



**T.C.**  
**MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE  
ÜRETİLEN ESNEK ELEKTROPNÖMATİK  
TUTUCUNUN ANALİZİ VE KONTROLÜ**

**Muhammet ULUDAĞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ocak-2023**  
**MUŞ**  
**Her Hakkı Saklıdır**



**T.C.**  
**MUŞ ALPARSLAN ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE  
ÜRETİLEN ESNEK ELEKTROPNÖMATİK  
TUTUCUNUN ANALİZİ VE KONTROLÜ**

**Muhammet ULUDAĞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Osman ÜLKİR**

**Ocak-2023**  
**MUŞ**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL ve ONAYI

Muhammet ULUDAĞ tarafından hazırlanan “Eklemeli imalat yöntemiyle üretilen esnek elektropnömatik tutucunun analizi ve kontrolü” adlı tez çalışması 25/01/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Muş Alparslan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Doç. Dr. M. Eşref ALKIŞ  
Muş Alparslan Üniversitesi,  
Sağlık Bilimleri Fakültesi,  
İş Sağlığı ve Güvenliği

.....

#### Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Osman ÜLKİR  
Muş Alparslan Üniversitesi,  
Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu,  
Elektrik ve Enerji

.....

#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Hasan POLAT  
Bingöl Üniversitesi,  
Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu,  
Elektrik ve Enerji

.....

Yukarıdaki sonuç;  
Enstitü Yönetim Kurulu ...../...../..... Tarih ve ...../..... nolu kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Sedat BOZARI  
FBE Müdürü

Bu tez çalışması Muş Alparslan Üniversitesi-Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından BAP-22-TBMYO-4902-04 nolu proje ile desteklenmiştir.

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Muhammet ULUDAĞ

25/01/2023

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS TEZİ

# EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN ESNEK ELEKTROPNÖMATİK TUTUCUNUN ANALİZİ VE KONTROLÜ

**Muhammet ULUDAĞ**

**Muş Alparslan Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Nükleer Enerji ve Enerji Sistemleri Anabilim Dalı**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Osman ÜLKİR**

Esnek elektropnömatik tutucular, yumuşak robotik cihazların geliştirilmesine ve yumuşak robotlar için farklı ve karmaşık donanım tasarımlarının etkinleştirilmesine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Birçok avantajın yanı sıra, esnek tutucuların konum geri bildiriminin olmaması, konum kontrolü için bir sorun teşkil etmektedir. Bu tez çalışması, eklemeli imalat teknolojisi kullanılarak üretilen esnek elektropnömatik tutucuyla bu sorunu incelemeyi amaçlamaktadır. Esnek tutucu, 3D yazıcıda kalıplama tekniği kullanılarak iki parça halinde imal edilmiştir. Tutucunun yapısı, kalıplanmış silikon (RTV-3015) ve haznelere oluşan polietilen tereftalat (PET) filminden oluşmaktadır. Bu bölmeler, basınçlı hava ile çalışabilen 10 adet hava geçirmez bölmeden oluşan aktif bir bölme ve PET film ile kaplanmış bir pasif bölmedir. Esnek tutucunun bükülmesi sırasında, pasif hazne içindeki PET film basınçlı hava tarafından sıkıştırılmaya başlar ve bu da tutucunun daha yüksek bir yük tutma kapasitesiyle sonuçlanır. Ayrıca esnek sensörden yapılan geri besleme modülü fabrikasyon sırasında entegre edilmiştir. Esnek tutucunun PID kontrolü için gerçek zamanlı bir kontrol deney düzeneği oluşturulmuştur. Kontrolcünün basamak ve yörünge takip performansları gözlemlenmiştir. Gerçek zamanlı deneylerin doğruluğunu karşılaştırmak için tutucunun sonlu eleman analizi COMSOL programıyla gerçekleştirildi. Deneysel çalışmaların sonuçları ile elektropnömatik tutucunun hareket özellikleri, eğilme açısı ile basınç arasındaki ilişki ve konum izleme performansı incelenmiştir. Tutucunun deneysel sonuçlarının simülasyon sonuçlarıyla iyi bir uyum içinde olduğu tespit edilmiştir. Deneysel sonuçlar, esnek tutucunun PID kontrol algoritması ile başarılı yörünge izleme performansı gösterdiğini belirlemiştir.

**2023, 43 Sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** Esnek elektropnömatik tutucu, eklemeli imalat yöntemi, esnek sensör, konum geri bildirim, PID kontrol.

## **ABSTRACT**

### **MS THESIS**

# **ANALYSIS AND CONTROL OF SOFT ELECTROPNEUMATIC GRIPPER FABRICATED BY ADDITIVE MANUFACTURING METHOD**

**Muhammet ULUDAĞ**

**Muş Alparslan University  
Natural and Applied Science  
Department of Nuclear Energy and Energy Systems**

**Advisor: Assist. Prof. Osman ÜLKİR**

Soft electropneumatic grippers contribute significantly to the development of soft robotic devices and enable different and complex hardware designs for soft robots. Besides the many advantages, the lack of position feedback of flexible grippers poses a problem for position control. This thesis study aims to examine this problem with a flexible electropneumatic gripper to be produced using additive manufacturing technology. The flexible gripper is manufactured in two parts using a 3D-printed molding technique. The structure of the gripper consists of molded silicone (RTV-3015) and polyethylene terephthalate (PET) film made of chambers. These compartments are an active compartment consisting of 10 airtight compartments that can operate with compressed air, and a passive compartment covered with PET film. During the bending of the soft gripper, the PET film inside the passive chamber begins to be compressed by the compressed air, resulting in a higher load holding capacity of the gripper. In addition, the feedback module made of flexible sensor is integrated during fabrication. A real-time control experiment setup was created for the PID control of the flexible gripper. The step and trajectory tracking performances of the controller were observed. Finite element analysis of the gripper was performed with the COMSOL program to compare the accuracy of real-time experiments. The results of the experimental studies and the movement characteristics of the electropneumatic gripper, the relationship between the bending angle and the pressure, and the position tracking performance were investigated. The experimental results of the gripper were found to be in good agreement with the simulation results. Experimental results determined that the flexible gripper showed successful trajectory tracking performance with PID control algorithm.

**2023, 43 Pages**

**Keywords:** Soft electropneumatic gripper, additive manufacturing method, flexible sensor, position feedback, PID control.

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince ve tez çalışmamın planlanması araştırılması ve meydana gelmesinde desteğini esiremeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım çok değerli danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Osman ÜLKİR'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarında değerli tecrübeleri ile bana destek olan Prof. Dr. Erkan KAPLANOĞLU ve Dr. Öğr. Üyesi İshak ERTUĞRUL hocalarıma teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Muş Alparslan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler (BAP) Koordinatörlüğüne (Proje No: BAP-22-TBMYO-4902-04) teşekkür ederim.

Muhammet ULUDAĞ  
MUŞ-2023



# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>v</b>
<b>TEŞEKKÜR .....</b>	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>vii</b>
<b>SİMGELER ve KISALTMALAR.....</b>	<b>ix</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ.....</b>	<b>x</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ.....</b>	<b>xi</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Amaç .....	3
1.2 Literatür Taraması.....	4
1.2.1 Esnek Tutucu Tasarımları .....	5
1.3 Eklemeli Üretim Yöntemleri .....	12
1.3.1 Eriyik Yığılma Modelleme (FDM) .....	13
1.3.2 Stereolitografi (SLA) .....	13
1.3.3 Polyjet Modelleme (PJM).....	14
1.3.4 Seçici Lazer Sinterleme (SLS).....	15
1.3.5 Elektron Işınli Ergitme (EBM) .....	15
1.3.6 Lamine Nesne İmalatı (LOM) .....	16
1.4 Tez İçeriği .....	17
<b>2. MATERYAL ve METOT .....</b>	<b>18</b>
2.1 Tasarım Süreci .....	18
2.1.1 Esnek Elektropnömatik Tutucunun Tasarımı .....	18
2.1.2 Kalıpların Tasarımı .....	19
2.2 Üretim Süreci .....	20
2.2.1 Esnek Elektropnömatik Tutucunun Üretimi .....	20
2.3 Sonlu Elemanlar Analizi .....	23
2.4 Elektronik Sistem Tasarımı .....	26
2.5 Kontrol Sistem Tasarımı .....	27
<b>3. BULGULAR ve TARTIŞMA .....</b>	<b>30</b>
3.1 Tutucunun Konum Geribildirimi Karakterizasyonu .....	30
3.2 Deneysel Sonuçlar .....	32
3.2.1 Kontrolörün Basamak Referans Altında Çalıştırılması .....	33
3.2.2 Kontrolörün Değişken Referans Altında Çalıştırılması.....	33
3.2.3 Kontrolörün Farklı Frekanslarda Yörünge Takibi .....	34
3.2.4 Kontrolörün Sinüs Yörünge Takibi .....	35
3.3 Tartışma .....	35
<b>4. SONUÇLAR.....</b>	<b>37</b>



