

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KONJUGE ELEKTRO-AKTİF POLİMER EYLEYİCİLERİN GÖRÜNTÜ  
TABANLI KONTROLÜ VE UYGULAMALARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makina Mühendisi Mustafa Yavuz COŞKUN**

**OCAK 2016  
TRABZON**



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

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KONJUGE ELEKTRO-AKTİF POLİMER EYLEYİCİLERİN GÖRÜNTÜ TABANLI  
KONTROLÜ VE UYGULAMALARI**

**Mustafa Yavuz COŞKUN**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde**

**"MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ"**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 / 01 / 2016**

**Tezin Savunma Tarihi : 06 / 01 / 2016**

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

**Trabzon 2016**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalında  
Mustafa Yavuz COŞKUN tarafından hazırlanan**

**KONJUGE ELEKTRO-AKTİF POLİMER EYLEYİCİLERİN GÖRÜNTÜ TABANLI  
KONTROLÜ VE UYGULAMALARI**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 08 / 12 / 2015 gün ve 1630 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
olarak kabul edilmiştir.**

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Doç.Dr. Mehmet İTİK** .....

**Üye : Yrd.Doç.Dr. Nurhan ÖZMEN** .....

**Üye : Yrd.Doç.Dr. Evren SAMUR** .....

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Yapılan bu tezde konjuge elektro-aktif polimer (EAP) eyleyicilerin konum kontrolü için görüntü tabanlı kontrol yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemin konum kontrolü için sıklıkla kullanılan ve belli kısıtları bulunan lazer mesafe ölçerlerin yerini alarak EAP eyleyicilerin kontrolü üzerine yapılan çalışmaların önünü açabileceği düşünülmüştür. Bu amaç doğrultusunda EAP eyleyicilerin çeşitlerinden kısaca bahsedilerek bu tezde kullanılan konjuge EAP eyleyicinin çalışma mekanizmasına odaklanılmış ve önerilen yöntem olan görüntü tabanlı kontrol üzerine detaylı bilgiler verilmiştir. Daha sonra, lazer mesafe ölçer ve görüntü tabanlı konum kontrol yöntemlerinin deneysel olarak kıyaslaması yapılarak önerilen yöntemin geçerliliği ve lazer mesafe ölçerlerin kısıtları ortadan kaldırıldığında yapılabilecek uygulamaların bir kısmı yapılan deneysel çalışmalarla gösterilmiştir.

Öncelikle yüksek lisans eğitimimin başlangıcından itibaren tecrübe ve bilgisiyle gidebileceğim yolları bana gösteren, öğrenmeyi öğrenmenin ne kadar önemli olduğunu daima hatırlatan ve bu tezin ortaya çıkmasında yardım ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet İtik'e, bugünlere ulaşmam için her daim beni destekleyen değerli aileme, verdiğim kararlarda daima yanımda olan Elife ŞAHİN'e, çalışmalarım esnasında zorlandığım anlarda bana destek olan Arş. Gör. Caner SANCAK'a, bölümdeki diğer tüm hocalarıma ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mustafa Yavuz COŞKUN

Trabzon 2016



## **TEZ ETİK BEYANNAMESİ**

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Konjuge Elektro-aktif Polimer Eyleyicilerin Görüntü Tabanlı Kontrolü ve Uygulamaları” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Doç. Dr. Mehmet İtik’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. 06/01/2016

Mustafa Yavuz COŞKUN

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VII
SUMMARY .....	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Konjuge Elektro-aktif Polimer Eyleyiciler.....	8
2. METODLAR.....	14
2.1. Görüntü İşleme .....	14
2.1.1. Griye Dönüştürme .....	16
2.1.2. Renk Kanallarının Ayrılması.....	17
2.1.3. İlgi Alanı.....	18
2.1.4. Eşikleme .....	20
2.1.5. Kapama.....	22
2.1.5.1. Yapısal Eleman.....	23
2.1.5.2. Genleşme .....	24
2.1.5.3. Aşınma.....	25
2.1.6. Belirleme .....	26
2.1.7. Koordinat Çıkarımı.....	26
2.2. Görüntü Tabanlı Kontrol .....	27
2.3. Kontrolcü.....	31
2.3.1. PID Kontrolcü .....	31
2.3.2. Smith Öngörücüsü .....	32
3. YAPILAN ÇALIŞMALAR .....	35
3.1. Giriş.....	35
3.2. Görüntü Tabanlı Konum Kontrolünün Yeterliliği.....	36

3.2.1.	Görüntü İşleme .....	36
3.2.2.	Deney Düzenegi .....	37
3.2.3.	Eyleyicinin Doğrusal Konum Modelinin Belirlenmesi.....	39
3.2.4.	Kontrolcü Parametreleri .....	41
3.2.5.	Uygulama ve Sonuçlar .....	42
3.3.	Görüntü Tabanlı Konum Kontrolünde Gecikmenin Giderilmesi.....	44
3.3.1.	Kontrolcü Parametreleri .....	44
3.3.2.	Uygulama ve Sonuçlar .....	45
3.4.	Görüntü Tabanlı Kontrol Sistemi ile Hibrit Kontrol Uygulaması.....	47
3.4.1.	Deney Düzenegi .....	48
3.4.2.	Eyleyicinin Doğrusal Konum ve Kuvvet Modelinin Belirlenmesi .....	49
3.4.3.	Kontrolcü Parametreleri .....	53
3.4.4.	Uygulama ve Sonuçlar .....	53
3.5.	Hibrit Kontrol Uygulamasında Görüntü Tabanlı Kontrol Kaynaklı Gecikmenin Giderilmesi.....	56
3.5.1.	Görüntü İşleme .....	56
3.5.2.	Deney Düzenegi .....	58
3.5.3.	Eyleyicinin Doğrusal Konum ve Kuvvet Modelinin Belirlenmesi .....	59
3.5.4.	Kontrolcü Parametreleri .....	62
3.5.5.	Uygulama ve Sonuçları .....	63
4.	SONUÇLAR .....	67
5.	ÖNERİLER .....	70
6.	KAYNAKLAR.....	71
	ÖZGEÇMİŞ	

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

KONJUGE ELEKTRO-AKTİF POLİMER EYLEYİCİLERİN GÖRÜNTÜ TABANLI  
KONTROLÜ VE UYGULAMALARI

Mustafa Yavuz COŞKUN

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Doç. Dr. Mehmet İTİK  
2016, 75 Sayfa

Konjuge elektro-aktif polimer (EAP) eyleyiciler elektriksel gerilim altında içyapısında meydana gelen iyon transferi sayesinde şekil değişikliği gösterebilen akıllı malzemelerdir. Konjuge EAP eyleyicilerin konum kontrolü için yaygın olarak lazer mesafe ölçerler kullanılmaktadır. Lazer mesafe ölçerler yüksek maliyetli ve görece büyük boyutlu olmaları, genelde tek eksenle ölçüm yapabilmeleri ve bu sebepten dolayı eyleyicinin yaptığı hareketi belli bir noktadan sonra ölçememeleri sisteme ve konjuge EAP eyleyicilerle yapılan çalışmalara kısıtlar getirmektedir. Yapılan bu tezde eyleyicinin konum kontrolü için görüntü tabanlı bir sistem önerilmiş ve görüntü tabanlı konum kontrolü ile lazer mesafe ölçerlerin kullanıldığı sistemler karşılaştırılmıştır. Önceki yöntemin kısıtlamalarının kaldırılmasından sonra görüntü tabanlı kontrol sistemi hibrit kontrol sistemi ile kullanılarak bir dizi konum ve kuvvet değişimi içeren senaryo deneysel olarak çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen görüntü tabanlı kontrol sistemiyle konjuge EAP eyleyicilerin hassas konum kontrolünün yapılabileceği ve lazer mesafe ölçer kaynaklı kısıtların kaldırılmasıyla eyleyicilerin potansiyel kullanım alanlarının genişletilebileceğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Konjuge elektro-aktif polimer eyleyici, Görüntü tabanlı kontrol, Hibrit kontrol, Smith öngörücüsü

Master Thesis

SUMMARY

VISION-BASED CONTROL AND APPLICATIONS OF CONJUGATED ELECTRO-  
ACTIVE POLYMER ACTUATORS

Mustafa Yavuz COŞKUN

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Mechanical Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet İtik  
2016, 75 Pages

Conjugated electro-active polymer (EAP) actuators are smart materials which response electrical stimulation by changing their shape and dimension via ion transfer in micro structure level. Laser distance sensors are widely used for position control of conjugated EAP actuators. Although their widely usage, they are costly and have relatively large size. They can usually measure movement only in single axis and cannot measure after a certain point. These disadvantages limit research on position control of conjugated EAP actuators. This thesis presents a vision-based position measurement method for position control of conjugated EAP actuators. The proposed vision-based position control system is compared with systems using laser distance sensor. After removal of the restrictions of the previous system, an experiment including position and force control has been performed by a hybrid controller system using the vision-based position control method. Results show that, the proposed vision based position control method is able to precisely control position of conjugated EAP actuators and eliminating the necessity of laser distance sensors for control widens the application areas for conjugated EAP.

**Key Words:** Conjugated electro-active polymer actuators, Vision based control, Visual servoing, Hybrid control, Smith predictor

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.1.	3 katmanlı PPy(PVDF) konjuge EAP eyleyicinin uygulanan voltaj karşısında bükülme hareketi yapması .....	3
Şekil 1.2.	İki ekseninde gerçekleşen hareketin incelenmesi .....	5
Şekil 1.3.	Lazer mesafe ölçerinin eyleyicinin hareketine bağlı olarak ölçüm yapabilme durumu .....	6
Şekil 1.4.	Konjuge polimerlerden polipirol ve polianilin'in kimyasal yapısı .....	8
Şekil 1.5.	Polipirol polimerin yarı iletken ve iletken hâl geçişi (Anquetil, 2005). .....	9
Şekil 1.6.	İletken polimerin yükseltgenme sonucunda genişmesi (Price, 2012). .....	11
Şekil 1.7.	İletken polimerin indirgenme sonucunda daralması .....	11
Şekil 1.8.	Üç katmanlı PPy(PVDF) konjuge EAP eyleyici .....	12
Şekil 1.9.	PPy(PVDF) eyleyicinin redoks tepkimesi sonucu bükülme hareketi .....	13
Şekil 2.1.	Elektro manyetik tayfin sınıflandırılması (Ronan, 2015). .....	14
Şekil 2.2.	Tek nesne takibinde kullanılan yöntemler ve sıralamaları .....	15
Şekil 2.3.	Çoklu nesne takibinde kullanılan yöntemler ve sıralamaları .....	16
Şekil 2.4.	Kırmızı (R), yeşil (G) ve mavi (B) renk kanallarından oluşan renkli (RGB) görüntü .....	17
Şekil 2.5.	Renk kanallarına ayrılan renkli görüntü .....	18
Şekil 2.6.	Görüntü üzerinde statik ilgi alanı yaklaşımının uygulanması .....	19
Şekil 2.7.	8 bit gri görüntü üzerinde eşikleme uygulaması .....	20
Şekil 2.8.	a) Renkli görüntü b) Gri görüntü c) Gri görüntüdeki piksellerin gri seviyelerine göre dağılımını veren histogram .....	21
Şekil 2.9.	Farklı eşik değerleri ile elde edilen siyah-beyaz görüntüler .....	22
Şekil 2.10.	Farklı boyutlara ve 0 (sıfır)-1 yerleşimlerine sahip yapısal elemanlar a) 3x3 b) 3x3 c) 5x5 d) 5x1 .....	24
Şekil 2.11.	Siyah-beyaz görüntü üzerine uygulanan genişleme, aşınma ve kapama matematiksel morfolojik işlemlerinin sonuçları .....	25
Şekil 2.12.	Piksel-milimetre dönüşüm katsayısının belirlenmesi .....	26
Şekil 2.13.	Kameranın gözlemci konumunda olduğu sistem .....	28
Şekil 2.14.	Kameranın hareketli durumda olduğu sistem .....	28
Şekil 2.15.	Poz tabanlı görsel kontrol yaklaşımının şematik gösterimi .....	30
Şekil 2.16.	Görüntü tabanlı görsel kontrol yaklaşımının şematik gösterimi .....	31

Şekil 2.17.	PID kontrolcü.....	32
Şekil 2.18.	Smith öngörücüsüyle desteklenen kontrol sistemi.....	33
Şekil 3.1.	Tek nesne takibi için görüntü işleme adımlarının uygulanması .....	36
Şekil 3.2.	Kameranın görüş alanı .....	37
Şekil 3.3.	Görüntü tabanlı konum kontrolünün yeterliliğinin ölçüldüğü deney düzeneği .....	38
Şekil 3.4.	Görüntü tabanlı konum kontrolünün yeterliliğinin ölçüldüğü deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	38
Şekil 3.5.	Eyleyicinin 0.3 Hz ve 0.5 V genlikli PRBS sinyaline verdiği açık çevrim konum cevabı.....	39
Şekil 3.6.	Eyleyicinin konum modelinin deneysel adım cevabıyla doğrulanması.....	40
Şekil 3.7.	Eyleyicinin konum modelinin deneysel frekans cevabıyla doğrulanması...	41
Şekil 3.8.	Türev terimi 50 Hz AGF ile gürültüden korunmuş ayırık zamanlı PID içeren kontrol sistemi .....	42
Şekil 3.9.	Görüntü tabanlı konum kontrolü esnasında lazer ve kameradan alınan yer değiştirme verilerinin karşılaştırılması.....	43
Şekil 3.10.	Lazer ve kameradan alınan ölçüm değerleri arasındaki farkın RMS grafiği ile gösterimi.....	43
Şekil 3.11.	Görüntü tabanlı kontrol ile eyleyicinin hareketinin iki ekseninde ölçümü.....	44
Şekil 3.12.	PID ve SÖ PID kontrolcülerin referans takip performansları.....	45
Şekil 3.13.	Smith öngörücüsü ile faz farkının giderilmesi.....	46
Şekil 3.14.	PID ve SÖ PID kontrolcülerin takip hatalarının RMS grafiği ile karşılaştırılması .....	46
Şekil 3.15.	a) Hücreye yaklaşma b) Temas halinde bekleme c) Hücre zarına belirlenen miktarda kuvvet uygulama d) Madde enjeksiyonu e) Hücreden çıkış ve temas noktasında bekleme f) Hücreden uzaklaşma (Huang vd., 2009). .....	47
Şekil 3.16.	Görüntü tabanlı kontrol ile hibrit kontrol çalışması için kullanılan deney düzeneği.....	48
Şekil 3.17.	Görüntü tabanlı kontrol ile Hibrit kontrol çalışması için kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	49
Şekil 3.18.	Eyleyicinin konum modelinin deneysel adım cevabıyla doğrulanması.....	50
Şekil 3.19.	Eyleyicinin konum modelinin deneysel frekans cevabıyla doğrulanması...	51
Şekil 3.20.	Eyleyicinin kuvvet modelinin deneysel adım cevabıyla doğrulanması.....	52
Şekil 3.21.	Eyleyicinin kuvvet modelinin deneysel frekans cevabıyla doğrulanması ...	53

Şekil 3.22.	a) Enjeksiyon pipetinin belirli bir mesafeden hücreye yaklaşması b) Hücre zarına ve hücreye kuvvet uygulanması (Sun ve Nelson, 2002)....	54
Şekil 3.23.	Konum ve kuvvet kontrolü içeren senaryo .....	55
Şekil 3.24.	Konum ve kuvvet kontrolü içeren senaryonun hibrit kontrol sistemi ile uygulanması .....	55
Şekil 3.25.	Çoklu nesne takibi için görüntü işleme adımlarının uygulanması.....	57
Şekil 3.26.	Hibrit kontrol uygulamasında görüntü tabanlı kontrol kaynaklı gecikmenin giderilmesi çalışması için kullanılan deney düzeği.....	59
Şekil 3.27.	Eyleyicinin konum modelinin deneysel adım cevabı ile doğrulanması.....	60
Şekil 3.28.	Eyleyicinin konum modelinin deneysel frekans cevabı ile doğrulanması...	61
Şekil 3.29.	Eyleyicinin kuvvet modelinin deneysel adım cevabı ile doğrulanması.....	61
Şekil 3.30.	Eyleyicinin kuvvet modelinin deneysel frekans cevabı ile doğrulanması ...	62
Şekil 3.31.	Senaryonun uygulandığı sistem ve sistemin senaryoya göre temsil ettiği enjeksiyon pipeti ve hücre zarı .....	63
Şekil 3.32.	Senaryonun gerçekleşmesi için oluşturulan hibrit kontrol sistemi.....	64
Şekil 3.33.	Uygulanan senaryonun iş akış şeması.....	64
Şekil 3.34.	Çalışmada uygulanan senaryonun referansı ve Smith öngörücüsü olmadan yapılan simülasyon sonucu .....	65
Şekil 3.35.	Senaryonun Smith öngörücülü hibrit kontrol sistemiyle uygulanması.....	65
Şekil 3.36.	PI kontrolcüyle (simülasyon) ve Smith öngörücüsü destekli PI kontrolcüyle (deneysel) yapılan çalışmalarda ortaya çıkan referans takip hatalarının karşılaştırılması .....	66



## TABLULAR DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1.1. EAP eyleyicilerin sınıflandırılması (Bar-Cohen, 2004).....	1
Tablo 1.2. EAP eyleyicilerin üstünlükleri ve zayıflıkları (Bar-Cohen, 2004).....	2
Tablo 4.1. Önerilen yöntemin sağlaması gereken özellikler .....	67
Tablo 4.2. Önerilen sistemin karşıladığı özellikler.....	69

## SEMBOLLER DİZİNİ

AGF	: Alçak geçirgen filtre
DE	: Dielektrik elastomer
EAP	: Elektro-aktif polimer
EP	: Elektrostriktif polimer
FPS	: Frame per second
IBVS	: Image based visual servoing
İPMK	: İyonik polimer metal kompozit
KN	: Karbon nanotüp
KP	: Konjuge polimer
Li <sup>+</sup> TFSI <sup>-</sup>	: Lithium triflouromethanesulfonimide
PBVS	: Position based visual servoing
PC	: Propylene carbonate
PPy	: Polipirol
PVDF	: Polyvinylidene fluoride
RMS	: Root mean square
SKE	: Sıvı kristal elastomer
SÖ	: Smith öngörücüsü

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Elektro-aktif polimer (EAP) eyleyiciler elektriksel gerilim altında şekil değişikliği gösterebilen ve bunun sonucunda bükülme hareketi sergileyen akıllı malzemelerdir. Elektro-aktif polimerler yaygın olarak algılayıcı ve eyleyici olarak kullanılırlar (Alici vd., 2008; Carpi vd., 2011). Elektriksel gerilim altındaki şekil değişimleri mikro mekanizmalara tahrik verilmesi, yapay kas ve aktif titreşim gibi alanlarda kullanılmalarına olanak sağlar (Alici vd., 2008; Carpi vd., 2011; Sarban vd., 2011). EAP eyleyicilerin bu özelliklere sahip olmaları robotik, medikal mühendislik, biyoteknoloji, mikro-nano manipülasyon gibi alanlarda kullanımlarını cazip hale getirmiştir (Low vd., 2000; Jager vd., 2000; Lee vd., 2009; Um vd., 2014; Otero vd., 2012). Geleneksel elektro-mekanik, hidrolik ve pnömatik tahrik sistemlerine kıyasla EAP'leri öne çıkaran unsurlar hafiflik, esneyebilme kabiliyeti, yüksek kırılma toleransı, düşük maliyet ve biyo-uyumluluktur (Bar-cohen, 2004; Carpi ve DeRossi, 2005; Alici ve Huynh, 2007; Alici vd., 2008; Carpi vd., 2011; Sarban vd., 2011; Wang vd., 2013; Vunder vd., 2014; İtik vd., 2014).

EAP eyleyiciler Tablo 1.1'de görüldüğü üzere hareket mekanizmalarına göre elektronik ve iyonik olmak üzere ikiye ayrılırlar. Tablo 1.2'de EAP eyleyicilerin hareket mekanizmalarına göre özellikleri verilmiştir. İyonik eyleyicilerin tahriki iyonların belirli bir elektrik alanı altında yer değiştirmesi ile oluşur. Düşük voltajlarda ( $< 5$  V) aktive edilebilmeleri iyonik EAP eyleyicilerin en önemli avantajlarından biridir.

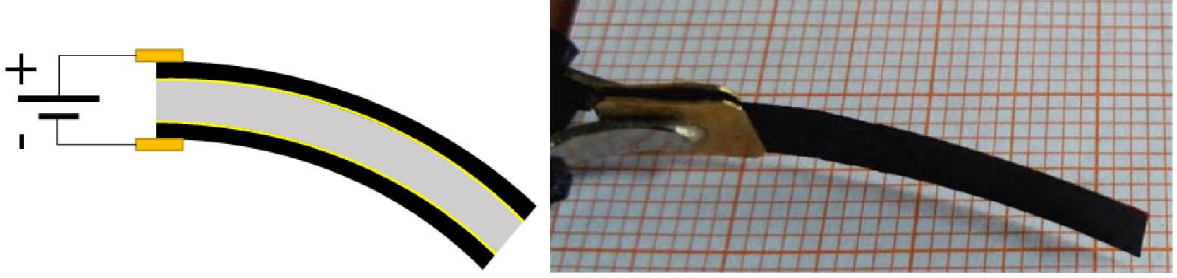
Tablo 1.1. EAP eyleyicilerin sınıflandırılması (Bar-Cohen, 2004).

<b>Elektronik EAP Eyleyiciler</b>	<b>İyonik EAP Eyleyiciler</b>
Dielektrik Elastomer (DE)	Konjuge Polimer (KP)
Elektrostriktif Polimer (EP)	İyonik Polimer Metal Kompozit (İPMK)
Sıvı Kristal Elastomer (SKE)	Karbon Nanotüp (KN)
	Polimer Jel (PJ)

Tablo 1.2. EAP eyleyicilerin üstünlükleri ve zayıflıkları (Bar-Cohen, 2004).

<b>EAP Eyleyici Türü</b>	<b>Üstünlükleri</b>	<b>Zayıflıkları</b>
İyonik EAP	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Düşük elektriksel gerilim gereksinimi</li> <li>- İyonların hareket yönünün elektriksel gerilimin kutupsallığına bağlı olarak iki yönlü olabilmesi</li> <li>- KP EAP eyleyiciler gibi bazı iyonik EAP eyleyicilerin sabit doğrusal elektrik gerilimi altında şekil değişikliğini koruyabilmesi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hareket mekanizmaları sebebiyle sistemde elektrolit bulunma zorunluluğu</li> <li>- Hava ortamında çalışılması durumunda eyleyicinin koruyucu katmanlara ihtiyaç duyması</li> <li>- KP ve NT dışındaki EAP eyleyicilerin doğrusal elektrik gerilimi altında gerinimlerini koruyamaması</li> <li>- Yavaş tepki süresi (&lt; 1 saniye)</li> <li>- Bükülme hareketi yapan EAP eyleyicilerin düşük güç çıkışı vermesi</li> <li>- KP EAP eyleyiciler hariç, tutarlı bir yapıya sahip iyonik EAP eyleyici üretiminin zor olması (Özellikle İPMK EAP eyleyiciler)</li> </ul>
Elektronik EAP	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mekanik enerji yoğunluklarının yüksek olması</li> <li>- İyonik EAP eyleyicilere göre daha yüksek çıkış kuvveti vermeleri</li> <li>- Açık havada uzun süre çalışabilmeleri</li> <li>- Hızlı tepki süresi (milisaniye düzeyinde)</li> <li>- Doğrusal elektrik gerilimi altında gerinimlerini koruyabilmeleri</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Çoğunlukla doğrusal elektrik geriliminin kutupsallığından bağımsız olarak tek yönlü hareket üretebilmeleri</li> <li>- Yüksek elektriksel gerilim gereksinimleri (~100 MV/m)</li> </ul>

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda düşük elektrik gerilimi altında ( $< 1V$ ) yüksek gerinim gösterebilen, üretildiği polipirol (PPy) malzemeden dolayı biyo-uyumlu olan (George vd., 2005) ve iyonik EAP eyleyici sınıfında değerlendirilen üç katmanlı PPy(PVDF) konjuge EAP eyleyici kullanılmıştır (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. 3 katmanlı PPy(PVDF) konjuge EAP eyleyicinin uygulanan voltaj karşısında bükülme hareketi yapması

Elektrik gerilimi altında bükülme hareketi yapabilen konjuge EAP eyleyiciler yukarıda bahsedilen alanlarda kendilerine yer bulmalarına rağmen endüstriyel olarak kullanılamamaktadırlar. Bunun sebebiyse, bu eyleyicilerin hareket mekanizmalarının zamanla değişiklik göstermesinden dolayı kontrol edilebilmelerinin zor olmasıdır. Kullanımlarının önündeki bu engelin kaldırılması amacıyla konjuge EAP eyleyicilerin modellenmesi için farklı çalışmalar yapılmıştır. İki katmanlı konjuge EAP eyleyiciler için Madden (2000) geçirgen elastik metal modelini geliştirmiştir, daha sonra Fang vd. (2008) bu modeli üç katmanlı eyleyicileri içine alacak şekilde genişletmişlerdir. Shoa vd. (2011) ise iki ve üç katmanlı eyleyiciler için akım ve serbest uç noktasının konum değişimini veren analitik bir model geliştirmişlerdir. Nguyen vd. (2014) oluşturdukları modele üç katmanlı konjuge EAP eyleyicinin viskoelastik özelliklerini de dahil ederek doğruluğu artırılmış bir model elde etmiş ve bu modelin deneysel doğrulamasını yapmışlardır. Önerilen modellerle eyleyicinin serbest uç noktasının konumu belli bir doğrulukta hesaplanabilmektedir, fakat hassas konum kontrolü gerektiren makro ve mikro uygulamalar için bu yetersiz kalmaktadır.

Eyleyicinin uç noktasının konumunu istenen hassasiyette hesaplayabilmek için farklı uygulamalar kullanılmaktadır. Eyleyicinin imal edildiği malzeme aynı zamanda sensör olarak kullanılabilirdiğinden eyleyicinin kendisi kendi hareketini algılayabilmekte, böylelikle eyleyicinin kontrolü mümkün olmaktadır (Otero ve Cortes, 2004; John vd., 2009). Fakat, Punning vd. (2015) uzun-sürelili çalışmalarda iyonik EAP eyleyicilerde bozulmaların

meydana geldiğini, bu sebeple eyleyicinin hareket kabiliyetinde bir miktar azalma olurken eyleyici üzerinden ölçülen akım ve elektriksel gerilimin değişiklik gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu durum ise konjuge EAP eyleyicilerin kendisinden alınan bilgilerin uzun dönemli çalışmalarda hassas kontrol amaçlı kullanılamayacağını göstermektedir. Diğer bir yöntem ise, harici sensörlerden alınan verilerin kullanıldığı kontrol sistemleridir. Bu uygulamalarda eyleyicinin serbest ucunun konum kontrolü için lazer mesafe ölçerlerden sıklıkla yararlanılmaktadır. Fang vd. (2008) tarafından yapılan çalışmada konjuge EAP eyleyicinin konum kontrolü gürbüz kontrolcü ve lazer sensörden sağlanan geri besleme ile yapılmıştır. Benzer şekilde, İtik (2013) yaptığı çalışmada lazer sensörü tekrarlamalı kontrolcü ile kullanarak eyleyicinin serbest uç noktasının konumunu kontrol etmiştir. Bu durumda eyleyicinin uç noktasının konum değişikliği yüksek hassasiyette (5 µm) ölçülebilmektedir, fakat aşağıda sıralanan sebeplerden dolayı lazer mesafe ölçerlerin kullanımı sisteme kısıtlar getirmekte ve bazı durumlarda da yetersiz kalabilmektedir (Coşkun ve İtik, 2015),

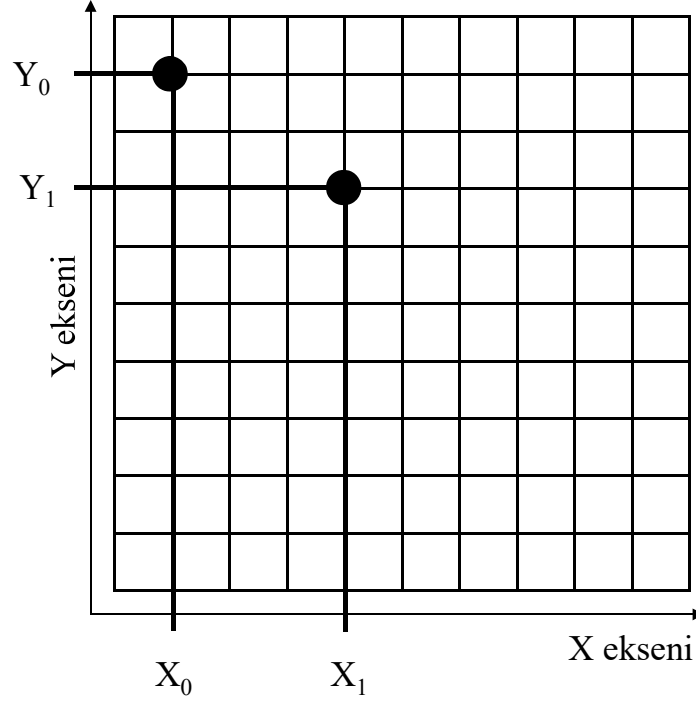
1. Genelde tek eksendeki hareketi ölçebilmeleri
2. Konum değişiminin tek eksende ölçülmesi sebebiyle bazı durumlarda konumdaki gerçek değişimi doğru olarak yansıtamamaları
3. İki eksende meydana gelen hareketin büyüklüğüne bağlı olarak ölçüm yapamamaları
4. Yüksek maliyetli olmaları
5. Aynı anda tek bir noktadan ölçüm alabilmeleri
6. Büyük boyutlu olmaları

Eyleyicinin serbest ucunun konum kontrolü için yaptığımız deneylerde uç noktasının yer değiştirme miktarı arttıkça hassas mesafe ölçer lazer sensörden direkt elde edilen ölçümlerin konumdaki değişiklikleri doğru yansıtamadığı görülmüştür. Konjuge EAP eyleyicinin dış yüzeyine yeterli elektrik gerilimi uygulandığında bükülme sonucu iki eksende (X ve Y) hareketi meydana gelir. Lazer mesafe ölçerinin X eksenine doğrultusunda yerleştirildiği durum için elde edilecek konum değişikliği Şekil 1.2 göz önünde tutularak incelenebilir.

$X_0$  ve  $Y_0$  ölçüm alınacak noktanın ilk konumunu,  $X_1$  ve  $Y_1$  ise son konumunu sırasıyla X ve Y ekseninde göstermektedir.

$$d_x = |X_1 - X_0| \quad (1.1)$$

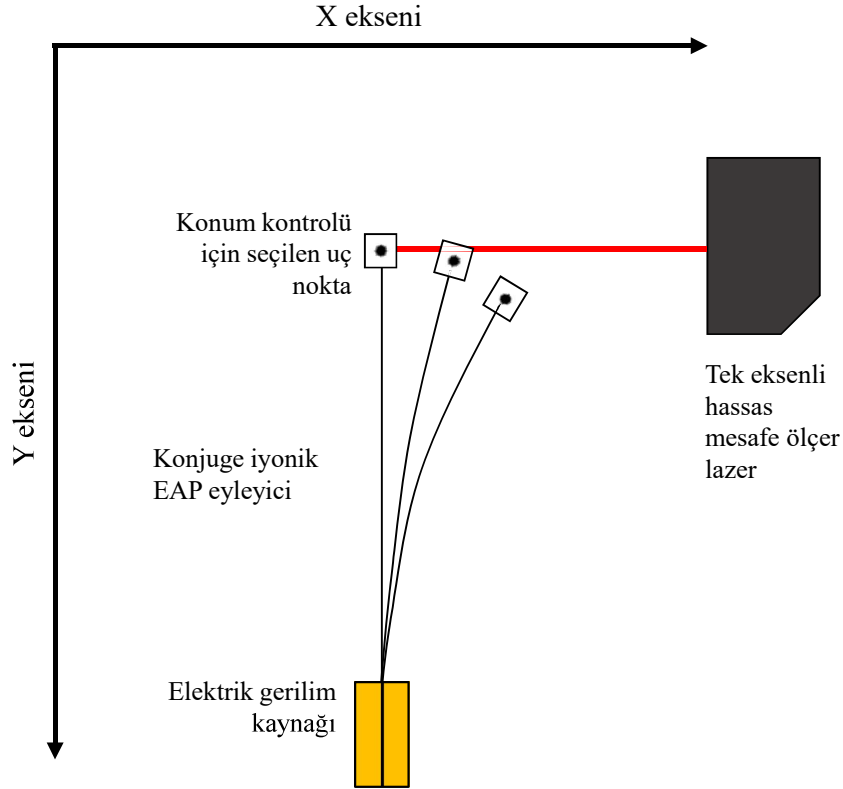
$$d_{xy} = \sqrt{(X_1 - X_0)^2 + (Y_1 - Y_0)^2} \quad (1.2)$$



Şekil 1.2. İki ekseninde gerçekleşen hareketin incelenmesi

Denklem 1.1 ve 1.2 seçilen noktanın yaptığı yer değiştirme miktarını X ekseninde ( $d_x$ ) ve X-Y ekseninde ( $d_{xy}$ ) vermektedir. Konjuge EAP eyleyiciye yeterli elektrik gerilimi uygulandığında bükülme hareketi eyleyicinin uzun kenarı boyunca farklı oranlarda artar ve sonuç olarak eyleyici sarmal bir hareket yapmış olur. Yapılan çalışmada eyleyicinin hareketi basit bükülme ile sınırlı kaldığı kabul edilmiştir. Bu kabul göz önünde bulundurularak, Y ekseninde yapılan yer değiştirmenin artması durumunda lazerden alınan ölçüm bilgisinin hata miktarı artacaktır. Konjuge EAP eyleyicinin hareketi her iki ekseninde olmasına rağmen büyük yer değiştirme yerleştirildiği konuma dik olan ekseninde meydana gelir. Bu tezde eyleyicinin yerleştirildiği konum daima Y eksenini olarak kabul edilecektir ve bu durumda büyük yer değiştirme X ekseninde olmaktadır. X eksenindeki yer değiştirmeden yola çıkılarak eyleyicinin Y eksenindeki hareketini belirleyebilmek mümkündür. Fakat böyle bir durum için lazerin X eksenindeki yer değiştirmeyi her daim ölçebileceği kabul edilmektedir.

Y eksenindeki yer değiştirme miktarı yeterince büyük olması durumunda X ekseninde meydana gelen yer değiştirme lazer tarafından ölçülemeyecektir (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Lazer mesafe ölçerin eyleyicinin hareketine bağlı olarak ölçüm yapabilme durumu

Bahsedilen bu kısıtları ve aşağıda sıralanan maddeleri de göz önünde bulundurarak yeni bir yöntemin önerilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Önerilecek olan ölçüm sistemi,

1. Konjuge EAP eyleyicinin uç noktasının hareketinin gerçekleştiği iki eksendeki konum değerlerini ölçebilmeli
2. Makro/mikro konumlama ve manipülasyon işlemleri için yeterli ölçüm hassasiyetini (<0.01 mm) sağlayabilmeli
3. Lazer mesafe ölçere göre daha düşük maliyetli olmalı
4. Eyleyicinin bulunduğu sistemde ölçüm yaparken boyutu sebebiyle sorun teşkil etmemeli
5. Birden çok sensör yerine kullanılabilmeli



Kullanılması planlanan ölçüm sistemini belirlemek ve tez kapsamında yapılacak çalışmalar için geçerli bir alt yapı oluşmasını sağlamak amacıyla literatür taramasında çoğunlukla mikro ölçekli olan ve tıp alanında uygulanan çözümler incelenmiştir.

