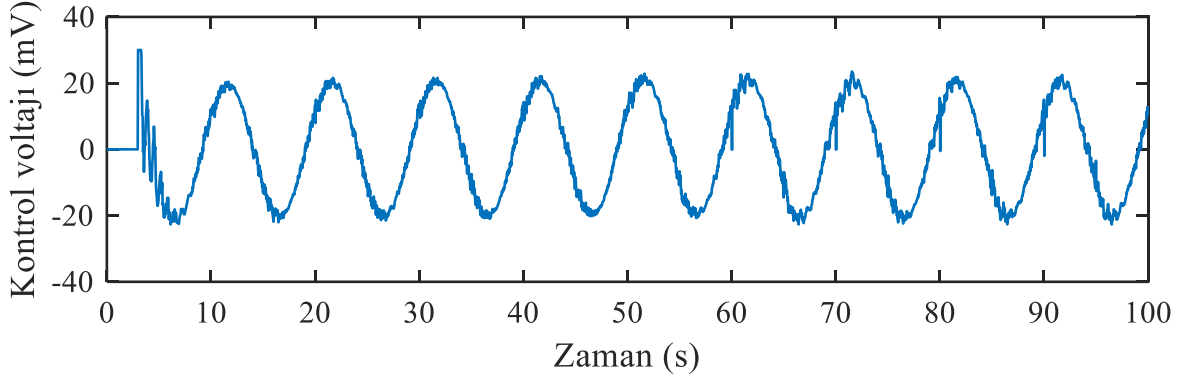
Şekil 3.17.  $\dot{\sigma}_1 = -\rho \operatorname{sgn}(\sigma)$  erişim kuralı ile 0,05 Hz sinüs referans sinyali takibi için eyleyiciye uygulanan kontrol voltajı

Bu deneyde sistemin yüzeye ulaşması daha uzun sürmüştür fakat yüzeye ulaşılması sonrasında eyleyici, verilen referans değerini takip etmiştir.

İkinci olarak erişim kuralı  $\dot{\sigma}_2 = -\delta\sigma$  olması durumunda sistem performansı incelenmiştir. Şekil 3.18’de 0,1 Hz frekansında ve 250  $\mu\text{m}$  genlikli sinüs referans sinyali için sistem cevabı verilmiştir.

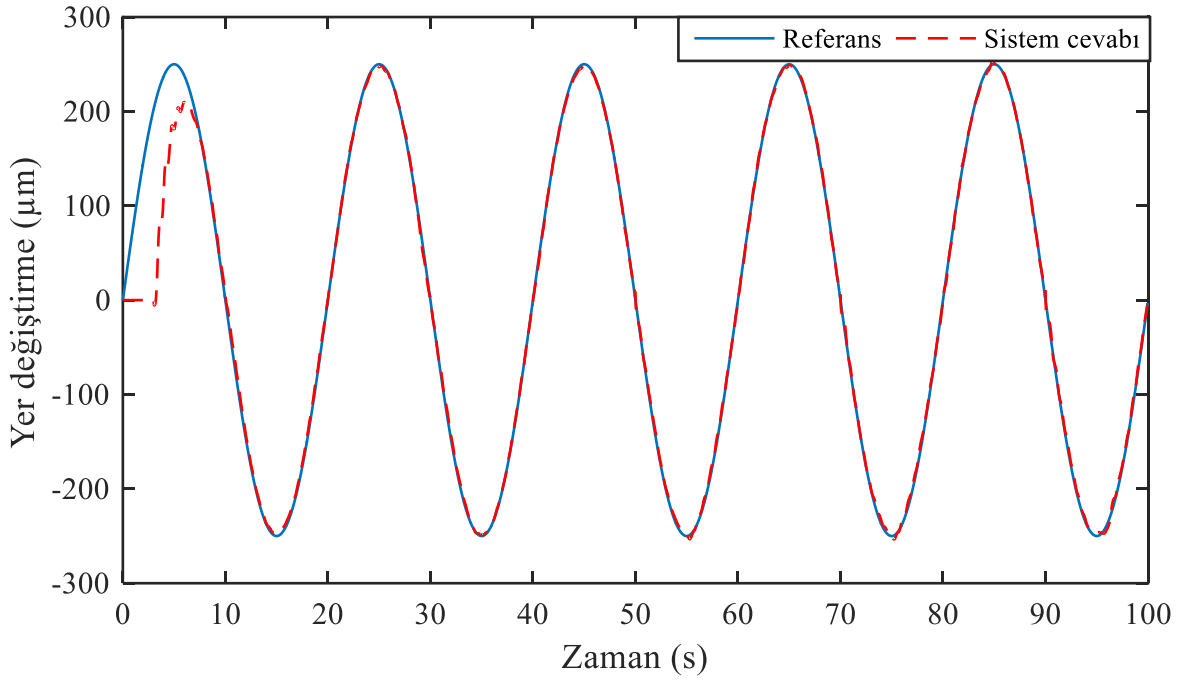


Şekil 3.18.  $\dot{\sigma}_2 = -\delta\sigma$  erişim kuralı ile 0,1 Hz sinüs referans sinyali takip cevabı

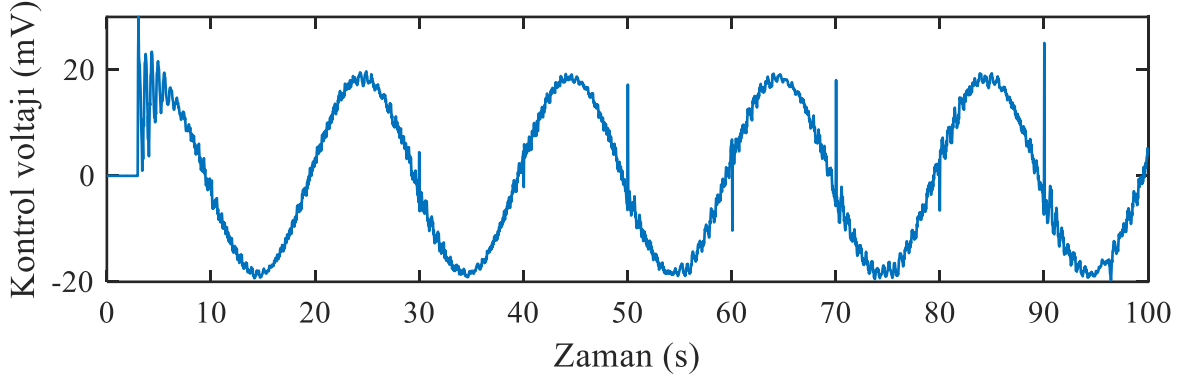


Şekil 3.19.  $\sigma_2 = -\delta\sigma$  erişim kuralı ile 0,1 Hz sinüs referans sinyali takibi için eyleyiciye uygulanan kontrol voltajı

Şekilde görüldüğü üzere erişim kuralının  $\sigma_2 = -\delta\sigma$  olarak seçilmesi diğer kayma kuralına göre kayma yüzeyine erişme süresi bakımından daha agresif bir kontrol performansına neden olmuştur. Üçüncü saniyede aktifleşen kontrolcü yaklaşık üç saniye içerisinde sistemi kayma yüzeyine ulaştırmıştır. Kayma yüzeyine ulaşıldıktan sonra eyleyici referans sinyalini takip etmiştir. Şekil 3.20’de 0,05 Hz 250  $\mu\text{m}$  genlikli sinüs referans sinyali için sistem cevabı verilmiştir.