## SİMGELER ve KISALTMALAR

### Simgeler

C	: Celsius
g	: Gram
hz	: Hertz
kg	: Kilogram
kPa	: Kilopaskal
kΩ	: Kiloohm
mm	: Milimetre
ms	: Milisaniye
s	: Saniye
V	: Volt
°	: Derece
µm	: Mikrometre
µs	: Mikrosaniye

### Kısaltmalar

ABS	: Akrilonitril butadien stiren
CAD	: Bilgisayar destekli grafik-tasarım
DEA	: Dielektrik elastomer aktüatör
DLP	: Dijital ışık işleme
EBM	: Elektron ışınli ergitme
FDM	: Eriyik yığıma modelleme
FRA	: Kumaş tabanlı döner aktüatör
LOM	: Namine nesne imalatı
PBF	: Toz yatağı füzyon
PET	: Polietilen tereftalat
PID	: Oransal-integral-türevsel
PJM	: Polyjet modelleme
PLA	: Polilaktik asit
PN	: Pneu-net
PWM	: Darbe genişlik modülasyonu
RTV-3015	: Kalıplanmış silikon
SLA	: Stereolitografi
SLS	: Seçici lazer sinterleme
SPA	: Yumuşak pnömatik aktüatör
STL	: Dosya formatı
UV	: Ultraviyole

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. 1	Bir pnömatik aktüatörde kalıplama tekniği ile üretim.....	3
Şekil 1. 2	Pnömatik yumuşak tutucu .....	6
Şekil 1. 3	Gecko yumuşak tutucu .....	6
Şekil 1. 4	Üç parmaklı esnek tutucu .....	6
Şekil 1. 5	C şekilli tutucu.....	7
Şekil 1. 6	Dört parmaklı esnek tutucu .....	7
Şekil 1. 7	PneuNets esnek tutucu.....	8
Şekil 1. 8	Haptik yumuşak tutucu.....	8
Şekil 1. 9	Baxter robotik tutucu.....	9
Şekil 1. 10	Çeşitli nesnelere kavrama yeteneğinin gösterimi.....	9
Şekil 1. 11	Bükülen bir SPA'nın üretim görüntüleri.....	10
Şekil 1. 12	DLP yöntemiyle yumuşak tutucunun üretim süreci .....	10
Şekil 1. 13	Yumuşak aktüatörün deforme olmuş hali .....	11
Şekil 1. 14	Yumuşak kavrayıcının kavrama performansı.....	12
Şekil 1. 15	Eklemeli imalat teknolojisinin sınıflandırılması .....	12
Şekil 1. 16	FDM nin çalışma prensibi .....	13
Şekil 1. 17	SLA'nın çalışma prensibi.....	14
Şekil 1. 18	PJM'nin çalışma prensibi .....	14
Şekil 1. 19	SLS çalışma prensibi .....	15
Şekil 1. 20	EBM çalışma prensibi .....	16
Şekil 1. 21	LOM çalışma prensibi .....	16
Şekil 2. 1	Esnek elektro pnömatik tutucunun tasarımı .....	18
Şekil 2. 2	Esnek elektro pnömatik tutucunun aktif odasının üretiminde kullanılan kalıp	19
Şekil 2. 3	Esnek elektro pnömatik tutucunun pasif odasının üretiminde kullanılan kalıp	19
Şekil 2. 4	Esnek elektro pnömatik tutucuyu sabitlemek için tasarlanan sistem .....	20
Şekil 2. 5	Esnek elektro pnömatik tutucunun üretiminde kullanılan yöntem ve ekipmanlar	21
Şekil 2. 6	Esnek elektro pnömatik tutucunun üretiminde kullanılan kalıplar .....	21
Şekil 2. 7	Esnek elektro pnömatik tutucunun üretim süreci .....	22
Şekil 2. 8	Kalıplama tekniğiyle üretilen esnek elektro pnömatik tutucu.....	23
Şekil 2. 9	Esnek tutucunun sonlu eleman simülasyonu ve deneysel sonuçlar .....	25
Şekil 2. 10	Esnek tutucunun kontrol sisteminin elektronik bileşenleri .....	26
Şekil 2. 11	PID kontrol blok şeması .....	27
Şekil 2. 12	Önerilen PID kontrol algoritması .....	29
Şekil 3. 1	Konum geri bildirim sisteminin gerçek zamanlı deneysel kurulumu.....	31
Şekil 3. 2	Esnek sensörün tasarımı ve tutucuya entegrasyon süreci.....	32
Şekil 3. 3	Basamak fonksiyonu referans değerleri için PID kontrolörün cevabı .....	33
Şekil 3. 4	Değişken basamak fonksiyonu referans değerleri için PID kontrolörün cevabı	34
Şekil 3. 5	Değişken genlikteki yörünge takip fonksiyonu referans değerleri için PID	35
Şekil 3. 6	Sinüs sinyali fonksiyonu için PID kontrolörün cevabı.....	35

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 2. 1</b> RTV silikonunun temel özellikleri .....	23
<b>Çizelge 3. 1</b> Sistemin değişken basamak fonksiyonu referans değerleri için PID kontrolörün cevabı .....	34
<b>Çizelge 3. 2</b> Literatürdeki en gelişmiş 3D baskılı esnek pnömatik tutucular .....	36



## 1. GİRİŞ

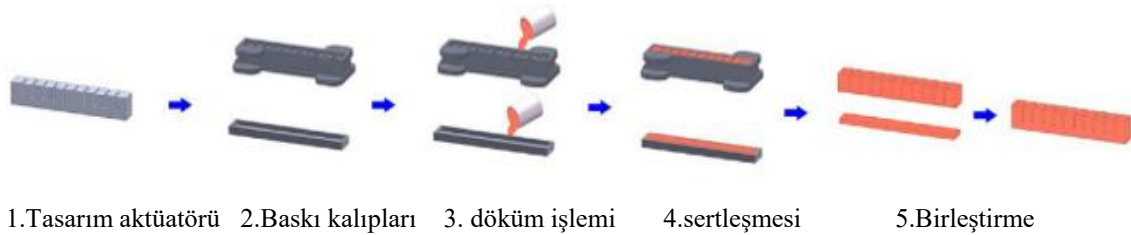
Yumuşak robotlar, robot ailesinin yeni bir üyesi olmakla birlikte hafif, ucuz, kolayca üretilebilir, basitçe kontrol edilebilir vb. gibi birçok umut vadeden özelliklere sahiptir (Kim ve ark., 2013; Lipson, 2014; Rus ve Tolley, 2015; Hao ve ark., 2016). Son zamanlarda yumuşak robotiklerin tasarımı, üretimi ve çalıştırılması, kimya (Ilievski ve ark., 2011; Shepherd ve ark., 2013), fizik (Brown ve ark., 2010), biyoloji (Moderator: ve ark., 2014; Ren ve ark., 2016) ve makine mühendisliği (Polygerinos ve ark., 2015; Deimel ve Brock, 2016) gibi birçok alandan araştırmacıların artan ilgisini çekmiştir. Yumuşak robotlar, yüksek oranda deforme olabilen uyumlu malzemelerden yapılmaktadır. Bu da yumuşak robotların büyük deformasyonları tekrar tekrar sürdürebilmesine imkân sağlamaktadır. Biyolojiden ilham alan yumuşak robotlar, fil hortumları (Hannan ve Walker, 2003; Salomon ve Wolf, 2012), ahtapot kolları (Laschi ve ark., 2009), yılanlar (Onal ve Rus, 2012), balıklar (Marchese ve ark., 2014), solucanlar (Seok ve ark., 2012) ve tırtıllar (Lin ve ark., 2011; Tawk ve ark., 2019) gibi kaynaklardan esinlenilerek geliştirildi. Robotikçilere ilham veren en büyüleyici biyolojik yapı, doğadaki en hünerli sistemlerden biri olan insan elidir (Biagiotti ve ark., 2004). Robotik inovasyon için antropomorfik son efektörlerin gelişimi büyük ölçüde insan eli modellerine dayanmaktadır (Biagiotti ve ark., 2004). Yumuşak robotlar, geleneksel robotlara göre uyarlanabilirlik, uygunluk, çeviklik ve dayanıklılık gibi birçok avantaja sahiptir (Whitesides, 2018). Bu avantajlar nedeniyle, yumuşak kavrayıcılar (Brown ve ark., 2010; Galloway ve ark., 2016), hareket robotları (Shepherd ve ark., 2011; Bartlett ve ark., 2015), tıbbi cihazlar (Park ve ark., 2014) dahil olmak üzere yumuşak robotik konseptlere dayalı çeşitli uygulamalar geliştirilmiştir.