Cappelleri vd. (2011) mikro robotik uygulamalar için iki eksenli kuvvet ölçümü yapabilen görüntü tabanlı kuvvet ölçüm sistemiyle görüntü işleme sistemlerinin farklı sensörler yerine kullanılabileceğini göstermişlerdir. Becattini vd. (2013) tarafından yapılan çalışmada hücre enjeksiyonu için görüntü tabanlı otonom bir sistem kullanıldığı; Xiao ve Li (2014) tarafından yapılan çalışmada mikro birleştirme sistemlerinde kullanılan mikro manipülatörlerin konum kontrolü için görüntü tabanlı kontrol sistemi geliştirildiği; Azizian vd. (2014) tarafından hazırlanan derleme makalesinde görüntü tabanlı kontrol sistemlerinin tıbbi görüntüleme sistemleriyle ortak olarak kullanılarak mikro ve makro ameliyatlarda yapılabildiği görülmüştür. Aviles vd. (2015) çalışmalarında görüntü tabanlı kuvvet kontrolünü robot destekli minimal invazif ameliyatlarda uygulayarak ameliyat sonrası komplikasyonları ve doku hasarını en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Greninger ve Nelson (2003) yaptıkları çalışmada görüntü tabanlı kuvvet ölçüm yöntemini önererek mN seviyesinde kuvvet kontrolünü başarılı bir şekilde gerçekleştirmişlerdir, ayrıca bu yöntemin biyolojik hücre uygulamalarında kullanılabilirliğini vurgulamışlardır. Karimirad vd. (2014) mikro enjeksiyon esnasında biyolojik hücrelere uygulanan kuvveti hücre çeperinde meydana gelen şekilsel değişiklikten yararlanarak görüntü tabanlı ölçüm yöntemiyle hesaplamışlardır. Lin ve Subbaro (2001) çalışmalarında elde ettikleri görüntülerden 3 boyutlu model çıkarımı yapmışlardır. Usamentiaga vd. (2012) endüstride hali hazırda kullanılan sıcaklık ölçüm yöntemlerinin eriyik haldeki dökme demirin sıcaklığını ölçmede yetersiz kalmasının ardından kızılötesi kameradan alınan görüntüleri kullanarak endüstrinin ihtiyacını karşılayacak bir çözüm üretmişlerdir.

Bu sebeplerden dolayı bu tezde konjuge EAP eyleyicilerin konum kontrolü için görüntü tabanlı kontrol sistemi önerilmiştir. Önerilen yöntemin yeterliliği,

- Görüntü işleme sisteminden ve lazerden elde edilen sonuçların karşılaştırılması
- Hassas konum kontrol yeteneklerinin farklı kontrolcülerle sınanması
- Bir dizi konum değişikliği ve kuvvet uygulaması içeren senaryonun deneysel çalışılması

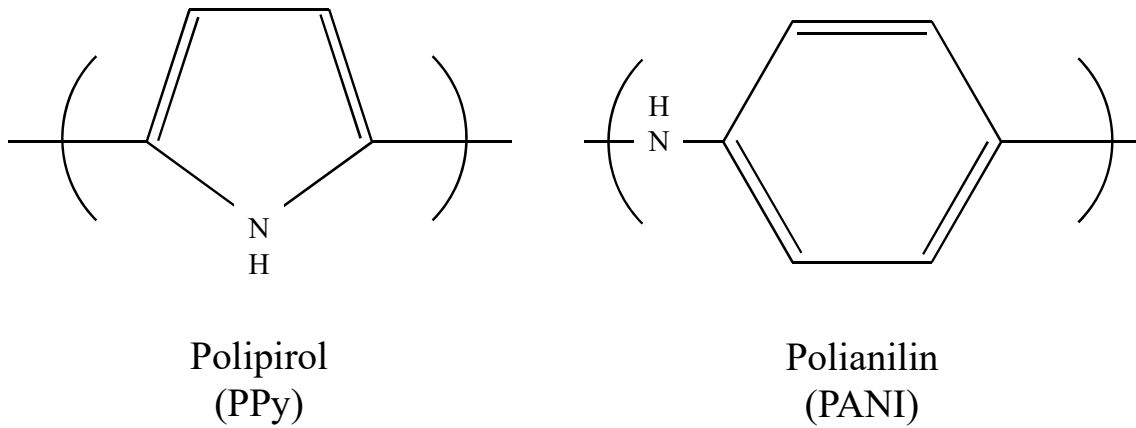
ile ortaya konmuştur.

Yapılan bu tez kapsamında ilk olarak çalışmanın yapılmasında etkili olan sebeplere değinilmiş ve lazer mesafe ölçerin yetersiz kaldığı yönler vurgulanarak bu eksiklikleri

giderebilecek yeterlilikte bir yöntem olan görüntü tabanlı kontrol sistemi önerilmiştir. Devamında bu çalışmada kullanılan üç katmanlı PPy(PVDF) konjuge EAP eyleyici tanıtılmıştır. İkinci kısımda görüntü işleme, görüntü tabanlı kontrol yöntemi ve kontrolcülerle ilgili bilgiler verilerek tezde kullanılan yöntemler anlatılmıştır. Üçüncü kısımda hazırlanan deney düzeneği ve önerilen yöntemin yeterliliğini sınamak adına yapılan deneysel çalışmalar detaylıca anlatılarak deneyler sonucunda elde edilen veriler grafiksel ve sözel olarak ortaya konmuştur. Dördüncü kısımda önerilen yöntemin istenen özellikleri ne ölçüde sağladığı yapılan çalışmalarla değerlendirilmiştir. Beşinci kısımda önerilen yöntemle var olan kısıtların kaldırması sonucunda konjuge EAP eyleyicilerle yapılabilecek çalışmalara değinilmiştir.

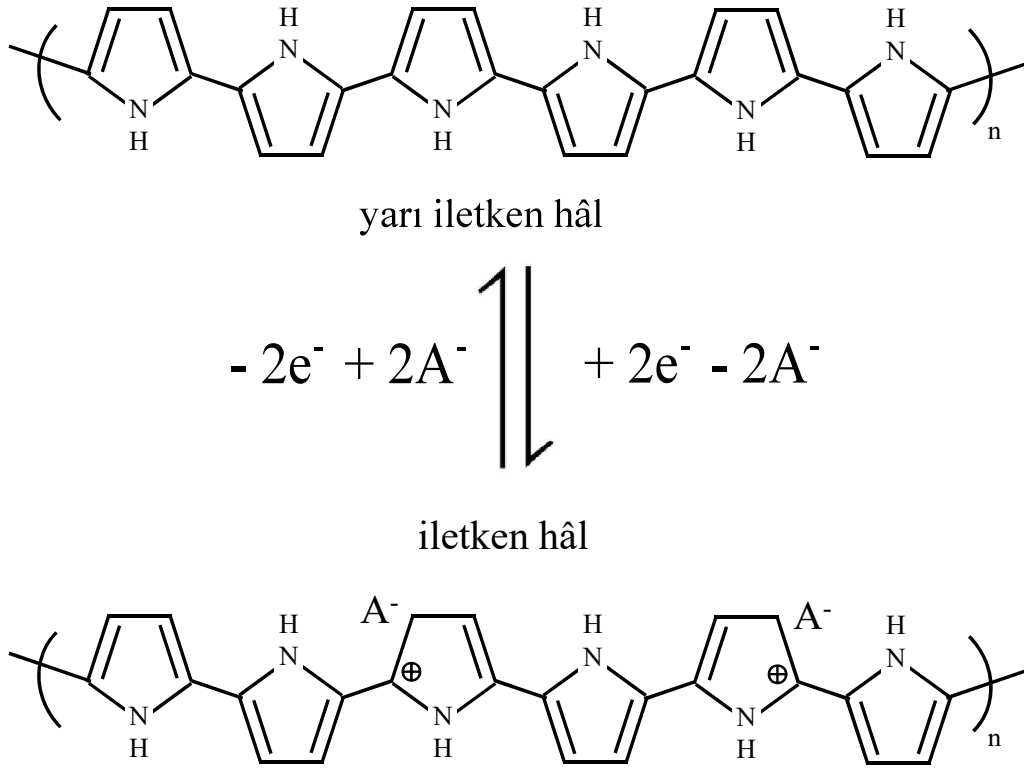
## 1.2. Konjuge Elektro-aktif Polimer Eyleyiciler

Polimerler genel olarak yalıtkan özellikleri ile bilinirler ve yalıtım için en çok kullanılan malzemeler arasında yer alırlar. Hideki Shirakawa, Alan G. MacDiarmid, Alan J. Heeger ve çalışma arkadaşlarının 1977 yılında uyarılmış haldeyken yüksek iletkenlik gösteren konjuge (eşlenik) polimeri bulmaları bu genel kanıyı değiştirdi ve kendilerine 2000 yılında Nobel kimya ödülünü kazandırdı. İletken polimerler yarı iletken ve metalik özellikleri bünyelerinde barındıran malzemelerdir. Bu polimerleri diğerlerinden ayıran kısım polimer içerisindeki kimyasal bağların konjuge çift bağ olmasıdır (Şekil 1.4). Konjuge bağlarda, karbon atomları arasındaki bağlar tek-çift-tek-çift olarak ilerler.



Şekil 1.4. Konjuge polimerlerden polipirol ve polianilin'in kimyasal yapısı

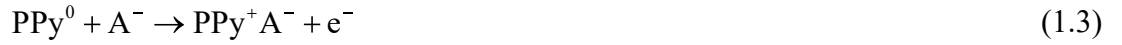
Konjuge başlara sahip olan polimerlerde iki farklı baş bulunur, bunlardan biri gcl diğeri ise zayıftır. Gcl olan başlar ‘sigma’ ( $\sigma$ ), zayıf olan başlar ise ‘pi’ ( $\pi$ ) başları olarak adlandırılır. Her baş, içerisinde bir tane lokalize  $\sigma$ -başı barındırır. İkili başlarda ise ikinci baş daha zayıf olan  $\pi$ -başıdır. Kimyasal yapıda bulunan bu başlar polimer içerisindeki elektronların delokalize olarak tüm yapıda serbestçe gezinebilmesine olanak sağlar. Ancak polimerin iletken hle geçebilmesi için elektronların delokalize olması yeterli değildir, elektron akışının gerçekleşebilmesi için uyarılma (doping) işleme ihtiye duyulur. Uyarılma sonucunda polimer içerisindeki elektronların dolaşabilmesi için gerekli olan enerji eşiği düşürülür ve böylelikle yarı iletken halden iletken hale geçilir (Şekil 1.5). Bu işlemler, polimere elektron eklenerek indirgenmesi veya polimerden elektron çekilerek yükseltgenmesi ile yapılabilir. Yükseltgenme ve indirgenme işleminde, polimer içerisindeki yük dengesi bozulur, bunun sonucunda polimer ve elektrolit ortam etkileşime girerek yk dengesini tekrar sağlamak için iyon aktarımı yapmak zorunda kalır.



Şekil 1.5. Polipirol polimerin yarı iletken ve iletken hâl geçişi (Anquetil, 2005).

İyon aktarımı polimerin hacminde değişikliğe sebep olur ve bu değişiklik iletken polimerlerin eyleyici olarak kullanılmasının önünü açan etkindir. Polimerde meydana gelen değişiklik genişleme ve daralma olarak iki şekilde ortaya çıkar. Hutchison vd. (2000) yaptığı çalışmada PPy'nin hacimsel değişikliğinde etkili olan mekanizmaları şu şekilde sıralamakta,

- Yükseltgenme durumunda polimer içerisinden çekilen elektronun sebep olduğu yük dengesizliği ortamdan alınan anyon ile veya ortama verilen katyon ile giderilerek,



- İndirgenme durumunda polimerin aldığı elektron sebebiyle meydana gelen dengesizlik ortamdan alınan katyon ile veya ortama verilen anyon ile giderilerek,



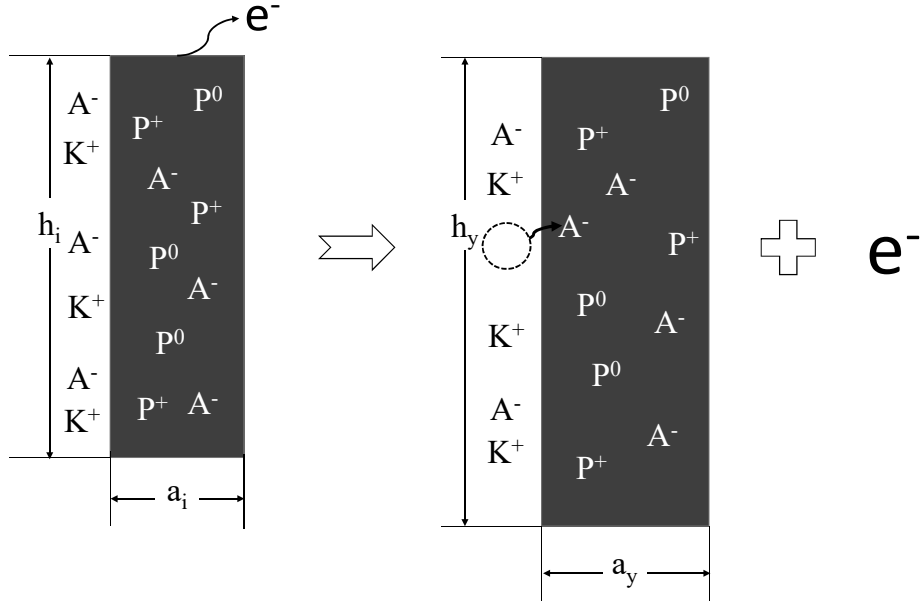
- İndirgenmiş durumdaki polimer tuzda kurutma ile her iki yüklü parçacığı dışarıya vererek,



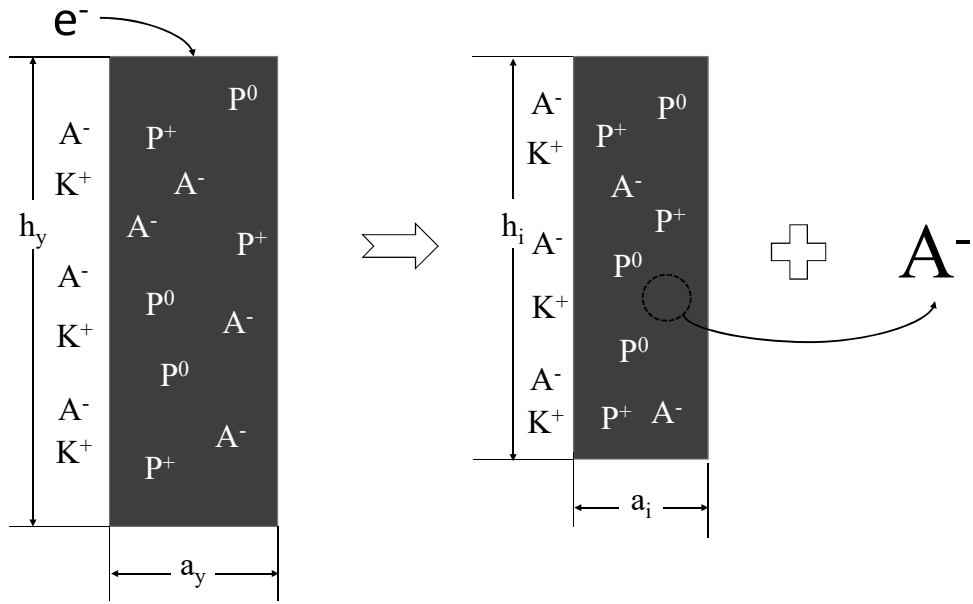
polimerin hacminde daralma veya genişleme sağlanır.

İletken polimerlerde genişleme ve daralma mekanizması PPy ile benzer şekilde incelenebilir.  $\text{PPy}^0$  ve  $\text{PPy}^+$  sırasıyla polimerin nötr ve indirgenmiş durumlarını göstermektedir.  $\text{K}^+$ ,  $\text{A}^-$  ve  $\text{e}^-$  ise sırasıyla katyon, anyon ve elektronu göstermektedir. Bu durumda, denklem 1.3 doğrultusunda meydana gelen yükseltgenme işlemi ve bunun sonucunda polimerin genişmesi Şekil 1.6'da görülmektedir. Polimerin Denklem 1.5 doğrultusunda yükseltgenilmiş halden indirgenmiş hale geçerek daralması ise Şekil 1.7'de görülmektedir.

Şekil 1.6 ve Şekil 1.7’de, polimerin indirgenmiş haldeki uzunluğu ve genişliği sırasıyla  $h_i$  ve  $a_i$  ile gösterilmektedir ve yükseltgenmiş haldeki uzunluk ve genişliği ise sırasıyla  $h_y$  ve  $a_y$  ile gösterilmektedir. Meydana gelen tepkimeler sonucunda polimerin boyutuyla ilgili  $h_y > h_i$  ve  $a_y > a_i$  yazılabilir,



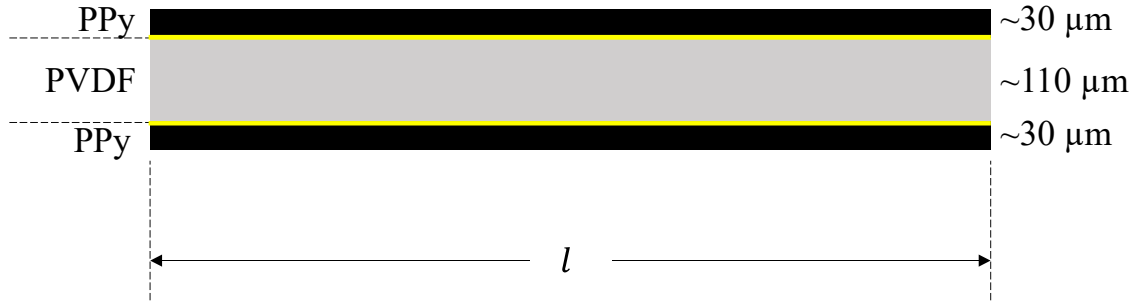
Şekil 1.6. İletken polimerin yükseltgenme sonucunda genişmesi (Price, 2012).



Şekil 1.7. İletken polimerin indirgenme sonucunda daralması

Denklem 1.3 ve 1.5'e bakıldığında meydana gelen yükseltgenme ve indirgenme tepkimelerinin terslerinin birbirine eşit olduğu görülebilir. Polimerin içerisinde gerçekleşen bu işleme redoks tepkimesi adı verilir. Redoks tepkimesi sayesinde polimer daralma ve genişleme hareketini çift yönlü olarak yapabilmektedir. Meydana gelen tepkime polimerden çekilen veya polimere verilen elektron sayısı ile kontrol edilebilmektedir. Polimerin boyutu elektrik akımı ile ayarlanarak genişleme sonucu ulaştığı en büyük boyut ile daralma ile ulaştığı en küçük boyut arasında istenen konumda tutulabilmektedir.

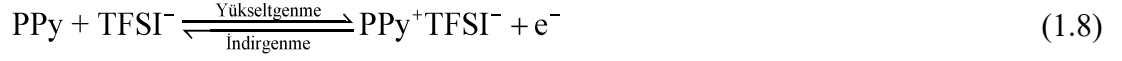
Konjuge EAP eyleyiciler çalışma mekanizması bakımından iyonik EAP eyleyiciler sınıfına dâhildirler (Tablo 1.1) ve bu çalışmada kullanılan konjuge EAP eyleyici, iletken dış PPy tabakalar arasına yerleştirilmiş olan polyvinylidene fluoride (PVDF) yalıtkan tabakadan oluşmaktadır (Şekil 1.8). Elektriksel gerilim altında yer değiştiren iyonlar eyleyicinin çalışma mekanizmasını oluşturur.



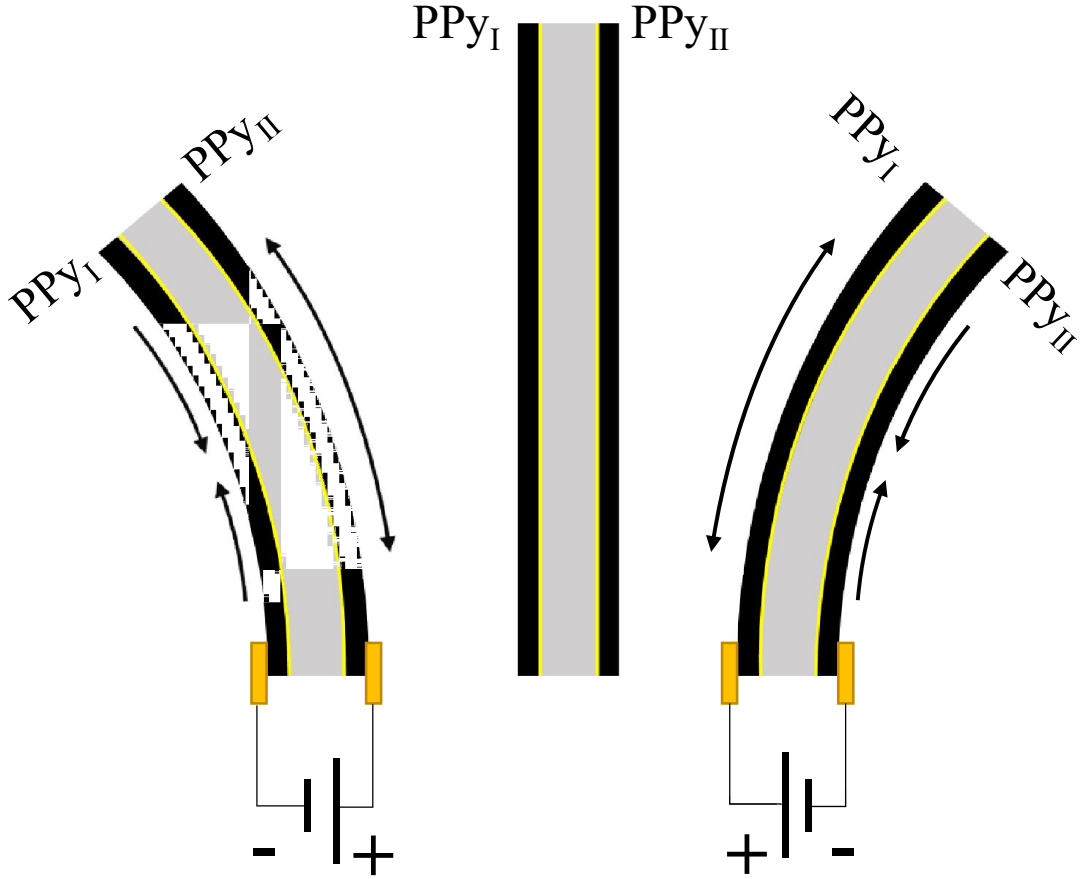
Şekil 1.8. Üç katmanlı PPy(PVDF) konjuge EAP eyleyici

Orta kısımda yaklaşık 110 µm kalınlığında, her iki yüzünde iletkenliği arttırmak amacıyla 0.2 µm kalınlığında altın kaplama bulunan, yalıtkan ve gözenekli yapıya sahip PVDF katman bulunmaktadır. Altın kaplama yüzeye iletkenlik katarak PVDF katman üzerinde elektrokimyasal yolla yeni tabaka oluşturulmasını sağlamaktadır. PVDF katman gözenekli yapısı ile hareket mekanizması için gerekli olan elektrolit sıvıyı içerisinde barındırmaktadır. Elektrolit sıvı lithium trifluorometanesulfonimide ( $\text{Li}^+\text{TFSI}$ ) ve propylene carbonate (PC) karışımından meydana gelmektedir. Eyleyicinin dış kısmında elektrot olarak kullanılan ve kalınlığı yaklaşık 30 µm olan PPy tabakalar bulunmaktadır. Dış kısımda kullanılan PPy tabaka biyo-uyumlu bir polimer türü olup, eyleyicinin kan, idrar ve diğer vücut sıvıları içerisinde herhangi bir ek korumaya gerek kalmadan çalışmasına olanak sağlamaktadır (Smela, 2003).

PPy(PVDF) eyleyicinin dış katmanlarına elektrik gerilimi uygulandığında PPy-PVDF-PPy sistemi içerisinde redoks (yükseltgenme-indirgenme) tepkimesi meydana gelir,



Tepkime sonucunda PPy tabakalarda, bağlı oldukları elektriksel kutuplara göre daralma (indirgenir) ve genişleme (yükseltgenme) hali gözlenir. Bir tarafın daralırken diğer tarafın genişmesi PPy(PVDF) eyleyicinin bükülme hareketi yapmasına sebep olur (Şekil 1.9).



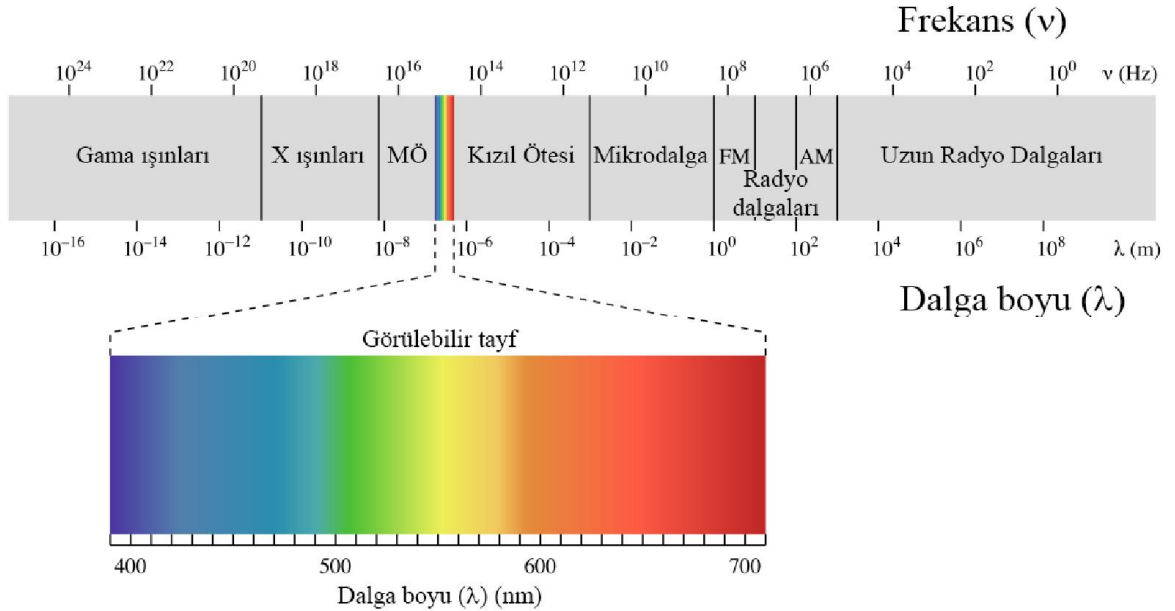
Şekil 1.9. PPy(PVDF) eyleyicinin redoks tepkimesi sonucu bükülme hareketi

## 2. METODLAR

### 2.1. Görüntü İşleme

Bir görüntü iki boyutlu bir  $f(x,y)$  fonksiyonu ile tanımlanabilir. Burada,  $x$  ve  $y$  iki boyutlu uzaydaki konumu,  $f$  ise bu konuma denk gelen gri seviyesini veren terimlerdir. Görüntüyü oluşturan sonlu sayıda bileşen vardır ve her bir bileşene piksel adı verilir. Her bir piksel,  $f(x,y)$  fonksiyonu ile bulunan gri seviyesine sahiptir.

İnsanların görme duyusu elektromanyetik tayfin belli bir kısmı ile sınırlıdır (Şekil 2.1). Buna karşın, görüntüleme cihazları gamadan radyo dalgalarına kadar uzanan hemen hemen elektromanyetik tayfin tümünü kapsarlar (Gonzalez ve Woods, 2014). Bu cihazlarla, insanların normalde göremeyecekleri görüntüler alınarak sayılasallaştırılır ve üzerinde çalışılabilmeleri mümkün hale getirilmiş olur. Elde edilen görüntüler daha önce tanımlandığı üzere iki boyutlu bir uzayda ve konumuna bağlı olarak değer alan piksellerle ifade edilir.



Şekil 2.1. Elektro manyetik tayfin sınıflandırılması (Ronan, 2015).

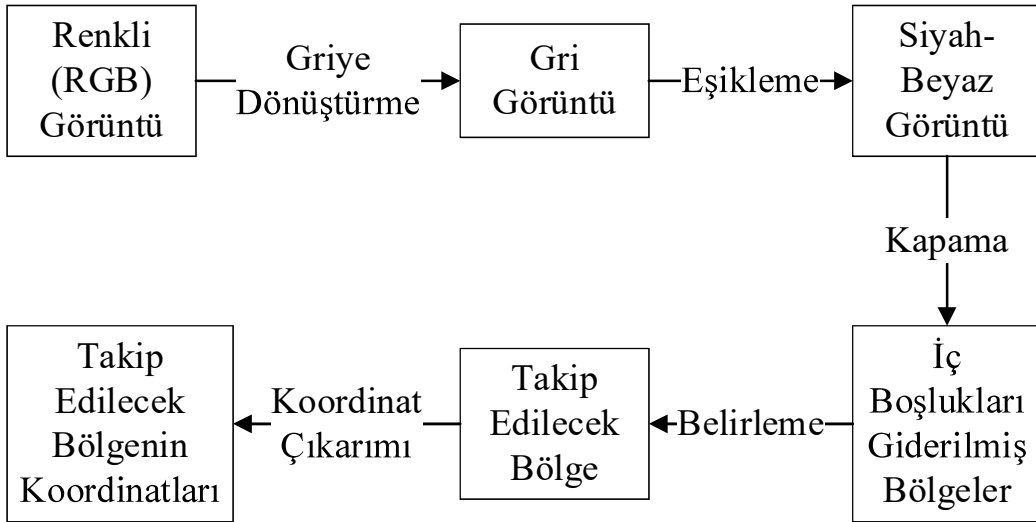
Görüntü işleme, iki boyutlu uzayda tanımlanan görüntüye uygulanarak görüntünün istenen özelliklerini ön plana çıkartacak ya da sadece istenen nitelikleri vermesini sağlayacak işlemler olarak tanımlanır. Yapılan bu tezde, görüntü işleme kavramı bilgisayar ortamına



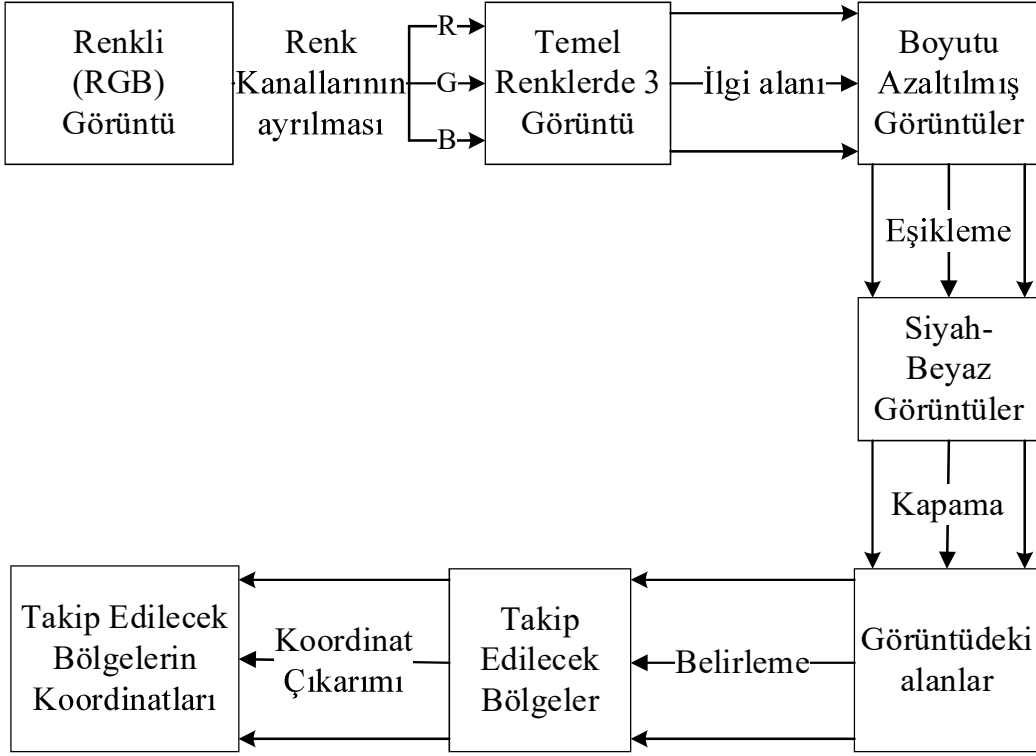
aktarılan görüntü üzerinde yapılan işlemler olarak ele alınmıştır ve bu bağlamda bakıldığında, görüntü işleme için kullanılan bilgisayarlı süreçler alçak, orta ve yüksek olmak üzere üç seviyeye ayrılır.

Alçak seviye süreçler, görüntüyü zenginleştirmek amacıyla kullanılan gürültü azaltma, görüntü keskinleştirme gibi basit işlemleri içerir ve hem girdisinin hem de çıktısının görüntü olduğu süreçler olarak tanımlanır. Orta seviye süreçler, görüntüyü içerisinde bulunan alan ve nesnelere bölerek, nesnelere bilgisayarlar da işlemeye uygun hale getiren tanımlama ve sınıflandırma işlemlerini içerir. Bu sürecin girdileri görüntü, çıktıları ise görüntüye ait kenarlar ve nesnelere çevresi gibi özniteliklerdir. Yüksek seviye süreçler ise, tanımlanan nesnelere bilişsel görme fonksiyonlarını uygulayarak anlamlandırmak ile ilgilidir (Gonzalez ve Woods, 2014).