Şekil 3.20.  $\sigma_2 = -\delta\sigma$  erişim kuralı ile 0,05 Hz sinüs referans sinyali takip cevabı



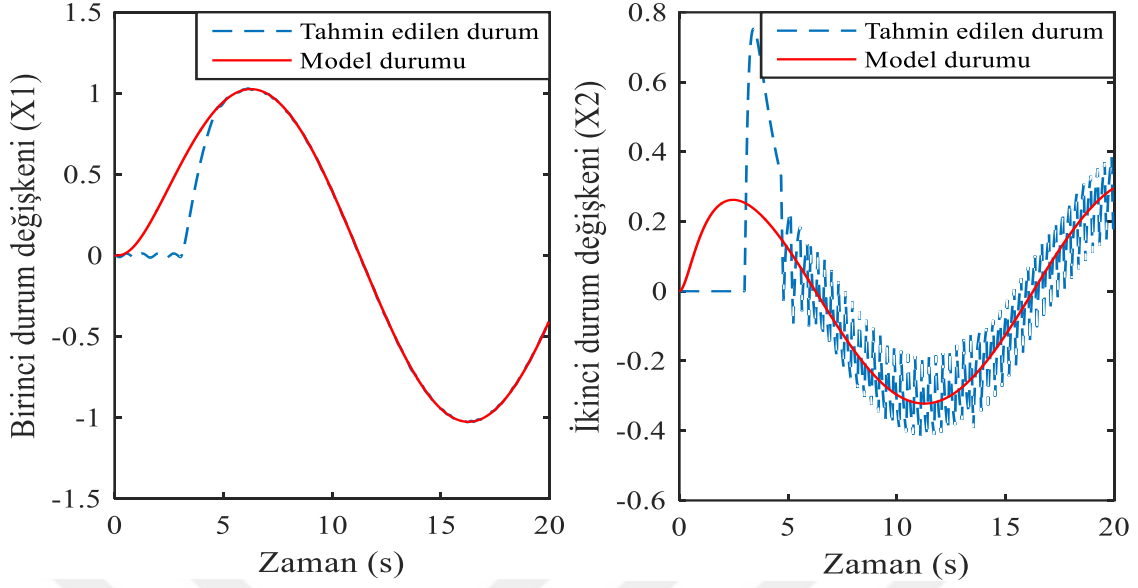
Şekil 3.21.  $\dot{\sigma}_2 = -\delta\sigma$  erişim kuralı ile 0,05 Hz sinüs referans sinyali takibi için eyleyiciye uygulanan kontrol voltajı

Düşük frekanslı sinüs sinyalinin takibinde kayma yüzeyine ulaşma süresi daha uzun sürmüştür. Sistem kayma yüzeyine ulaştıktan sonra referans sinyalini takip etmiştir. Erişim kuralının  $\dot{\sigma}_2 = -\delta\sigma$  olması durumunda kontrol voltajı, hatanın yüksek olduğu yerlerde yüksek değerlere ulaşmıştır. Hatanın en büyük olduğu başlangıç durumundan kalıcı hal durumuna ulaşana kadar sistem için üretilen kontrol voltajı yüksek salınımlar göstermiştir. Bu durum karşısında ise sistem cevabı salınım yaparak referans değerine ulaşmıştır. Kontrol voltajında görülen yüksek salınım değerlerine karşılık sistem cevabında görülen küçük salınımlar eyleyicinin çalışma mekanizmasından kaynaklanmaktadır. İyon transferine dayalı olan eyleyici çalışma mekanizması yüksek frekanslı bir girdi karşısında iyon transferinin yavaş kalması sebebiyle çabuk tepki verememektedir. Ayrıca kontrol voltajında ilerleyen süre içerisinde görülen ani yükselmeler, kontrol voltajının yüksek frekansta değişmesinden kaynaklanmaktadır.

### 3.2.3.2. Model Dayanıklı KKK ile Yer Değiştirme Kontrolü

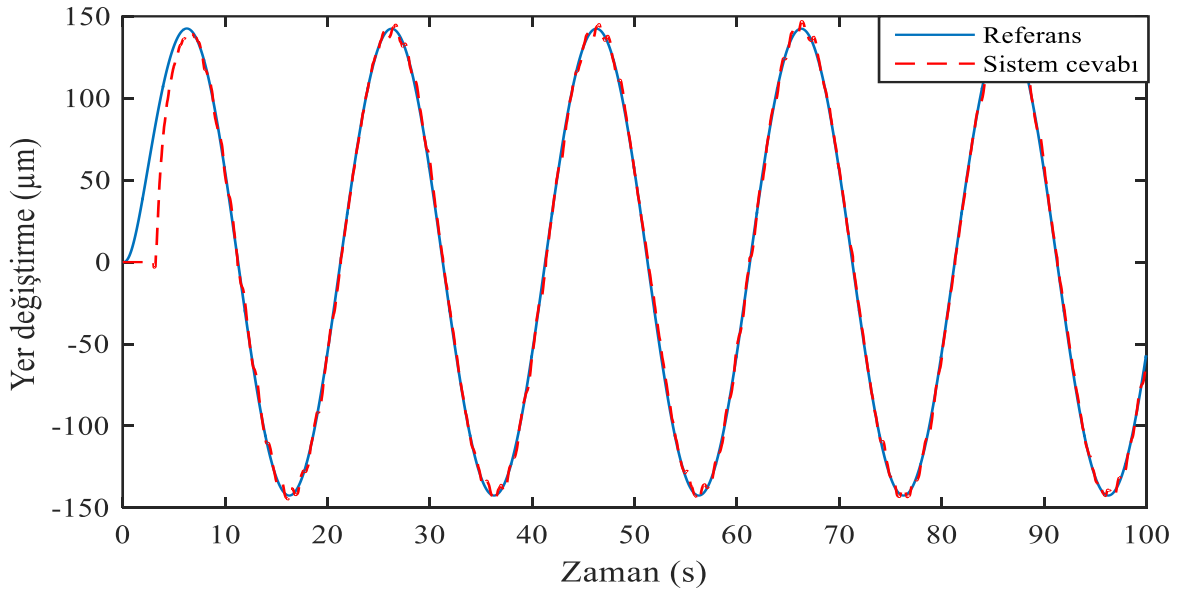
Bu kontrol yönteminde eyleyicinin, belirlenen bir ideal model dinamiğine zorlanarak ideal model cevabını takip etmesi için durum beslemeli model dayanıklı KKK yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla ilk olarak sistem durumlarının sistem cevabı üzerinden tahmin edilmesi için sistem modeli parametrelerinden faydalanarak bir kayan kipli gözlemci tasarlanmıştır. Tasarlama aşamaları kısım 2.5.3.2'de verilen gözlemcinin ideal model durumlarını izleme cevabı 0,05 Hz sinüs referans sinyali için Şekil 3.22'de verilmiştir. Kontrolcü bu uygulamada da referans takip sinyalinden üç saniye sonra aktifleştirilmiştir.



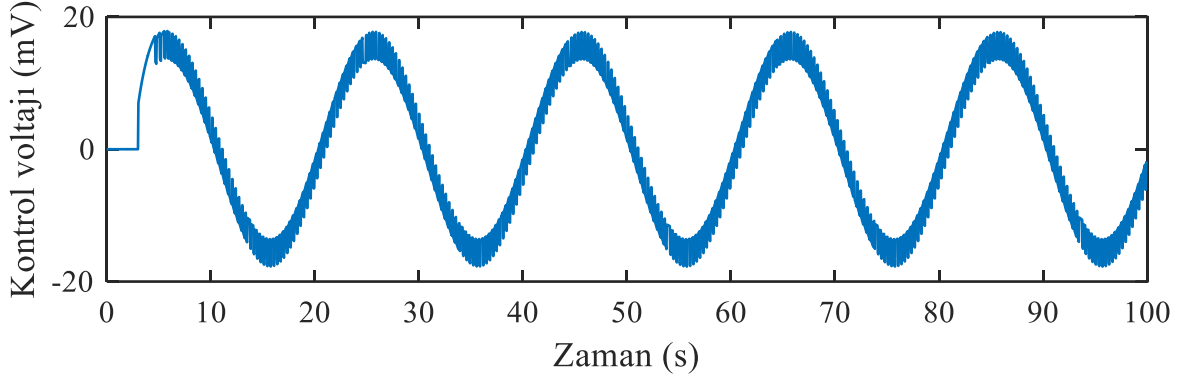


Şekil 3.22. İdeal model durumları ve gözlemci ile tahmin edilen durumlar

Şekilde görüldüğü üzere gözlemci aktif hale geldikten yaklaşık iki saniye sonra model durumlarını iyi bir şekilde tahmin etmektedir. İkinci durum grafiğinde yüksek frekanslı kontrolcünün sistem üzerine olan etkisi görülmektedir. Şekil 3.23'de 0,05 Hz frekansına ve 150  $\mu\text{m}$  genliğe sahip sinüs referans sinyali için ideal model tarafından üretilen cevabın eyleyici tarafından takip cevabı verilmiştir.