Geleneksel rijit robotik kavrayıcıların tipik olarak parmak uçlarında görsel geri bildirim ve kuvvet algılama gerektiren iki veya daha fazla parmak bulunmaktadır. Algoritmaları çalıştıran ve uyarlanabilir kavrama elde etmek için tutucu nesneye dokunmadan önce kararlar veren merkezi bir işlemci kullanılmaktadır. Bu sebeple çok parmaklı tutucu, uygulanması karmaşık, sert ve kontrol edilmesi zor bir sistemdir. Yumuşak malzeme hareketine dayalı evrensel bir kavrayıcı, farklı nesnelere güvenilir ve hızlı bir şekilde arka arkaya tutulmasını sağlayan çeşitli uygulamalara sahip olabilmektedir (Brown ve ark., 2010; Yeow ve ark., 2014).

Yumuşak robotlar, yapıcı sert olmaması nedeniyle yüksek kuvvet ve dayanıklılık sağlayamamaktadır. Değişken sertlik yeteneklerine sahip yumuşak robotların etkinleştirilmesi, esnekliğin ve çevreye uyumun beklendiği durumlarda düşük sertliğe ve yüksek uyumluluğa sahip olması açısından yapılabilecek bir aksiyondur. Oysa robotlar, şekillerini korurken yüksek kuvvet verebilmek veya büyük yükleri tutabilmek için sertleştirilmelidir (Yang ve ark., 2020).

Aktif ve yarı aktif değişken rijitlik yöntemleri yumuşak robotikte benimsenen yöntemlerdir (Kornbluh ve ark., 2004; Manti ve ark., 2016). Aktif yöntemler, büzülen ve genişleyen McKibben aktüatörlerinin bir kombinasyonu (Suzumori ve ark., 2013) olmakla birlikte kontrollü aktivasyonla ayarlanmış ön gerilimleri olan birkaç DEA aktüatörü (Pelrine ve ark., 2008) ve tendonlarla birleştirilmiş akışkan aktüatörleri gibi mekanizmaları birleştirerek değişken sertliği gerçekleştirmeyi ifade eder (McMahan ve ark., 2005). Aktif yöntemlerden farklı olarak, yarı aktif yöntemler, değişken sertliği gerçekleştirmek için malzemenin yapısal özelliklerinin (elastik modülü veya viskozite gibi) modülasyonunu kullanır (Wang ve ark., 2018). Yarı aktif sertlik modülasyonu için kullanılan malzemeler arasında granüler malzemeler (sıkışma) (Brown ve ark., 2010), şekil hafızalı polimerler (Yang ve ark., 2017; Firouzeh ve Paik, 2017), düşük erime noktalı alaşımlar (Schubert ve Floreano, 2013), düşük erime noktalı polimerler (McEvoy ve Correll, 2015) bulunur.

Yumuşak pnömatik aktüatörleri (SPA) imal etmek için 3D baskı tekniği, ısıyla yapıştırma tekniği ve döküm tekniği olarak kategorize edilebilecek farklı teknikler kullanır. Son yıllarda yumuşak aktüatörlerin üretiminde bir atılım olan 3D baskı ile karmaşık yapılara sahip bazı SPA'lar üretilmiştir (Bartlett ve ark., 2015; Yap ve ark., 2016; Zolfagharian ve ark., 2016). Bazı bilim adamları, hafif SPA'ları imal etmek için ısıyla yapıştırma tekniğini de kullanmışlardır (Amiri Moghadam ve ark., 2018; Natividad ve ark., 2018). Döküm tekniği, özellikle büyük SPA'ların ve elyaf takviyeli SPA'ların seri üretiminde, yüksek olgunluğu, düşük maliyeti ve iyi uyarlanabilirliği nedeniyle SPA'ların her zaman önemli bir üretim yöntemi olmuştur (Li ve ark., 2020). Pnömatik yumuşak aktüatörler, farklı teknikler kullanılarak kolay ve hızlı bir şekilde üretilmelerini nedeniyle yumuşak robotik uygulamalar için en çok kullanılan aktüatörlerden biridir (Tawk ve ark., 2019).



**Şekil 1. 1** Bir pnömatik aktüatörde kalıplama tekniği ile üretim

SPA'ları tasarlamak ve araştırmak için fabrikasyon teknikleri çok önemlidir. Günümüzde kalıplama tekniği yaygın olarak kullanılmaktadır (Jeong ve Konishi, 2006; Gorissen ve ark., 2013; Gorissen ve ark., 2014; Sun ve Ren, 2015; Sun ve ark., 2016). Şekil 1.1'de gösterildiği gibi, bu teknik genellikle zaman alıcıdır ve zahmetli imalat süreçleri gerektirir. Örneğin, bir pnömatik ağ aktüatörünün (Mosadegh ve ark., 2014) kalıplama yaklaşımıyla üretilmesi, çok adımlı ve ekstra bağlama işlemlerine ihtiyaç duyar. Daha da önemlisi, üretim ölçeği ve yapı çeşitliliği de kalıplarla sınırlıdır. Kalıplama yaklaşımını kullanarak karmaşık içyapı özelliklerine sahip mikro-SPA'ları üretmek, imkânsız değilse de oldukça zordur. Kalıp kullanımını ortadan kaldırmak ve üretim sürecini basitleştirmek için bazı farklı yöntemler (Liang ve ark., 2016; Ge ve ark., 2018) geliştirilmiştir. Bununla birlikte, çok aşamalı adımlar hâlâ gereklidir ve üretilen aktüatörlerin yapıları nispeten basittir. Alternatif olarak 3D baskı, yapıyı doğrudan üreterek bu sorunu çözmeyi vadetmektedir (Ge ve ark., 2018).

Yumuşak aktüatörlerin çalıştırılması için değişken uzunlukta germe kabloları (Shepherd ve ark., 2011; Hao ve ark., 2016) kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra akışkan aktivasyonu (Lee ve ark., 2017; Li ve ark., 2020) ve akıllı malzeme aktivasyonu (Lee ve ark., 2017; Li ve ark., 2020) gibi farklı yöntemler de bulunmaktadır. Akışkan çalıştırma alt kategorilerinde olan pnömatik ve hidrolik çalıştırma yöntemleri de yaygın olarak kullanılmaktadır.

## 1.1 Amaç

Bu çalışmadaki amacımız, özgün bir tasarıma sahip olacak olan esnek elektro-pnömatik tutucunun eklemeli imalat yöntemini kullanarak kalıplama tekniğiyle üretimini gerçekleştirmektir. Tutucunun yer değiştirme miktarları gerçekleştirilen sonlu elemanlar analiziyle de gözlemlenmiştir. Ayrıca birçok esnek tutucuda mevcut olmayan konum geri besleme ile kontrol gerçekleştirilecektir. Burada konum geri besleme kontrolü tutucuya yerleştirilen esnek sensörler tarafından konum bilgileri alınarak yapılmaktadır. Konum geri besleme denetleyicisi olarak PID (oransal-integral-türevsel)

denetleyicisi kullanıldı. Böylelikle tutucunun istenilen açılarda açılıp-kapanması kontrol edilmiş olacaktır. Tutucunun hareket etmesi için basınçlı hava elektropnömatik oransal valfler ile hava ayarı yapılarak kontrollü bir şekilde verilmektedir. Sonuç olarak, bükülme sırasında parmağın sertliği güçlendirilir, bu da ele daha büyük kuvvet çıkışı ve yük tutma kapasitesi sağlar.