Bu tez kapsamında alçak ve orta seviye görüntü işleme yöntemleri kullanılarak 4 çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda kullanılan yöntemler, takip edilecek nesne sayısına göre değişiklik göstermektedir. Tekli ve çoklu nesne takibi için kullanılan görüntü işleme yöntemleri sırasıyla Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.2. Tek nesne takibinde kullanılan yöntemler ve sıralamaları



Şekil 2.3. Çoklu nesne takibinde kullanılan yöntemler ve sıralamaları

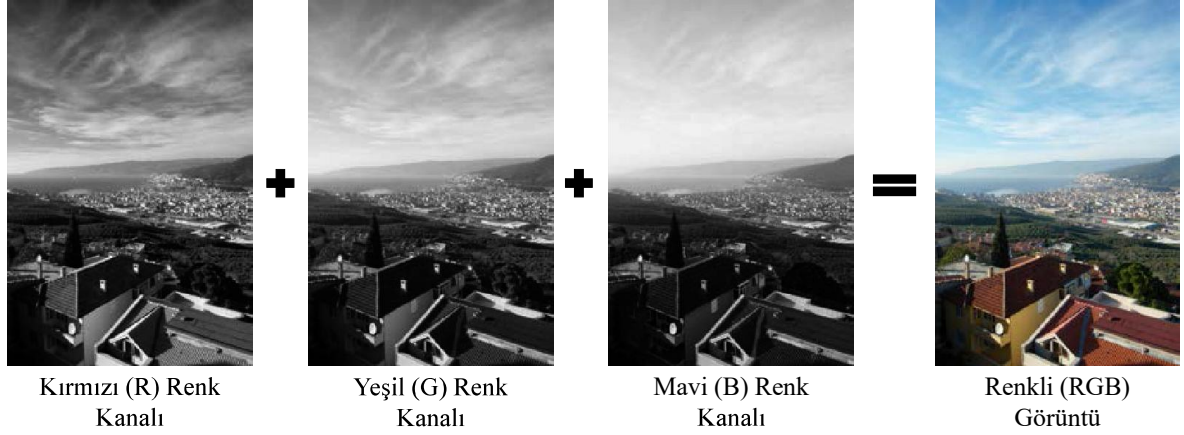
Şekil 2.3 ile gösterilen yöntemin Şekil 2.2 ile gösterilenden farkı, kısıtlı işlemci gücünü yeterli hale getirebilmek için kullanılan ara işlemlerdir. Şekil 2.2 ile temsil edilen sistemde kullanılan ara işlem, alınan renkli görüntünün ilk adımda griye dönüştürülmesiyle veri miktarını, görüntünün içerisindeki ayırt edici özellikleri koruyarak, azaltmaktır. Buna karşın Şekil 2.3 ile temsil edilen sistem çoklu nesne takibi yaptığı için kullanması gereken işlemci gücü daha fazla olacaktır ve ek bir tedbire ihtiyaç duyulacaktır. İlk olarak renkli görüntünün her bir renk kanalı 8 bit değerine sahip 3 adet gri görüntüye ayrılır, daha sonra işlem yapılması gereken alanın büyüklüğünü düşürmek için her bir görüntüye ilgi alanı yaklaşımı uygulanır. Bu iki adımla beraber çoklu nesne takibi için ihtiyaç duyulan işlemci gücü azaltılmış olur.

Görüntü işleme adımlarının detaylı açıklaması bu kısmın devamında verilmiştir.

### 2.1.1. Griye Dönüştürme

Griye dönüştürme işlemi tek nesne takibinde kullanılmıştır. Bu çalışma sırasında, görüntü alma cihazından gelen görüntülerin tamamı üç renk kanalının birleşiminden oluşan

24 bit RGB formatındadır. RGB terimi kırmızı (Red), yeşil (Green) ve mavi (Blue) renkleri veren renk kanallarını temsil etmektedir. 3 ayrı renk kanalının her birinden 8 bit değerinde görüntü alınmaktadır. 8 bitlik görüntüde bulunan her bir piksel 0 ile 255 arasında tam sayı değerini alır. Renkli (RGB) görüntüdeki her bir piksel üç alt pikselden meydana gelmektedir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Kırmızı (R), yeşil (G) ve mavi (B) renk kanallarından oluşan renkli (RGB) görüntü

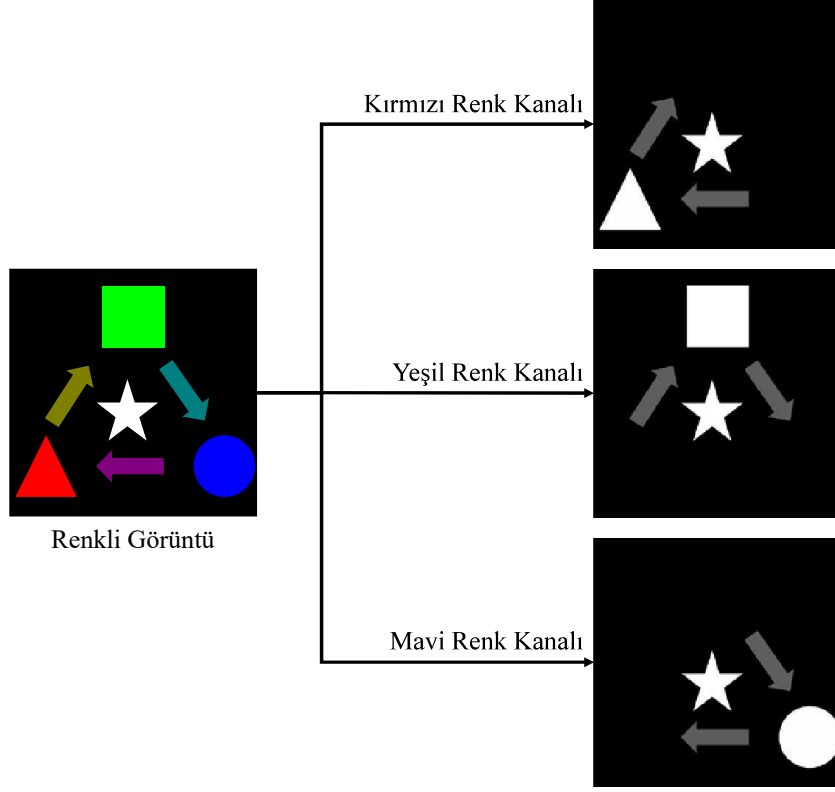
Alınan görüntünün barındırdığı veri miktarını (24 bit) düşürmek için 3 kanallı görüntü tek kanala indirgenir (Leta vd., 2006). Bu işlem için üç kanaldan gelen piksel değerleri farklı katsayılarla çarpılarak toplanır ve yeni pikselin sayısal değeri elde edilir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalarda kullanılan dönüşüm formülü, insan gözünün renklerdeki parlaklık miktarını algılama ağırlığı göz önünde bulundurularak seçilmiştir (Bosch vd., 2007; Kanan ve Cottrell 2012),

$$G_{\text{parlaklık}} = 0.2989R + 0.5870G + 0.1140B \quad (2.1)$$

### 2.1.2. Renk Kanallarının Ayrılması

Renk kanallarının ayrılması işlemi çoklu nesne takibinde kullanılan bir adımdır. Görüntü alma cihazından RGB formatında 24 bit değerinde görüntü alınmaktadır. Alınan görüntü kırmızı (R), yeşil (G) ve mavi (B) olmak üzerine üç ayrı renk kanalına ayrıştırılır ve 8 bit değerine sahip üç ayrı görüntü elde edilmiş olur. Bu adımdan sonra yer alan her işlem elde edilen üç görüntüye de uygulanır.

Takip edilmek istenen her bir nesnenin rengi üç ana renkten birine yakın olacak şekilde seçildiğinde, uygun olan renk kanallarında bu nesnelere daha belirgin olacaktır (Şekil 2.5). Böylelikle takip işlemi için yapılacak ek işlem miktarı azalacaktır.



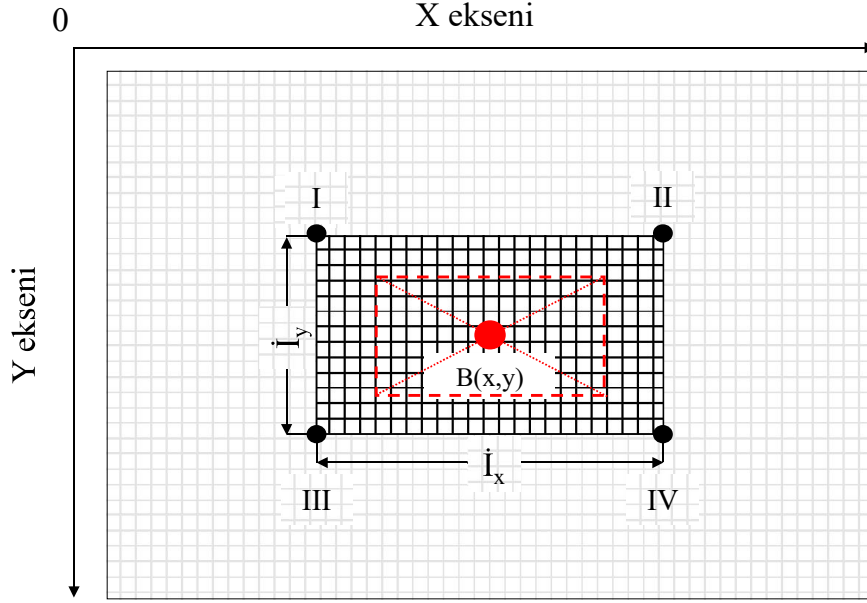
Şekil 2.5. Renk kanallarına ayrılan renkli görüntü

### 2.1.3. İlgi Alanı

Bu işlem çoklu nesne takibinin yapıldığı sistemlerde işlem yükünü hafifletmek için kullanılır. Görüntüde bulunan piksellerin dizilimi iki boyutlu uzayda X ve Y eksenleri boyunca yapılır. Genellikle görüntüleme cihazlarından alınan görüntülerin sol üst köşesi orjin olarak belirlenir ve piksellerin sıralaması buna göre yapılır. İlgi alanının bulunduğu konum yaklaşık olarak belirlenir ve bu adımı takip eden işlemler belirlenen konumu kapsayan bir miktar daha geniş bir alan içerisinde yapılır (Şekil 2.6).

İlgi alanı işlemi, dinamik ve statik olmak üzere iki şekilde uygulanır. Dinamik olarak uygulandığında her görüntü için basit bir işlemle ilgi alanının yaklaşık konumu belirlenir ve takip eden işlemler belirlenen alan için uygulanır. Statik olarak uygulandığında ise, ilgi alanının konumu bir defaya mahsus yaklaşık olarak belirlenir ve sistem her görüntü için

tekrar hesaplama yapmaz. Bu çalışmada, takip edilmek istenen nesnenin görüntü içerisinde belli bir bölgede kalacağı bilindiğinden ve dinamik ilgi alanının devamlı hesaplama yaparak ek işlemci gücü gerektireceğinden, statik ilgi alanı yöntemi tercih edilmiştir.



Şekil 2.6. Görüntü üzerinde statik ilgi alanı yaklaşımının uygulanması

Şekil 2.6’da statik ilgi alanı uygulaması görülmektedir. Alınan görüntü iki boyutlu uzayda X ve Y eksenleri üzerindeki piksellerle tanımlanır. Kırmızı kesikli dikdörtgen içerisinde kalan bölge, görüntü üzerinde takip edilmek istenen nesnenin bulunduğu alanı göstermektedir ve merkezi  $B(x,y)$  noktasıdır. İlgi alanı bu dikdörtgenin merkez noktası  $B(x,y)$ , temel alınarak tanımlanır. Tanımlanan alanın büyüklüğü  $\dot{I}_x=2a$  ve  $\dot{I}_y=2h$  olarak verildiğinde, Şekil 2.6’da gösterilen ilgi alanının kenar koordinatları,

$$I(x - a, y - h) \quad (2.2)$$

$$II(x + a, y - h) \quad (2.3)$$

$$III(x - a, y + h) \quad (2.4)$$

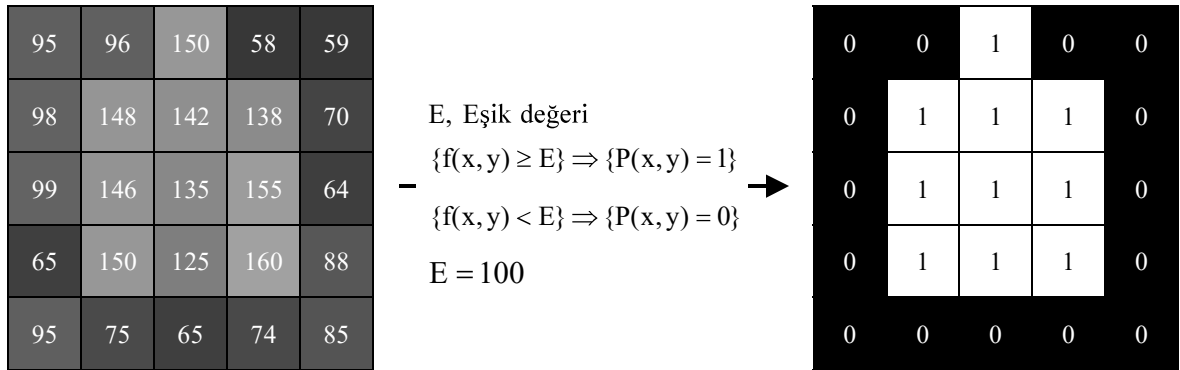
$$IV(x + a, y + h) \quad (2.5)$$

olmaktadır. İlgi alanından sonraki işlemler sadece belirlenen bölge için uygulanır.

### 2.1.4. Eşikleme

Griye dönüştürme işlemi görüntü cihazından alınan görüntüye uygulanır ve uygulanacak işlemlerin süresi kısaltılır. Diğer taraftan, ilgilenilen bölgeyi görüntüdeki diğer alanlardan ayırmak için gerekli olan eşikleme işleminin ön safhasını oluşturmaktadır (Leta vd., 2006).

Eşikleme, 0-255 arasında tam sayı değeri alan piksellerle ifade edilen 8 bit gri görüntünün, 0 (sıfır) ile 1 değeri alan piksellerle 1 bit siyah-beyaz görüntü olarak ifade edilmesi için yapılan işlemdir. Bu işlem sonucunda, görüntünün genelinden farklı gri seviyesine sahip olan bölge arka plandan ayrılır. Eşikleme işlemi için uygun gri seviyenin yani eşik değerinin seçilmesi gerekmektedir. Eşik değerinin seçimi dinamik ve statik olmak üzere iki şekilde yapılır. Dinamik eşik değeri, alınan görüntüye göre değişiklik gösterir ve Otsu'nun 1979 yılında önerdiği kendi adıyla anılan yöntem bu işlem için sıklıkla kullanılır. Eşikleme değerini statik olarak belirlemek için ise arka planın ve ilgilenilen bölgenin gri seviyeleri belirlenir. Bu iki değer arasında bir gri seviyesi seçilir. Eşik değeri belirlendikten sonra bu değerden küçük gri seviyesine sahip olan piksellere 0 (sıfır) değeri verilirken, bu değere eşit ve bu değerden yüksek gri seviyesine sahip piksellere 1 değeri verilir (Şekil 2.7). Gerekli durumlarda 0 (sıfır) ve 1 şartı değiştirilebilir. Bu işlem sonucunda sadece istenen bölgenin beyaz olarak ifade edildiği 1 bit siyah-beyaz görüntü elde edilmiş olur.

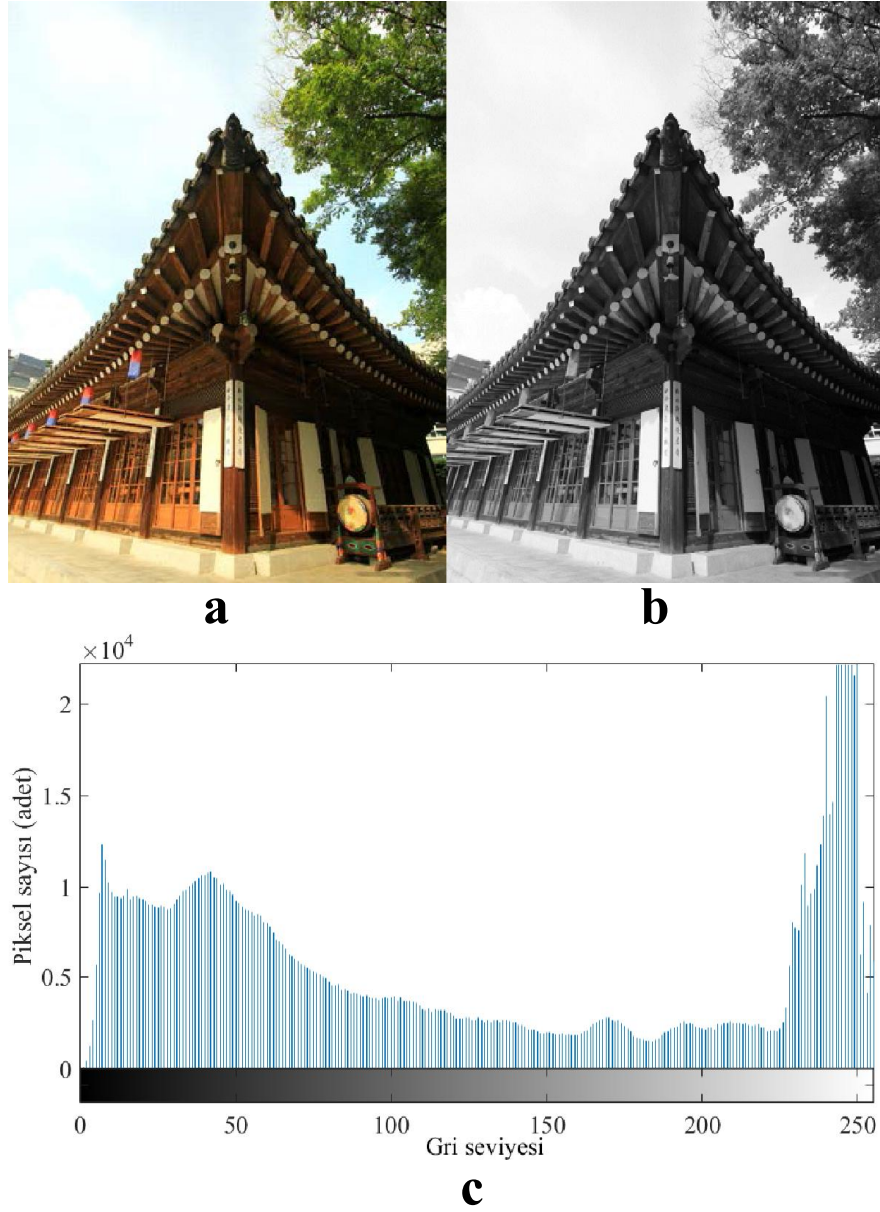


Şekil 2.7. 8 bit gri görüntü üzerinde eşikleme uygulaması

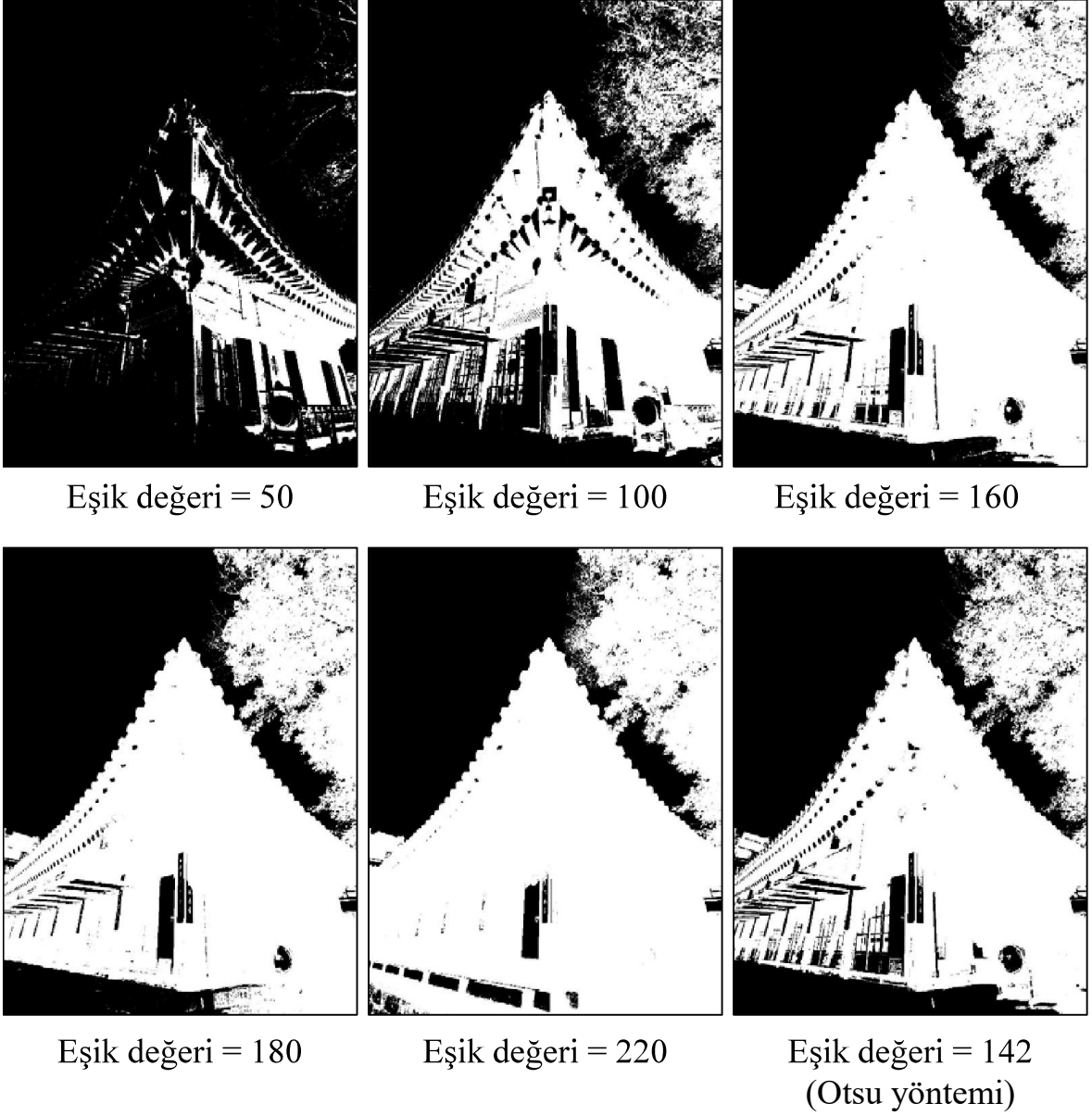
Bu çalışmada olduğu gibi, görüntü alınan ortam şartlarının uygun hale ( sürekli ve sabit ışıklandırma, istenen bölgeyi öne çıkartacak arka plan) getirilebildiği durumlar için statik

eşik değeri belirleme yöntemi kullanılabilir. Ayrıca, bu şekilde kısıtlı işlemci gücü daha verimli şekilde kullanılmış olacaktır.

Şekil 2.8’de renkli görüntü griye çevrilmiş ve histogram ile gri görüntüdeki piksellerin gri seviyelerine göre dağılımları verilmiştir. Ön plandaki geleneksel Kore evi ile arka plandaki gökyüzünün gri tonları histogramda iki ayrı tepe oluşturmuştur. Arka planı resimden çıkarmak için iki tepe arasında ve arka plana yakın olan gri seviyesi eşik değeri olarak seçilir ve bu değerin üstündeki piksellere 0 (sıfır) değeri verilir (Şekil 2.9) .



Şekil 2.8. a) Renkli görüntü b) Gri görüntü c) Gri görüntüdeki piksellerin gri seviyelerine göre dağılımını veren histogram



Şekil 2.9. Farklı eşik değerleri ile elde edilen siyah-beyaz görüntüler

### 2.1.5. Kapama

Kapama iki temel matematiksel morfolojik işlemin belirli bir sırayla uygulanması sonucu elde edilen bir işlemdir. Bunlar sırasıyla genişleme ve aşınma matematiksel morfolojik işlemleridir. Morfoloji, canlıların biçimsel ve yapısal özellikleriyle ilgilenen bilim dalıdır. Benzer şekilde, görüntü işlemede matematiksel morfoloji terimi görüntünün biçimsel ve şekilsel olarak ele alınmasını ve buna göre üzerinde işlem yapılmasını ifade etmektedir. Matematiksel morfolojik işlemler sonucunda uygulanan işlem veya işlemlere



göre görüntünün sınırları ve iskeleti gibi özellikleri belirlenebilmektedir (Gonzalez ve Woods, 2014).

Kapama işlemi sonucunda siyah-beyaz görüntüdeki bölgelerde var olan boşluklar giderilir ve gürültü miktarı azaltılır. Böylelikle, her bölge tam kapalı alan haline getirilerek bölgelerin bütünlüğü sağlanır ve daha temiz bir görüntü elde edilir. Kapama işlemi,

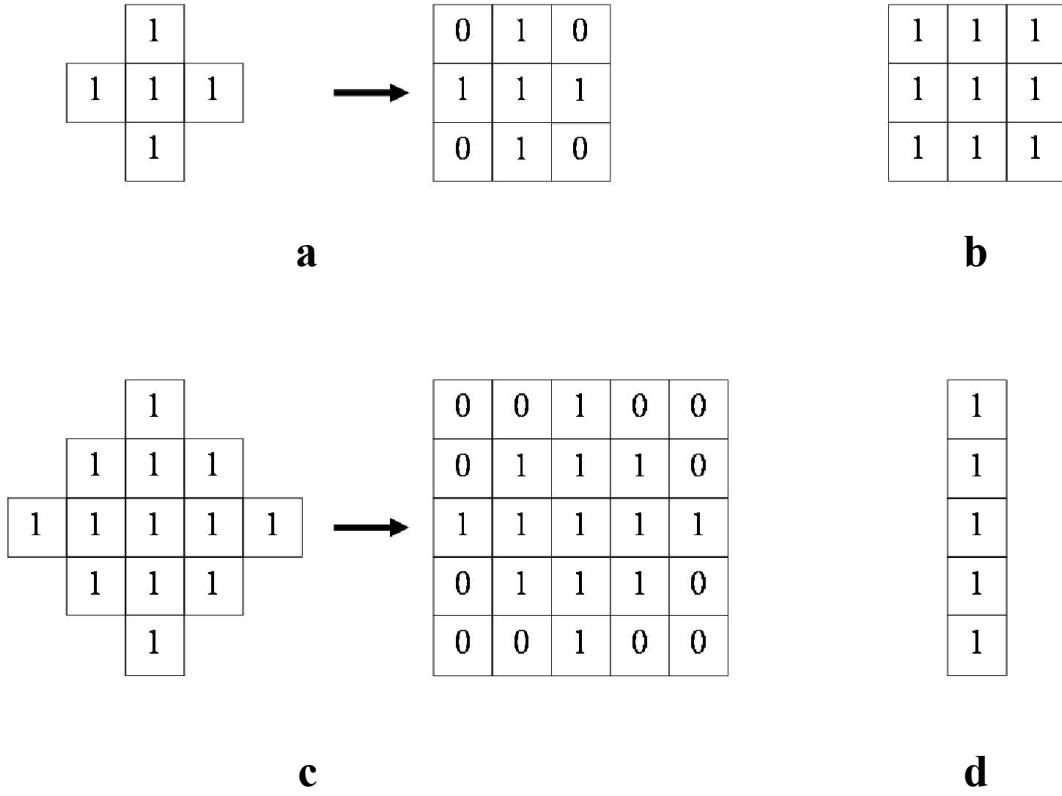
$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B \quad (2.6)$$

ile gösterilir.  $\bullet$ ,  $\oplus$  ve  $\ominus$  sembolleri sırasıyla kapama, genişleme ve aşınma işlemlerini temsil eder. Denklem 2.6'da, A terimi üzerinde işlem yapılacak olan siyah-beyaz görüntüyü, B terimi ise yapısal elemanı gösterir. Yapısal elemanın özellikleri, kapama işleminin siyah-beyaz görüntüye nasıl uygulanacağını belirler. Bu kısmın devamında yapısal eleman ile genişleme ve aşınma morfolojik işlemleri Gonzalez ve Woods'dan (2014) yararlanılarak açıklanmıştır.

### 2.1.5.1. Yapısal Eleman

Yapısal eleman, içerisinde 0 (sıfır) ve 1 değerlerini bulunduran bir maskedir. 0 (sıfır) ve 1 değerlerinin maske içerisindeki yerleşimi ve maskenin biçimi uygulanan matematiksel morfolojik işlemin sonucunu değiştirmektedir. Aşınma işlemi ile görüntüdeki gürültülü kısımlar veya bütünlük göstermeyen alanlar kaldırılmak istendiğinde, yapısal elemandan büyük olan gürültüler ve bütünlük göstermeyen bölgeler görüntüden kaldırılamayacaktır. Yani, aşınma işleminin etkisi sadece yapısal elemanın boyutuna eşit ve bu boyuttan küçük bölgelerde ortaya çıkacaktır.

Yapısal eleman biçimsel olarak 0 (sıfır) ve 1 değerlerinden oluşan bir matris olarak düşünülebilir. 1 değerinin geldiği kısımlar asıl yapısal elemanın şeklini göstermektedir, fakat görüntü işleme için yapısal elemanın dikdörtgen biçimli olması gerekir. Asıl şekli dikdörtgene tamamlamak amacıyla gerekli kısımlara 0 değerleri yerleştirilir (Şekil 2.10). Yapısal elemanın boyutu ve 0 (sıfır) – 1 yerleşimi çözülmek istenen soruna göre değişiklik gösterir. Şekil 2.10'da farklı yapısal elemanlar görülmektedir. Yapısal elemanların boyutları tek sayı olarak seçilir, böylelikle uygulama esnasında yapısal elemanın merkezi, görüntüdeki her bir piksel üzerine uygulanabilir.



Şekil 2.10. Farklı boyutlara ve 0 (sıfır)-1 yerleşimlerine sahip yapısal elemanlar **a)** 3x3 **b)** 3x3 **c)** 5x5 **d)** 5x1

### 2.1.5.2. Genleşme

Genleşme, iki boyutlu uzayda ifade edilen siyah-beyaz görüntüdeki bölge sınırlarını genişletmek ve hatlarını daha belirgin hale getirmek için kullanılan temel matematiksel morfolojik işlemdir. Genleşme işlemi,

$$A \oplus B = \{z | (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (2.7)$$

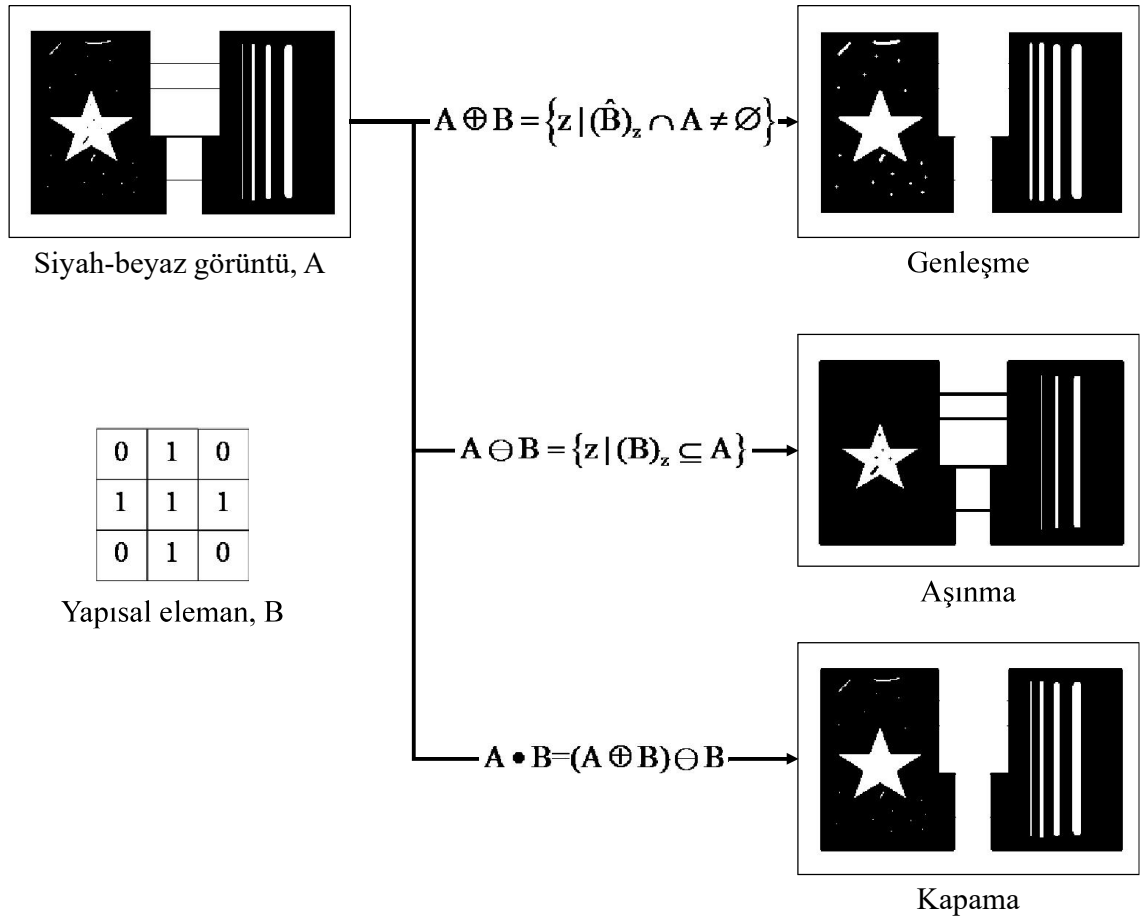
olarak ifade edilir. Denklem 2.7 ile ifade edilen işlem, B yapısal elemanının kendi orjinine simetriğinin,  $\hat{B}$ , z kadar ötelenmesidir. Bu işlem sonucunda A görüntüsüne B yapısal elemanı kullanılarak genleşme işlemi uygulanmış olur (Şekil 2.11).

### 2.1.5.3. Aşınma

Aşınma, iki boyutlu uzayda ifade edilen siyah-beyaz görüntüde bulunan gürültüler ve istenmeyen bölgelerin görüntüden kaldırılması için kullanılan temel matematiksel morfolojik işlemdir. Aşınma işlemi,

$$A \ominus B = \{z \mid (B)_z \subseteq A\} \quad (2.8)$$

olarak ifade edilir. Denklem 2.8’de ifade edilen işlem, z kadar öteleme durumunda yapısal elemanın (B), siyah-beyaz görüntü (A) içerisinde yer alabileceği bütün z noktalarının konumlarını vermektedir. Elde edilen konum kümesi B ile aşınma işlemi uygulanmış A’dır (Şekil 2.11).



Şekil 2.11. Siyah-beyaz görüntü üzerine uygulanan genişleme, aşınma ve kapama matematiksel morfolojik işlemlerinin sonuçları

### 2.1.6. Belirleme

Kapama işleminden sonra siyah-beyaz görüntüde kalan bölgeler arasında seçim yapmak için belirleme işlemi uygulanır. Öncelikle, bütün bölgelerin kaç piksellik alana sahip olduğu belirlenir. Daha sonra belirlenen aralık içinde kalan bölgenin piksellerinin değeri sabit tutulurken, diğer piksellere 0 (sıfır) değeri verilir. Böylelikle, siyah-beyaz resimde sadece seçili bölge kalır.

### 2.1.7. Koordinat Çıkarımı

Siyah-beyaz görüntüde bulunan bölgenin veya bölgelerin her birinin merkez noktası belirlenir. Merkez noktasına karşılık gelen piksel değerleri bölgenin X ve Y görüntü eksenindeki konumunu verir. İki konum arasındaki fark, Denklem 1.2’de verilen Öklid uzaklığı ile bulunan değer piksel-milimetre dönüşüm katsayısı ile çarpılmasıyla hesaplanır. Piksel-milimetre dönüşüm katsayısı ayarlı uzunluğu bilinen geometrik şekillerin görüntülenmesi ile hesaplanır (Şekil 2.12). Gerçek uzunluk ile görüntü üzerinde ölçülen uzunluk arasındaki oran piksel-milimetre dönüşüm katsayısını vermektedir.