Şekil 3.23. Model dayanaklı KKK ile referans takip cevabı



Şekil 3.24. Model dayanaklı KKK ile referans takibi için eyleyiciye uygulanan kontrol voltajı

Şekil 3.22’de görüldüğü üzere gözlemlenen durumların ideal model durumlarına ulaşması ile sistem kayma yüzeyine erişmiştir. Kayma yüzeyine erişimin ardından sistem çıktısı referans değerine üç saniye sonra erişmiştir. Bunun nedeni sistemin durum değişkenleri tabanlı olarak kontrol edilmesinden dolayı kontrolde sistem çıktısının küçük model hatalarından etkilenmesidir. Sistemde başlangıçta aşma görülmemiş fakat ilerleyen zamanda sinüs tepe noktalarında küçük aşmalar görülmüştür. Ayrıca deneysel çalışmada yüksek gözlemci kazancı ve yüksek geri besleme kazancı sistemde salınımlara neden olmuş bu yüzden kazanç değerleri düşük olarak belirlenmiştir. Geri besleme kazancının düşük olması sistemin model dayanaklı KKK kontrolde ileri besleme kontrol girdisinin etkisinin geri beslemeye göre büyük olmasına neden olmuştur. Bu durumda sistem elde edilen sistem modeli dinamiklerini karşılayacak şekilde kontrol girdisi üretmiştir. Böyle bir sistem modelleme hatalarını karşılayamayacaktır. Bu yüzden elde edilen sistem modeli için tasarlanan model dayanaklı KKK, bir örneği yukarıda verilen ilk deney için kabul edilebilir sonuç vermiş sonraki deneylerde model bozulmalarından dolayı ise sistem aynı performansı gösterememiştir.

### 3.2.4. Kontrolcülerin Karşılaştırılması

Yapılan çalışmada eyleyicilerin referans sinyalini izlemeye takip hatalarının belirlenmesi için RMS (Root Mean Square) hataları, kalıcı durum hatalarını belirlemek için kullanılmıştır. Basit tekrarlamalı kontrolcü ile kararlı bir cevap elde edilememesine karşın

eyleyicinin kararlı kaldığı süre için RMS hatası verilmiştir. Aşağıda verilen tablolarla eyleyicinin kuvvet takibi ve konum takibinde meydana gelen RMS hataları verilmiştir.

Tablo 3. Eyleyicinin kuvvet kontrolünde kullanılan kontrol yöntemlerinin kalıcı durum RMS hataları.

Kontrolcü	Takip Sinyali			Kalıcı hal RMS hatası
	Türü	Frekansı(Hz)	Genliği(mN)	
PI	Sinüs	0,1	6,65	0,799
Basit Tekrarlamalı	Sinüs	0,1	6,65	0,319
Geliştirilmiş Tekrarlamalı	Sinüs	0,1	6,65	0,279
Geliştirilmiş Tekrarlamalı	Üçgen	0,1	6,65	0,266

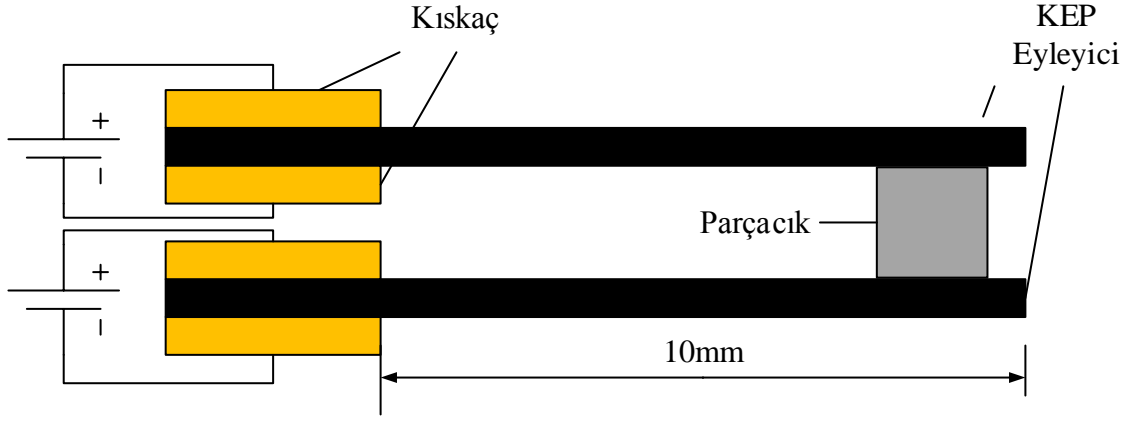
Tablo 4. Eyleyicinin yer değiştirme kontrolünde kullanılan kontrol yöntemlerinin kalıcı durum RMS hataları.

Kontrolcü	Takip Sinyali			Kalıcı hal RMS hatası
	Türü	Frekansı(Hz)	Genliği( $\mu$ m)	
PI	Sinüs	0,1	150	23,5
Basit Tekrarlamalı	Sinüs	0,1	150	2,64
Geliştirilmiş Tekrarlamalı	Sinüs	0,1	150	1,79
Geliştirilmiş Tekrarlamalı	Üçgen	0,1	150	3,39
$\dot{\sigma}_1 = -\rho \operatorname{sgn}(\sigma)$ erişim kurallı KKK	Sinüs	0,1	250	3,51
$\dot{\sigma}_1 = -\rho \operatorname{sgn}(\sigma)$ erişim kurallı KKK	Sinüs	0,05	250	3,56
$\dot{\sigma}_2 = -\delta\sigma$ erişim kurallı KKK	Sinüs	0,1	250	3,86
$\dot{\sigma}_2 = -\delta\sigma$ erişim kurallı KKK	Sinüs	0,05	250	2,71
Model dayanaklı KKK	Sinüs	0,05	250	2,65

### 3.3. Üç Katmanlı KEP Eyleyici İçin Mikro Tutucu Uygulaması

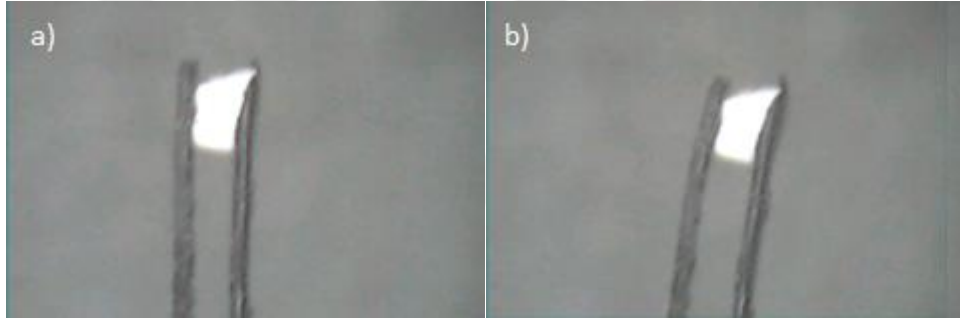
KEP eyleyicilerin biyo-uyumlu olmaları bu eyleyicilerin özellikle mikrobiyolojik uygulamalarda kullanılması adına önemli bir potansiyel oluşturmaktadır. Farklı boyutlarda üretilen bu eyleyiciler çeşitli amaçlar doğrultusunda kullanılabilir. Yapılan bir önceki çalışmada bu KEP eyleyici bir hücre enjeksiyon sisteminde enjeksiyon işlemini gerçekleştirmek için tahrik elemanı olarak düşünülmüş ve bu amaç doğrultusunda belirlenen bir hibrit senaryonun takibi gerçekleştirilmiştir (Sancak vd., 2015). Çalışmada eyleyicinin yer değiştirme ve kuvvet modelleri elde edilmiş ve senaryonun gerçekleştirilmesinde bu modellerden faydalanılarak tasarlanan PI kontrolcülerle eyleyicinin yer değiştirme ve kuvvet büyüklükleri kontrol edilmiştir.