## 1.2 Literatür Taraması

Bilim ve mühendislik disiplinlerindeki son gelişmeler, robot uzmanlarının biyolojik muadillerini taklit eden biyo-ilhamlı esnek robotlar geliştirmelerini sağlamıştır. Esnek robotik uygulaması esnek aktüatörler, esnek ve gerilebilir sensörler, esnek güç kaynakları ve esnek aktif yapılar geliştirmeye odaklanan çok disiplinli bir araştırma alanıdır. Esnek robotlar sürdürülebilir, portatif ve uyumlu malzemelerden yapılmıştır (Laschi ve ark., 2009).

Geleneksel robotik tutucular, çok çeşitli nesnelere alınmasını ve yerleştirilmesini içeren görevler için kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bununla birlikte, bu geleneksel robotik sistemler, onları dinamik ortamlarda çalışmaya uygun olmayan katı ve sert malzemelerden yapılmıştır. Ayrıca karmaşık işleme, zahmetli montaj süreçleri ve yerleşik çoklu sensörler gerektirirler (Majidi, 2014). Geleneksel robotik tutucularda kullanılan bileşenlerin yüksek Young modülü nedeniyle, ele alınan nesnelere zarar vermeden yeterli ancak aşırı olmayan bir kavrama kuvvetinin uygulanmasını sağlamak için kontrol algoritmalarına ihtiyaç vardır. Bu sistemleri kullanarak hassas nesnelere kavramak, ek duysal geri bildirimle sahip karmaşık kontrol yöntemleri gerektirir. Yüksek oranda deforme olabilen ve uyumlu malzemelerden yapılan esnek tutucular, karmaşık olmayan bir alternatif olabilir. İlk olarak bu esnek tutucular, düşük maliyetli ve kullanıma hazır esnek malzemeler kullanılarak hızla üretilebilir. İkincisi, herhangi bir sensör ve karmaşık kontrol yöntemleri gerektirmeden çok çeşitli nesnelere kavrayabilir ve bunlarla etkileşime girebilirler. Üçüncüsü, doğal esneklikleri nedeniyle insanlarla birlikte çalışmak için güvenlidirler. Son olarak, kalıplama ve 3D baskıyı içeren çeşitli üretim teknikleri kullanılarak kolayca özelleştirilebilir ve farklı uygulamalara uyarlanabilirler. Herhangi bir nesneyi seçip yerleştirebilen evrensel tutucular geliştirmek hem esnek hem de sert tutucular için hâlâ bir zorluktur. Sabit ve sağlam bir tutuşun gerçekleştirilmesi, taşınan nesne ile kavrayıcı arasında yeterli bir temas alanı gerektirir. Genel olarak, sert ve esnek robotik tutucular, kavrayıcılar için mükemmel bir model olarak kabul edilen insan elinden ilham alan çok parmaklı bir tasarıma sahiptir (Marchese ve ark., 2015).

Literatürde birkaç tip esnek tutucu önerilmiştir. Bu tutucular, uyumlu kavrama görevlerini yerine getirebilse de, çoklu üretim adımlarını içeren karmaşık ve zahmetli üretim yöntemleri gerektirir. Esnek robotik sistemlerin yapısal uyumu ve uyarlanabilirliği nedeniyle, yumuşak bir robotik tutucu, oldukça pasif deformasyonlar üretebilir ve kendisini, işlenen bir nesnenin şekline uygun bir şekilde uyarlayabilir. Pnömatik esnek aktüatörler, farklı teknikler kullanılarak kolay ve hızlı bir şekilde üretilmelerini nedeniyle esnek robotik uygulamalar için en çok kullanılan aktüatörlerden biridir. Ayrıca, esnek tutucular için çeşitli deformasyon modları oluşturmak için esnek pnömatik aktüatörler ve 3D baskı kullanılarak karmaşık topolojiler elde edilebilir. Esnek tutucuları sürmek için kullanılan ana esnek pnömatik aktüatör türleri, PneuNets ve fiber takviyeli aktüatörlerdir. Eklemeli üretim yöntemleri kullanılarak esnek tutucuların üretilmesi için önerilen son üretim teknikleri arasında FDM 3D baskı, çok malzemeli 3D baskı ve silikon 3D baskı bulunmaktadır.

Bu çalışmanın en önemli katkıları, PneuNet aktüatörler de olduğu gibi şişirme odaları arasındaki temas sürtünmesini ortadan kaldıran yeni bir esnek elektro-pnömatik tutucu geliştirmek ve kavramayı geliştirmek için değiştirilmiş bir kanat-ray yapısı kullanmaktır. Esnek kavrayıcının kapasitesiyle son derece uyumlu bir yumuşak tutuş elde edilir. Bu çalışmada, düşük maliyetli ve açık kaynaklı bir FDM 3D yazıcı ve ticari olarak temin edilebilen bir termoplastik poliüretan kullanılarak tamamen 3D baskılı esnek pnömatik bir tutucu geliştirilecektir. Tutucu, herhangi bir destek malzemesi ve son işlem gerektirmeden tek adımda basılacaktır. Yeni bir pnömatik oda tasarımı içeren esnek bir pnömatik aktüatör geliştirilecek ve karakterize edilecektir. Esnek aktüatörün performansı, deformasyon ve engellenen kuvvet açısından sonlu elemanlar analizi kullanılarak optimize edilecektir.

### 1.2.1 Esnek Tutucu Tasarımları

Literatürde farklı teknikler ve farklı kontrol sistemleri, farklı güç aktarım yöntemleri ve üretim teknikleri kullanılarak geliştirilmiş birçok esnek tutucu vardır. Aşağıda belirtilen çalışmalar bunlara örnek olarak verilebilmektedir.

Guo ve ark., hassas cerrahi operasyonlar sırasında metal forseps ve laparoskopik gibi geleneksel tutucuların kısıcaçlarının sebep olduğu yumuşak doku zedelenmelerini en aza indirmek için yeni bir esnek tutucu tasarlamış ve üretmişlerdir. Bu pnömatik esnek tutucu; bir plastik kapak, bir plastik kabuk, 0.8 mm çapında iki küçük çubuk ve pnömatik şişirilebilir aktüatörden meydana gelmiştir (Guo ve ark., 2017).



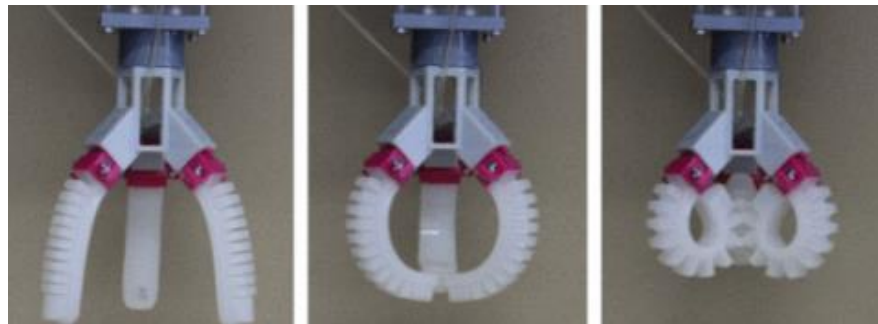
Şekil 1.2 Pnömatik yumuşak tutucu

Glick ve ark., gecko sürüngenlerinin yapışma özelliği ve akışkan elastomer aktüatörlerden esinlenerek ikisinin kombinasyonu sonucunda esnek tutucu üretmiştir. Gecko yapışma özelliği sayesinde diğer tutuculara göre daha düşük basınçlarda daha yüksek mukavemetli kavramalar gösterir (Glick ve ark., 2018).