Şekil 2.12. Piksel-milimetre dönüşüm katsayısının belirlenmesi

## 2.2. Görüntü Tabanlı Kontrol

Çıktıları belirli bir amaca uygun olarak kontrol edilmek istenen sistemlerin girdileri, matematiksel model veya sensörlerden alınan verilerin işlenmesi ile elde edilir. Sensörlerin kullanıldığı sistemler, kapalı çevrim veya geri beslemeli sistem olarak isimlendirilir. Bu sistemler çevreyle etkileşimini, sensörlerden toplanan bilgilerin kontrolcüye beslenmesiyle düzenler ve istenen çıktılarını verir.

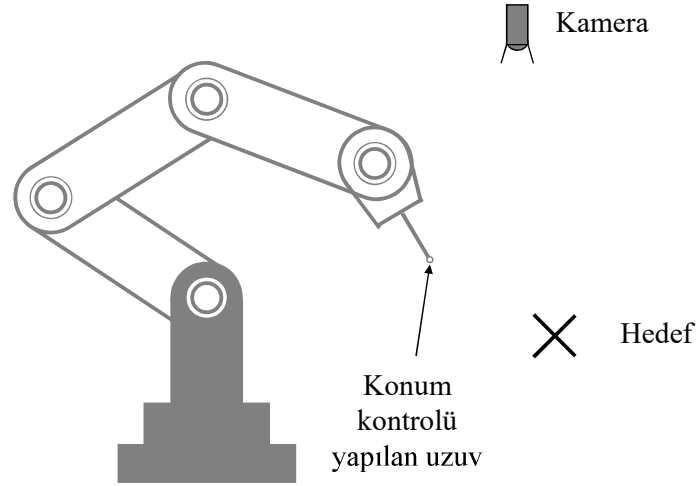
Sensörler vasıtasıyla alınan bilgiler, sistemin yapması için tasarlanan iş ve bulunduğu çevre koşullarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Çalışılması planlanan ortam statik bir yapıdaysa, sistem bu ortama göre tasarlanır ve sensöre ihtiyaç duyulmayabilir. Dinamik bir ortamda çalışan ve statik ortamda belirtilen aynı işi yapacak sistemin, bu süreçte dinamik ortama uyum sağlayabilmesi için çevredeki değişkenlerin sistem kontrolcüsüne geri beslenmesi gerekir. Ortamdaki farklı değişkenleri ölçebilmek için farklı sensörler kullanılması yoluna gidilebileceği gibi tek sensör ile farklı değişkenlerin verileri de ölçülebilir.

Görüntü sensörleri dahil oldukları sistemin bulunduğu çevreyle ilgili çok miktarda değişkeni gözlemleyerek sisteme aktarma kapasitesine sahiptir. Sisteme aktarılan görüntü verisinin işlenmesinin ardından elde edilen bilgi sistemde kullanılmak üzere gerekli birimlere yönlendirilir, böylelikle tek bir sensör ile birden çok bilginin alınması mümkün olur. Çevreden toplanan bilgiler sisteme dinamik bir ortam içerisinde çalışma imkânı sunduğu gibi esneklikte katmaktadır (Hashimoto, 2003).

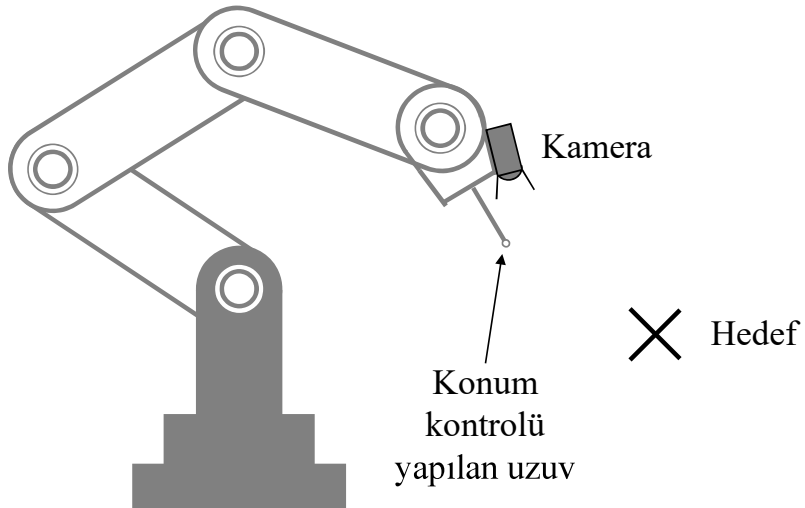
Ortaya çıkan, esnek çalışabilen sistemlerin ihtiyacı sonucunda ortama uyum sağlayabilecek sistemlerin üretilmesi gerekmiştir ve görüntü tabanlı kontrol yöntemi kullanılarak bu ihtiyacın karşılanabileceği görülmüştür. Görüntü tabanlı kontrol sistemleri görüntü işleme, bilgisayarla görme ve kontrol teorisinin kullanımıyla gerçek zamanlı olarak alınan görüntülerden elde edilen bilgilerin kontrol sistemine geri beslenmesi işlemidir.

Görüntü tabanlı kontrol ile ilgili kayıtlara geçen ilk makalelerden birisi Shirai ve Inoue'nin 1973 yılında robot kol ile yapılması tasarlanan montaj işlemine görüntü tabanlı kontrol sistemini dahil etmesi ile ortaya çıkan çalışmadır. Geçen zamanla birlikte işlemci hızı ve kapasitesinin artması, birim hesaplama başına düşen maliyet ve zamanın azalması, görüntü işleme için gerekli cihazlara kolay erişilebilmesi bu alanda ortaya çıkan çalışmaların miktarını ve çeşitliliğini arttırmıştır (Hutchinson vd., 1996).

Görüntü alma cihazı olarak kullanılan kameranın sistem içindeki yerleşiminde temel olarak iki durum bulunmaktadır. Kamera, sistemi ve hedef noktasını aynı anda gözlemleyecek veya sistemin kontrol edilen kısmıyla beraber hareket ederek sadece hedefi gözlemleyecektir. Bu iki durum sırasıyla gözlemci kamera ve hareketli kamera olarak anılacaktır (Şekil 2.13, Şekil 2.14).



Şekil 2.13 Kameranın gözlemci konumunda olduğu sistem



Şekil 2.14. Kameranın hareketli durumda olduğu sistem

Bu tez kapsamında yapılan çalışmaların tamamında kamera sisteme gözlemci konumunda dahil olmuştur. Kameranın yerleşimi çalışmaların yapıldığı düzleme dik olarak yapılmıştır. Böylelikle, çalışmaların gerçekleştirildiği 3 boyutlu ortamın seçilen 2 boyutu ile kameranın 2 boyutlu görüşü örtüştürülmüştür. Bu örtüşme sonucunda iki ortam arasında herhangi bir koordinat çevrimi yapılmaksızın kontrol işleminin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.

Bu kısmın devamında poz tabanlı ve görüntü tabanlı görsel kontrol kavramlarından bahsedilecektir ve temel kaynak olarak Chaumette ve Hutchinson'un 2006 yılında yayınladıkları çalışmadan yararlanılmıştır.

Görüntü tabanlı kontrol sistemlerinin amacı hatayı,  $e(t)$ , en küçük değere indirmektir ve hatayı elde etmek için,

$$e(t) = s^*(t) - s(m(t), q) \quad (2.9)$$

$$q = q(q_{3B}, q_K) \quad (2.10)$$

eşitliği kullanılır. Görüntüden elde edilen ilgi noktalarının koordinatları ya da belirli bir nesnenin merkez noktasının koordinatları gibi bilgileri  $m(t)$  veri vektörüyle, görüntü alma cihazı olarak kullanılan kameranın bazı iç parametreleri ya da objelerin 3 boyutlu modeli gibi ek bilgileri içeren değişkenler  $q$  veri setiyle, tanımlanan  $m(t)$  ve  $q$  değişkenlere bağlı olarak alınan görüntüdeki görsel özellikler  $s(m(t), q)$  fonksiyonuyla ve hedef olarak kullanılan görsel özellikleri ise  $s^*(t)$  terimi ile gösterilir. Denklem 2.10'da verilen  $q_{3B}$ , 3 boyutlu geometrik özellikleri içeren veri setini ve  $q_K$ , kameranın iç parametrelerini (odak uzaklığı, görüntü sensör biçimi ve esas noktaları) temsil etmektedir.  $s^*(t)$  ve  $s(m(t), q)$  vektörlerinin boyutları birbiriyle eşit olmakta ve sistemin takip etmesi istenen referansa göre değişmektedir (belirli büyüklükteki alan, belirli bir bölgenin merkez noktası).

Görüntüden yararlanılarak kontrol işlemini gerçekleştiren sistemler tasarlanırken alınan görüntüden görsel özelliklerin hesaplanmasında iki farklı yöntem kullanılır: Poz tabanlı görsel kontrol (Pose Based Visual Servoing, PBVS) ve görüntü tabanlı görsel kontrol (Image Based Visual Servoing, IBVS).

Poz tabanlı görsel kontrol yaklaşımı, görüntüden çıkarılan bilgilerin sistemde daha önceden tanımlı olan 3 boyutlu nesne veya sahne modelleriyle örtüştürülmesi ve buna dayalı olarak kontrol işleminin yerine getirilmesini içermektedir (Şekil 2.15). Görüntü tabanlı görsel kontrol yaklaşımı ise, sadece kameradan alınan görüntü verisinden direkt elde

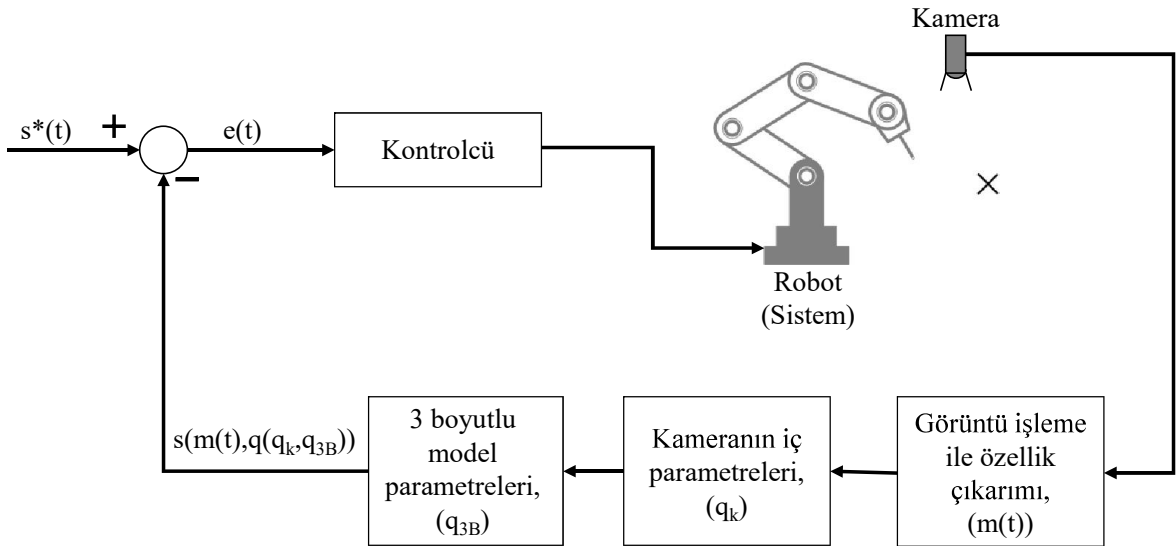
edilebilen bilgileri kullanarak sistemin kontrol edilmesini içermektedir (Şekil 2.16). Hazırlanan bu tezin genelinde görüntü tabanlı görsel kontrol terimi ile görüntü tabanlı kontrol terimi eş anlamlı olarak kullanılmıştır.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar 2 boyutlu düzlemde hareket sergileyen eyleyicinin takip edilmesi, kontrolü ve aynı düzlemdeki bir noktaya belirtilen şartlarda yaklaşmasını içermektedir. Poz tabanlı görsel kontrol yaklaşımında görüntüden elde edilen özellikler kullanılarak geometrik modele geçildiği için yapılacak işlem miktarı artmaktadır. Bu sebeplerden dolayı çalışmalarda 3 boyutlu geometrik modellere ihtiyaç duyulmamış ve işlemci gücünü daha verimli kullanmak adına görüntü tabanlı görsel kontrol yaklaşımı kullanılmıştır.

Yapılan çalışmalarda Şekil 2.16'da gösterilen sistem kullanılmıştır ve bu sisteme göre hata,

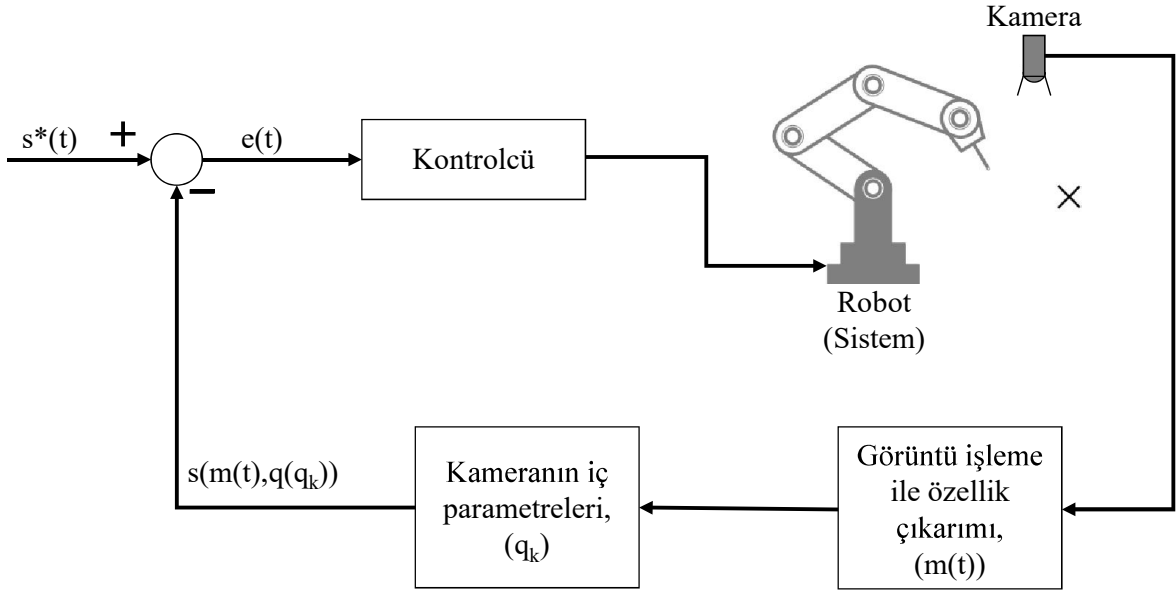
$$e(t) = s^*(t) - s(m(t), q(q_k)) \quad (2.11)$$

eşitliği ile hesaplanır. Hesaplanan hata kontrolcü sisteme beslenir ve hatayı en küçük değerde tutacak kontrol çıktısının üretilmesi sağlanır.



Şekil 2.15. Poz tabanlı görsel kontrol yaklaşımının şematik gösterimi





Şekil 2.16. Görüntü tabanlı görsel kontrol yaklaşımının şematik gösterimi

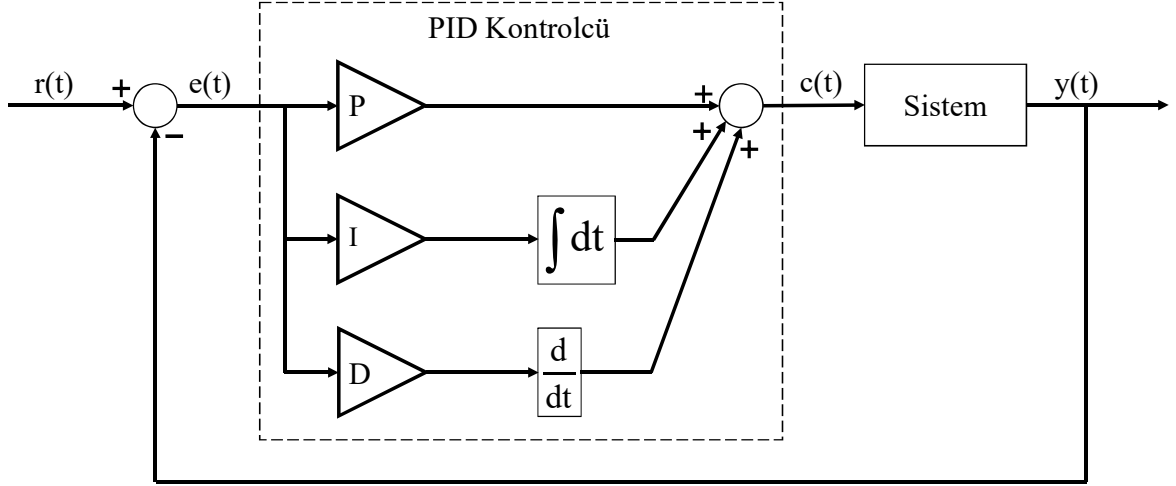
### 2.3. Kontrolcü

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar konjuge EAP eyleyicinin serbest ucunun görüntü tabanlı sistemle kontrolünü içermektedir. Bu amaçla kullanılan kontrolcü çeşitleri bu kısmın devamında anlatılmıştır.

#### 2.3.1. PID Kontrolcü

Kapalı çevrim veya geri beslemeli sistem, sistem çıktısına göre sistem girdisini ayarlayabilen sistemleri ifade etmek için kullanılır. Bu bağlamda, sistem çıktısı kontrolden sorumlu yapıya direkt veya belli işlemlerden geçirilerek geri beslenir. Geri beslemeli kontrol sistemlerinde yaygın olarak PID kontrolcü çeşitlerinden yararlanır.

PID kontrolcü doğrusal (P), integral (I) ve türev (D) olmak üzere 3 temel elemanın birleşiminden oluşur. Her eleman referans,  $r(t)$ , ile sistem çıktısı,  $y(t)$ , arasındaki farktan oluşan hatayı,  $e(t)$ , kullanarak kontrol çıktısına katkı sağlar. P, I ve D elemanlarının kontrol çıktısına katkısı, hataya uyguladıkları işlemlerin (doğrusal olarak arttırarak, integral ve türevini alarak) belirtilen katsayılarla çarpılmasıyla değişiklik gösterir. Bu çıktıların toplamı referansı takip etmek için gerekli olan sistem girdisine,  $c(t)$ , eşit olmalıdır (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. PID kontrolcü

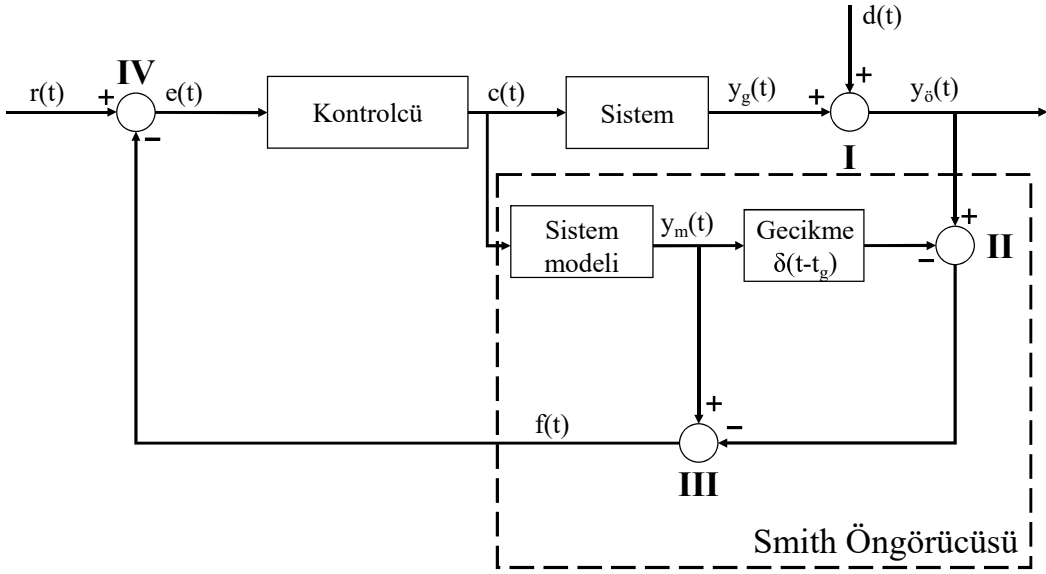
Şekil 2.17’de verilen PID kontrolcüye farklı elemanlar eklenerek kullanılacak sisteme uygun hale getirilebilirler.

### 2.3.2. Smith Öngörücüsü

Smith öngörücüsü 1957 yılında Otto J.M. Smith tarafından sistem kaynaklı gecikmeleri gidermek için önerilen bir kontrolcü çeşididir. Bu gecikmelere ölü zaman adı verilmektedir. Ölü zamanın büyüklüğü kontrolcünün etkisini azaltabilir dahası sistemin kararsız bir yapıya geçmesine sebep olabilir (Shokri vd., 2010).

Görüntü tabanlı görsel kontrol sistemleri de ağır işlem yükü içerdiği için sistem kontrolünde sorun oluşturabilecek seviyede ölü zamana sebep olabilir. Ortaya çıkan ölü zamanın kontrol performansını etkilememesi ve sistemin kararlı yapıda kalabilmesi için Smith öngörücüsü bu tür sistemlerde kullanılabilir.

Smith öngörücüsünün mantığı, gerçek sistemden gelen ve ölü zamandan dolayı gecikmiş olan sistem cevabını yok etmek için sistem modelinden gelen geciktirilmiş cevabı kullanmasıdır. Sistem çıktısı olarak sistem modelinden gelen gecikmemiş cevap geri beslenerek ölü zamanın sistem üzerindeki etkisi ortadan kaldırılır. Bu yöntemin işe yarayabilmesi için elde edilen sistem modelinin gerçek sistemle uyumu çok önemlidir. Smith öngörücüsün kontrol sistemi içindeki yerleşimi Şekil 2.18’de görülmektedir.



Şekil 2.18. Smith öngörücüsüyle desteklenen kontrol sistemi

Şekil 2.18 üzerinde Smith öngörücüsünün işleyişi gösterilmiştir, I. düğüm noktasında gerçek sistemin çıktısı,  $y_g(t)$ , ile ölçümde ortaya çıkan gürültü,  $d(t)$ , toplanarak ölçülen sistem çıktısını,  $y_\delta(t)$ , oluşturur.

$$y_\delta(t) = y_g(t) + d(t) \quad (2.12)$$

II. düğüm noktasında  $\delta(t-t_g)$  ile geciktirilmiş olan sistem modelinin çıktısı,  $y_m(t)$ , I. düğümden gelen ölçülen sistem çıktısından,  $y_\delta(t)$ , çıkartılır. Eğer sistem modeli gerçek sistemle mükemmel uyuyorsa, bu işlem sonrasında II. düğümde sadece gürültü,  $d(t)$ , çıkacaktır. Fakat, model ile gerçek sistemin uyumsuzluğu da işleme dahil etmek için model ile gerçek sistemin çıktıları arasında farklılık,  $e_m(t)$ , olduğu kabul edilecektir.

$$y_\delta(t) - y_m(t) \delta(t-t_g) = d(t) + e_m(t) \quad (2.13)$$

III. düğüm noktasında sistem modelinden gelen gecikmesiz cevap,  $y_m(t)$ , ile II. düğümde gelen sinyal toplanır ve geri besleme,  $f(t)$ , sinyali elde edilmiş olur.

$$f(t) = y_m(t) + d(t) + e_d(t) \quad (2.14)$$

IV. düğüm noktasında geri besleme sinyali,  $f(t)$ , sistemin takip etmesi istenen referanstan,  $r(t)$ , çıkartılarak hata,  $e(t)$ , belirlenir. Kontrolcü hesaplanan hataya,  $e(t)$ , göre uygun kontrol çıktısını,  $c(t)$ , sisteme girdi olarak uygular.

$$e(t) = r(t) - f(t) \quad (2.15)$$

Denklem 2.12, 2.13, 2.14 ve 2.15'te Smith öngörücüsüyle desteklenen kontrolcünün bir döngüde yaptığı işlemler gösterilmiştir. Denklemlere eklenen gürültü,  $d(t)$ , ve model kaynaklı hata,  $e_m(t)$ , gerçek hayatta kullanılan kontrol sistemlerinde ortaya çıkabilecek hataları göstermek amacıyla işlemlere dahil edilmiştir. Gürültü,  $d(t)$ , ve hatanın,  $e_m(t)$ , olmadığı durumlar göz önüne alınırsa, denklem 2.12, 2.13, 2.14 ve 2.15 sırasıyla denklem 2.16, 2.17, 2.18 ve 2.19 a dönüşecektir.

$$y_o(t) = y_g(t) \quad (2.16)$$

$$y_o(t) - y_m(t) \delta(t - t_g) = 0 \quad (2.17)$$

$$f(t) = y_m(t) \quad (2.18)$$

$$e(t) = r(t) - f(t) = r(t) - y_m(t) \quad (2.19)$$

### 3. YAPILAN ÇALIŞMALAR

#### 3.1. Giriş

Bu tez kapsamında birbirini tamamlar nitelikte 4 çalışma yapılmış ve çalışmalarda incelenen konular aşağıda verilmiştir.

- Konjuge EAP eyleyicinin görüntü tabanlı kontrol sistemiyle konum kontrolünün yapılabirliği ve tek eksende ölçüm yapabilen lazer mesafe ölçer karşısında sağladığı avantajlar (Coşkun ve İtik, 2015)
- Konjuge EAP eyleyicinin görüntü tabanlı konum kontrolünde meydana gelen gecikmenin giderilmesi (Coşkun ve İtik, 2015)
- Konjuge EAP eyleyicinin görüntü tabanlı konum kontrolünün ve kuvvet kontrolünün hibrit kontrolcüyle yapılması ve bir dizi konum ve kuvvet değişimi içeren senaryonun uygulanabilirliği (Sancak vd., 2015)
- Konjuge EAP eyleyicinin görüntü tabanlı konum ve kuvvet kontrolünün hibrit kontrolcüyle yapılması esnasında gecikmeden dolayı konumda meydana gelen takip hatasının giderilmesi ve Sancak vd. (2015) çalışmasında kullanılan senaryonun geliştirilerek gerçekleştirilmesi

Bu bölümün devamında her bir çalışmadan detaylıca bahsedilecektir. Öncelikle çalışmanın yapılış amacı açıklanacak daha sonra çalışmanın yapılması için uygulanan adımlar başlıklar altında verilecektir. Elde edilen sonuçlar her bir çalışmanın başlığı altında verilecektir. Yapılan çalışmaların tamamında eyleyici olarak konjuge EAP kullanıldığından, konu başlıklarında eyleyiciyi belirten ibareler yer almayacaktır. Bu kısımda eyleyicinin doğrusal modellerinin ve frekans cevabı grafiklerinin eldesi için MATLAB yazılımından yararlanılmıştır. Ayrıca, çalışmalarda kullanılan konum kontrolcileri frekans alanında ve kuvvet kontrolcileri ise zaman alanında MATLAB PID Tuning arayüzü kullanılarak tasarlanmıştır.

Diğer bir husus ise, çalışmalarda kullanılan konjuge EAP eyleyicilerin uygulanan elektriksel gerilime verdikleri konum cevabının zaman içerisinde değişiklik göstermesidir. Yapılan çalışmalar 1 yıldan uzun bir süreye yayıldığı için bu durumdan etkilenilmiş ve

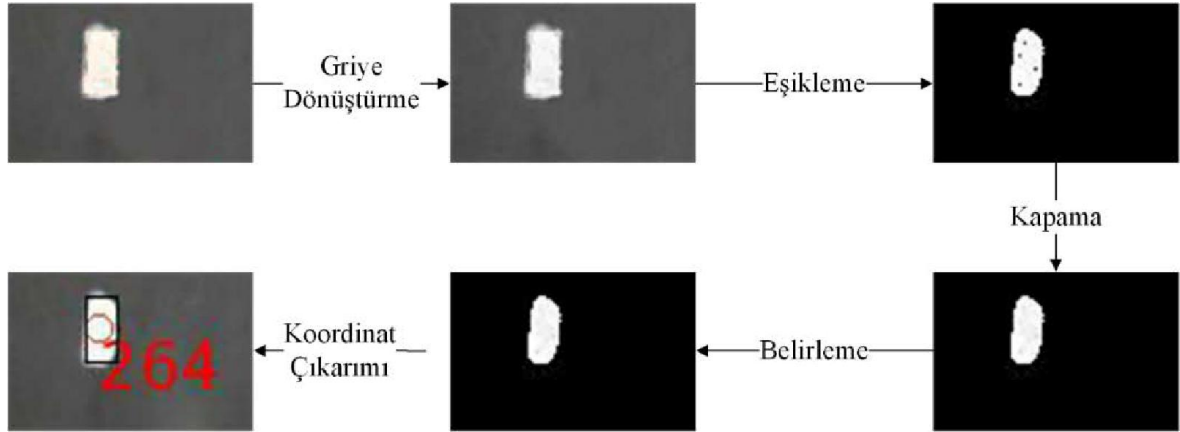
gerekli görülen çalışmaların öncesinde eyleyicinin ilgili çalışmaya uygun modeli tekrar elde edilmiştir.

### 3.2. Görüntü Tabanlı Konum Kontrolünün Yeterliliği

Bu çalışmada görüntü tabanlı kontrol sisteminin eyleyicinin serbest ucunun konum kontrolü için yeterli olup olmadığı incelenmiştir. Çalışma kapsamında eyleyicinin uç noktasının 0.1 Hz ve 2 mm genlikli sinüs sinyalinin takip etmesi görüntü tabanlı konum kontrol sistemi ile sağlanmıştır.

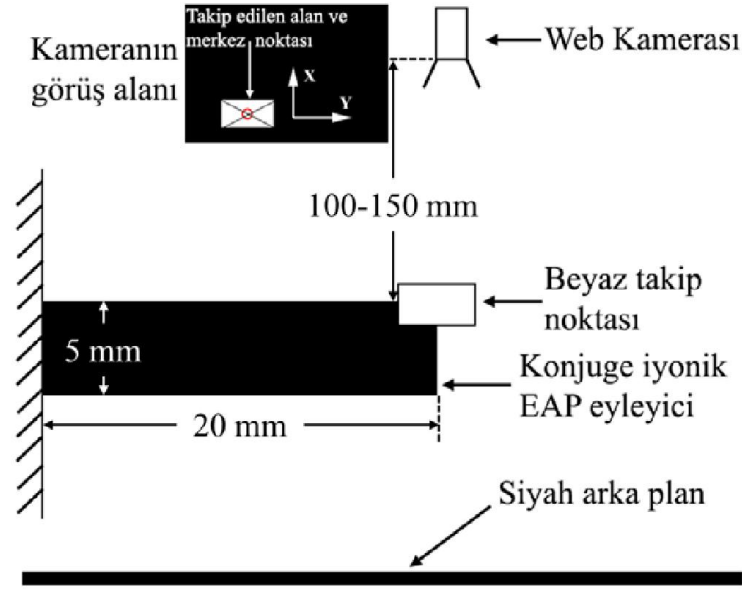
#### 3.2.1. Görüntü İşleme

Konum kontrolü esnasında tek noktanın takibi yapıldığı için Şekil 2.2’de verilen görüntü işleme adımları kullanılmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Tek nesne takibi için görüntü işleme adımlarının uygulanması

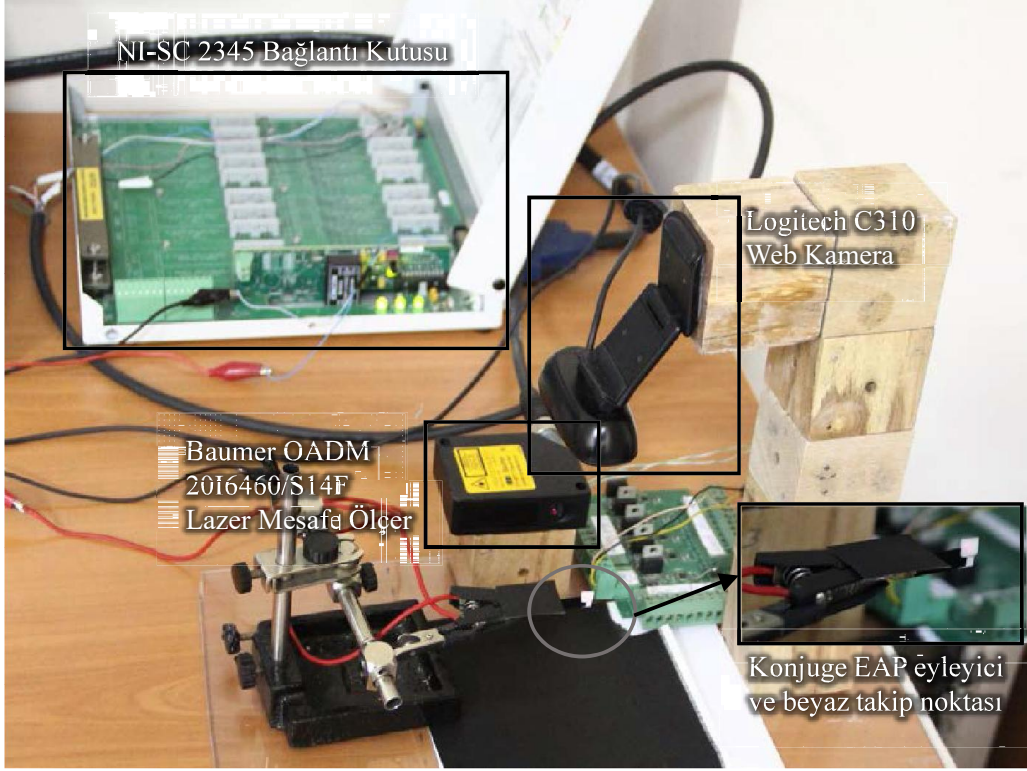
Görüntü işlemeyi kolaylaştırmak amacıyla eyleyicinin serbest ucuna hareketi engellemeyecek, merkez noktası eyleyicinin uç noktasına gelecek şekilde hizalanmış beyaz bir takip noktası konulmuştur. Siyah arka plan seçilerek eşikleme işlemi sonucunda elde edilecek siyah-beyaz görüntüdeki bölgenin daha belirgin bölge hatlarına sahip olması sağlanmıştır (Şekil 3.2).