Bu tez çalışmasında ise önceki çalışmanın devamı niteliğinde olarak KEP eyleyici için bir mikro hareket ettirme uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamada, hücre enjeksiyon sistemlerinde enjeksiyon uygulanacak hücrenin veya konumlandırılması gereken bir parçacığın mikro boyutta konumlandırılması veya sabit tutulması amacıyla kullanılacak, KEP eyleyicilerden meydana gelen bir mikro tutucunun (manipülatör, gripper) konumlandırma karakterizasyonu yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda, aynı boyutlarda (1 mm 15 mm 170 µm) KEP eyleyiciler birbirleri ile arasında 1 mm mesafe olacak şekilde konumlandırılarak bir tutucu mekanizması oluşturulmuştur. Bu tutucu mekanizma kullanılarak yeterince hafif olan polistiren malzemesinden kesilen ve yaklaşık olarak (1x1x1) mm ebatlarında olan bir parçacığın konumlandırılması mikroskop altında gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla kullanılan deney düzeneği yer değiştirme kontrolünde kullanılan deney düzeneğine tutucu mekanizmanın bağlanması ile oluşturulmuştur. Önceki kısımlardaki kontrol uygulamalarında kullanılan düzeneden farklı olarak, KEP eyleyicilere ayrı elektriksel gerilimler uygulayabilmek amacıyla, elektrik gerilimi uygulanmasını sağlayan kısaçlar konektör bloğa ayrı ayrı bağlanmıştır. Tutucu mekanizmanın şematik gösterimi Şekil 3.25'te verilmiştir.



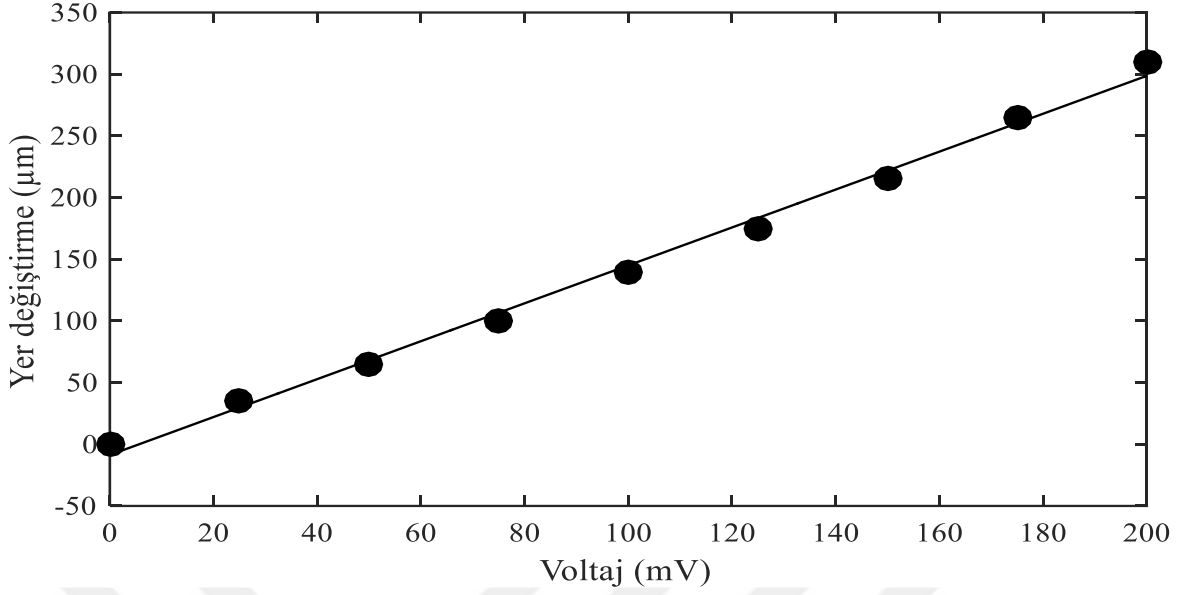
Şekil 3.25. Tutucu mekanizmanın şematik gösterimi

Tutucunun pasif ve elektriksel gerilim altındaki hareketi Şekil 3.26’da verilmektedir.



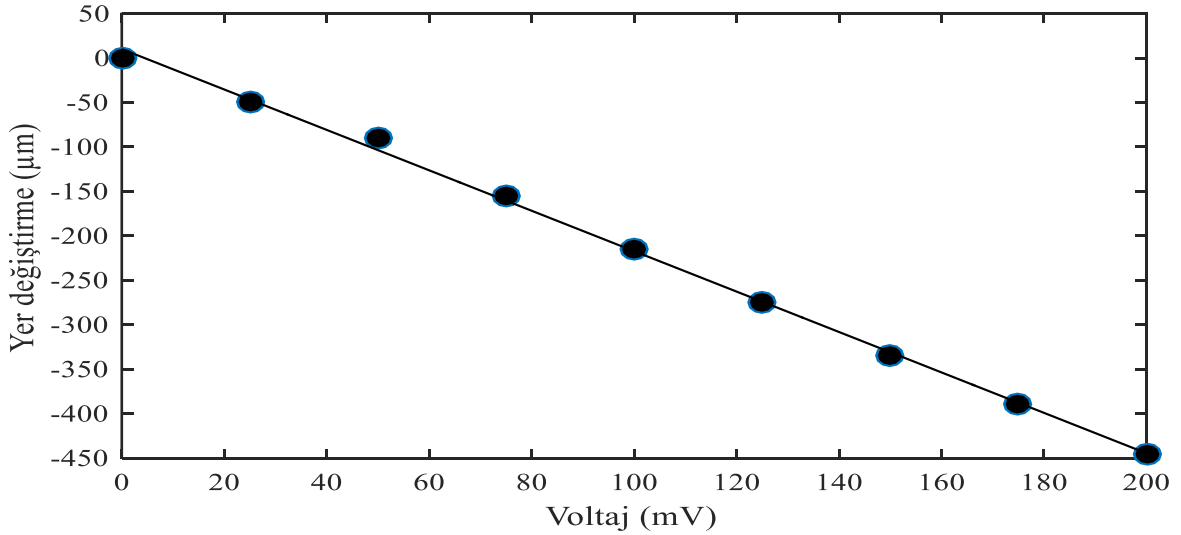
Şekil 3.26. Tutucunun pasif (a) ve aktif (b) durumları

İlk uygulama olarak parçacık eyleyicilere elektrik gerilimi uygulamadan tutucuya tutturulmuştur. Daha sonra yalnızca bir eyleyiciye elektrik gerilimi uygulayarak parçacığın pasif durumda olan eyleyiciye doğru yer değiştirmesi sağlanmıştır. Pasif eyleyici ise sıfır elektrik gerilimi uygulanacak şekilde konektör bloğa bağlanmıştır. Aktif olan polimere 25 mV aralıklar ile 200 mV’a kadar elektrik gerilimi uygulanmıştır. Bu uygulama sonucu parçacığın başlangıç konumundan itibaren uygulanan elektrik gerilimlerine karşı göstermiş olduğu yer değiştirme Şekil 3.27’de verilmektedir.



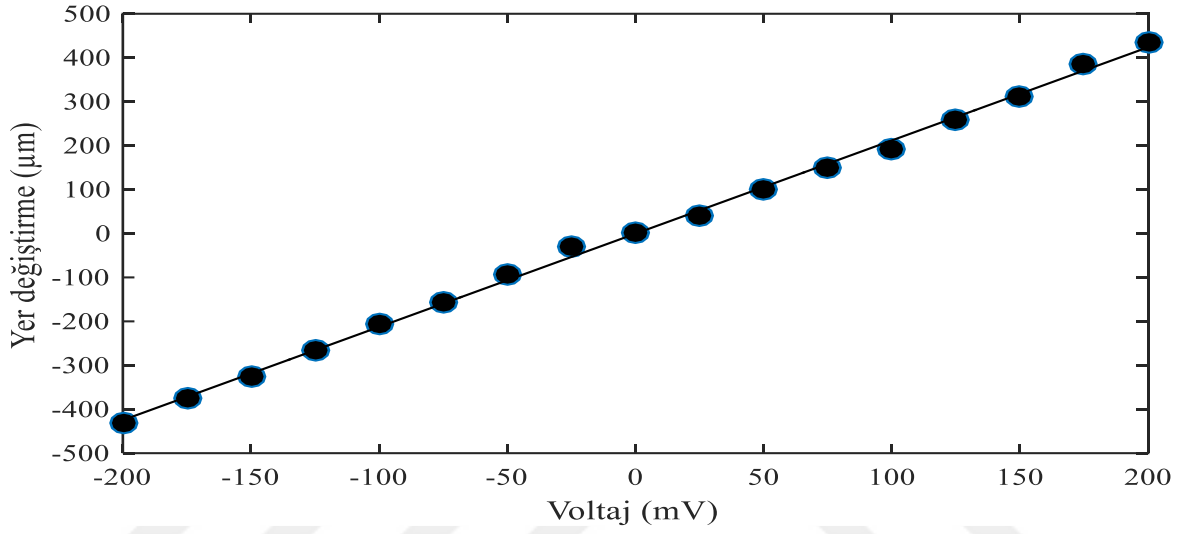
Şekil 3.27. Sadece birinci eyleyiciye basamak girdi voltajı uygulanması durumunda tutucu mekanizma ile elde edilen yer değiştirme