Şekil 1.3 Gecko yumuşak tutucu

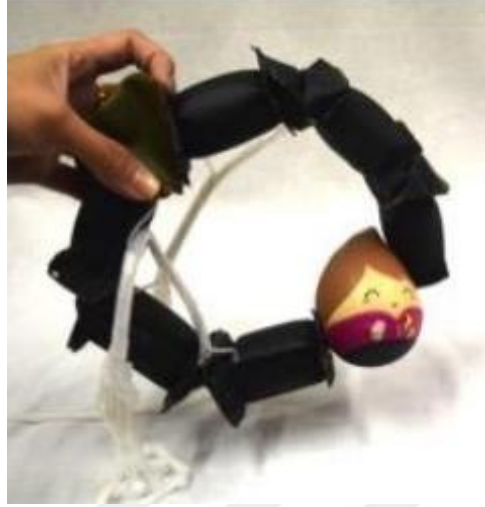
Zhu ve ark., tutulacak olan nesnenin şeklini kontrol edebilmek için esnek tutucuya bir eğim sensörü yerleştirilerek tasarımı ve imalatı anlatmışlardır. Yumuşak tutucu akışkan elastomer aktüatör prensibine dayalı 3 özdeş parmandan oluşmuş ve parmaklar Dragon Skin adı verilen silikon kauçuktan yapılmıştır. Her parmak geçmeli bir kilitleme sistemi ile robot kola bağlanmıştır (Zhu ve ark., 2017).



Şekil 1.4 Üç parmaklı esnek tutucu

Khin ve ark., yaptıkları çalışmada modüler tabanlı yumuşak robotik kavrayıcı tek başına yaklaşık 140 g ağırlığında, kumaş tabanlı döner aktüatörler (FRA) ve kırımlerin

bir araya getirilmesiyle oluşturulmuştur. İki kollu yumuşak tutucu yaklaşık 2,4 kilograma kadar olan nesnelere pnömatik basınçlı hava ile taşıyabilmektedir (Khin ve ark., 2017).



Şekil 1. 5 C şekilli tutucu

Terryn ve ark., yumuşak tutucular çalıştığı ortamdaki keskin nesnelere maruz kalarak kesik ve delikler gibi hasarlara yol açabileceğini söylemişlerdir. Ayrıca yumuşak tutucular aşırı basınç veya aşınma nedeniyle de delikler ve sızıntılara maruz kalabilir. Bu çalışmada ısıya dayanıklı kovalent bağlardan oluşmuş DielsAlder polimerleri kullanarak kendi kendini yenileyen esnek pnömatik tutucular ele alınmıştır (Terryn ve ark., 2017).



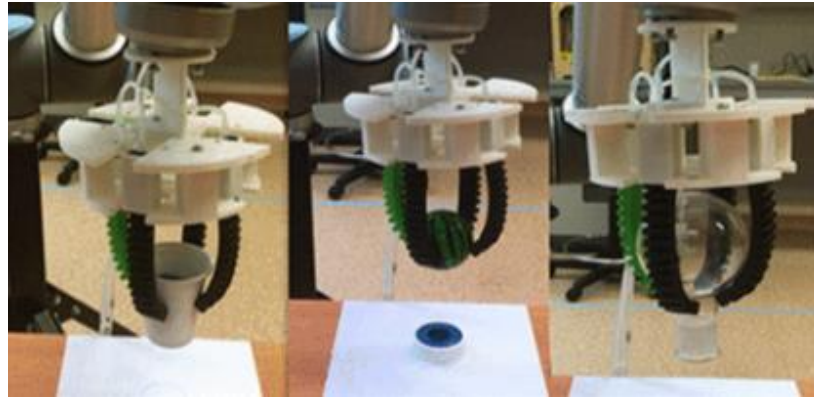
Şekil 1. 6 Dört parmaklı esnek tutucu

Shepherd ve ark., yaptıkları çalışmada sade bir tutucuyu düşük basınçlı hava ile pnömatik olarak çalıştırılmıştır. Pnömatik kanal tasarımı, PneuNet (PN) mimarisine dayanmaktadır. PN'ler, uzayabilir bir elastomer tabakasına gömülmüş ve uzayamaz bir tabakaya bağlanmış bir dizi odacıktır. Bu odalar, çalıştırma sırasında balonlar gibi şişer. Uzatılabilir üst katman ile uzamaz alt katman arasındaki gerilim farkı, basınç uygulandığında PN'nin bükülmesine neden olur. PN'nin bükme hareketini, odacıklarının yönü, boyutu ve sayısı aracılığıyla ayarlanır (Shepherd ve ark., 2011).



Şekil 1. 7 PneuNets esnek tutucu

Low ve ark., kavrama manipülasyonunu iyileştirmeyi ve operatörlere algılama, geri bildirim sağlamayı amaçlayan, sensörlü 3 boyutlu baskılı yumuşak robotik kavrayıcı ve yumuşak kumaş tabanlı dokunsal eldivenden oluşan hibrit bir tele-manipülasyon sistemi sunmuştur. Yumuşak dokunsal eldiven, kullanıcıların kavramayı kontrol etmesini, kavramanın başarılı olup olmadığını belirlemesini ve kavranan nesne şeklini tanımlamasını sağlayan esnek sensörler ve yumuşak pnömatik haptik aktüatör ile donatılmıştır. Kumaş bazlı yumuşak pnömatik haptik aktüatör, kullanıcılara kuvvet geri bildirimini üretmek haptik algıyı simüle edebilir. 50 g ile 1100 g arası nesnelere tutma yeteneğine sahiptir. Mevcut yumuşak kavrayıcılarla karşılaştırıldığında, kullanıcılara dokunsal geri bildirim sunarak robotik kavrama manipülasyonunu geliştirme potansiyeline sahip yumuşak kumaş tabanlı bir dokunsal eldiven ile birleştirilmiş ilk yumuşak sensörlü 3 boyutlu baskılı kavrayıcıdır (Low ve ark., 2017).



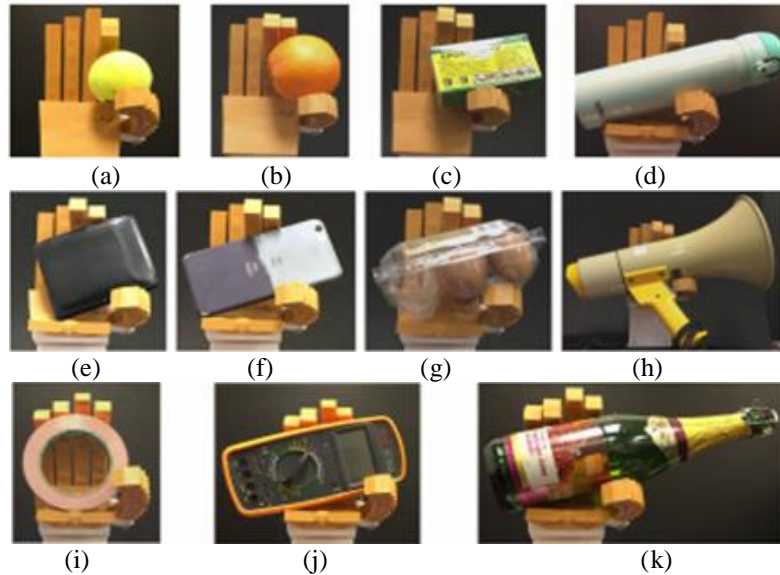
Şekil 1. 8 Haptik yumuşak tutucu

Homberg ve ark., Baxter robotunun bileğine kolayca takılabilen üç parmaklı bir tutucu tasarladı. Nesnelere tutarken uygulanacak kuvveti ayarlamak için her bir parmağa direnç bükülme sensörleri eklendi. Düzgün olmayan şekilleri tutarken sensörler sayesinde her bir parmağın uyguladığı kuvvet birbirinden farklıdır. Bu robot el, güçlü proprioseptif yumuşak tutucuya doğru ilk adımdır (Homberg et al., 2015).