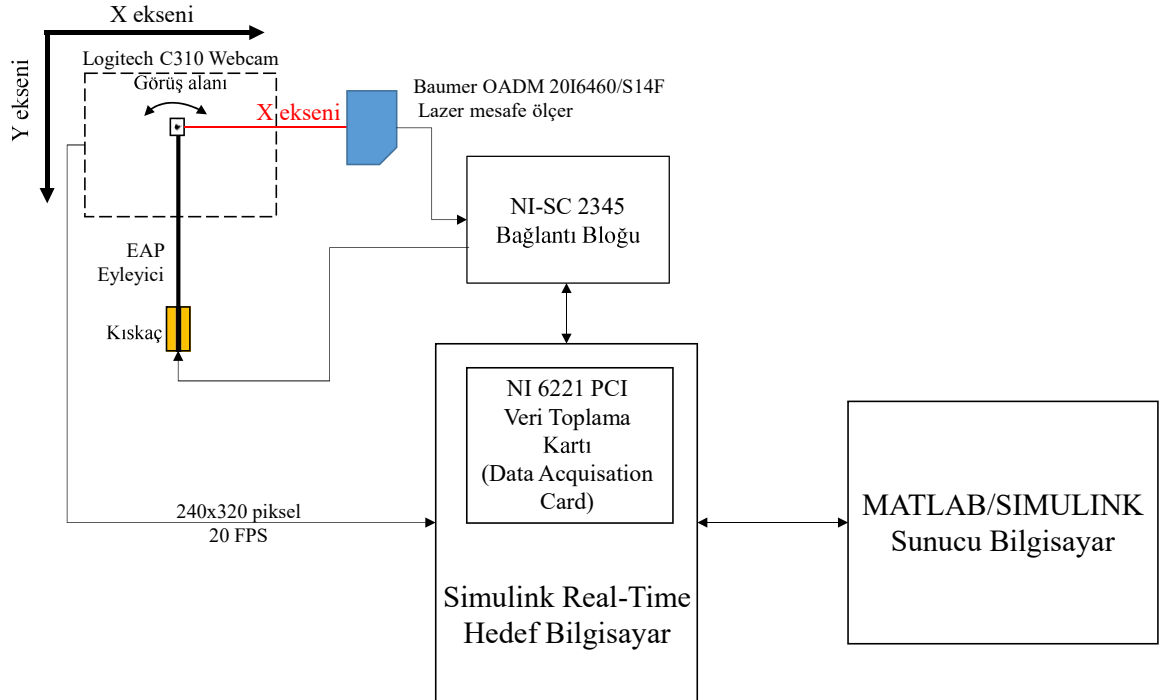
Şekil 3.2. Kameranın görüş alanı

### 3.2.2. Deney Düzenegi

Konjuge EAP eyleyicinin uç noktasının görüntü tabanlı kontrolü için kullanılan deney düzenegi ve deney düzeneginin şematik gösterimi, sırasıyla, Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te verilmiştir. Deney düzeneginde biri hedef diğeri sunucu olmak üzere iki bilgisayar bulunmaktadır. Hedef bilgisayarda National Instruments firmasına ait NI-6221 PCI veri toplama kartı bulunmaktadır ve Baumer firmasına ait OADM 20I6460/S14F lazer mesafe ölçerden gelen sinyaller bağlantı kutusu ve bu kart üzerinden hedef bilgisayara aktarılmıştır. Görüntü almak için Logitech firmasına ait C310 web kamerası kullanılmış ve 20 kare-saniyelik 320x240 piksel çözünürlüğünde görüntü elde edilmiştir. Elde edilen verilerin değerlendirilmesi, istenen bilgilerin çıkarılması ve eyleyicinin kontrolü için Mathworks firmasına ait MATLAB Simulink Real-Time altyapısından faydalanılmıştır.



Şekil 3.3. Görüntü tabanlı konum kontrolünün yeterliliğinin ölçüldüğü deney düzeneği

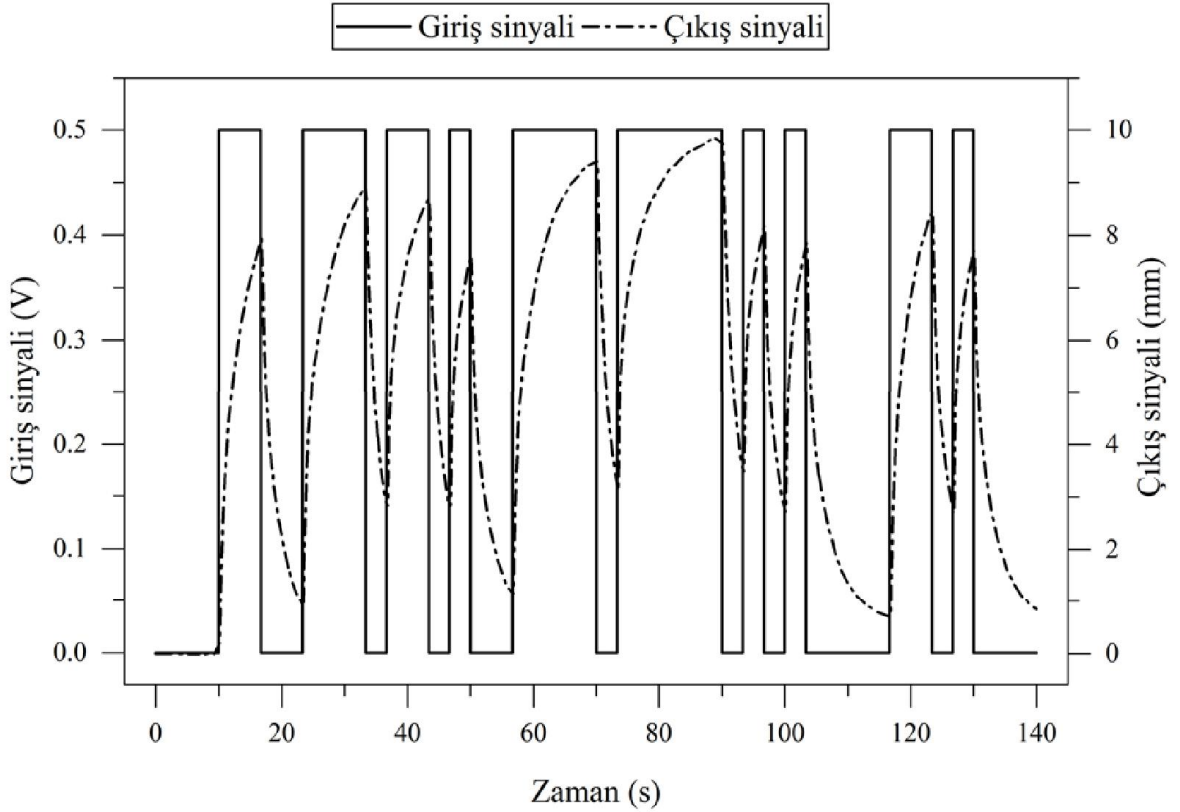


Şekil 3.4. Görüntü tabanlı konum kontrolünün yeterliliğinin ölçüldüğü deney düzeneğinin şematik gösterimi



### 3.2.3. Eyleyicinin Doğrusal Konum Modelinin Belirlenmesi

PID kontrolcü parametrelerini belirlemek amacıyla konjuge EAP eyleyicinin konum bilgisini veren doğrusal sistem modeli ayrık zamanlı olarak sistem tanılama yöntemiyle elde edilmiştir. Sisteme aktarılan görüntünün işleme hızı saniyede 20 kare olduğundan dolayı örnekleme zamanı 0.05 s olarak kullanılmıştır. Eyleyicinin serbest ucunun takip etmesi istenilen referans sinyalinin frekansı ve genliği göz önünde bulundurularak sistem tanılamada kullanılacak giriş sinyalinin genliği ve band genişliği belirlenmiştir. Bu çalışma esnasında referans sinyali olarak 0.1 Hz frekans değerine sahip sinüs sinyali kullanıldığından dolayı sistemin bu çalışma frekansında giriş-çıkış dinamiğini elde edebilmek amacı ile 0.3 Hz band genişliğinde ve 0.5 V büyüklüğünde elektriksel gerilim rastgele bit dizisi (Pseudorandom binary sequence, PRBS) sinyali giriş olarak uygulanmıştır. PRBS, içerisinde rastgele 1 ve 0 ikili değerini bulunduran yapıya sahip bir sinyal türüdür. Eyleyicinin bu girişe verdiği açık çevrim cevabı deneysel olarak görüntü tabanlı sistem ile elde edilmiştir (Şekil 3.5).

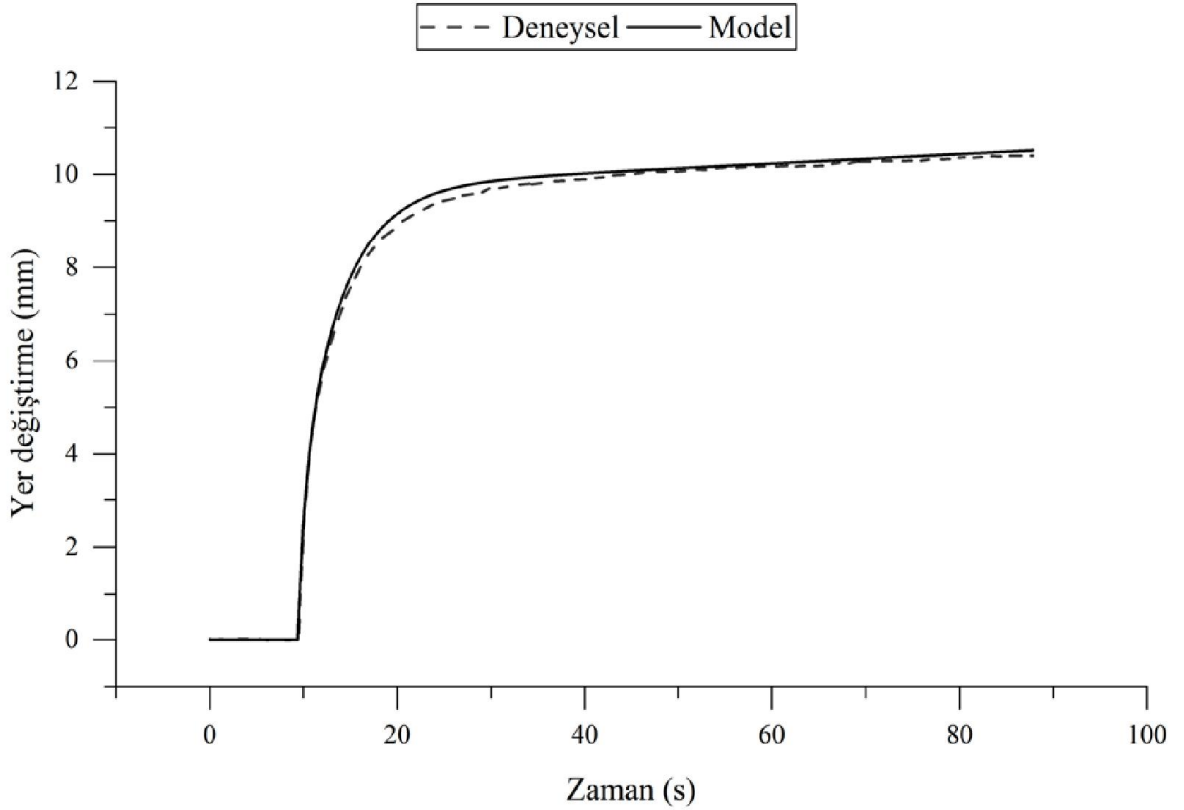


Şekil 3.5. Eyleyicinin 0.3 Hz ve 0.5 V genlikli PRBS sinyaline verdiği açık çevrim konum cevabı

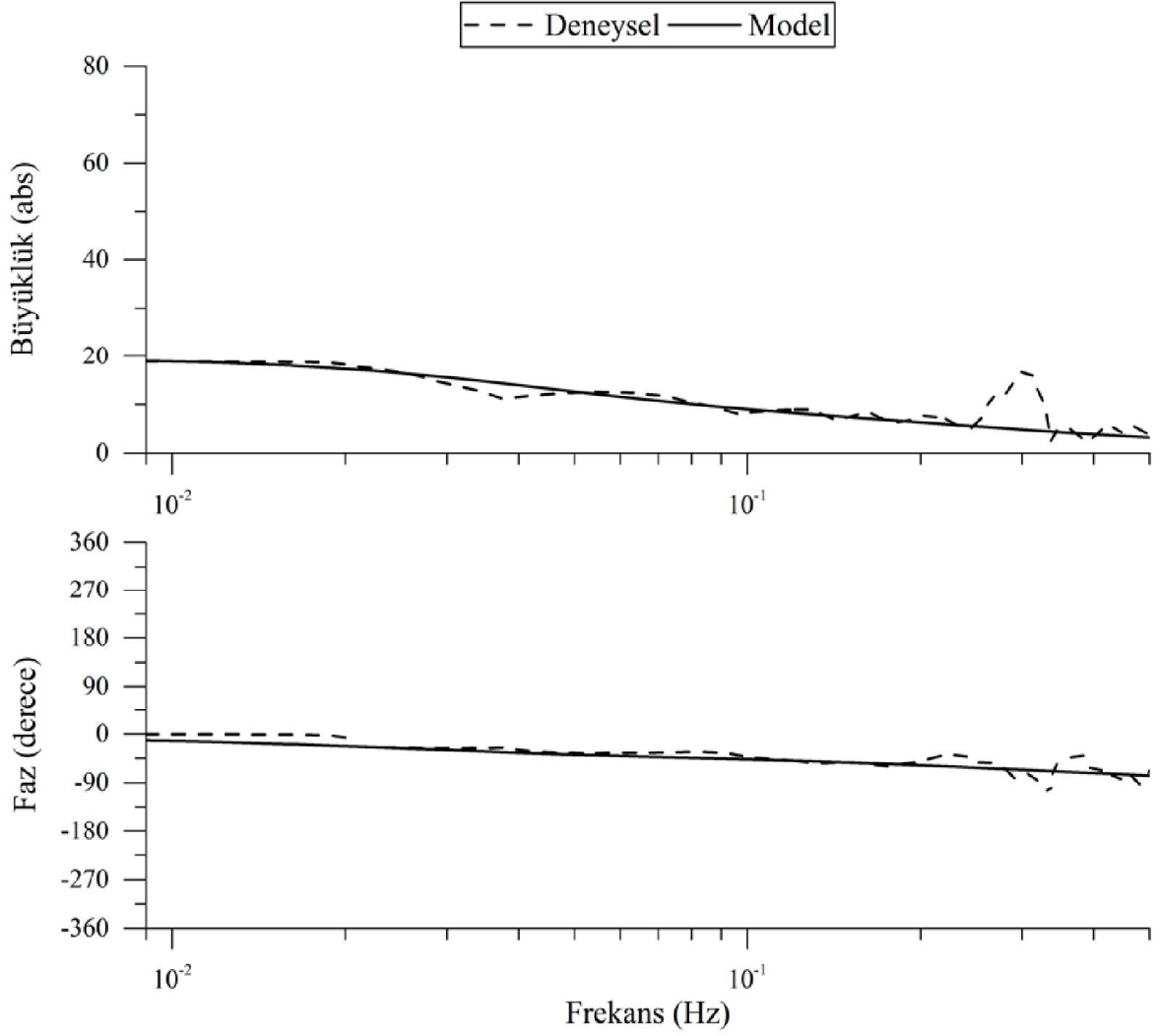
Elde edilen deneysel verilerle sistem tanımlama yapılarak eyleyicinin elektriksel gerilim (V) - yer değiştirme (mm) ilişkisini veren matematiksel model elde edilmiştir.

$$G(z) = \frac{0.5281z^2 - 1.042z + 0.5142}{z^3 - 2.924z^2 - 0.9247} \quad (3.1)$$

Eyleyicinin deneysel olarak elde edilen adım ve frekans cevapları modelin adım ve frekans cevapları ile karşılaştırılmıştır. Bu tez içerisinde yapılan bütün çalışmalarda adım girişi olarak 0.5 V elektrik gerilimi uygulanmıştır. Eyleyicinin takip etmesi gereken referans sinyalinin frekansı 0.1 Hz olduğu için frekans cevaplarının karşılaştırılmasında 0.1 Hz frekansına kadar olan aralıktaki uyuşum gözlemlenmiştir. Adım cevaplarının karşılaştırılması Şekil 3.6, frekans cevaplarının karşılaştırılması ise Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.6. Eyleyicinin konum modelinin deneysel adım cevabıyla doğrulanması

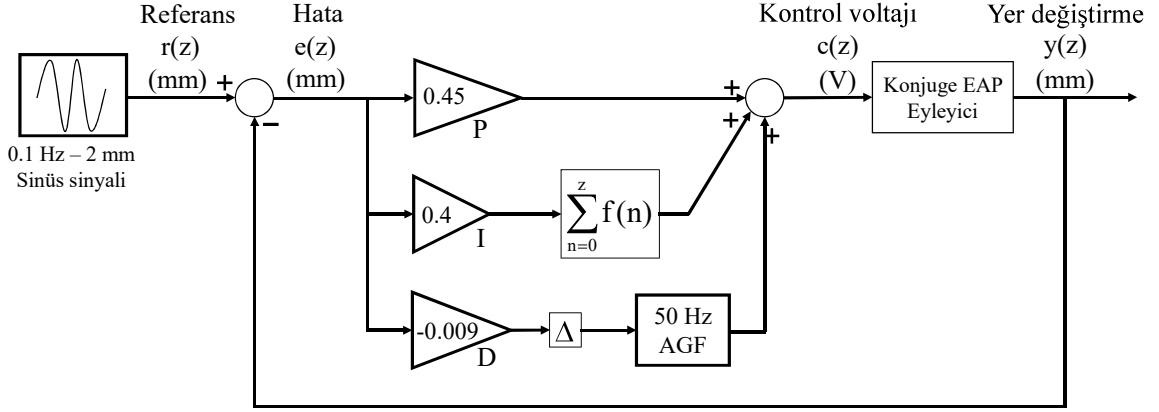


Şekil 3.7. Eyleyicinin konum modelinin deneysel frekans cevabıyla doğrulanması

### 3.2.4. Kontrolcü Parametreleri

Bu çalışmada eyleyicinin istenen referansı takip etmesi için ayrık zamanlı PID kontrolcü kullanılmıştır. Kontrolcü katsayılarının belirlenmesi işlemi frekans alanında yapılmış olup, 0.1 Hz ve 2 mm genlikli sinüs sinyali en iyi takip edebilecek kontrolcü katsayıları seçilmiştir. Seçilen katsayılar;  $P = 0.45$ ,  $I = 0.4$  ve  $D = -0.009$ 'dur. Ayrıca, türev teriminin gürültüden etkilenmemesi için 50 Hz kesme frekanslı alçak geçiren filtre (AGF) kullanılmıştır. Elde edilen kontrolcü örnekleme zamanı 0.05 s olan ayrık zamanlı transfer fonksiyonu olarak sisteme dahil edilmiştir (Denklem 3.2). Kontrol sistemi Şekil 3.8'de verilmiştir.

$$C(z) = \frac{0.37z^2 - 0.5643z + 0.2012}{z^2 - 1.654z + 0.654} \quad (3.2)$$

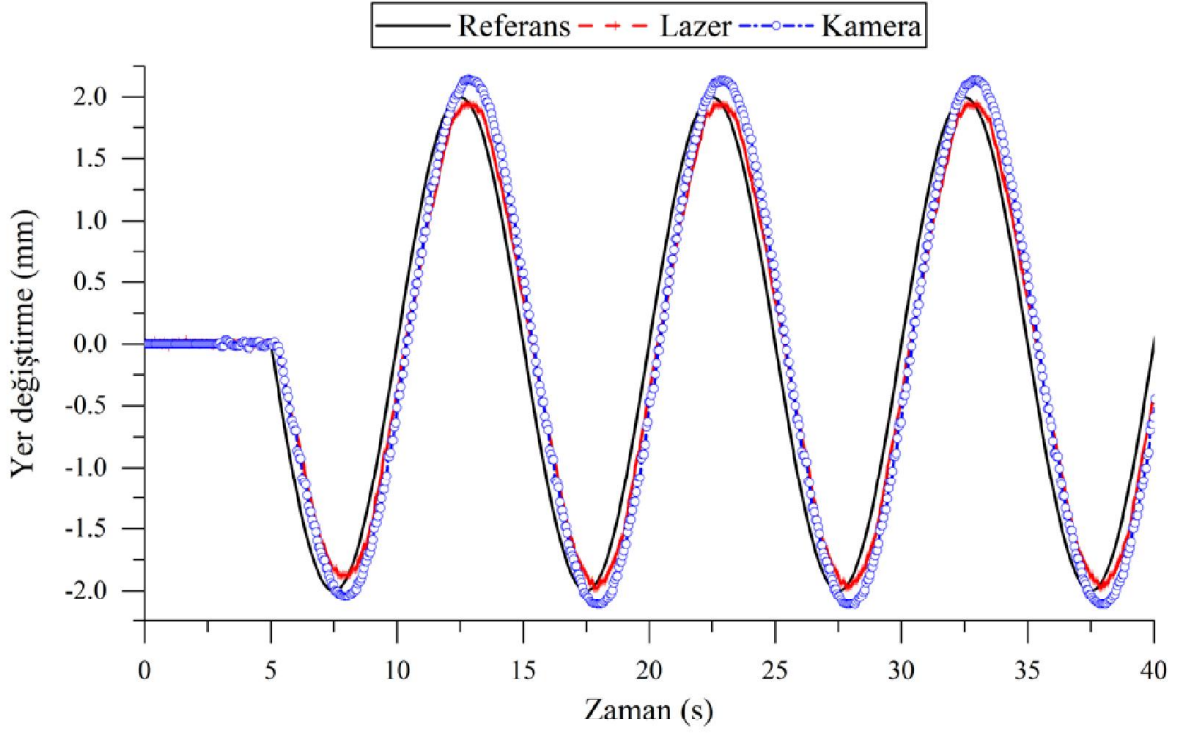


Şekil 3.8. Türev terimi 50 Hz AGF ile gürültüden korunmuş ayrık zamanlı PID içeren kontrol sistemi

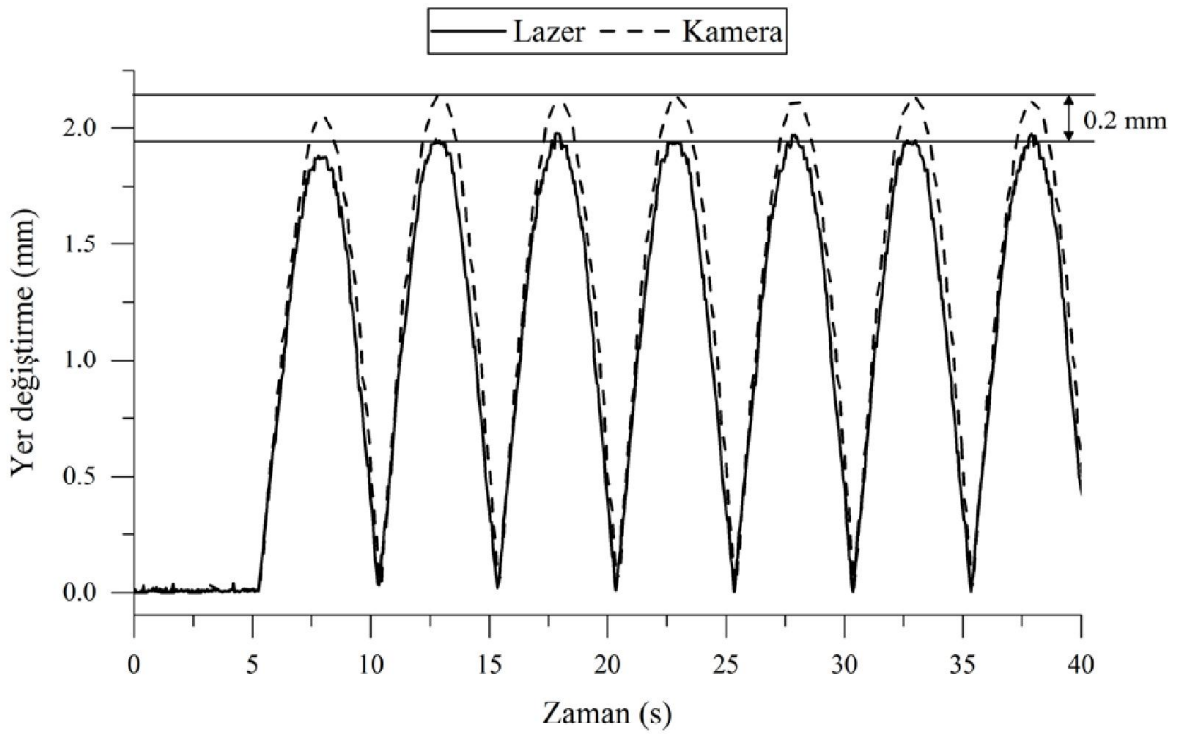
### 3.2.5. Uygulama ve Sonuçlar

Kontrolcü sisteme dahil edildikten sonra takip sinyali olarak 0.1 Hz frekans ve 2 mm genlikli sinüs sinyali kullanılmıştır. Kalibrasyon levhası yardımıyla pikselden milimetreye dönüşüm katsayısı 0.238 mm/piksel olarak belirlenmiştir (Şekil 2.12).

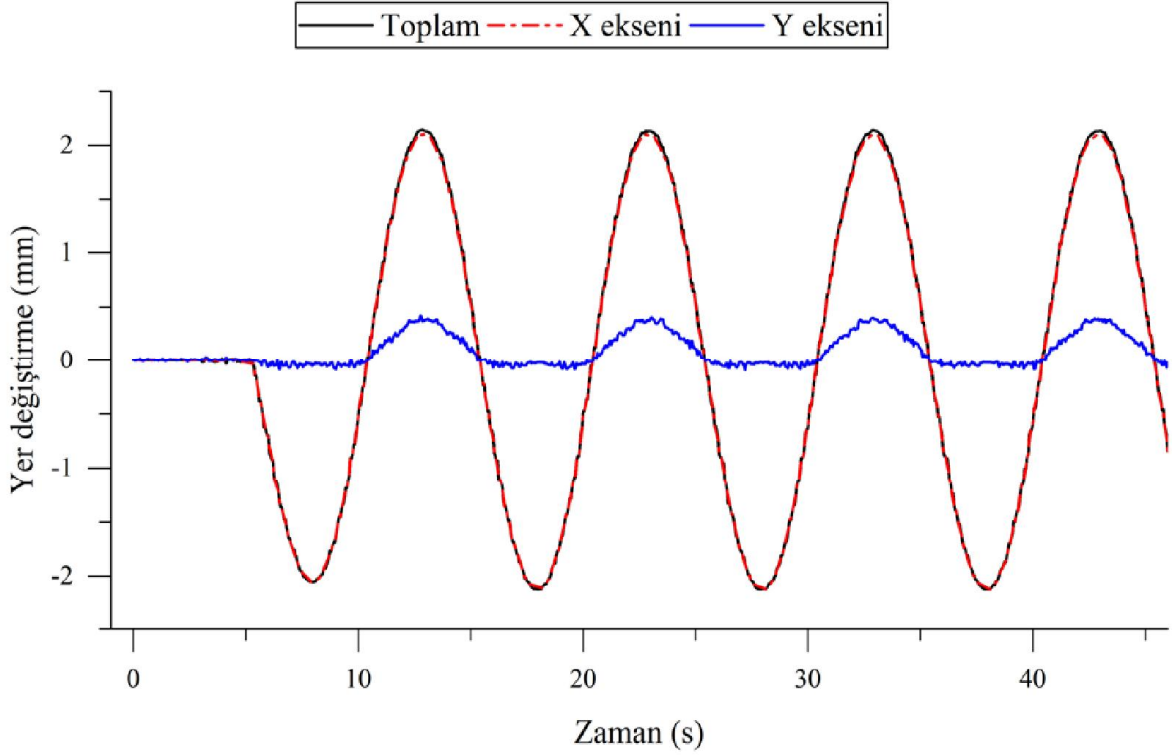
Görüntü tabanlı kontrol ve lazer mesafe ölçerden elde edilen sonuçlar Şekil 3.9'da verilmiştir. Lazer mesafe ölçerden alınan konum bilgisinin kameradan alınandan farklı olduğu Şekil 3.10'da görülmektedir. Şekil 3.10'da eyleyicinin serbest uç noktasının konumu ile referans sinyali arasında meydana gelen fark görüntü tabanlı sistemden kaynaklanan gecikme ve seçilen kontrolcü katsayılarının bu duruma uyum sağlayamamasından kaynaklanmaktadır. Eyleyicinin uç noktasının yer değiştirmesi iki ekseninde olmaktadır, lazer ise tek ekseninde olan değişimi ölçebilmektedir. Lazerden farklı olarak kameradan gelen görüntüden her iki eksenindeki yer değişimi hesaplanarak toplam yer değiştirme Öklid uzaklık eşitliği kullanılarak belirlenir, y eksenindeki yer değiştirme X eksenindeki yer değiştirmeye göre daha küçük olduğu için toplam yer değiştirme ile X eksenindeki yer değiştirme büyük oranda benzerlik göstermektedir (Şekil 3.11).



Şekil 3.9. Görüntü tabanlı konum kontrolü esnasında lazer ve kameradan alınan yer değiştirme verilerinin karşılaştırılması



Şekil 3.10. Lazer ve kameradan alınan ölçüm değerleri arasındaki farkın RMS grafiği ile gösterimi



şekil 3.11. Görüntü tabanlı kontrol ile eyleyicinin hareketinin iki eksende ölçümü

### 3.3. Görüntü Tabanlı Konum Kontrolünde Gecikmenin Giderilmesi

Bu çalışma eyleyicinin serbest uç noktasının istenen referansı takip ederken ortaya çıkan faz farkını gidermek amacıyla yapılmıştır (şekil 3.9). Görüntü tabanlı konum kontrol sisteminden kaynaklanan gecikmenin belirtilen faz farkına sebep olduğu görülmüştür ve bu durumun giderilmesi için Smith öngörücüsünden faydalanılmıştır. Çalışmada kullanılan deney düzeneği, eyleyici modeli, görüntü işleme adımları ve pikselden milimetreye dönüşüm katsayısı bölüm 3.2’de kullanılanlar ile aynıdır. Bu sebeple deney düzeneği, görüntü işleme ve model çıkartımı ile ilgili kısımlar tekrar verilmeyecektir.

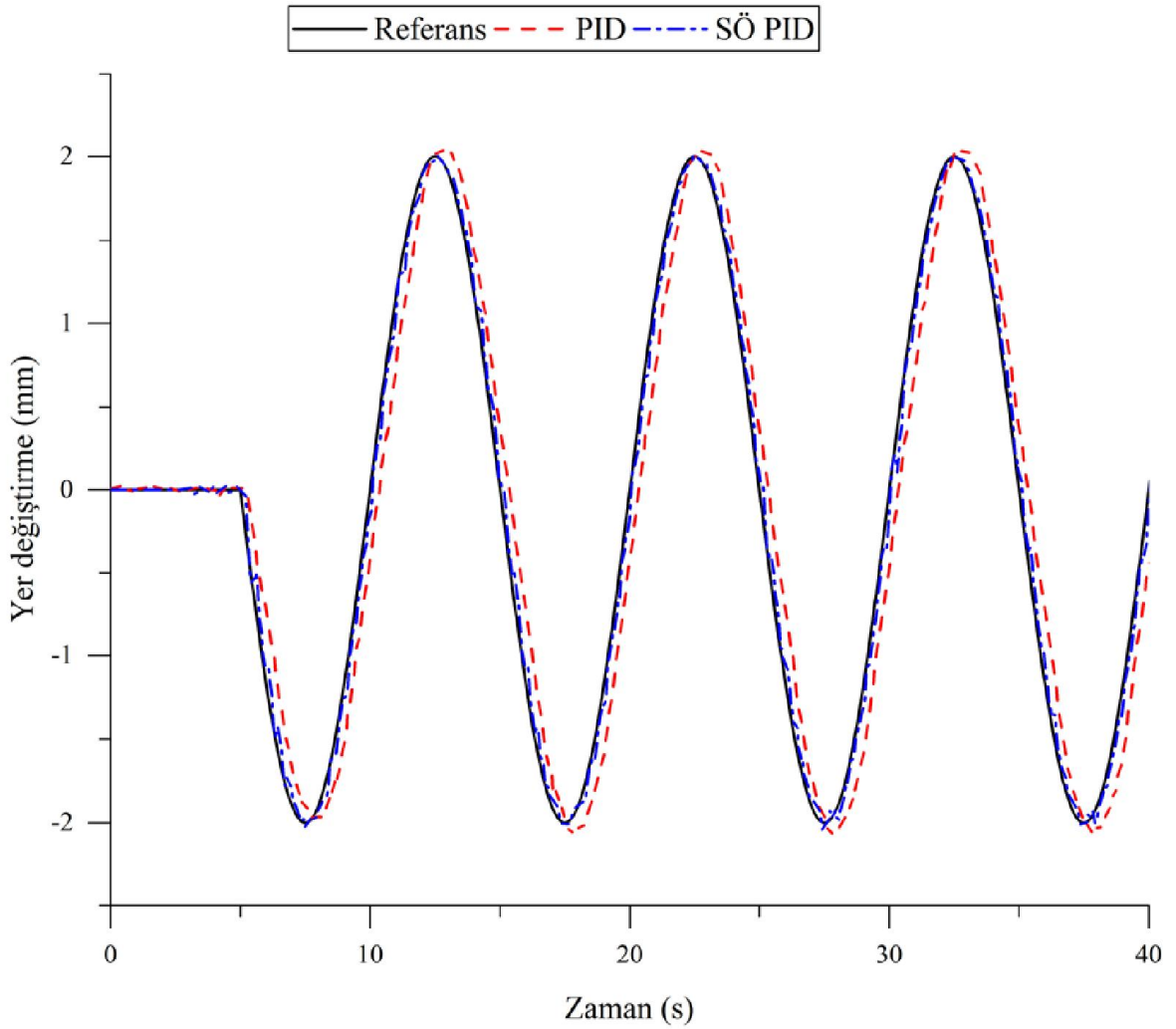
#### 3.3.1. Kontrolcü Parametreleri

Eyleyicinin konum kontrolü için temel olarak ayırık zamanlı PID kontrolcü kullanılmıştır. Kontrolcü parametrelerinin belirlenmesi frekans alanında yapılmış ve 0.1 Hz frekansa sahip 2 mm genlikli sinüs sinyalini en iyi takip edebilecek katsayılar seçilmiştir. Seçilen katsayılar;  $P = 1.2$ ,  $I = 3.5$  ve  $D = 0.017$ ’dir. Kesme frekansı 50 Hz olan alçak-geçirgen filtre ile türev (D) parametresi gürültüden korunmuştur.