İkinci deneyde ise bir önceki deneyde aktif olan KEP eyleyici pasif bırakılarak diğer polimer eyleyiciye elektrik gerilimi uygulanmış ve parçacığın pasif eyleyiciye doğru yer değiştirmesi sağlanmıştır. İkinci eyleyiciye uygulanan elektriksel gerilime karşılık parçacığın yer değiştirmesi Şekil 3.28’de verilmiştir.



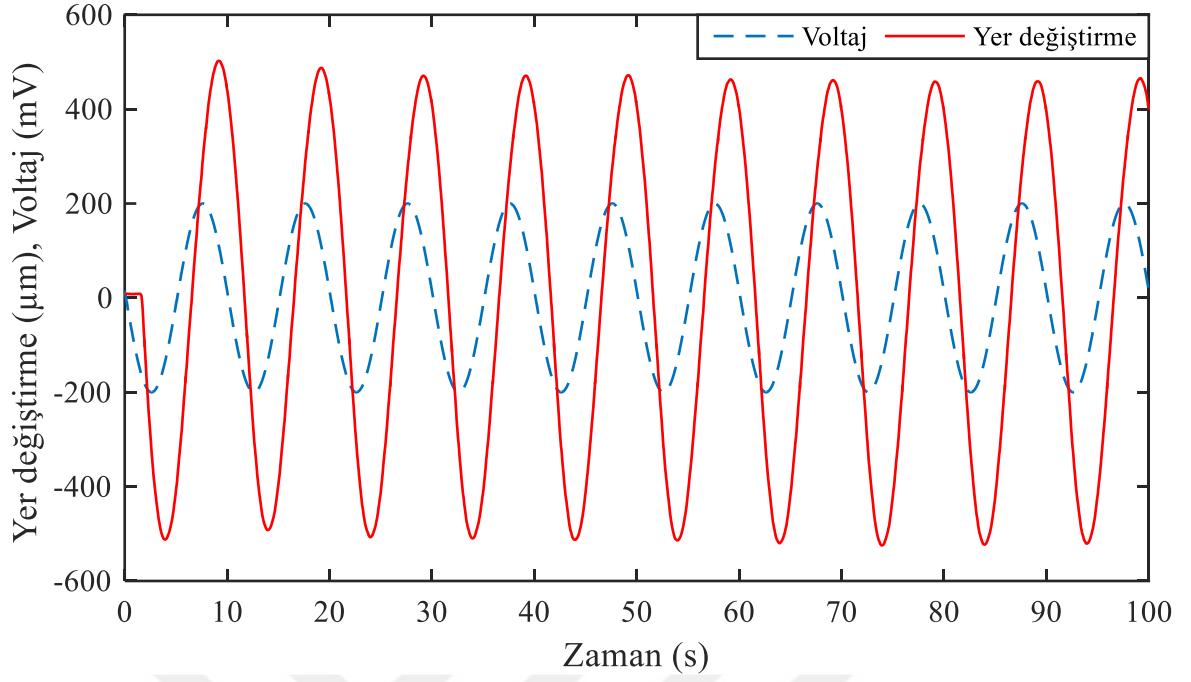
Şekil 3.28. Sadece ikinci eyleyiciye basamak girdi voltajı uygulanması durumunda tutucu mekanizma ile elde edilen yer değiştirme

Bir diğerk deneyde ise iki KEP eyleyicinin de aynı anda aktif olması durumunda tutucu mekanizmanın hareket kabiliyeti incelenmiştir. Bu uygulamada parçacığın tutucu mekanizmadan düşmesini önlemek için her iki KEP eyleyiciye, parçacığa doğru yönelecek şekilde 50 mV'luk bir elektriksel gerilim uygulanmış ve 25 mV aralıklarla iki eyleyiciye birden aynı yöne yönelecek şekilde elektrik gerilimi uygulanmıştır. Deney sonucu elde edilen veriler ise Şekil 3.29'da gösterilmiştir.



Şekil 3.29. İki eyleyiciye aynı anda farklı basamak girdi voltajları uygulanması durumunda tutucu mekanizma ile elde edilen yer değıştirme

Son olarak sistemin periyodik bir referans girdisine karşı cevabı incelenmiştir. Bu uygulamada da parçacığın tutucu mekanizmadan düşmesini önlemek için her iki KEP eyleyiciye, parçacığa doğru yönelecek şekilde 50 mV'luk bir elektriksel gerilim uygulanmış ve daha sonra eyleyicilere 200 mV genliğinde 0,1 Hz frekansında sinüs sinyali aynı yönde hareketi sağlayacak şekilde uygulanmıştır. Deney sonucu elde edilen veriler ise Şekil 3.30'da gösterilmiştir.



şekil 3.30. İki eyleyiciye aynı anda sinüzoidal girdi voltajı uygulanması durumunda tutucu mekanizma ile elde edilen yer değiştirme

şekillerden de anlaşılacağı üzere tutucu mekanizma eyleyicilerin ayrı ayrı tahrik edilmeleri durumunda birbirinden farklı fakat doğrusal sonuçlar gösterirken aynı anda tahrik edilmeleri durumunda iki yönde de eşit yer değiştirme ve doğrusal bir davranış göstermektedir.



#### 4. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, bir ucu ankastre diğer ucu serbest üç katmanlı konjuge tip bir iyonik polimer eyleyicinin serbest ucunun kuvvet uygulama ve mikro ölçekte yer değiştirme davranışı belirli bir çalışma frekansı aralığında ampirik olarak modellenmiş ve farklı kontrol yöntemleri ile eyleyicinin serbest ucunun kontrolü yapılmıştır. Eyleyicilerinin çoğunun periyodik sinyaller altında çalıştığı düşünüldüğünde bu eyleyicinin kontrolü için periyodik referans sinyallerinin takibi seçilmiştir. Ayrıca konjuge iyonik polimer eyleyicilerden oluşan bir mekanik tutucu tasarlanmış ve bu tutucunun mikro ölçekte konumlama davranışı farklı elektrik gerilimleri altında belirlenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalarda, doğrusal olmayan bir yapıya sahip olan eyleyicinin düşük kuvvet uygulama ( $\sim 10$  mN) ve yer değiştirme ( $\sim 1$  mm) değerlerinde doğrusal bir davranış gösterdiği tespit edilmiş ve siyah kutu modelleme yöntemi kullanılarak eğri uyumlama ile eyleyicinin bu aralıkta doğrusal modelleri elde edilmiştir. Eyleyicinin fiziksel yapısından dolayı yüksek çalışma frekanslarında yavaş tepki vermesi ve çok düşük frekanslarda ise doğrusal olmayan davranışlar göstermesi nedeniyle eyleyicinin doğrusal davranış gösterdiği (0,05 Hz – 0,5 Hz) aralığı çalışma frekansı aralığı olarak belirlenmiştir. Belirlenen aralıkta eyleyici cevabı ile uyumlu, doğrusal bir modelin elde edilebilmesi amacıyla modelleme girdi sinyali olarak, verilen frekans aralığında bir değere sahip olan girdi sinyali kullanılmış olduğu gibi eyleyicinin kontrolü için kullanılan periyodik referans takip sinyalleri de aynı aralıkta seçilmiştir. Yapılan kontrol uygulamalarında kontrol parametrelerin belirlenmesi amacıyla eyleyicinin ampirik modelleri kullanılmış deneyler esnasında ise daha iyi bir kontrol performansı için model tabanlı olarak elde edilen kontrol parametreleri üzerinde küçük değişimler yapılmıştır.