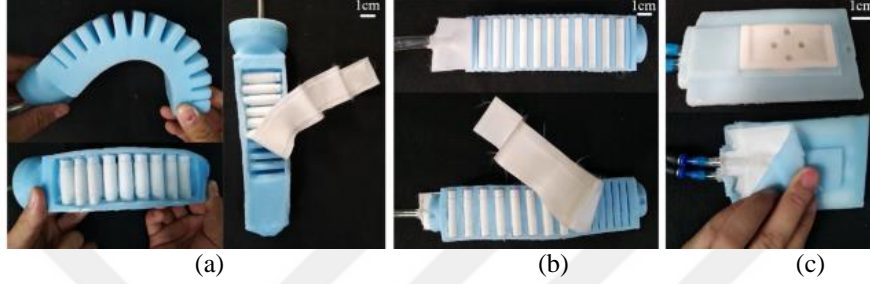
Şekil 1.9 Baxter robotik tutucu

Yang ve ark., yeni tasarlanmış bir yumuşak akıllı robotik elde, konum geri bildiriminin olmaması ve yumuşak malzemelerin rijitliğinin düşük olması nedeniyle yüksek kuvvet/mukavemet sunamama gibi bu iki zorluğu ele alıp çalışmalar yapmıştır. Bu el, tamamı bağımsız olarak çalıştırılabilen beş parmak ve bir avuçtan oluşur. Parmaklar, basınçlı hava ile çalıştırılabilen hava geçirmez aktif oda ve gevşek düzenlenmiş parçacıklarla dolu bir pasif oda olarak tasarlanmıştır. Bükülme sırasında pasif oda içindeki parçacıklar basınçlı hava ile sıkıştırılarak pasif sıkışma meydana gelir. Bu pasif sıkışma sonucunda parmakların sertliği güçlendirilerek elde daha büyük kuvvet çıkışı ve yük tutma kapasitesi sağlanır. Ayrıca, iletken elastomerlerden yapılan konum geri bildirim modülleri, imalat sırasında entegre edilir. Bu araştırmada, bir el prototipi üretilerek, özellikleri ve performansı ile ilgili çeşitli deneyler yapılarak değerlendirilmesi yapılmıştır (Yang ve ark., 2020).



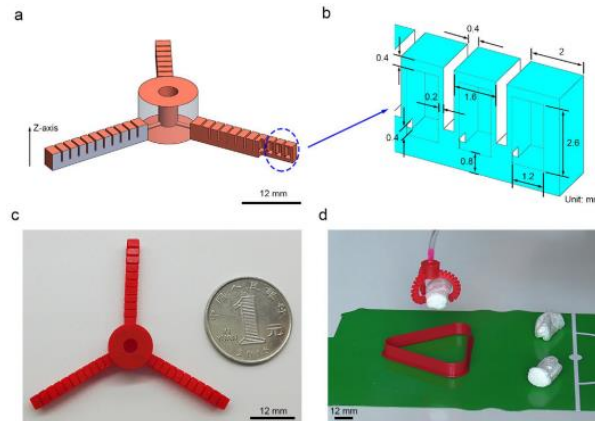
Şekil 1.10 Çeşitli nesnelerle kavrama yeteneğinin gösterimi (a) Bir beyzbolu başparmaklarıyla kavramak (b) Bir portakalı başparmak, işaret ve orta parmaklarla kavramak (c) Bir kutuyu başparmak, işaret ve orta parmaklarla kavramak (d) Metal bir şişeyi başparmak, işaret parmağı ve avuç içi ile kavramak (e) Bir cüzdanı başparmak, işaret parmağı, orta ve avuç içi ile kavramak (f) Cep telefonunu tutmak (g) Yumurtalarla dolu plastik bir kutuyu kavramak (h) Bir hoparlörü kavramak (i) Beş parmağın tümü ve avuç içi ile bir bakır bant rulosunu kavramak (j) Dijital multimetreyi kavramak (k) Şampanya şişesini kavramak

Li ve ark., gömülü maça dökümü yöntemi ile yüksek kuvvetli bir yumuşak pnömatik aktüatör (SPA) üretmişlerdir. Bu üretim iki aşamada yapılmıştır. Birincisi, elyaf takviyeli hava yastığından oluşan bir çalıştırma çekirdeği ve yumuşak malzemelerden yapılmış elastik tutucu olmak üzere iki parça halinde bağımsız olarak üretilir. İkincisi, her iki parça da montaj ve yeniden döküm teknikleri ile bir araya getirilerek bitmiş bir aktüatör üretilir. Bu çalışma, fiber takviyeli aktüatörler için üretim sürecini iyileştirmeye yardımcı olur (Li ve ark., 2020).



**Şekil 1. 11** Bükülen bir SPA'nın üretim görüntüleri (a) Bir uzayan SPA (b) Bir çift odacıklı SPA (c) Bölünmüş prototipler

Ge ve ark., bir masaüstü dijital ışık işleme (DLP) 3D yazıcı kullanarak, çok boyutlu yumuşak pnömatik aktüatörleri yüksek hız ve hassasiyetle üretmişlerdir. Yapılan deneyler, yazıcımızın 87,5 µm boyutuna kadar küçük özelliklere sahip nesnelere basabildiğini göstermiştir. Baskı işlemi, projeksiyon mikrostereolitografi yöntemine dayanmaktadır. İlk önce, pnömatik ağ (PneuNet) aktüatörleri bir bütün olarak yazdırılmıştır. Aktüatörlerin deformasyon kapasitesini test etmek için bir dizi aktivasyon deneyi ve sonlu eleman yöntemi analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca 0,4 mm genişliğinde kare hava kanallarına ve 0,2 mm kalınlığında hazne duvarlarına sahip üç mikro pnömatik aktüatör içeren yumuşak bir pnömatik tutucu tasarlanmıştır. Tutucuyu, DLP 3D yazıcıyla 30 dakikadan daha kısa sürede üretmişlerdir. Tutucunun kavrama kabiliyeti deneylerle de doğrulanmıştır (Ge ve ark., 2018).



**Şekil 1. 12** DLP yöntemiyle yumuşak tutucunun üretim süreci (a) Tutucunun 3B CAD modeli (b) Pnömatik aktüatör odalarının özel boyutları (c) DLP baskılı tutucu (d) Tutucunun kavrama deneyi

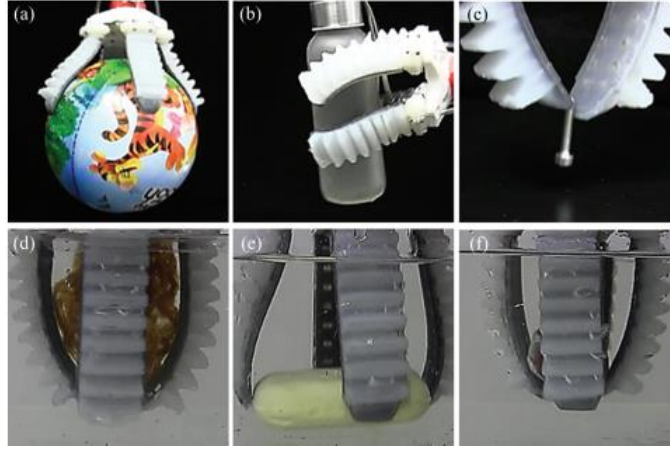
Xu ve Liu, lineer elastik rijit malzemelerde kullanılan tek nokta temas yaklaşımı nedeniyle oluşan, yumuşak aktüatörün bitişik hava odaları arasındaki karşılıklı penetrasyon problemini aşmak için çok noktalı bir temas yaklaşımı geliştirmişlerdir. Bu model çubuk tabanlı model ile karşılaştırıldığında elde edilen sonuçlar deneysel verilerle daha tutarlıdır ve simülasyon hassasiyeti de artırılmıştır (Xu ve Liu, 2020).



**Şekil 1. 13** Yumuşak aktüatörün deforme olmuş hali

Hao ve ark., çift yönlü bir yumuşak aktüatörün optimizasyon parametresini sunmuşlar ve aktüatörün özelliklerini değerlendirmişlerdir. Haznenin üst kama açısının (aktüatör yapısının kama şekli için açı) aktüatörün söndüğünde bükülme boyutu üzerindeki etkisini araştırmak için sistematik simülasyon gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca, aktüatörün genişliğini ve iki katmanın malzeme kombinasyonlarını deformasyon performansı ile ilişkisini araştırmışlardır.