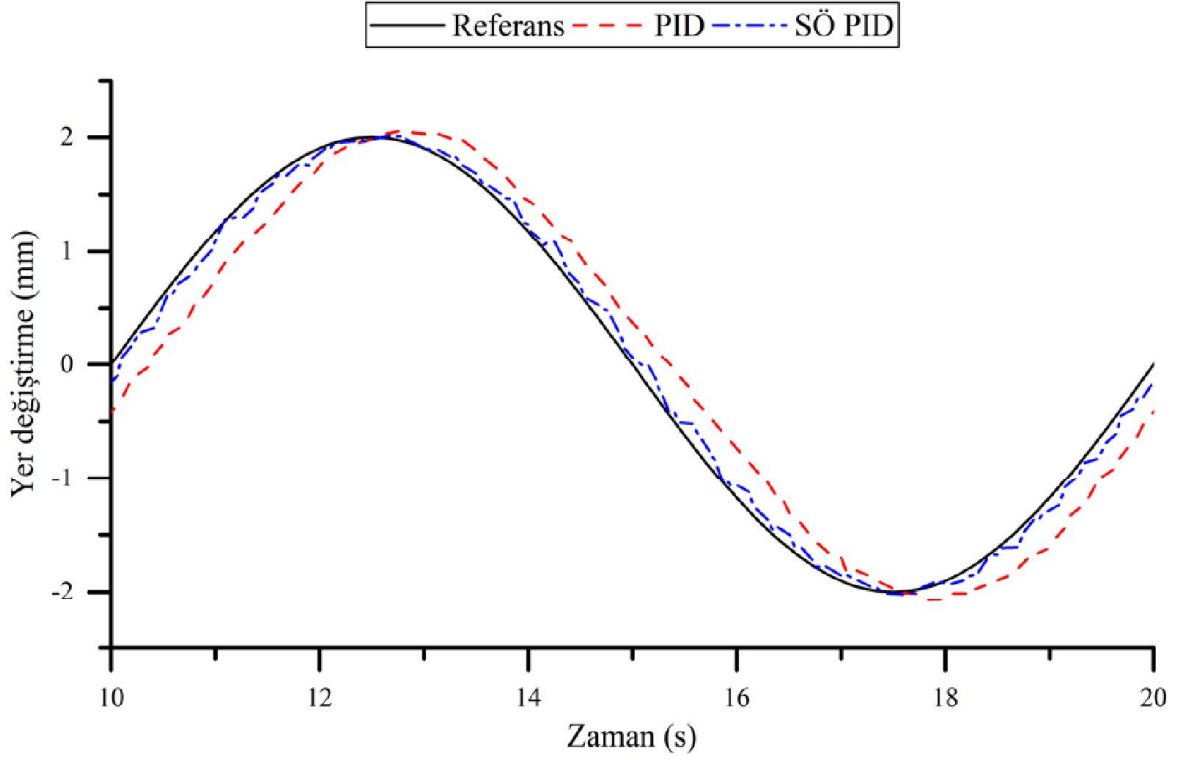
Görüntü tabanlı kontrol sisteminden dolayı meydana gelen gecikmenin etkilerini en aza indirebilmek amacıyla ayırık zamanlı PID kontrolcü Smith öngörücüsü ile desteklenmiştir. Smith öngörücüsünde kullanılmak üzere sistemdeki gecikme 2 örnekleme süresi olarak belirlenmiştir.

### 3.3.2. Uygulama ve Sonuçlar

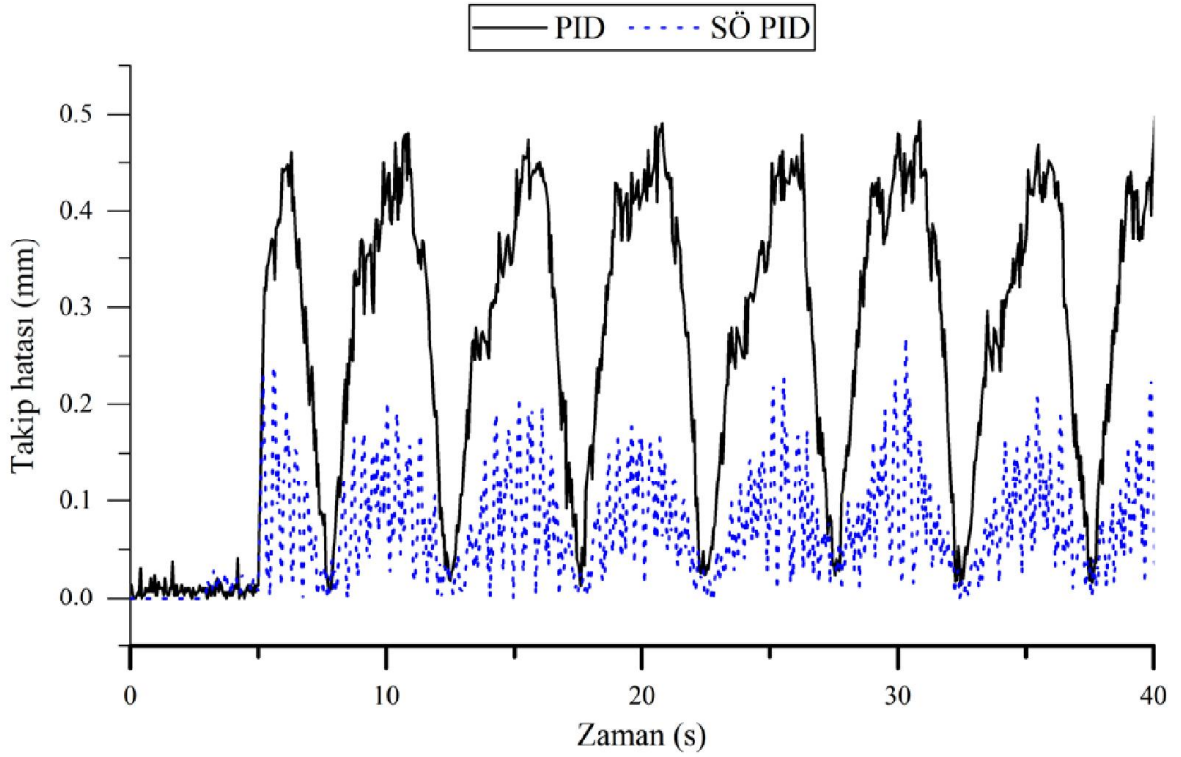
PID ile SÖ PID kontrolcüler ile yapılan çalışmanın sonucu Şekil 3.12’de verilmiştir. Çalışmanın sonucunda bir önceki çalışmada ortaya çıkan faz farkının Smith Öngörücüsü ile giderilebildiği Şekil 3.13’te görülmektedir. SÖ PID kontrolcü sayesinde sistemin takip performansı iyileştirilmiş ve takip hatası % 55 oranında azaltılmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3.12. PID ve SÖ PID kontrolcülerin referans takip performansları



Şekil 3.13. Smith öngörücüsü ile faz farkının giderilmesi

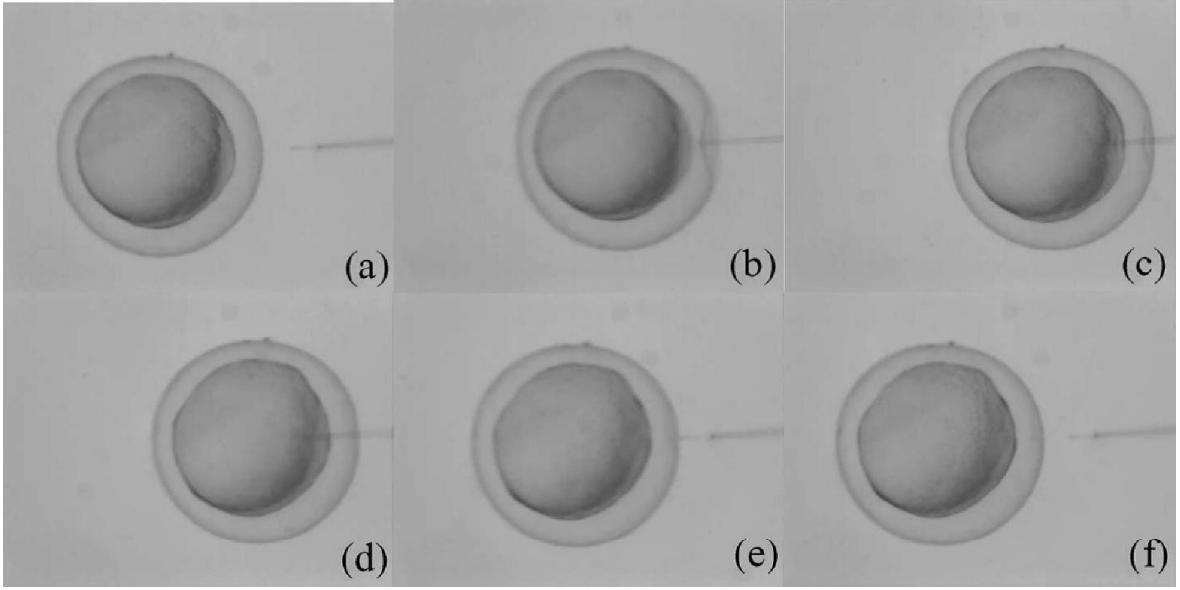


Şekil 3.14. PID ve SÖ PID kontrolcülerin takip hatalarının RMS grafiği ile karşılaştırılması



### 3.4. Görüntü Tabanlı Kontrol Sistemi ile Hibrit Kontrol Uygulaması

Bu çalışmada, eyleyicinin belirlenen bir senaryoya uygun olarak bir dizi konum takibi ve kuvvet uygulama işlemlerini gerçekleştirmesi ayrık zamanlı olarak tasarlanan PI kontrolcüler ile yapılmıştır. Belirlenen senaryo hücre enjeksiyon sistemlerinde uygulanan hücreye yaklaşma, temas halinde bekleme, hücre zarıyla etkileşime girme, temas halinde bekleme ve hücreden uzaklaşma adımlarını içermektedir (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. **a)** Hücreye yaklaşma **b)** Temas halinde bekleme **c)** Hücre zarına belirlenen miktarda kuvvet uygulama **d)** Madde enjeksiyonu **e)** Hücreden çıkış ve temas noktasında bekleme **f)** Hücreden uzaklaşma (Huang vd., 2009).

Çalışma dahilinde konjuge EAP eyleyicinin konum ve kuvvet modelleri sistem tanımlama ile elde edilmiştir. Elde edilen modellerin doğrulaması, eyleyiciden konum ve kuvvet için ayrı ayrı deneysel olarak elde edilen adım ve frekans cevapları ile yapılmıştır. Konum ve kuvvet kontrolü için kullanılacak PI kontrolcülerin tasarımları için ilgili modellerden yararlanılmıştır. Son olarak, tasarlanan kontrolcüler ile senaryo gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar verilmiştir.

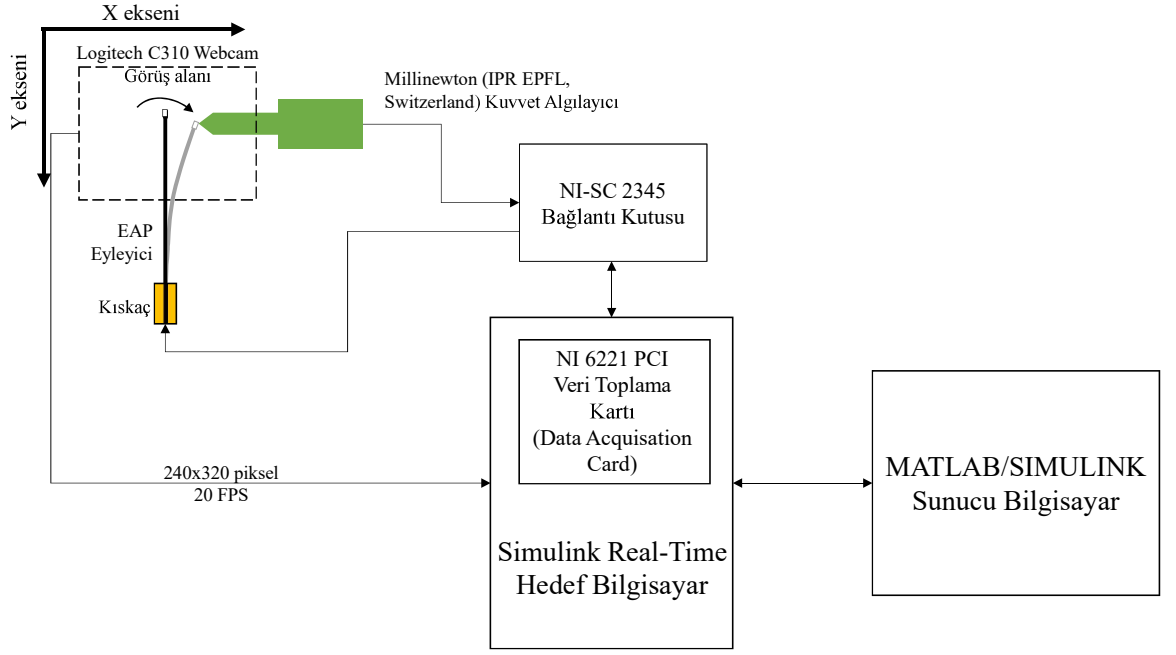
### 3.4.1. Deney Düzenegi

Görüntü tabanlı kontrol sistemi ile hibrit kontrol uygulaması için kullanılan deney düzenegi ve deney düzeneginin şematik gösterimi, sırasıyla, Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de verilmiştir. Deney düzeneginde biri hedef diğeri sunucu olmak üzere iki adet bilgisayar mevcuttur. Hedef bilgisayarda, NI-6221 PCI veri toplama kartı bulunmaktadır ve algılayıcılardan gelen veriler gerçek zamanlı olarak bağlantı kutusu ve veri toplama kartı üzerinden hedef bilgisayara aktarılmıştır. Hedef bilgisayarda toplanan veriler MATLAB Simulink Real-Time Target platformu kullanılarak MATLAB Simulink yazılımının bulunduğu sunucu bilgisayara aktarılmıştır. Görüntü almak için USB 2.0 arayüzü üzerinden veri aktarımı sağlayan Logitech firmasına ait C310 web kamerası kullanılmış ve 20 kare-saniyelik 320x240 piksel çözünürlüğünde görüntü elde edilmiştir. Deney sırasında ışık olaylarından olabildiğince az etkilenmesi için kameranın görüş alanı beyaz LED ışıklarla aydınlatılmış ve görüntü kontrolünde polimerin serbest ucunun rahatlıkla ayırt edilebilmesi için serbest ucun üst kısmında yaklaşık olarak 0.6 mm<sup>2</sup> alan beyaza boyanmıştır. Kuvvet algılayıcısı olarak Millinewton (IPR EPFL, Switzerland) kullanılmıştır ve 0-3 V aralığında analog sinyal üreten bu kuvvet algılayıcısı bağlantı kutusu yardımıyla hedef bilgisayar üzerindeki veri toplama kartına bağlıdır.

Görüntü işleme ve pikselden milimetreye dönüşüm katsayısı bölüm 3.2’de yapılan çalışmayla aynı olduğu için ilgili kısımlar tekrar verilmeyecektir.



Şekil 3.16. Görüntü tabanlı kontrol ile hibrit kontrol çalışması için kullanılan deney düzenegi



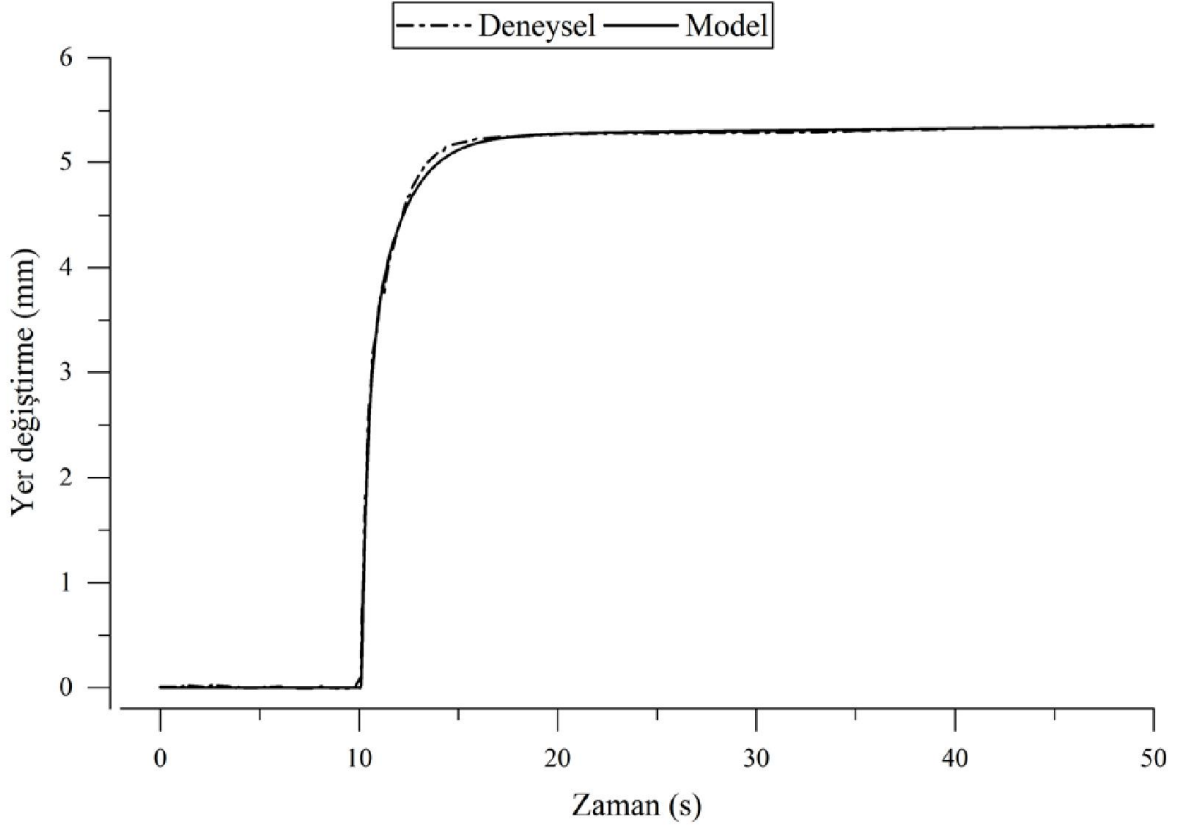
Şekil 3.17. Görüntü tabanlı kontrol ile Hibrit kontrol çalışması için kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi

### 3.4.2. Eyleyicinin Doğrusal Konum ve Kuvvet Modelinin Belirlenmesi

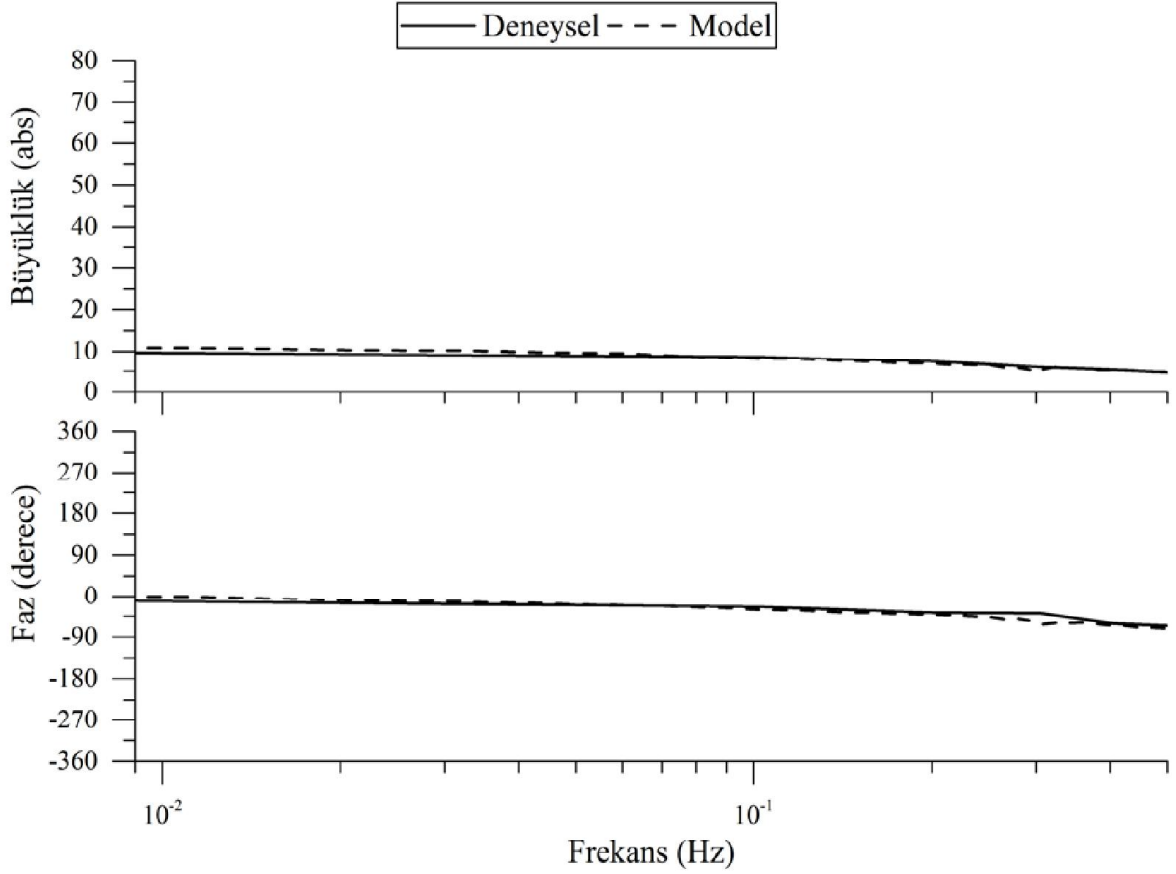
PID kontrolcü parametrelerini belirlemek amacıyla EAP eyleyicinin doğrusal konum ve kuvvet modelleri elde edilmiştir. Konjuge EAP eyleyicinin konum bilgisini veren doğrusal sistem modeli ayrık zamanlı olarak sistem tanılama yöntemiyle elde edilmiştir. Sisteme aktarılan görüntünün işleme hızı saniyede 20 kare olduğundan dolayı örnekleme zamanı 0.05 s olarak kullanılmıştır. Konjuge EAP eyleyicinin elektrik gerilimi ile serbest ucunun yer değiştirmesi arasındaki ilişkisini veren doğrusal modeli elde etmek amacıyla, eyleyiciye 0.1 Hz band genişliğinde ve 0.5 V genlikli elektrik gerilimi PRBS sinyali olarak uygulanmıştır. Elde edilen açık çevrim cevabı ve uygulanan giriş sinyali kullanılarak eyleyicinin elektrik gerilimi (V) – yer değiştirme (mm) ilişkisini veren ayrık zamanlı doğrusal modeli elde edilmiştir,

$$G_y(z) = \frac{-0.0129z^5 + 0.0962z^4 + 0.4698z^3 - 0.3255z^2 - 1.0075z + 0.7798}{z^6 - 2.3377z^5 + 1.2741z^4 + 0.5347z^3 - 0.5734z^2 + 0.1418z - 0.0394} \quad (3.4)$$

Eyleyicinin deneysel olarak elde edilen adım ve frekans cevapları konum modelinin adım ve frekans cevapları ile karşılaştırılmıştır. Eyleyicinin senaryo boyunca takip etmesi gereken referans göz önünde bulundurularak 0.1 Hz frekansına kadar olan aralıkta ki uyum gözlemlenmiştir. Konum modelinin doğrulaması için deneysel adım cevabıyla karşılaştırılması Şekil 3.18’de ve frekans cevabıyla karşılaştırılması ise Şekil 3.19’da verilmiştir. Konum modelinin, deneysel veri ile büyük oranda uyduğu görülmektedir.



Şekil 3.18. Eyleyicinin konum modelinin deneysel adım cevabıyla doğrulanması



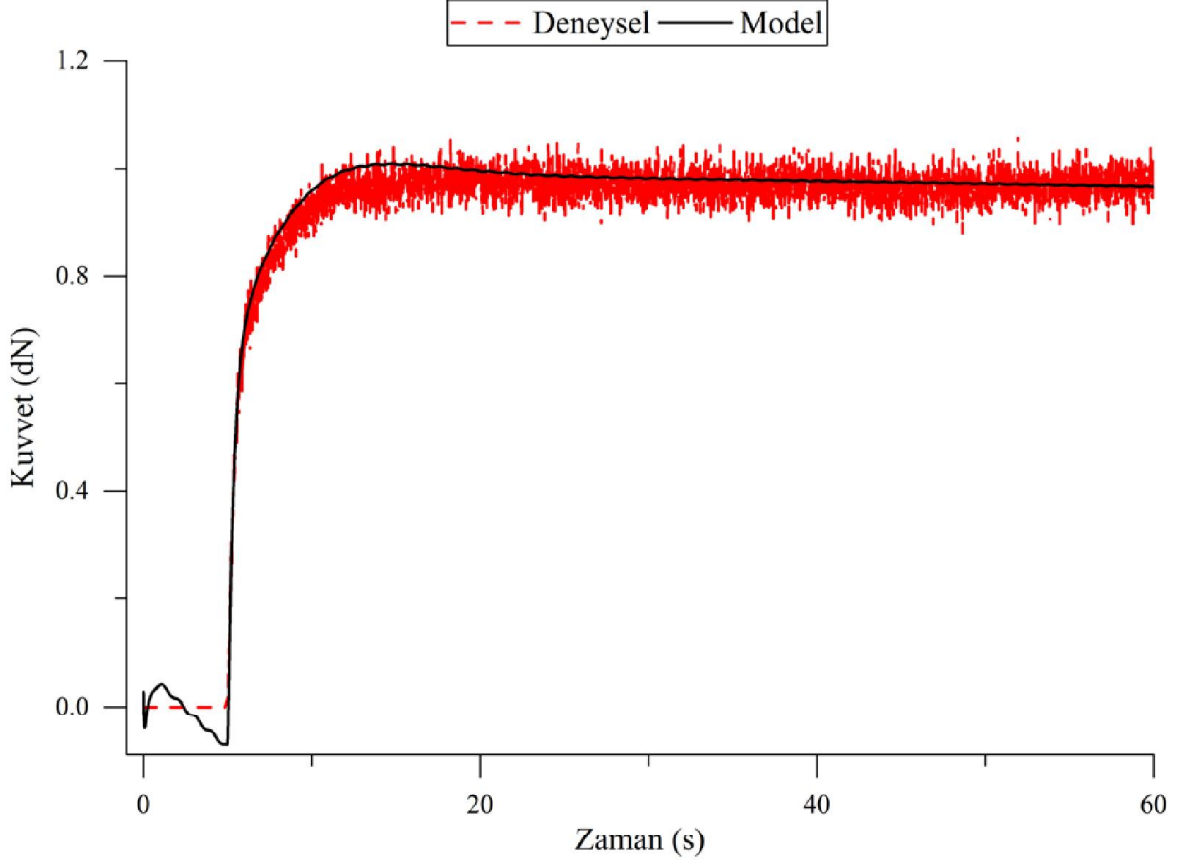
Şekil 3.19. Eyleyicinin konum modelinin deneysel frekans cevabıyla doğrulanması

Konjuge EAP eyleyicinin, elektrik gerilimi (V) – kuvvet (dN) ilişkisini veren ayrık zamanlı doğrusal sistem modelini elde etmek için giriş sinyali olarak 2 Hz band genişliğinde 0.5 V büyüklüğünde PRBS sinyali uygulanmıştır. Elde edilen açık çevrim cevabı ve uygulanan giriş sinyali kullanılarak eyleyicinin elektrik gerilimi (V) – kuvvet (dN) ilişkisini veren ayrık zamanlı doğrusal modeli elde edilmiştir,

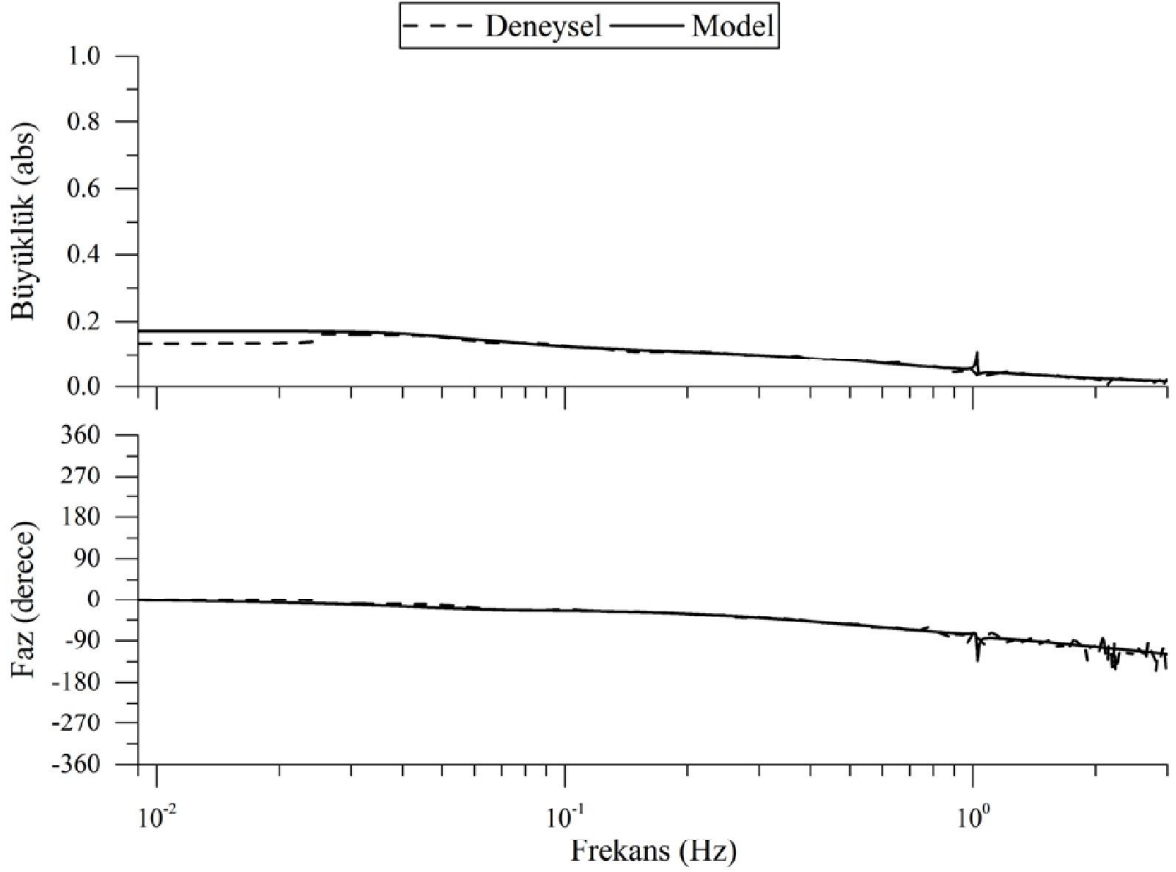
$$G_k(z) = \frac{0.0063z^7 - 0.0237z^6 + 0.0265z^5 + 0.0058z^4 - 0.0338z^3 + 0.0245z^2 - 0.0054z - 0.0003}{z^8 - 5.8771z^7 + 14.6192z^6 - 19.8187z^5 + 15.6414z^4 - 7.0497z^3 + 1.618z^2 - 0.1354z + 0.0020} \quad (3.5)$$

Eyleyicinin deneysel olarak elde edilen adım ve frekans cevapları kuvvet modelinin adım ve frekans cevapları ile karşılaştırılmıştır. Eyleyicinin senaryo boyunca takip etmesi gereken kuvvet referansı göz önünde bulundurulduğunda 1 Hz frekansına kadar olan aralıkta

ki uyumu gözlemlenmiştir. Adım cevaplarının karşılaştırılması Şekil 3.20’de ve frekans cevaplarının karşılaştırılması Şekil 3.21’de görülmektedir. Kuvvet modelinin deneysel veri ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 3.20. Eyleyicinin kuvvet modelinin deneysel adım cevabıyla doğrulanması



Şekil 3.21. Eyleyicinin kuvvet modelinin deneysel frekans cevabıyla doğrulanması

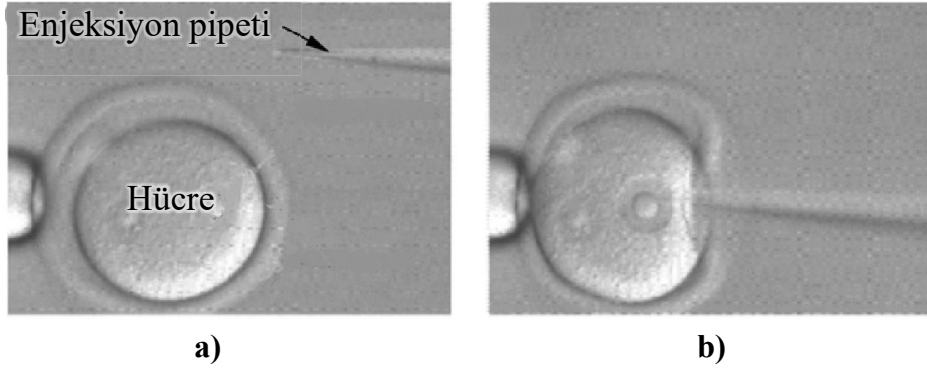
### 3.4.3. Kontrolcü Parametreleri

Konjuge EAP eyleyicinin konum ve kuvvet kontrolü için ayırık zamanlı PI kontrolcüler kullanılmıştır. Her kontrolcünün takip etmesi gereken referans sinyali göz önünde bulundurularak uygun katsayılar seçilmiştir. Konum kontrolcüsü için  $P = 0,6$  ve  $I = 1,6$ , kuvvet kontrolcüsü için ise  $P = 10$  ve  $I = 100$  katsayıları seçilmiştir.

### 3.4.4. Uygulama ve Sonuçlar

Hazırlanan senaryo hücre enjeksiyon sistemlerinde kullanılan işlemlerinin basitleştirilerek makro boyutta uygulanmasını içerir. Senaryo dahilinde kuvvet algılayıcısının temas noktası hücre zarı ve konjuge EAP eyleyicinin uç kısmı enjeksiyon pipetinin uç kısmı olarak kabul edilmiştir. Senaryo, aralarında belirli bir mesafe olan enjektör ile hücrenin etkileşimini içerir (Şekil 3.22). Enjektör ile hücre arasındaki mesafe

kontrollü olarak katedilir ve mesafe sifira indiğinde durulur. Bir süre bu konumda beklendikten sonra, hücre zarına kontrollü olarak artan bir kuvvet uygulanır. Kuvvet belirtilen sınıra eriştiğinde, belirlenen süre boyunca uygulanan kuvvet sabit tutulur. Daha sonra, kuvvet kontrollü olarak azaltılarak sifira indirilir. Bu andan itibaren enjektör hücre ile temas ettiği ilk noktaya gelmiş olur. Bu noktada bir süre beklendikten sonra işlem başlangıcında bulunduğu noktaya ulaşana kadar kontrollü olarak hücreden uzaklaştırılır.

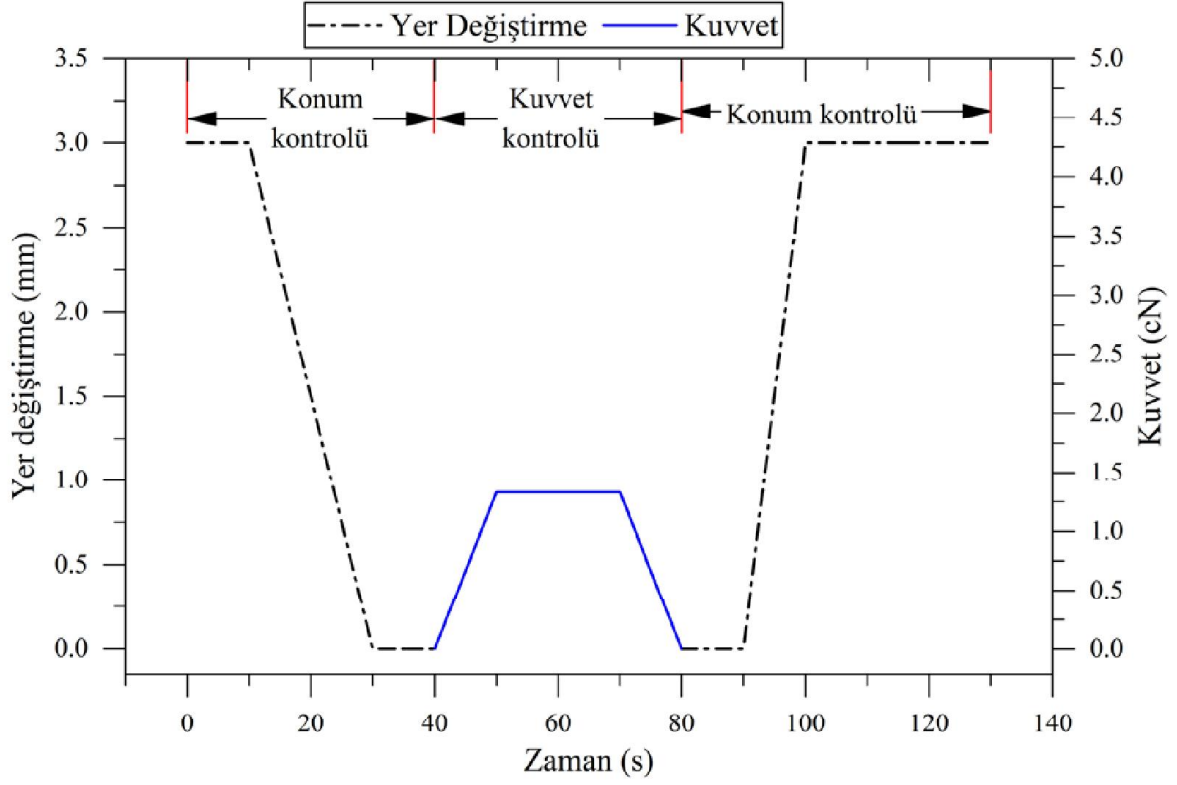


Şekil 3.22. **a)** Enjeksiyon pipetinin belirli bir mesafeden hücreye yaklaşması **b)** Hücre zarına ve hücreye kuvvet uygulanması (Sun ve Nelson, 2002).