Eyleyicinin kuvvet kontrolünde ilk olarak klasik PI kontrolcü kullanılmış ve bu kontrolcü tekrarlamalı kontrolcü ile birlikte kullanıldığında performans artışının rahatça görülebilmesi için çok iyi bir şekilde optimize edilmemiştir. PI kontrolcüye sadece hafıza döngüsü eklenerek tasarlanan basit bir tekrarlamalı kontrol sisteminde eyleyicinin kısa bir süre için periyodik bir sinyali takip etmesine karşın ilerleyen zamanda kontrolcü kararlılığı bozulmuştur. Bu kararlılık sorununun üstesinden gelmek ve daha iyi bir takip performansı elde etmek için tekrarlamalı kontrol sistemi yapısına alçak geçiren filtreler eklenerek geliştirilmiş bir tekrarlamalı kontrol sistemi elde edilmiştir. Bu tekrarlamalı kontrol

sistemiyle kararlı bir kontrol sistemi elde edilmesinin yanı sıra eyleyicinin geçici cevabı iyileştirilmiş, sinüzoidal bir takip sinyali için birinci döngüden sonra sistem cevabı kalıcı hal durumuna geçmiştir. Geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcünün kararlılığı ise rejenerasyon spektrumu adı verilen bir kararlılık ölçütü yardımıyla tüm frekanslar için kararlı olacak şekilde belirlenmiştir.

Eyleyicinin yer değiştirme kontrolünde de basit-geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcüler ve tekrarlamalı kontrol sisteminde kullanılan PI kontrolcü, kuvvet kontrolünde izlenen adımlar kullanılarak tasarlanmıştır. Yer değiştirme kontrolünde basit tekrarlamalı kontrolcü ile uzun süreli sistem cevabında kararlılık sağlanamamış ve geliştirilmiş tekrarlamalı kontrol sistemiyle bu sorun giderilmiştir. Ayrıca sinüzoidal referans sinyali takibinde geliştirilmiş tekrarlamalı kontrolcü ile basit tekrarlamalı kontrolcü cevabında görülen aşmalar giderilmiş ve sistem daha kısa sürede kalıcı hal durumuna geçmiştir.

Bu kontrolcülerin yanında eyleyicinin yer değiştirme kontrolü kayan kipli kontrol yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Kayan kipli kontrol yönteminde Lyapunov eşdeğer kontrol kuralı kullanılarak iki farklı erişim kuralı için farklı frekanslara sahip referans sinyallerinin takibi gerçekleştirilmiştir. Farklı erişim kuralları için sistem cevabının istenilen referans değere erişim süresi bakımından farklılıklar gözlemlenmiştir.  $\dot{\sigma}_2 = -\delta\sigma$  erişim kuralı kullanılarak oluşturulan kontrol sisteminin cevabı  $\dot{\sigma}_1 = -\rho \operatorname{sgn}(\sigma)$  erişim kuralı kullanılmasına göre sistem cevabının kayma yüzeyine erişmesi bakımından daha agresif bir kontrol performansı göstermiş ve sistem daha erken istenilen referans değere erişmiştir. Ayrıca bir başka kayan kipli kontrol yaklaşımı olarak model dayanaklı kayan kipli kontrol sistemi eyleyicinin durum değişkenleri kullanılarak tasarlanmıştır. Bu yöntemde eyleyici durumlarının belirlenebilmesi amacıyla bir kayan kipli gözlemci tasarlanmıştır. Bu yöntem kullanılarak uygulanan kontrol, eyleyici için elde edilen matematiksel model parametrelerine yüksek oranda bağlı olmasından dolayı yapılan ilk deneyler için iyi sonuçlar vermiş fakat eyleyicinin model parametrelerinin bozulması durumunda iyi bir performans sergileyememiştir. Bu yöntemde kararlılık ise kök yerleştirme yöntemi kullanılarak sistem parametreleri tasarımıyla sağlanmıştır.

Bir diğer çalışma olarak; aynı boyutta iki konjuge EAP eyleyiciden oluşan bir mikro tutucu tasarlanmış ve küçük bir objenin bu tutucu mekanizma kullanılarak mikro ölçekte hareket davranışı incelenmiştir. Eyleyicilere ayrı ayrı veya aynı anda elektrik gerilimleri uygulanarak parçacığın yer değiştirmesi ölçülmüştür. Yapılan çalışmalar sonucunda eyleyicilerden yalnızca birinin aktive edilmesi durumunda artan elektrik gerilimine göre

doğrusal bir davranış gösterdiği tespit edilmiştir. Fakat eyleyicilerin birinin aktif olması durumunda aktive edilen eyleyicinin değiştirilmesi ile farklı yer değiştirme miktarları elde edilmiştir. Eyleyicilerin aynı elektrik gerilimleri altında farklı yer değiştirme göstermeleri bir eyleyicide meydana gelen iyon transferinin değerine göre daha fazla olmasından kaynaklanmıştır. Bu durum eyleyici içerisindeki iyon miktarına bağlı olabileceği gibi zamanla meydana gelen kimyasal nedenlerden dolayı bir eyleyicinin daha çok iyon transferine izin vermesi olabilmektedir. Tutucu mekanizma ile yapılan bir diğer çalışmada ise parçacığın tutucu mekanizmadan düşmemesi için bir ön elektrik gerilimi uygulanarak parçacık eyleyiciler arasında kısıtlanmış ve daha sonra eyleyicilere aynı anda basamak ve sinüzoidal bir referans girdisi uygulanmıştır. Bu çalışma sonucunda ise tutucu mekanizma ile parçacığın yer değiştirmesi doğrusal olarak gerçekleşmiş ve her iki yönde eşit bir yer değiştirme elde edilmiştir. Eyleyicilerin aynı anda tahrik edilmesi ile elde edilen doğrusal davranış bu mekanizmanın mikro uygulamalarda kullanılabileceğini desteklemektedir.

## 5. ÖNERİLER

Üç katmanlı konjuge tip iyonik polimer eyleyicilerin karmaşık yapısı tam bir matematiksel modelin elde edilmesini zorlaştırmasının yanında eyleyicide kullanılan iyonik sıvının zaman içinde buharlaşması eyleyici davranışını değiştirmektedir. Bu durumda eyleyici modelinin ampirik olarak türetilmesi gerçek zamanlı kontrol uygulamalarında kullanım açısından faydalı bir yol olmaktadır. Eyleyici modeli türetilirken modelin karşılaması istenilen koşullara göre bir modelleme süreci gerçekleştirilebilir. Böyle bir süreç eyleyici modelinin tüm koşullar altında iyi bir performans göstermesi açısından zayıf kalacak olsa da sadece istenilen koşulların yerine getirilmesini sağlayacak olan bir model hem kolay bulunabilir olacak hem de kontrol uygulamalarında işlem çokluğu oluşturan yüksek dereceden karmaşık modellere göre daha kolay bir kontrolcü tasarım süreci sunacaktır.

KEP eyleyici için modellenmeyen dinamiklerin ve bu tip eyleyicilerde çabuk görülen model parametreleri bozulmalarının var olması bu eyleyicilerin kontrolü için sunulan KKK yöntemi gibi model bozulmalarına karşı etkin sonuçlar veren kontrolcülerin kullanılmasını faydalı kılacaktır. Bu kapsamda, çalışmada kullanılan tekrarlamalı kontrol sisteminde birinci kontrolcü olarak seçilen PI kontrolcü yerine daha etkin sonuçlar veren bir kontrolcünün kullanılması ve kullanılan alçak geçiren filtrelerin geliştirilmesiyle daha iyi sonuçlar elde edilebilecektir. Ayrıca KKK yönteminde erişim koşullarının ve kayma yüzeyinin daha farklı olarak tasarlanması ile yapılabilecek çalışmalarda daha iyi kontrol performanslarının elde edilmesi mümkün olabilecektir.