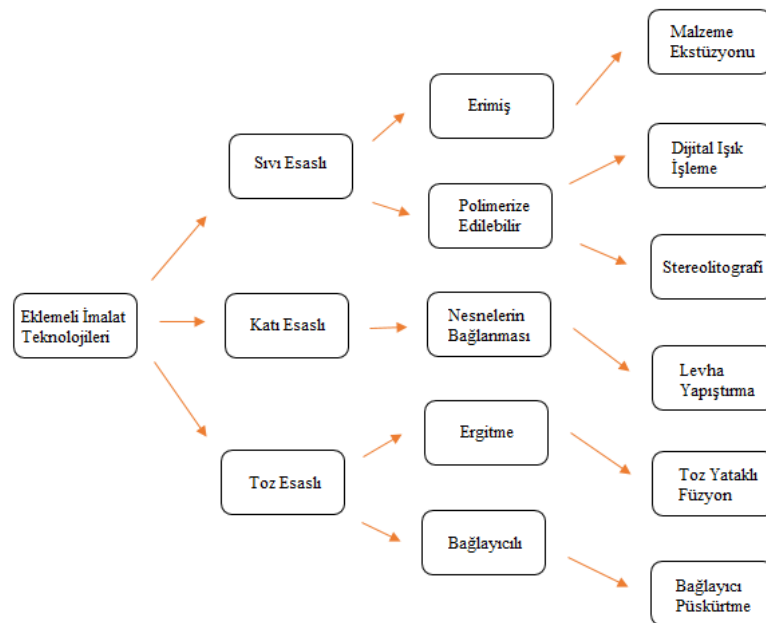
Aktüatörün hem havada hem de su altında bükülme yarıçapı ve çalışma süresi nicel olarak ölçülmüştür. Aktüatörün etrafındaki akış modellerini gözlemlemek için su altında dijital parçacık görüntü hızı deneyleri yapılmıştır. Üst kama açısının, aktüatörün söndürüldüğünde dışa doğru bükülmesi üzerine önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Üç boyut baskılı sert bir desteğe dört aktüatörün monte edilmesiyle oluşturulan yumuşak kavrayıcı, prototipin amfibi ortamlarda farklı boyut, şekil ve sert nesnelere kavrayabildiği gözlemlenmiştir (Hao ve ark., 2017).



**Şekil 1. 14** Yumuşak kavrayıcının kavrama performansı (a) 170 mm çapında küreyi (b) 250 g ağırlığında bardağı (c) 3 mm çapında bir vidayı (d) Kabuk demetini (e) Bir parça sabun (f) Bir üzüm

### 1.3 Eklemeli Üretim Yöntemleri

Eklemeli imalat teknolojisi dijital verinin nesneye dönüştürülme sürecini içermektedir (Şekil 1.15). Sürecin ilk adımında bilgisayar destekli tasarım programları (CAD/CAM) yardımıyla, üretilmesi istenen parça modellenir. Ardından üç boyutlu model dilimlenir, STL formatına dönüştürülür ve baskı gerçekleştirilir. 3D baskım sırasında, her katmanın üzerine bir sonraki katman eklenerek, katmanlı bir yapı oluşturulur. İşlem sonrasında, kullanılan yöntem ve malzemeye bağlı olarak ısıl işlem, yüzey işlemleri gibi bitirme işlemleri tercih edilebilmektedir. Eklemeli imalat teknolojisi çeşitli yöntemleri içermektedir. Bu yöntemler, malzeme türüne ve üretilecek ürünün kullanım alanına göre tercih edilebilmektedir (Şekil 1.15). Bu bölümde 3D baskı sürecinde en çok tercih edilen altı yöntem incelenmiştir (Bozkurt ve ark., 2021).

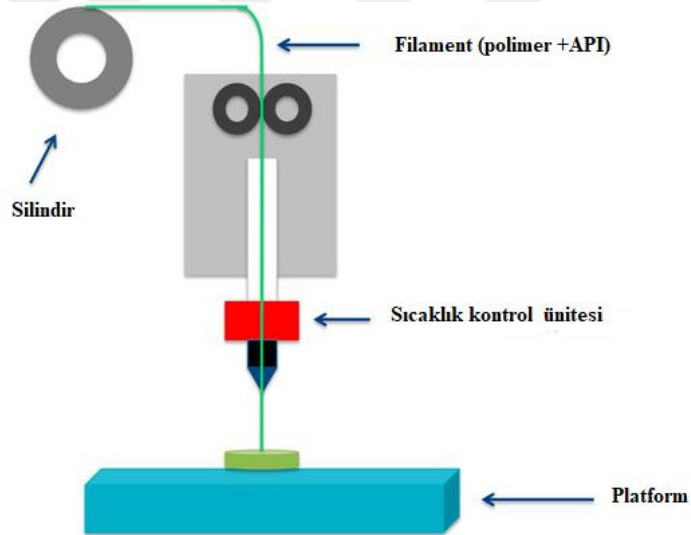


**Şekil 1. 15** Eklemeli imalat teknolojisinin sınıflandırılması

### 1.3.1 Eriyik Yığıma Modelleme (FDM)

Eriyik yığıma modelleme (FDM) teknolojisi temel olarak yüzey kimyasına, termal enerjiye ve bir katman üretim sürecine dayanmaktadır. Yöntem yaygın olarak polimer malzemeler için tercih edilmektedir. Bu nedenle ana malzeme olarak genelde termoplastik malzemeler kullanılır ve termoplastik malzeme çoğunlukla filament şeklindedir. Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) ve polilaktik asit (PLA) bu yöntem için sık kullanılan termoplastik polimerlerdir.

Başlangıçta kullanılan polimerler camsı geçiş sıcaklıklarının üzerine ısıtılır. Filament deki malzeme, hazırlanmış bir 3B CAD modelinden oluşturulan kesit verilerine göre bir katmanı ekstrüde eden özel olarak tasarlanmış bir kafada eritilir. Ekstrüde edildiğinde soğutulur ve böylece modeli oluşturmak için katlaşır. Model, diğer RP teknolojilerinde olduğu gibi her katmanı aşağıdan yukarıya doğru art arda istifleyerek ve biriktirerek üretilir (Ahn ve ark., 2009).

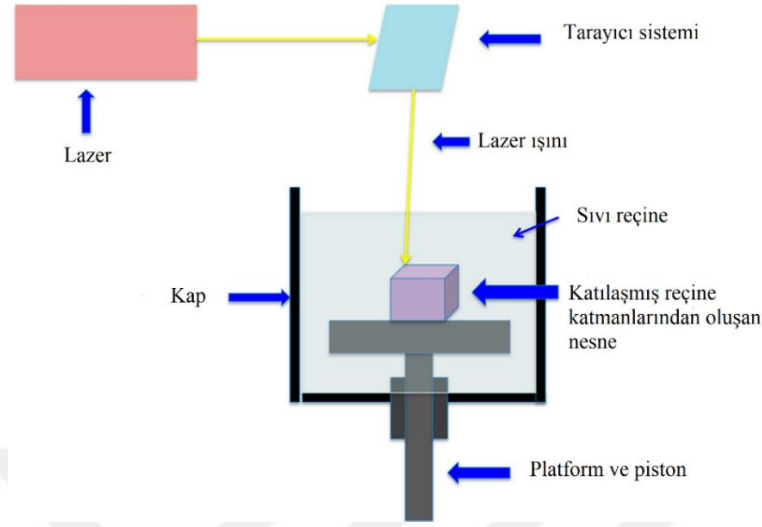


Şekil 1. 16 FDM nin çalışma prensibi

### 1.3.2 Stereolitografi (SLA)

Vat polimerizasyon yönteminin prensibi, sıvı fotopolimer reçinesinin ışık enerjisiyle sertleştirilmesine dayanmaktadır. Her katman için görüntü, katman şekline bağlı olarak UV ışığı ile tüm yüzeye yansıtılır. İstenilen geometri, katman katman oluşturulur. Stereolitografi ve Dijital Işık İşleme (DLP) teknolojileri vat polimerizasyon yöntemlerindedir. SLA, istenen numuneleri elde etmek için platform üzerine yansıtılan bir lazer kaynağı kullanan eklemeli üretim şeklidir. Bu ışık demeti, foto-başlatıcılara sahip polimerik reçine ile dolu bir sıvı tankından geçer ve ışın yörüngesinin çarptığı yüzey alanlarında seçici sertleştirmeyi üretir. Kütleme işlemi, numunenin doğru şekilde

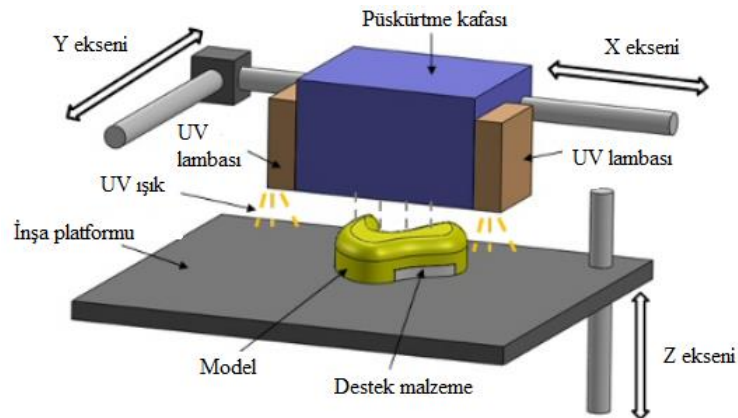
büyümesine ve bina yatağına bağlanmasına yardımcı olan desteklerle numunenin desteklendiği, katman katman bir yapının ardından platform düzleminde yapılır (Martín-Montal ve ark., 2021).