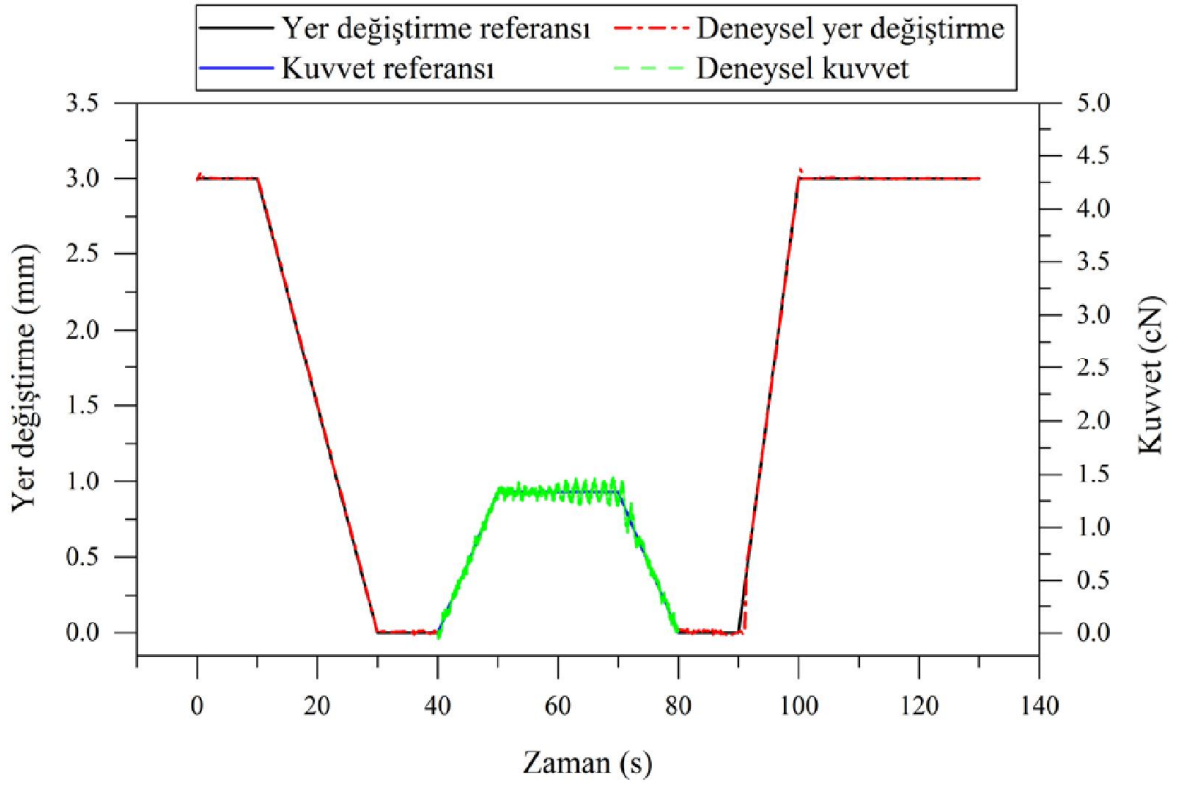
Yukarıda anlatılan senaryodaki konumdan kuvvet kontrolcüsüne ve kuvvetten konum kontrolcüsüne geçişlerin yapılabilmesi için MATLAB Simulink ortamında içerisinde birden çok kontrolcü barındıran hibrit bir kontrol sistemi oluşturulmuştur. Senaryo için hazırlanan referans sinyali Şekil 3.23'te ve senaryonun gerçekleşmesi sonucu elde edilen veriler Şekil 3.24'te verilmiştir.

Şekil 3.24'te görüldüğü üzere senaryo hem konum hem de kuvvet kontrolünde iyi bir şekilde takip edilmiştir. Kameradan alınan veriler doğrultusunda yapılan konum kontrolünün kuvvet kontrolüne göre daha iyi olduğu gözlemlenmektedir. Bunun nedeni kuvvet algılayıcısından dolayı meydana gelen gürültünün çok olmasıdır.





Şekil 3.23. Konum ve kuvvet kontrolü içeren senaryo



Şekil 3.24. Konum ve kuvvet kontrolü içeren senaryonun hibrit kontrol sistemi ile uygulanması

### 3.5. Hibrit Kontrol Uygulamasında Görüntü Tabanlı Kontrol Kaynaklı Gecikmenin Giderilmesi

Bu çalışmada, bölüm 3.4'te anlatılana benzer bir senaryo kullanılarak eyleyiciyle bir dizi konum takibi ve kuvvet uygulama işlemlerinin yapılabilirliği çalışılmıştır. Senaryo dahilinde hazırlanan, konum ve kuvvet kontrolü gerektiren referansın takip edilmesi için ayırık zamanlı olarak tasarlanan PI kontrolcüler kullanılmıştır. Bölüm 3.4'te yapılan çalışmadan farklı olarak, senaryo dahilinde gerçekleşen konum ve kuvvet kontrolcüler arasındaki geçişler eyleyicinin serbest ucu ile kuvvet algılayıcısının üzerindeki temas noktası arasındaki mesafeye göre gerçekleştirilmiştir.

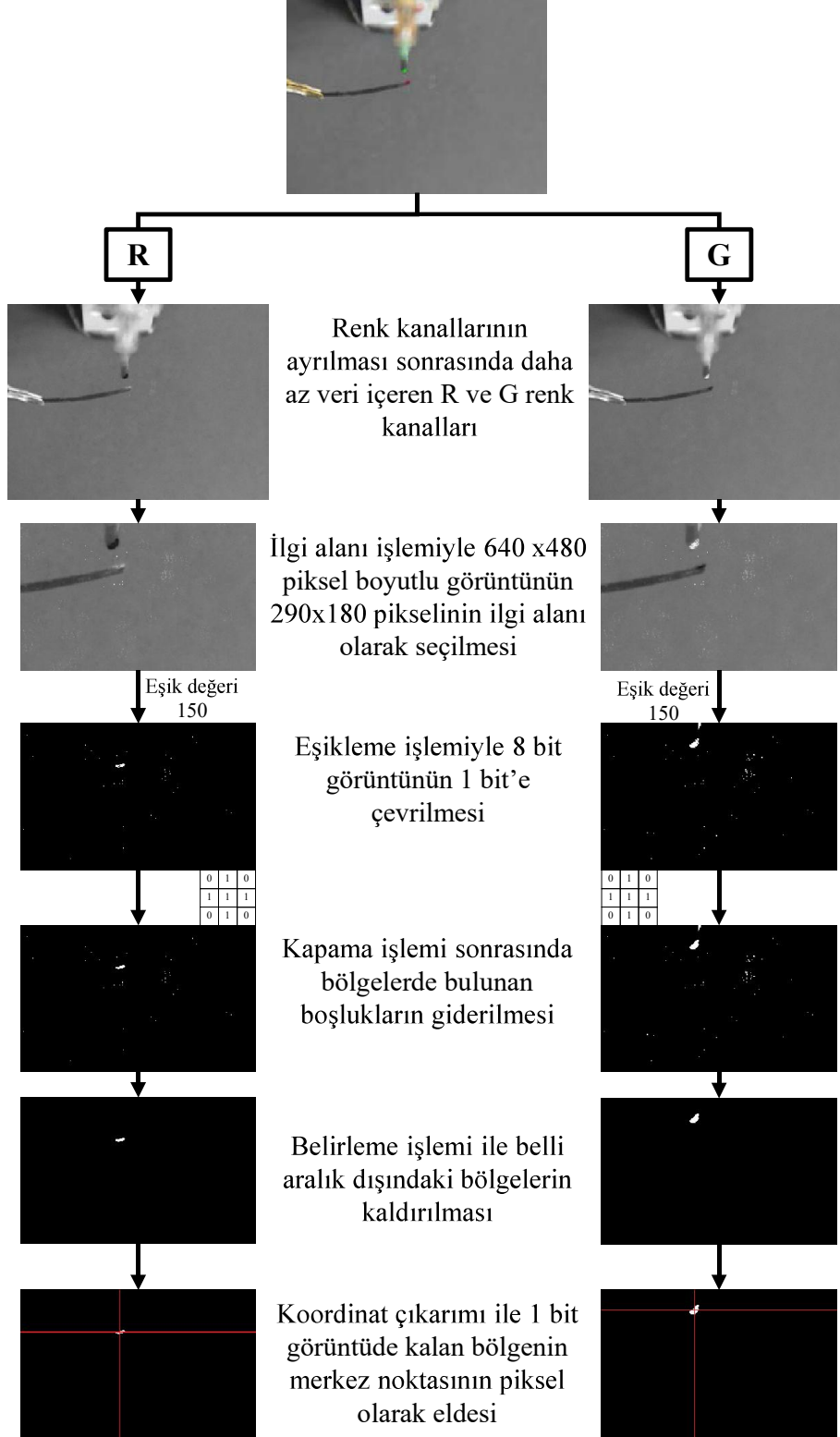
Eyleyicinin uç noktasının konum kontrolü için görüntü tabanlı kontrol sisteminden yararlanılmıştır. Görüntü tabanlı konum kontrol yapısı sistemde ölü zamanın miktarını arttırmaktadır. Bu sebepten dolayı, konum kontrolü sırasında eyleyicinin serbest ucu ile konum referansı arasında faz farkı oluştuğu önceki çalışmamızda görülmüştür (Coşkun ve İtik, 2015). Senaryonun uygulanması sırasında konum referansını ölü zamandan kaynaklanan hata olmadan takip edebilmek için konum kontrolcüsü Smith öngörücüsü ile desteklenmiştir.

Çalışma dahilinde konjuge EAP eyleyicinin konum ve kuvvet modelleri sistem tanılama ile elde edilmiştir. Elde edilen modellerin doğrulaması, eyleyiciden konum ve kuvvet için ayrı ayrı deneysel olarak elde edilen adım ve frekans cevapları ile yapılmıştır. Konum ve kuvvet kontrolü için kullanılacak PI kontrolcülerin tasarımları için ilgili modellerden yararlanılmıştır. Son olarak, tasarlanan kontrolcüler ile senaryo gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar verilmiştir.

#### 3.5.1. Görüntü İşleme

Hazırlanan senaryo eyleyicinin uç noktası ve kuvvet algılayıcısının üzerindeki temas noktası olmak üzere iki nokta takibini içermektedir. Bu yüzden, Şekil 2.3'te verilen görüntü işleme adımları kullanılmıştır. Bölüm 2.1.2'de bahsedildiği üzere, iki nesnenin uygun kısımları ana renklere veya bunlara yakın renklere boyanması takip işlemini kolaylaştıracaktır. Eyleyicinin uç kısmında yaklaşık 0.6 mm<sup>2</sup> alan kırmızıya ve kuvvet algılayıcısının temas noktasına olabildiğince yakın olan bir kısım yeşile boyanmıştır. Görüntü renk kanallarına ayrıldığında kırmızı ve yeşil kendi renk kanallarında baskın görünürken diğer kanallarda eşikleme işlemiyle rahatlıkla kaldırılabilir şekilde gözükecektir. Bu

adımdan sonraki görüntü işleme adımları kırmızı (R) ve yeşil (G) renk kanallarından alınan görüntülere uygulanır (Şekil 3.25).

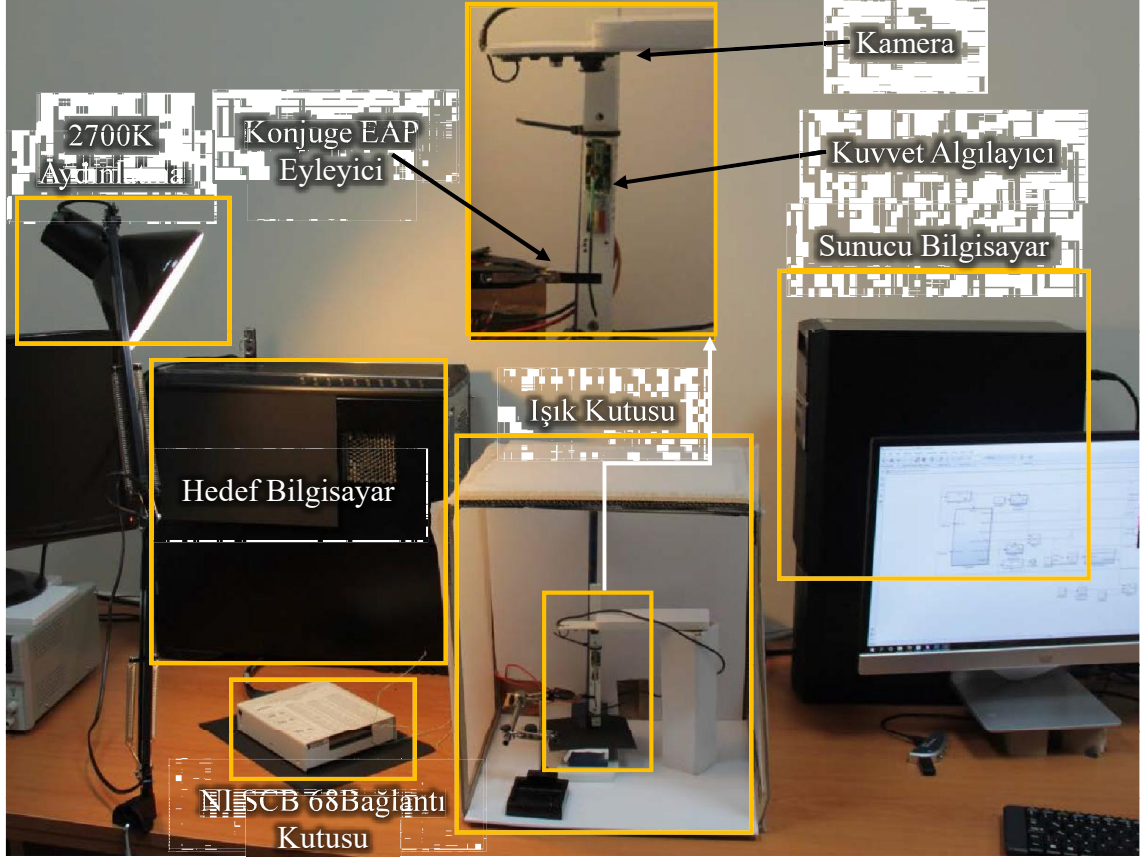


Şekil 3.25. Çoklu nesne takibi için görüntü işleme adımlarının uygulanması

Şekil 3.25'te verilen işlemlerin sonucunda elde edilen koordinatlar iki nesnenin görüntü üzerindeki konumunu piksel cinsinden vermektedir. Senaryo iki nesne arasındaki mesafenin durumuna göre farklı referanslar içerir. Mesafeyi bulmak için Denklem 1.2'de verilen Öklid uzaklığı kullanılır. Bulunan değer piksel-milimetre dönüşüm katsayısı, 0.105 mm/piksel, ile çarpılarak mesafe milimetre cinsinden bulunur.

### **3.5.2. Deney Düzenegi**

Bu çalışmada kullanılan deney düzenegi Şekil 3.26'da verilmiştir. Deney düzeneginde biri hedef diğeri sunucu olmak üzere iki adet bilgisayar bulunmaktadır. Kuvvet algılayıcısından ve kameradan gelen bilgiler hedef bilgisayar üzerinde toplanır. Hedef bilgisayarda National Instruments firmasına ait NI-6251 PCI veri toplama kartı bulunmaktadır, kuvvet algılayıcısından gelen veriler National Instruments firmasına ait SCB 68 bağlantı kutusu üzerinden veri toplama kartına aktarılır ve hedef bilgisayarda toplanır. MATLAB Simulink Real-Time Target altyapısıyla çalışan hedef bilgisayar gerçek zamanlı olarak sistemin kontrol edilmesini ve toplanan verilerin MATLAB Simulink yazılımının bulunduğu sunucu bilgisayara aktarılmasını sağlar. Görüntü almak için USB 2.0 arayüzü üzerinden veri aktarımı sağlayan Logitech firmasına ait C310 web kamerası kullanılmış ve 25 kare-saniyelik 640x480 piksel çözünürlüğünde görüntü elde edilmiştir. Işık olaylarının görüntü tabanlı kontrol sisteminin performansını etkilememesi ve deneylerin tekrar edilebilir olması için ışık kutusu ve aydınlatma olarak 2700K lamba kullanılmıştır. Kuvvet algılayıcısı olarak Millinewton (IPR EPFL, Switzerland) kullanılmıştır ve 0-3 V aralığında analog sinyal üreten bu kuvvet algılayıcısı bağlantı kutusu yardımıyla hedef bilgisayar üzerindeki veri toplama kartına bağlıdır.



Şekil 3.26. Hibrit kontrol uygulamasında görüntü tabanlı kontrol kaynaklı gecikmenin giderilmesi çalışması için kullanılan deney düzeği

### 3.5.3. Eyleyicinin Doğrusal Konum ve Kuvvet Modelinin Belirlenmesi

PID kontrolcü parametrelerini belirlemek amacıyla konjuge EAP eyleyicinin doğrusal konum ve kuvvet modelleri ayrık zamanlı olarak elde edilmiştir. Elde edilen konum modeli ayrıca Smith öngörücüsü içerisinde de kullanılmıştır. Sisteme aktarılan görüntünün işleme hızı saniyede 25 kare olduğundan dolayı model çıkarımında örnekleme zamanı 0.04 s olarak kullanılmıştır.

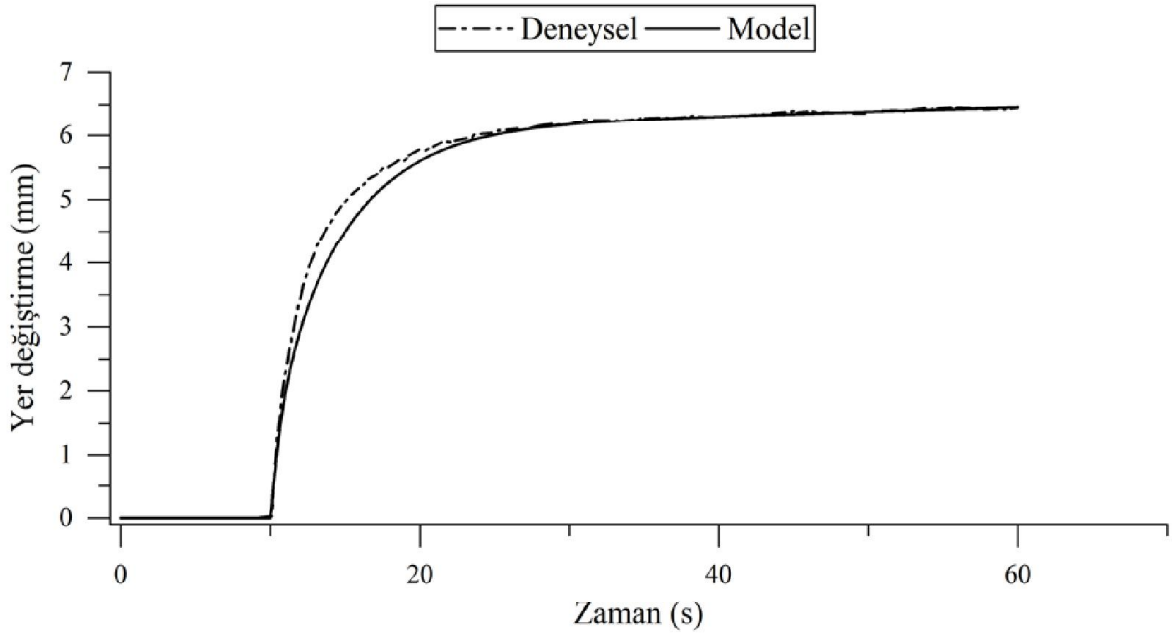
Konjuge EAP eyleyicinin elektrik gerilimi ile serbest ucunun yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi veren doğrusal modeli elde etmek amacıyla eyleyiciye 0.3 Hz band genişliğinde ve 0.5 V genlikli elektrik gerilimi PRBS sinyali olarak uygulanmıştır. Elde edilen açık çevrim cevabı ve uygulanan giriş sinyali kullanılarak eyleyicinin elektrik gerilimi (V) – yer değiştirme (mm) ilişkisini veren ayrık zamanlı doğrusal konum modeli elde edilmiştir,

$$G_k(z) = \frac{0.203z^4 - 0.6663z^3 + 1.038z^2 - 0.8831z + 0.3083}{z^5 - 3.335z^4 + 4.495z^3 - 3.406z^2 + 1.666z - 0.4208} \quad (3.6)$$

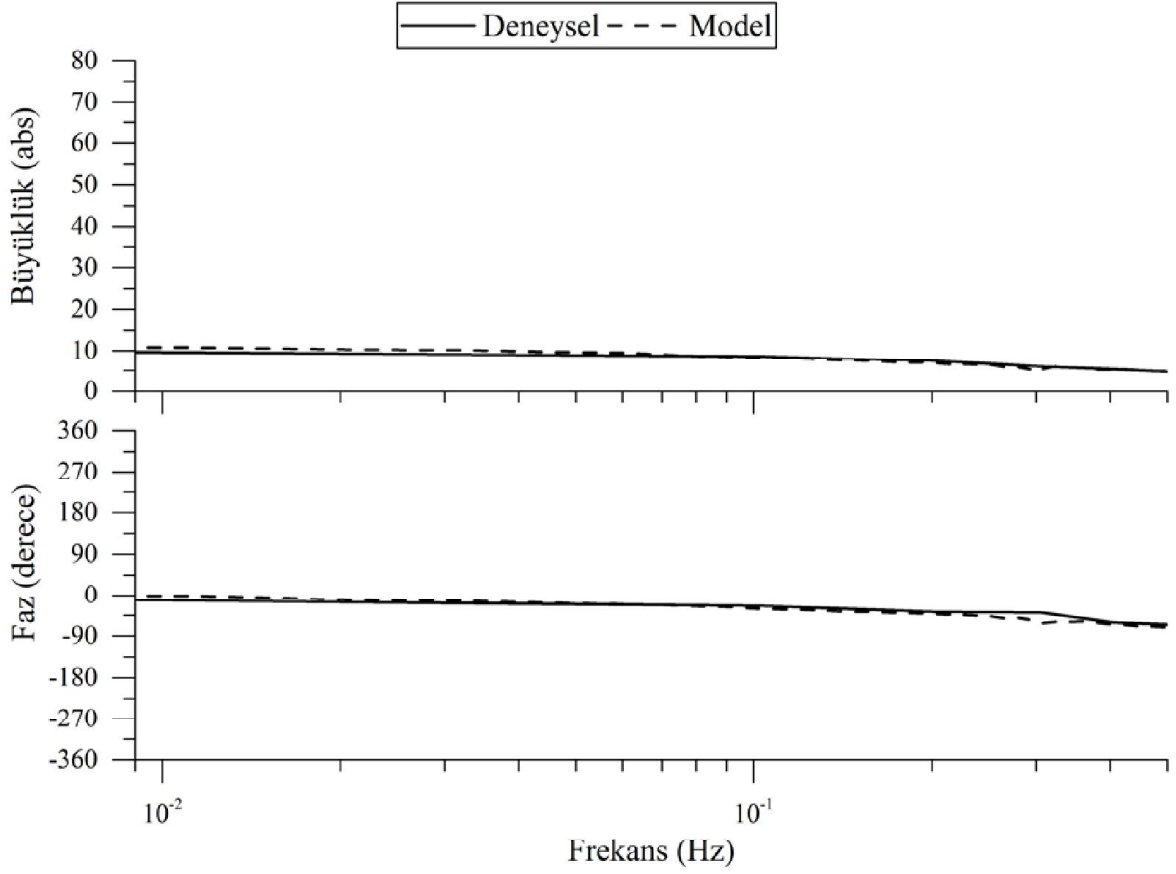
Konjuge EAP eyleyicinin elektrik gerilimi ile serbest ucunun uyguladığı kuvvet arasındaki ilişkiyi veren doğrusal modeli elde etmek amacıyla konum modeli eldesinde kullanılan PRBS sinyali girdi olarak kullanılmıştır. Elde edilen kuvvet verisi ve PRBS giriş sinyali kullanılarak eyleyicinin elektrik gerilimi (V) – kuvvet (mN) ilişkisini veren model elde edilmiştir.

$$G_k(z) = \frac{0.0074z^4 - 0.0173z^3 + 0.0076z^2 + 0.0069z - 0.0046}{z^5 - 4.1737z^4 + 6.7788z^3 - 5.2922z^2 + 1.9432z - 0.2559} \quad (3.7)$$

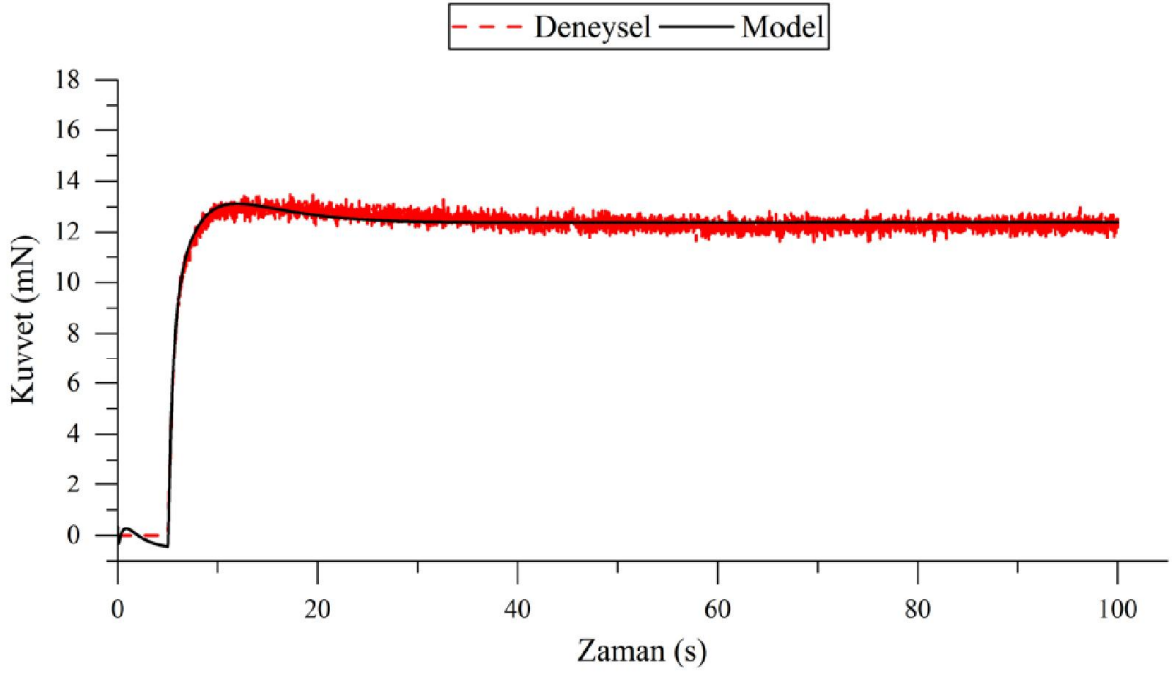
Elde edilen konum ve kuvvet modelinin doğrulanması için modellerden elde edilen veriler ve deneysel veriler, adım ve frekans cevapları olmak üzere iki farklı şekilde karşılaştırılmıştır. Frekans cevabının karşılaştırılması için seçilen aralık eyleyicinin takip etmesi gereken referans göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Konum modelinin adım ve frekans cevapları ile doğrulanması, sırasıyla, Şekil 3.27 ve Şekil 3.28’de verilmiştir. Kuvvet modelinin adım ve frekans cevapları ile doğrulanması ise, sırasıyla, Şekil 3.29 ve Şekil 3.30’da verilmiştir. Elde edilen konum ve kuvvet modellerinin deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmektedir.



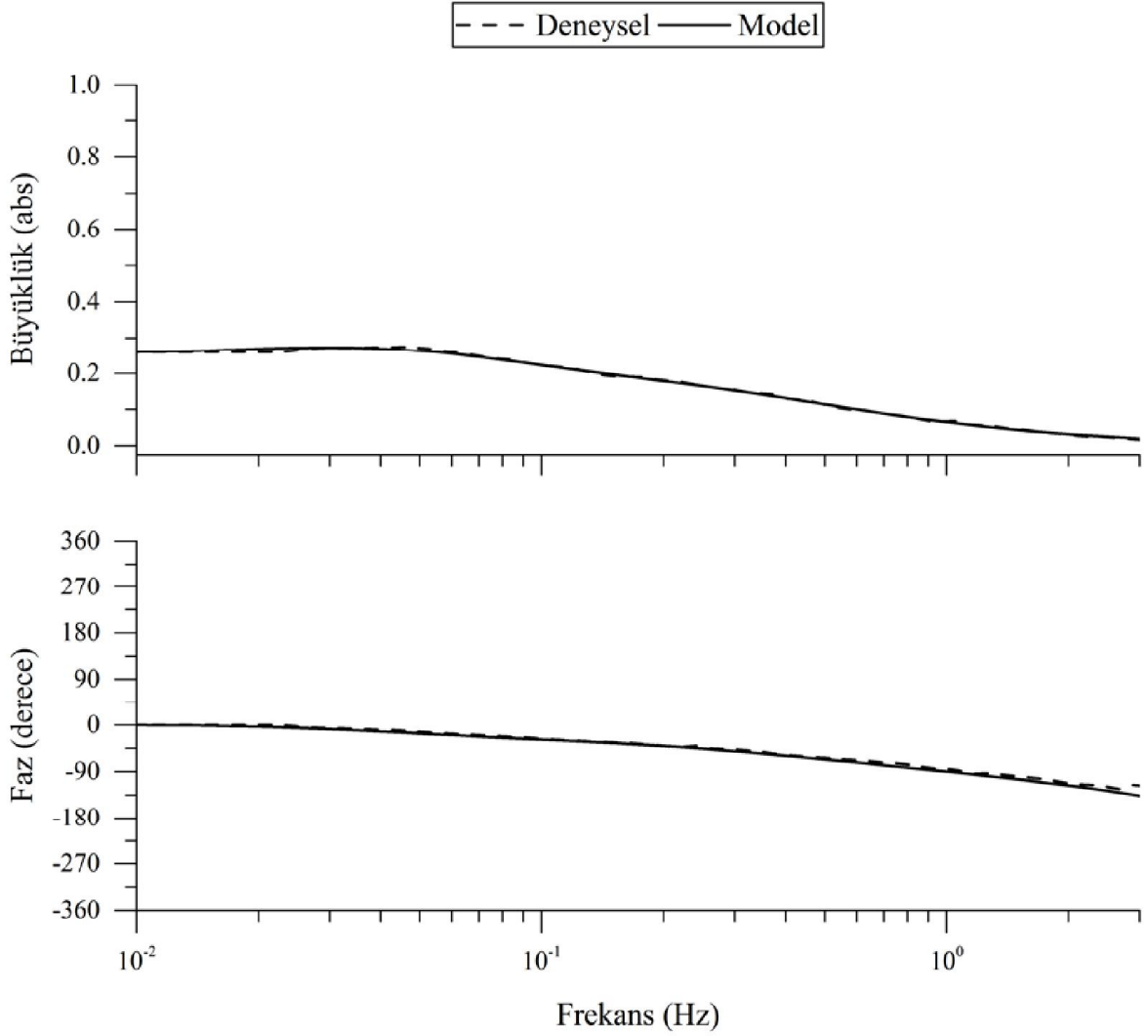
Şekil 3.27. Eyleyicinin konum modelinin deneysel adım cevabı ile doğrulanması



Şekil 3.28. Eyleyicinin konum modelinin deneysel frekans cevabı ile doğrulanması



Şekil 3.29. Eyleyicinin kuvvet modelinin deneysel adım cevabı ile doğrulanması



Şekil 3.30. Eyleyicinin kuvvet modelinin deneysel frekans cevabı ile doğrulanması

#### 3.5.4. Kontrolcü Parametreleri

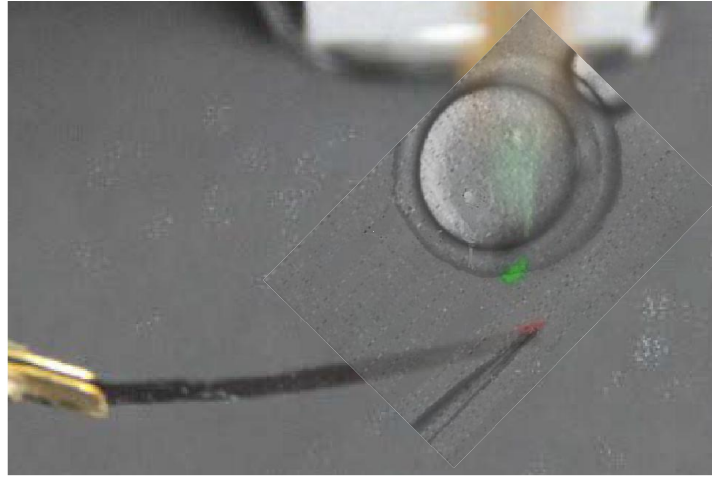
Eyleyicinin konum ve kuvvet kontrolü için iki adet ayrık zamanlı PI kontrolcü kullanılmıştır. Konum kontrolcüsünün P ve I terimi için kullanılan katsayılar, sırasıyla, 1.15 ve 0.39'dur. Kuvvet kontrolcüsünün P ve I terimleri için kullanılan katsayılar ise, sırasıyla, 20 ve 50'dir.

Konum kontrolünden görüntü tabanlı kontrol sisteminden dolayı meydana gelen gecikmenin etkilerini en aza indirebilmek amacıyla ayrık zamanlı PI konum kontrolcüsü Smith öngörücüsü ile desteklenmiştir. Smith öngörücüsünde gecikme süresi olarak 2 örnekleme zamanı kullanılmıştır.