## 6. KAYNAKLAR

- Alici, G., Metz, P. ve Spinks, G.M., 2006. A methodology towards geometry optimization of high performance polypyrrole (PPy) actuators, Smart Materials and Structures, 15, 2, 243-252.
- Alici, G., Mui, B. ve Cook, C., 2006. Bending modeling and its experimental verification for conducting polymer actuators dedicated to manipulation applications, Sensors and Actuators A: Physical, 126, 2, 396-404.
- Alici, G., ve Huynh, N. N., 2007. Performance quantification of conducting polymer actuators for real applications: a microgripping system, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 12,1, 73-84.
- Alici, G., Spinks, G., Madden, J., Wu, Y. ve Wallace, G., 2008. Response characterization of electroactive polymers as mechanical sensors, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 13, 2, 187-196.
- Alici, G., 2009. An effective modelling approach to estimate nonlinear bending behaviour of cantilever type conducting polymer actuators, Sensors and Actuators B: Chemical, 141, 1, 284-292.
- Bar-Cohen, Y., 2000. Electroactive polymers as artificial muscles capabilities, potentials and challenges, Osada, Y., 936-950, NTS Inc., 2000.
- Bar-Cohen, Y., 2004. Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential, and Challenges, Bar-Cohen, Y., Second Edition P(15-38), PM136, SPIE Press Book.
- Bar-Cohen, Y., ve Zhang, Q., 2008. Electroactive Polymer Actuators and Sensors, MRS Bulletin, 33, 3, 173-181.
- Bar-Cohen, Y., Xue, T., Shahinpoor, M., Simpson, J.O. ve Smith, J., 1998. Low-mass muscle actuators using electroactive polymers (EAP), Proceedings of SPIE's 5th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 3324-3332.
- Baughman, R.H., 1996. Conducting polymer artificial muscles, Synthetic Metals, 78, 3, 339-353.
- Baughman, R.H., 1999. Carbon Nanotube Actuators, Science, 284, 5418, 1340-1344.
- Brochu, P. ve Pei, Q., 2010. Advances in Dielectric Elastomers for Actuators and Artificial Muscles, Macromolecular Rapid Communications, 31, 1, 10-36.

- Carpi, F., De Rossi, D., Kornbluh, R., Pelrine, R. ve Sommer-Larsen, P., 2008. Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers, Carpi, F., De Rossi, D., Kornbluh, R., Pelrine, R. ve Sommer-Larsen, P., Elsevier, Amsterdam, Hollanda.
- Carpi, F. ve Smela, E., 2009. Biomedical Applications of Electroactive Polymer Actuators, Carpi, F. ve Smela, E., Wiley-Blackwell, İngiltere.
- Carpi, F., Kornbluh, R., Sommer-Larsen, P. ve Alici, G., 2011. Electroactive Polymer Actuators as Artificial Muscles: Are They Ready for Bioinspired Applications ?, Bioinspiration & Biomimetics, 4, 6, 045006.
- Choi, G.S., Lim, Y.A. ve Choi, G.H., 2002. Tracking position control of piezoelectric actuators for periodic reference inputs, Mechatronics, 12, 5, 669–684.
- Christophersen, M., Shapiro, B. ve Smela, E., 2006. Characterization and modeling of PPy bilayer microactuators. Part 1. Curvature, Sensors and Actuators B: Chemical, 115, 2, 596-609.
- Cuiyan L., Dongchun Z. ve Xianyi Z., 2004. A survey of repetitive control, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Eylül, Japonya, 2, 1160–1166.
- Della Santa, A., De Rossi, D. ve Mazzoldi, A., 1997. Characterization and modelling of a conducting polymer muscle-like linear actuator, Smart Materials & Structure, 6, 1, 23-24.
- Demirel, B. ve Guvenc, L., 2010. Parameter space design of repetitive controllers for satisfying a robust performance requirement, IEEE Transactions on Automatic Control, 55, 8, 1893–1899.
- Ding, J., Liu, L., Spinks, G., Zhou, D., Wallace, G. ve Gillespie, J., 2003. High performance conducting polymer actuators utilising a tubular geometry and helical wire interconnects, Synthetic Metals, 138, 3, 391-398.
- Edwards, C. ve Spurgeon, S.K., 1998. Sliding Mode Control: Theory and Applications, 1-92, Taylor & Francis, London.
- Fang, B., Ju, M. ve Lin, C., 2007. A new approach to develop ionic polymer-metal composites (IPMC) actuator: Fabrication and control for active catheter systems, Sensors and Actuators A: Physical, 137, 2, 321-329.
- Fang, Y., Pence, T.J. ve Tani X., 2008. Nonlinear elastic modeling of differential expansion in trilayer conjugated polymer actuators, Smart Materials and Structures, 17, 6, 065020.
- Fang, Y. ve Tan, X.B., 2010. A novel diaphragm micropump actuated by conjugated polymer petals: fabrication, modeling, and experimental results, Sensors and Actuators A: Physical, 158, 1, 121-131.

- Fernández, R. B., ve Hedrick, J. K., 1987. Control of multivariable non-linear systems by the sliding mode method. International Journal of Control, 46, 3, 1019-1040.
- Gandhi, M., Murray, P., Spinks, G. ve Wallace, G., 1995. Mechanism of electromechanical actuation in polypyrrole, Synthetic Metals, 73, 3, 247-256.
- Hara, S., Yamamoto, Y., Omata, T. ve Nakano, M., 1988. Repetitive control system: A new type servo system for periodic exogenous signals, IEEE Transactions on Automatic Control, 33, 7, 659-668.
- Hara, S., Zama, T., Takashima, W. ve Kaneto, K., 2005, Free-standing polypyrrole actuators with response rate of 10.8% $s^{-1}$ , Synthetic Metals, 149, 2-3, 199-201.
- Hara, S., Zama, T., Takashima, W. ve Kaneto, K., 2005. Free-standing gel-like polypyrrole actuators doped with bis(perfluoroalkylsulfonyl)imide exhibiting extremely large strain, Smart Materials & Structures, 14, 6, 1501-1510.
- Hutchison, A.S., Lewis, T.W., Moulton, S.E., Spinks, G.M. ve Wallace, G.G., 2000. Development of Polypyrrole-based Electromechanical Actuators, Synthetic Metals, 113, 1, 121-127.
- İtik, M., 2013. Repetitive control of a trilayer conjugated polymer actuator, Sensors and Actuators A: Physical, 194, 1449-159.
- İtik, M., Sabetghadam, M. ve Alici, G., 2014. Force control of a tri-layer conducting polymer actuator using optimized fuzzy logic control, Smart Materials and Structures, 23, 12, 125024.
- John, S.W., Alici, G. ve Cook, C.D., 2010. Inversion-based feedforward control of polypyrrole trilayer bender actuators, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 15, 1, 149-156.
- Kaneto, K., Kaneko, M., Min, Y. ve MacDiarmid, A.G., 1995. "Artificial muscle": Electromechanical actuators using polyaniline films, 71, 1-3, 2211-2212.
- Kim, K.J. ve Shahinpoor, M., 2002. Development of three dimensional ionic polymer-metal composites as artificial muscles, Polymer, 4329, 223-232.
- Kim, K.J. ve Shahinpoor, M., 2003. Ionic polymer-metal composites: II. Manufacturing techniques, Smart Materials and Structures, 12, 1, 65-79.
- Lee, S. ve Kim, K.J., 2006. Design of IPMC actuator-driven valve-less micropump and its flow rate estimation at low Reynolds numbers, Smart Materials and Structures, 15, 4, 1103-1109.
- Lee, S., 2006. Modeling of an IPMC Actuator-driven Zero-Net Mass-Flux Pump for Flow Control, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 17, 6, 533-541.

- Li, J.Y. ve Nemat, Nasser S., 2000. Micromechanical analysis of ionic clustering in Nafion perfluorinated membrane, Mechanics of Materials, 32, 5, 303-314.
- Longman, R.W., 2010. On the Theory and Design of Linear Repetitive Control, European Journal of Control, 10.3166/EJC.16.447–496.
- Madden, J., Cush, R., Kanigan, T. ve Hunter, I., 2000. Fast contracting polypyrrole actuators, 113, 1-2, 185-192.
- Madden, J.D.W., Madden, P.G.A. ve Hunter, I.W., 2001. Polypyrrole actuators: Modelling and performance, *Smart Structures and Materials: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, Temmuz, California, ABD, 4329, 72-83.
- Madden, P.G.A., 2003. Development and modeling of conducting polymer actuators and the fabrication of a conducting polymer based feedback loop, *Doktora Tezi*, Massachusetts Institute of Technology (MIT), ABD.
- Madden, J.D.W., Vandesteeg, N.A., Anquetil, P.A. , Madden, P.G.A., Takshi, A., Pytel, R.Z., Lafontaine, S.R., Wieringa, P.A. ve Hunter, I.W., 2004. Artificial Muscle Technology: Physical Principles and Naval Prospects, IEEE Journal of Oceanic Engineering, 29, 3, 706-728.
- Mirfakhrai, T., Madden J.D.W. ve Baughman R.H., 2007. Polymer artificial muscles, Materials Today, 10, 4, 30-38.
- Necipoglu, S., Cebeci, S.A., Has, Y.E., Guvenc, L. ve Basdogan C., 2011. Repetitive control of an XYZ piezo-stage for faster nano-scanning: numerical simulations and experiments, Mechatronics, 21, 6, 1098–1107.
- Necipoglu, S., Cebeci, S.A., Has, Y.E., Guvenc, L. ve Basdogan, C., 2011. Robust repetitive controller for fast AFM imaging, IEEE Transactions on Nanotechnology, 10, 5, 1074–1082.
- Nemat-Nasser, S., 2002. Micromechanics of actuation of ionic polymer-metal composites, Journal of Applied Physics, 92, 5, 2899-2915.
- Nemat-Nasser, S. ve Wu, Y., 2003. Comparative experimental study of ionic polymer–metal composites with different backbone ionomers and in various cation forms, Journal of Applied Physics, 93, 9, 5255-5267.
- Nemat-Nasser, S. ve Thomas, C.W., 2004. Ionic Polymer-Metal Composites, *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential, and Challenges*, Bar-Cohen, Y., Second Edition P(15-38), PM136, SPIE Press Book.
- Nemat-Nasser, S. ve Zamani, S., 2006. Modeling of electrochemomechanical response of ionic polymer-metal composites with various solvents, Journal of Applied Physics, 100, 6, 064310.



- Oguro, K., Kawami, Y., ve Takenaka, H., 1992. An actuator element of polyelectrolyte gel membrane-electrode composite, Osaka Kogyo Gijutsu Shikensho Kiho, 43, 1, 21.
- Osada, Y., Okuzaki, H. ve Hori, H., 1992. A polymer gel with electrically driven motility, Nature, 355, 6357, 242-244.
- Otero, T.F., 1977. Handbook of organic conductive molecules and polymers, 517-594, Wiley, ABD.
- Pei, Q. ve Ingnas, O., 1992. Electrochemical applications of the bending beam method: 1. mass transport and volume changes in polypyrrole during redox, Journal of Physical Chemistry, 96, 25, 10507-10514.
- Pei, Q. ve Ingnas, O., 1992. Electrochemical applications of the bending beam method: 2. Electroshrinking and slow relaxation in polypyrrole, Journal of Physical Chemistry, 97, 22, 6034-6041.
- Qi, B., Lu, W. ve Mattes, B.R., 2002. Control system for conducting polymer actuators, Smart Structures and Materials: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), Mart, ABD, 4695, 359-366.
- Sancak, C., Coşkun, M.Y. ve İtik, M., 2015. Elektro-Aktif Üç Katmanlı Konjuge Bir Polimer Eyleyicinin Hibrit Kontrolü, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı (TOK'15), Eylül, Denizli, Bildiriler Kitabı: 15-20.
- Schreyer, H.B., Nouvelle, G., Kim, K.J. ve Shahinpoor, M., 2000. Electrical Activation of Artificial Muscles Containing Polyacrylonitrile Gel Fibers, Biomacromolecules, 1, 4, 642-647.
- Segalman, D.J., Witkowski, W.R., Adolf, D.B. ve Shahinpoor, M., 1992. Theory and application of electrically controlled polymeric gels, Smart Materials and Structures, 1, 1, 95-100.
- Shahinpoor, M. ve Kim, K.J., 2001. Ionic polymer-metal composites: I. Fundamentals, Smart Materials and Structures, 10, 4, 819-833.
- Shahinpoor, M. ve Kim, K.J., 2002. A novel method of manufacturing three-dimensional ionic polymer-metal composites (IPMCs) biomimetic sensors, actuators and artificial muscles, Polymer, 43, 3, 797-802.
- Shahinpoor, M. ve Kim, K.J., 2005. Ionic polymer-metal composites: IV. Industrial and medical applications, Smart Materials and Structures, 14, 1, 197-214.
- Shahinpoor, M. ve Schneider, H., 2008. Intelligent Materials, Royal Society of Chemistry, İngiltere.
- Shiga, T. ve Kurauchi, T., 1990. Deformation of polyelectrolyte gels under the influence of electric field, Journal of Applied Polymer Science, 39, 112, 2305-2320.

- Slotine J. J. E., Li W., 1991. *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Smela, E., 2003. Conjugated polymer actuators for biomedical applications, *Journal of Advanced Materials*, 15, 6, 481-494.
- Srinivasan, K. ve Shaw, F.R., 1991. Analysis and design of repetitive control systems using the regeneration spectrum, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 113, 2, 216– 222.
- Tanaka, T., Nishio, I., Sun, S. ve Ueno-Nishio, S., 1982. Collapse of Gels in an Electric Field, *Science*, 218, 4571, 467-469.
- Tiwari, R. ve Kim, K.J., 2010. Disc-shaped ionic polymer metal composites for use in mechano-electrical applications, *Smart Materials and Structures*, 19, 6, 065016.
- Tomizuka, M., Tsao, T.C. ve Chew, K.K., 1989. Analysis and synthesis of discrete-time repetitive controllers, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 111, 3, 353–358.
- Tsai, M.C. ve Yao, W.S., 2002. Design of a plug-in type repetitive controller for periodic inputs, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 10, 4, 547–555.
- Utkin, V.I., 1977. Variable Structure Systems with Sliding Modes, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 22, 2, 212-222.
- Utkin, V.I., 1978. *Sliding Modes and Their Applications in Variable Structure Systems*, 1-120, Mir Publishers, Moscow.
- Utkin, V.I., 1992. *Sliding Modes in Control and Optimization*, Springer Verlag, Berlin.
- Wallace, G., Spinks, G., Kane-Maguire, L. ve Teasdale, P., 2003. *Conductive Electroactive Polymers*, CRC Press, Florida, ABD.
- Wang, X., Alici, G., & Nguyen, C. H., 2012. Adaptive sliding mode control of tri-layer conjugated polymer actuators, *Smart Materials and Structures*, 22, 2, 025004.
- Yao, Q., Alici, G. ve Spinks, G.A., 2008. Feedback control of tri-layer polymer actuators to improve their positioning ability and speed of response, *Sensors and Actuators A: Physical*, 144, 1, 176-184.
- Yeom, S.W. ve Oh, I.K., 2009. A biomimetic jellyfish robot based on ionic polymer metal composite actuators, *Smart Materials and Structures*, 18, 8, 085002.
- Zama, T., Tanaka, N., Takashima, W. ve Kaneto, K., 2006. Fast and Large Stretching Bis(trifluoromethylsulfonyl)imide (TFSI)-doped Polypyrrole Actuators and Their Applications to Small Devices, *Polymer Journal*, 38, 7, 669-677.

Zhou, D., Wallace, G.G., Spinks, G.M., Riu, L., Cowan, R., Saunders, E. ve Newbold, C., 2003. Actuators for the cochlear implant, Synthetic Metals, 135-136, 39-40.



## ÖZGEÇMİŞ

Caner SANCAK 1991 yılında Rize’de doğdu. 2008 yılında Pazar 75.Yıl İMKB Anadolu Lisesi’nden mezun olduktan sonra aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü’nde lisans öğrenimine başladı ve 2012 yılında mezun oldu. 2013 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı.