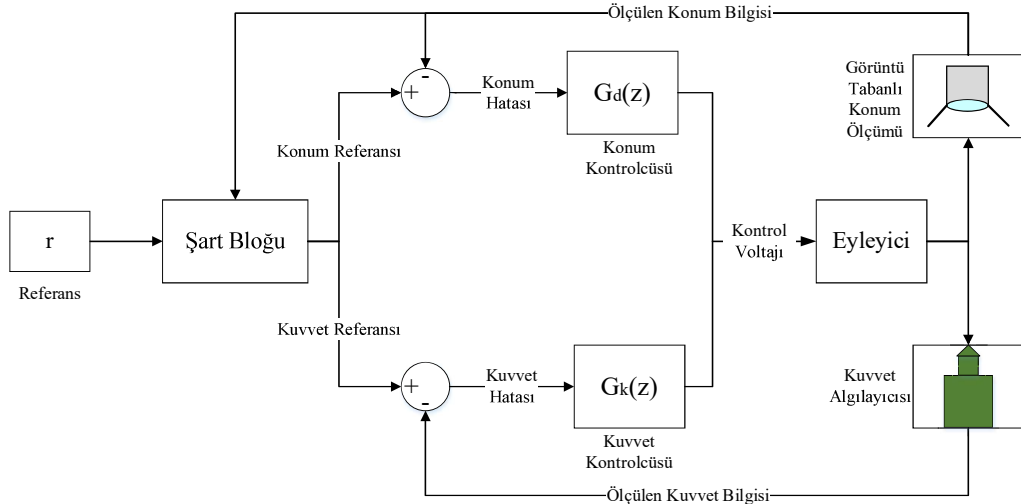


### 3.5.5. Uygulama ve Sonuçları

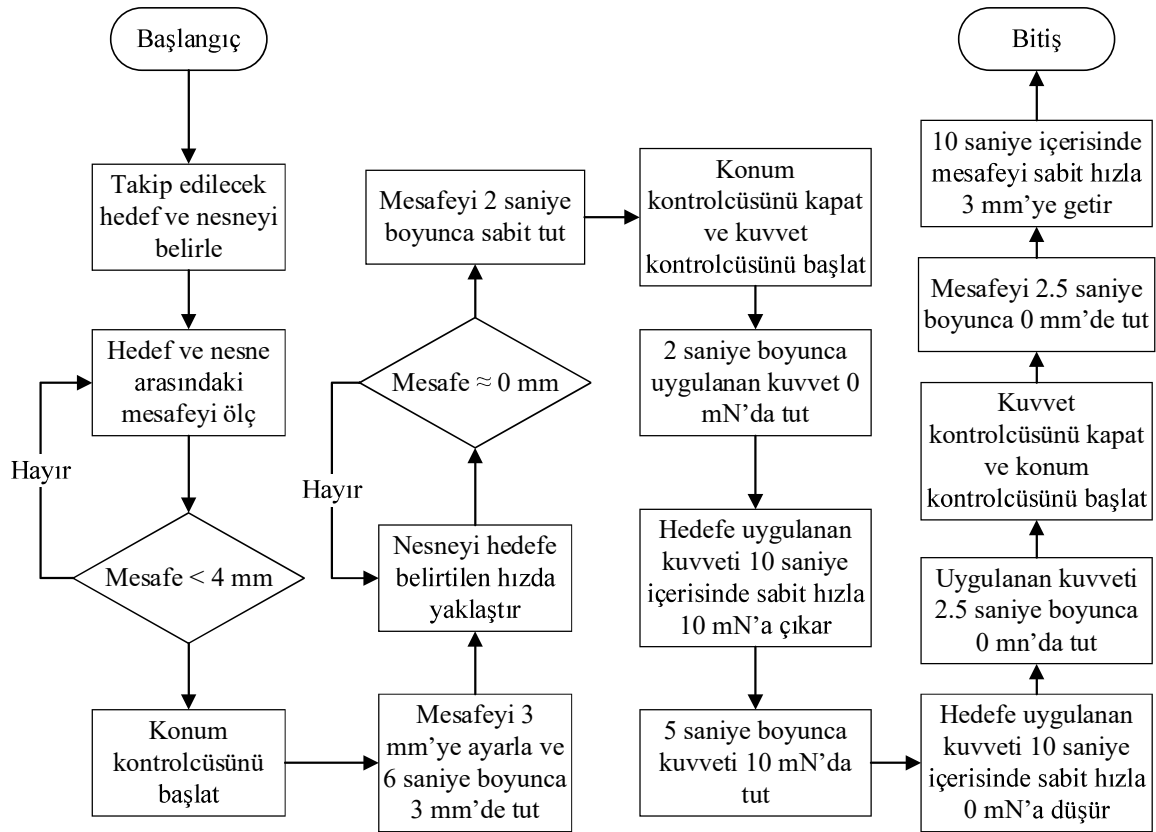
Bu çalışma için kullanılan senaryo bölüm 3.4.4'te anlatılan senaryoya benzerlik göstermektedir ve hücre enjeksiyon sistemlerinde kullanılan işlemlerin basitleştirilerek makro boyutta uygulanmasını içerir. Bu çalışmada kullanılan senaryonun içerdiği adımlar bu kısımda belirtildiği gibidir. Senaryo dahilinde, görüntü tabanlı kontrol sistemi tarafından algılanmaları kolaylaştırmak için uygun kısımları boyanan, konjuge EAP eyleyicinin uç kısmı ve kuvvet algılayıcısının temas noktası, sırasıyla, enjeksiyon pipeti ve hücre zarı olarak adlandırılmıştır (Şekil 3.31). Öncelikle, enjeksiyon pipeti ve hücre zarı aralarında 3 mm mesafe olacak şekilde yerleştirilir. Konum kontrolcüsü belli bir süre boyunca bu mesafeyi sabit tutar, daha sonra enjeksiyon pipetini hücre zarına doğru sabir bir hızla yaklaştırmaya başlar. Enjeksiyon pipeti hücre zarına temas ettiği anda konum kontrolcüsü hareketi durdurur ve kuvvet kontrolcüsüne geçiş yapılır. Kuvvet kontrolcüsü belirtilen süre boyunca enjeksiyon pipeti tarafından hücre zarına uygulanan kuvveti 0 mN'da tutar. Daha sonra uygulanan kuvvet sabit hızla 10 mN'a çıkartılır ve 5 saniye bu seviyede tutulur. Belirtilen sürenin sonunda şimdiye kadar uygulanan işlemler ters sırayla uygulanır ve enjektör pipeti başlangıç konumuna geri döner. Senaryonun gerçekleşmesi için oluşturulan hibrit kontrol sistemi Şekil 3.32'de ve iş akış şeması Şekil 3.33'te verilmiştir.



Şekil 3.31. Senaryonun uygulandığı sistem ve sistemin senaryoya göre temsil ettiği enjeksiyon pipeti ve hücre zarı

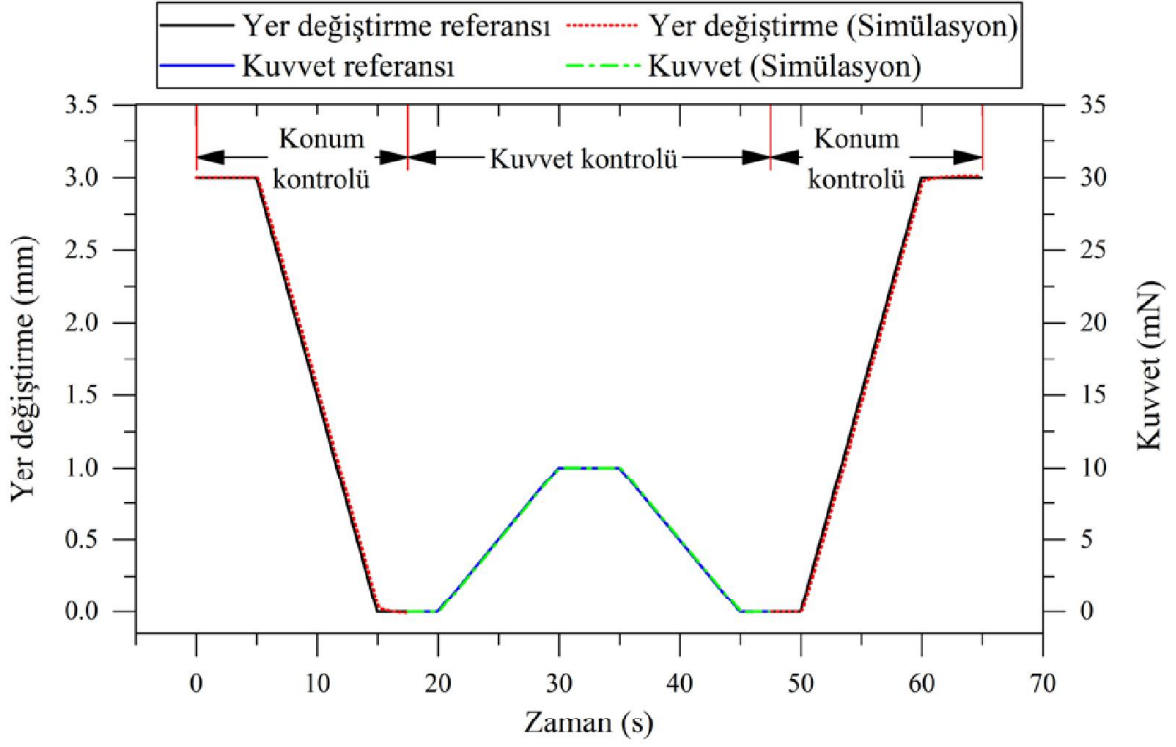


Şekil 3.32. Senaryonun gerçekleşmesi için oluşturulan hibrit kontrol sistemi

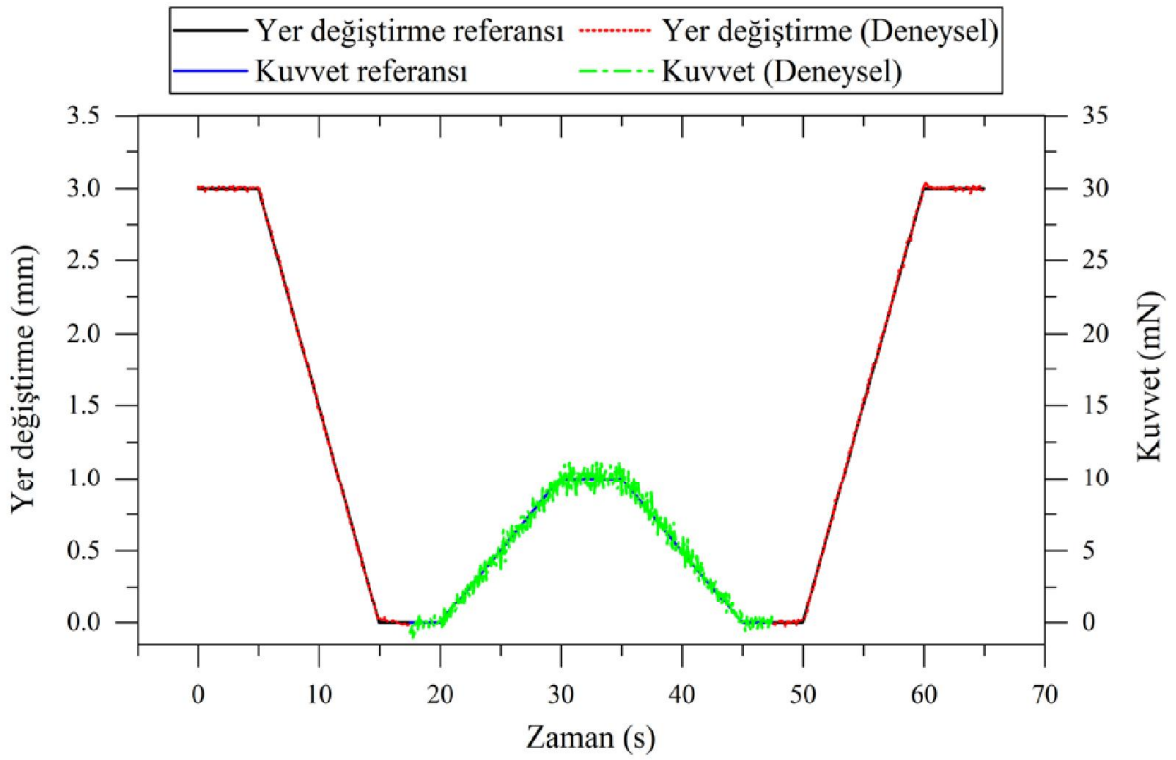


Şekil 3.33. Uygulanan senaryonun iş akış şeması

Anlatılan senaryo için hazırlanan referans sinyali ve senaryonun Smith öngörücüsü olmadan yapılmış simülasyonu Şekil 3.34'te ve senaryonun Smith öngörücüsü ile gerçekleşmesi sonucu elde edilen veriler Şekil 3.35'te verilmiştir.

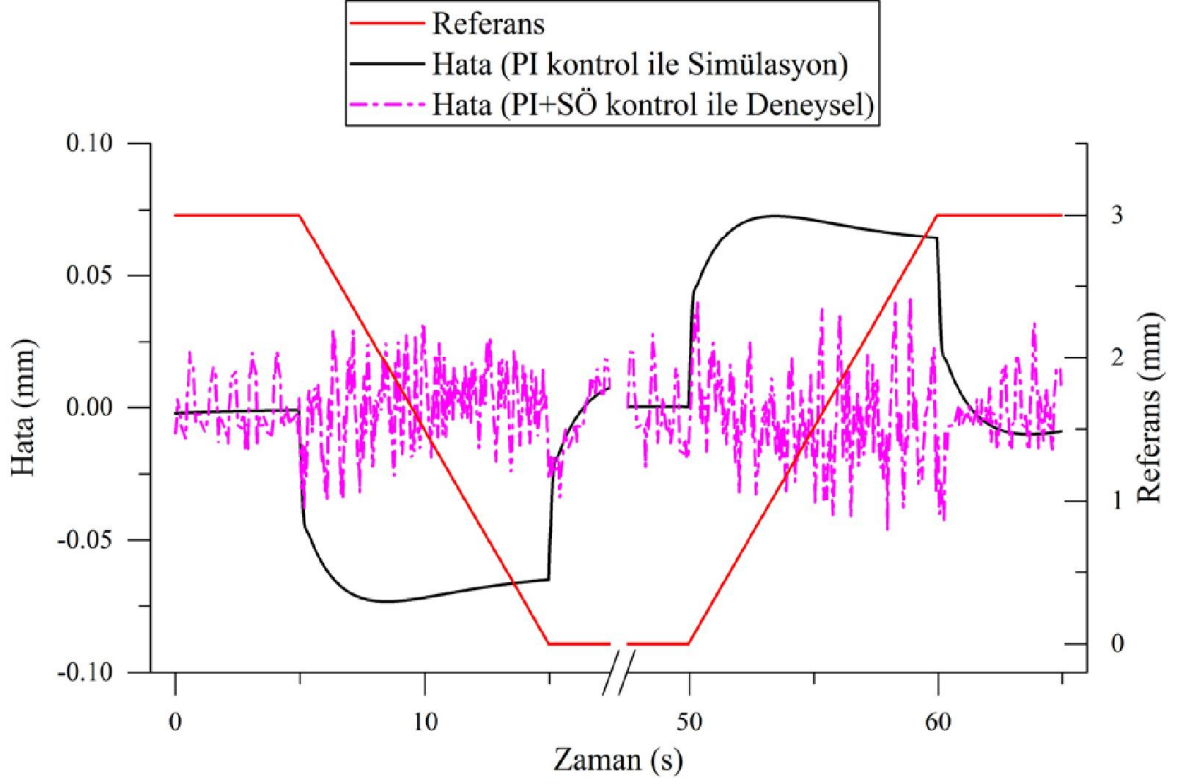


şekil 3.34. Çalışmada uygulanan senaryonun referansı ve Smith öngörücüsü olmadan yapılan simülasyon sonucu



şekil 3.35. Senaryonun Smith öngörücülü hibrit kontrol sistemiyle uygulanması

Şekil 3.34 ve Şekil 3.35'te verilen simülasyon ve deneysel yer değiştirme sonuçları karşılaştırıldığında Smith öngörücüsünün faz farkını neredeyse ortadan kaldırarak takip hatasını azalttığı görülmektedir (Şekil 3.36).



Şekil 3.36. PI kontrolcüsüyle (simülasyon) ve Smith öngörücüsü destekli PI kontrolcüsüyle (deneysel) yapılan çalışmalarda ortaya çıkan referans takip hatalarının karşılaştırılması

#### 4. SONUÇLAR

Yapılan bu tez kapsamında 3 katmanlı PPy(PVDF) konjuge EAP eyleyicinin görüntü tabanlı konum kontrolüyle ilgili 4 farklı çalışma yapılarak sonuçları bölüm 3'te ortaya koyulmuştur. Bölüm 3.2'de görüntü tabanlı konum kontrolünün yeterliliği temel düzeyde sınanmıştır. Bölüm 3.3'te önerilen yöntemin kontrol sistemine dahil edilmesiyle ortaya çıkan ölü zaman Smith öngörücüsü ile giderilerek gecikme kaynaklı takip hatası en aza indirgenmiştir. Bölüm 3.4'te hücre enjeksiyon sistemi temel alınarak geliştirilen bir dizi konum ve kuvvet kontrolü gerektiren senaryo önerilen yöntem kullanılarak başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Bölüm 3.5'te hücre enjeksiyon sistemi senaryosu geliştirilmiş ve ölü zaman kaynaklı takip hatasını en aza indirmek için konum kontrolcüsüne eklenen Smith öngörücüsü ile başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Önerilen sistemin yeterliliği bölüm 1.1'de sıralanan ve Tablo 4.1'de maddeler halinde verilen kriterlerle belirlenebilir.

Tablo 4.1. Önerilen yöntemin sağlaması gereken özellikler

Durum	Sıra	Önerilen yöntemin karşılaması gereken özellikler
<input type="checkbox"/>	1	Konjuge EAP eyleyicinin uç noktasının iki ekseninde yaptığı hareketi her iki ekseninde de ölçebilmeli
<input type="checkbox"/>	2	Makro/mikro konumlama ve manipülasyon işlemleri için yeterli ölçüm hassasiyetini sağlayabilmeli
<input type="checkbox"/>	3	Lazere göre daha düşük maliyetli bir sistem olmalı
<input type="checkbox"/>	4	Eyleyicinin bulunduğu sistemde ölçüm yaparken boyutu sebebiyle sorun teşkil etmemeli
<input type="checkbox"/>	5	Birden çok sensör yerine kullanılabilir

Bölüm 3.2'de görüntü tabanlı konum kontrolünün yeterliliğinin sınındığı çalışmayla önerilen yöntemin her iki ekseninde de hareketi ölçebildiği gösterilmiştir. Bu çalışma birinci

sıradaki kıstası karşılamaktadır. Bölüm 3.3'te görüntü tabanlı konum kontrolünde meydana gelen gecikmenin giderilmesi üzerine çalışılarak önerilen sistemin referans takibinde meydana gelen hata azaltılmış ve konumlama kabiliyeti arttırılmıştır. Bu çalışmada kullanılan görüntüleme cihazı, bu haliyle, mikro ölçekli konumlama ve referans takibi işlemleri için gerekli hassasiyete sahip değildir. Fakat, uygun ekipman kullanımıyla görüntüleme sistemi mikro ölçekte hassas konumlama ve referans takibi yapabilecek duruma getirilebilmektedir. Böylelikle önerilen sistemin makro ve mikro işlemler için kullanımı mümkün olmakta ve ikinci sıradaki kıstas sağlanmaktadır. Görüntü tabanlı kontrol için çalışmaların tamamında iki adet bilgisayar ile birlikte Logitech firmasına ait C310 web kamerası kullanılmıştır. Kullanılan kameranın piyasadaki fiyatı, bu tezin yazıldığı tarihte, 110 TL civarındadır. Bölüm 2.1'de karşılaştırma amaçlı kullanılan lazer mesafe ölçerin fiyatı ise, bu tezin yazıldığı tarihte, 4500 TL civarındadır ve lazer mesafe ölçer ile kullanılan ekipmanların fiyatıda bu yöntemin maliyetini arttırmaktadır. Görüntü tabanlı kontrol sistemlerinde kullanılan görüntüleme cihazları barındırdıkları özelliklere göre farklı fiyatlara sahiptirler fakat uygun ekipmanlarla karşılaştırma yapılan yöntemden daha düşük maliyetle konum kontrolünde kullanılmaları mümkündür. Bu şartlar altında önerilen yöntem üçüncü kıstası karşılamaktadır. Bu tez kapsamında yapılan bütün çalışmalarda kamera sistemde gözlemci olarak ve hareketin gerçekleştiği düzleme dik konumda bulunmaktadır. Kameranın yerleşiminin düzleme dik olmadığı durumlarda koordinat çevrimleriyle hareket gözlenmeye ve konum kontrolü yapılmaya devam edilebilir. Bu çalışmada kullanılan kamera bulunduğu çevreyi insan gözünün görebildiği gibi algılamaktadır. Bölüm 2.1'de bahsedildiği gibi farklı görüntüleme ekipmanları ile elektromanyetik tayfın tamamına yakını görüntülenebilir ve sayılaştırılan görüntü üzerinde çalışılabilir (Şekil 2.1). Yani, kontrol edilmek istenen sistemle bire bir görsel temas olmasa dahi farklı görüntüleme cihazlarıyla görüntülenip görüntü tabanlı kontrol sistemleri ile kontrolleri mümkün olmaktadır. Bu durum ise dördüncü kıstası sağlamaktadır. Bölüm 3.5'te ise aynı anda iki farklı nesne takibi ve konum kontrolü yapılarak iki adet tek eksenli lazer mesafe ölçerin yapabileceği iş bir adet görüntü tabanlı konum kontrol sistemi ile yapılmıştır. Yapılan bu son çalışma ise beşinci ve son kıstası sağlamaktadır.

Verilen bilgiler dahilinde Tablo 4.1'de sağlanması istenen özelliklerin tamamının sağlandığı görülmektedir (Tablo 4.2).

Tablo 4.2. Önerilen sistemin karşıladığı özellikler

<b>Durum</b>	<b>Sıra</b>	<b>Önerilen yöntemin karşılaması gereken özellikler</b>
✓	1	Konjuge EAP eyleyicinin uç noktasının iki ekseninde yaptığı hareketi her iki ekseninde de ölçebilmeli
✓	2	Makro/mikro konumlama ve manipülasyon işlemleri için yeterli ölçüm hassasiyetini sağlayabilmeli
✓	3	Lazere göre daha düşük maliyetli bir sistem olmalı
✓	4	Eyleyicinin bulunduğu sistemde ölçüm yaparken boyutu sebebiyle sorun teşkil etmemeli
✓	5	Birden çok sensör yerine kullanılabilmesi

## 5. ÖNERİLER

Bu tez kapsamında görüntü tabanlı kontrol sistemiyle üç katmanlı PPy(PVDF) konjuge EAP eyleyicinin hareketi iki eksende ölçülmüş fakat hareket kontrolü tek eksende yapılmıştır. Önerilen yöntemle birden çok eyleyici bir arada kullanılarak iki eksende hareket içeren senaryolar üretilebilir ve gerçekleştirilebilir. Eyleyicinin zamanla deformasyona uğraması sonucunda hareket kabiliyetinin azaldığı bilinen bir durumdur, önerilen yöntem ile eyleyici deformasyonunun iki eksendeki hareketi nasıl etkilediği araştırılarak eyleyicinin çalışma mekanizması hakkında daha fazla bilgi edinilebilir. Görüntü tabanlı kontrol sistemleri görüntü işlemeden dolayı yüksek işlem gücüne gereksinim duyarlar. Bu gereksinimi karşılamak amacıyla sistemde görüntü işleme algoritmalarını istenen hızda çalıştırabilecek bir bilgisayar bulunması gerekmektedir. İlerleyen çalışmalarda uygun donanım ve yazılım altyapısına geçilmesiyle ihtiyaç duyulan işlem gücü azaltılırken aynı işlem gücüyle daha yüksek hızlarda görüntü işlemek mümkün hale getirilebilir.



## 6. KAYNAKLAR

- Alici, G. ve Huyn, 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.M., Madden, J.D., Wu, Y. ve Wallace, G.G., 2008. Response Characterization of electroactive polymers as mechanical sensors, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 13, 2, 187-196.
- Anquetil, P.A.T, 2005. Large Contraction Conducting Polymer Molecular Actuators, Doktora Tezi, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, ABD.
- Aviles, A.I., Alsaleh, S., Sobrevilla, P. ve Casals, A., 2015. Sensorless Force Estimation Using a Neuro-Vision-Based Approach for Robotic-Assisted Surgery, 7th Annual International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering, Nisan, Montpellier, Fransa, Bildiriler Kitabı: 86-89.
- Azizian, M., Khoshnam, M., Najmaei, N. ve Patel, R.V., 2014. Visual Servoing in Medical Robotics: A Survey. Part I: Endoscopic and Direct Vision Imaging – Techniques and Applications, International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 10, 3, 263-274.
- Bar-Cohen, Y., Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential, and Challenges, Bar-Cohen, Y., Second Edition P(15-38), PM136, SPIE Press Book, 2004.
- Becattini, G., Mattos, L.S. ve Caldwell, D.G., 2013. A Visual Targeting System for The Microinjection of Unstrained Adherent Cells, Computers in Biology and Medicine, 43, 2, 109-120.
- Bosch, A., Zisserman, A. ve Muñoz, X., 2007. Image Classification Using Random Forests and Ferns, IEEE 11th International Conference on Computer Vision, Ekim, Rio de Janeiro, 1-8.
- Cappelleri, D.J., Piazza, G. ve Kumar, V., 2011. A Two Dimensional Vision-based Force Sensor for Microrobotic Applications, Sensors and Actuators A: Physical, 171, 2, 340-351.
- Carpi, F. ve DeRossi, D., 2005. Electroactive Polymer-based Devices for E-textiles in biomedicine, IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine, 9, 3, 295-318.
- 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.

- Chaumette, F. ve Hutchinson, S., 2006. Visual Servo Control Part I: Basic Approaches, IEEE Robotics & Automation Magazine, 13, 4, 82-90.
- Chiang, C.K., Fincher, C.R., Park, Jr.Y.W., Heeger, A.J., Shirakawa, H., Louis, E.J., Gau, S.C., ve MacDiarmid, A.G., 1977. Electrical Conductivity in Doped Polyacetylene, Physical Review Letters, 39, 17, 1098-1101.
- Coşkun, M.Y. ve İtik, M., 2015. Konjuge Tip Bir Elektro-Aktif Polimer Eyleyicinin Görüntü Tabanlı Kontrolü, Uluslararası Katılımlı 17.Makina Teorisi Sempozyumu, Haziran, İzmir, Bildiri Kitabı: 810-813.
- Coşkun, M.Y. ve İtik, M., 2015. Vision Based Control of A Conjugated Electro-active Polymer Actuator, 2015 IEEE International Conference On Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Temmuz, Busan, Güney Kore, 824-829.
- Fang, Y., Xiaobo, T. ve Alici, G., 2008. Robust Adaptive Control of Conjugated Polymer Actuators, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 16, 4, 600-612.
- George, PM., Lyckman, AW., LaVan, D., Hegde, A., Leung, Y., Avasare, T., Testa, C., Alexander, PM., Langer, R. ve Sur, M., 2005. Fabrication and Biocompatibility of Polypyrrole Implants Suitable for Neural Prosthetics, Biomaterials, 26, 17, 3511-3519.
- Gonzalez, R.C. ve Woods, R.E., 2014. Sayısal Görüntü İşleme, Telatar, Z.(editör), Tora, H., Arı, F. ve Kalaycıoğlu, A., Palme Yayıncılık, Ankara.
- Greminger, M.A. ve Nelson, B.J., 2004. Vision-based Force Measurement, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 26, 3, 290-298.
- Hashimoto, K., 2003, A Review on Vision-based Control of Robot Manipulators, Advanced Robotics, 17, 10, 969-991.
- Huang, H.B., Dong, S., Mills, J.K. ve Cheng, S.H., 2009. Robotic Cell Injection System With Position and Force Control: Toward Automatic Batch Biomanipulation, IEEE Transactions on Robotics, 25, 3, 727-737.
- 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.
- Hutchinson, S., Hager, G.D., ve Corke, P.I., 1996. A Tutorial on Visual Servo Control, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 12, 5, 651-670.
- İtik, M., 2013. Repetitive Control of A Trilayer Conjugated Polymer Actuator, Sensors and Actuators A: Physical, 194, 149-159.
- 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.

- Jager, E.W.H., Inganäs, O. ve Lundström, I., 2008. Microrobots for micrometer-size objects in aqueous media: potential tools for single-cell manipulation, Science, 288, 2335-2338.
- John, S.W., Alici, G. ve Cook, C.D., 2009. Towards The Position Control of Conducting Polymer Trilayer Bending Actuators with Integrated Feedback Sensor, In Proceedings of the 2009 IEEE/ASME International Conference Advanced Intelligent Mechatronics, Temmuz , Singapore, 65–70.
- Kanan, C. ve Cottrell, G.W., 2012. Color-to-Grayscale: Does The Method Matter in Image Recognition?, PLoS ONE, 7, 1, e29740.
- Karimirad, F., Chauhan, S., ve Shirinzadeh, B., 2014. Vision-based Force Measurement Using Neural Networks for Biological Cell Microinjection, Journal of Biomechanics, 47, 5, 1157-1163.
- Lee, K.K.C., Munce, N.R. ve Shoa, T., 2009. Fabrication and Characterization of Laser-micromachined Polypyrrole-based Artificial Muscle Actuated Catheters, Sensors and Actuators A: Physical, 153, 2, 230-236.
- Leta, F.R., Feliciano, F.F., de Souza, I.L. ve Cataldo, E., 2005. Discussing Accuracy in An Automatic Measurement System Using Computer Vision Techniques, Mechatronics Symposium of the 18th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM), Kasım, Ouro Preto, MG, Brazil, 2, 645-652.
- Lin, H. ve Subbarao, M., 2001. A Vision System for Fast 3D Model Reconstruction, Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Aralık, Kauai, HI, ABD, 2, 663-668.
- Low, L., Seetharaman, S. ve He, K., 2000. Microactuators Toward Microvalves for Responsive Controlled Drug Delivery, Sensors and Actuators B, 67, 1-2, 149-160.
- Madden, J.D.W., 2000. Conducting Polymer Actuators, Doktora Tezi, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, ABD.
- Nguyen, C.H., Alici, G. ve Wallace, G., 2014. An Advanced Mathematical Model and its Experimental Verification for Trilayer Conjugated Polymer Actuators, IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 19, 4, 1279-1288.
- Otero, T.F. ve Cortes, 2004. M.T., Artificial Muscle: Movement and Position Control, Chemical Communications, 10, 3, 284-285.
- Otero, T.F., Martinez, J.G. ve Arias-Pardilla, J., 2012. Biomimetic Electrochemistry from Conducting Polymers. A Review Artificial Muscles, Smart Membranes, Smart Drug Delivery and Computer/Neuron Interfaces, Electrochimica Acta, 84, 112-128.
- Otsu, N., 1979. A Threshold Selection Method From Gray-level Histograms, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 9, 1, 62-66.

- Price, A.D., 2012. Fabrication, Modelling and Application of Conductive Polymer Composites, Doktora Tezi, University of Toronto, Ontario, Kanada.
- Punning, A., Must, I., Põldsalu, I., Vunder, V., Kaasik, F., Temmer, R. ve Aabloo, A., 2015. Long-term degradation of the ionic electroactive polymer actuators, *Electroactive Polymer Actuators And Devices (EAPAD)*, Mart, Kaliforniya, ABD, 9430, 0S1-0S9.
- Ronan, P., The Free Encyclopedia: Electromagnetic spectrum with light highlighted, [https://en.wikipedia.org/wiki/Light#/media/File:EM\\_spectrum.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Light#/media/File:EM_spectrum.svg), 07 Aralık 2015
- 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.
- Sarban, R., Jones, R.W., Rustighi, E. ve Mace, B.R., 2011. Active Vibration Isolation Using A Dielectric Electro-active Polymer Actuator, *Journal of System Design and Dynamics*, 5, 5, 643-652.
- Shirai, Y. ve Inoue, H., 1973. Guiding a Robot by Visual Feedback in Assembling Tasks, *Pattern Recognition*, 5, 99-108.
- Shoa, T., Yoo, D.S., Walus, K. ve Madden J.D.W., 2011. A Dynamic Electromechanical Model for Electrochemically Driven Conducting Polymer Actuators, *IEEE/ASME Transactions Mechatronics*, 16, 1, 42-49.
- Shokri, S., Shirvani, M., Salmani, A. ve Younesi, M., 2010. Improved PI Controllers Tuning in Time-delay Smith Predictor with Model Mismatch, *International Journal Of Chemical Engineering And Applications*, 1, 4, 290-293.
- Smela, E., 2003. Conjugated Polymer Actuators for Biomedical Applications, *Advanced Materials*, 15, 6, 481-494.
- Smith, O.J.M., 1957. Posicast Control of Damped Oscillatory Systems, *Proceedings of the IRE*, 45, 9, 1249-1255.
- Sun, N. ve Nelson, B.J., 2002. Biological Cell Injection Using an Autonomous MicroRobotic System, *The International Journal of Robotics Research*, 21, 10-11, 861-868.
- Um, D., Asianbanpour, B. ve Jimenez, J., 2009. A Flexible Micro Manufacturing System for Micro Parts Assembly via Micro Visual Sensing and EAP Based Grasping, *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 08, 02, 137-152.
- Usamentiaga, R., Molleda, J., Garcia, D.F., Granda, J.C. ve Rendueles, J.L., 2012, Temperature Measurement of Molten Pig Iron Slag Characterization and Detection Using Infrared Computer Vision, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 61, 5, 1149-1159.

- Vunder, V., İtik, M., Punning, A. ve Aabloo, A., 2014. Force Control of Ionic Polymer-metal Composite Actuators with Carbon-based Electrodes, *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, Mart, Kaliforniya, ABD, 9056, 1Y1-1Y7.
- Wang, X., Gu, X., Yuan, C., Chen, S., Zhang, T., Yao, J., Chen, F. ve Chen, G., 2003. Evaluation of Biocompatibility of Polypyrrolein Vitro and in Vivo, *Journals of Biomedical Materials Research Part A*, 68A, 3, 411-422.
- Xiao, S. ve Li, Y., 2014. Visual Servo Feedback Control of A Novel Large Working Range Micro Manipulation System for Microassembly, *Journal of Microelectromechanical Systems*, 23, 1, 181-190.

## ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Yavuz COŞKUN 1989 yılında Bursa'da doğdu. 2006 yılında Gemlik Celâl Bayar Anadolu Lisesi'nden mezun olduktan sonra aynı yıl Niğde Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde lisans öğrenimine başladı ve 2011 yılında mezun oldu. 2012 yılında Gedik Eğitim Vakfı'nın Uluslararası/Avrupa Kaynak Mühendisliği eğitimini tamamlayarak Uluslararası/Avrupa Kaynak Mühendisi ünvanını aldı. 2013 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı. 2013 yılı Şubat ayından beri Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak görevine devam eden Mustafa Yavuz COŞKUN giriş seviyesinde Portekizce ve iyi derecede İngilizce bilmektedir.