Şekil 1. 17 SLA'nın çalışma prensibi

### 1.3.3 Polyjet Modelleme (PJM)

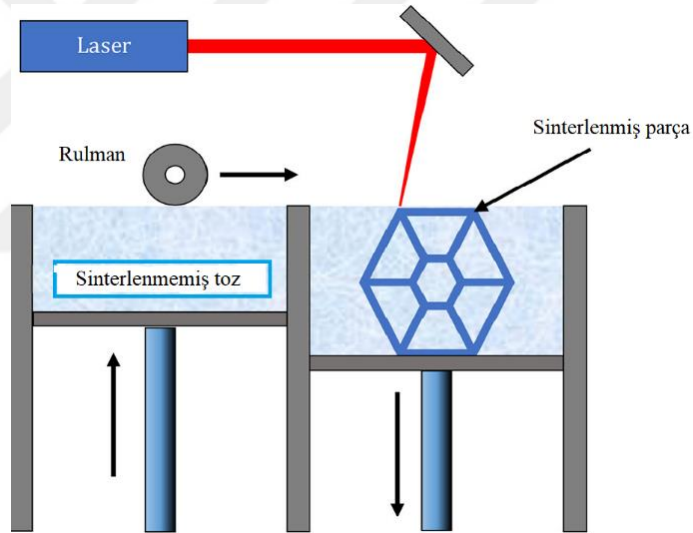
Polyjet 3D baskı tekniği, inkjet teknolojisi ile fotopolimerizasyon sürecini birleştirerek, katman katman parçaların oluşturulmasından meydana gelir. Ana adımlar şunlardır; ön işleme, işleme ve işleme sonrası. Ön işleme adımında, oluşturma tepsisindeki parça yönü, Objet Studio yazılımı kullanılarak optimize edilir. Bir sonraki adımda, reçine damlacıkları, 16 mikronluk katmanlar halinde, bir inkjet baskı kafası aracılığıyla yerleşik bir tepsi üzerine biriktirilir, her katman UV ışığı ile sertleştirilir. Yapı tepsisi aşağı doğru hareket eder ve süreç parça tamamlanana kadar katman katman devam eder. Model ve destek olmak üzere iki farklı fotopolimer malzeme kullanılmıştır. Son adımda, bir su jeti geri dönüşüm istasyonu kullanılarak destek malzemesi çıkarılır. PolyJet tekniği ile elde edilen parçaların hassasiyeti 0,1mm'dir (Udroiu ve Braga, 2017).



Şekil 1. 18 PJM'nin çalışma prensibi

### 1.3.4 Seçici Lazer Sinterleme (SLS)

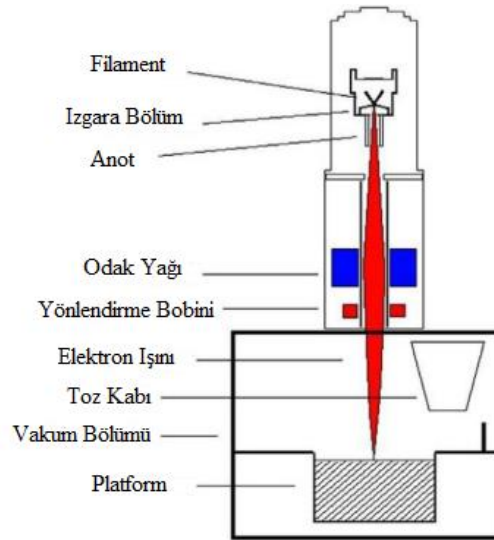
Toz yataklı füzyon yöntemlerinin temel prensibi, ince toz serilmiş bir tabakanın, lazer enerji kaynağı ile taranmasına dayanmaktadır. İşlemin tekrar edilmesiyle katmanlı imalat gerçekleştirilir. Seçici lazer sinterleme (SLS), seçici lazer ergitme (SLM) ve elektron ışın ergitme (EBM) yöntemlerini içermektedir. SLS, toz halindeki malzemeyi eritmek ve bağlamak için lazer veya elektron ışını kullanan tekniklerden olan toz yataklı füzyon (PBF) işlemleri sınıfına aittir. Lazer sinterleme makineleri üç bileşenden oluşur; malzemeyi eritmek için bir ısı kaynağı, ısı kaynağını kontrol etmek için bir yöntem ve öncelikle yeni malzeme katmanları eklemek için bir mekanizma. Toz haline getirilmiş malzeme, yapım süreci boyunca nesneye yeterli desteği sağladığından, SLS işleminin herhangi bir ek destek yapısı gerektirmemesi gibi büyük bir avantajı vardır. SLS işlemleri için yaygın olarak kullanılan farklı malzemeler arasında plastik, metal, cam, seramik ve kompozitler bulunur (Tagliaferri ve ark., 2019).



Şekil 1. 19 SLS çalışma prensibi

### 1.3.5 Elektron Işınlı Ergitme (EBM)

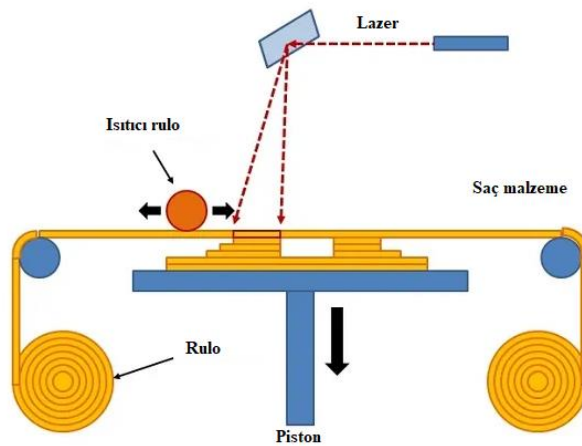
Elektron ışınlı ergitme (EBM) işlemi sırasında, malzeme tozu, toz hazneleri tarafından sağlanır ve bir tırmıkla yapı platformu üzerinde tek bir katman halinde eşit olarak dağıtılır. Bu katmandaki toz, elektron ışını tarafından seçici olarak sinterlenir. İlk katman tamamlandıktan sonra, yapım platformu alçalarak yeni bir toz katmanının birinci katmanının üzerine eşit şekilde dağılmasına izin verir. Bu yeni toz tabakası tekrar seçici olarak sinterlenir. İşlem, eksiksiz bir 3B geometri oluşturulana kadar devam eder (Zhai ve ark., 2016).



Şekil 1. 20 EBM çalışma prensibi

### 1.3.6 Lamine Nesne İmalatı (LOM)

Lamine nesne imalatı işlemi, kesilmiş malzeme katmanlarının birbirine yapıştırılmasıyla serbest biçimli bir katı nesnenin oluşturulduğu bir üretim tekniğidir. Sistemin ana bileşenleri, bir levhayı bir yapı platformu üzerinde ilerleten bir besleme mekanizması, levhayı aşağıdaki tabakaya yapıştırmak için basınç uygulayan ısıtılmış bir silindir ve her tabaka tabakasındaki parçanın ana hatlarını kesmek için bir lazerdir. Parçalar, bir öncekinin üzerine yapışkan kaplı sac malzeme katmanlarının istiflenmesi, yapıştırılması ve kesilmesiyle üretilir. Bir lazer, parçanın ana hatlarını her katmana keser. Her kesim tamamlandıktan sonra, platform sac kalınlığına eşit bir derinlikle alçalır ve daha önce biriktirilen katmanların üzerine başka bir sac ilerletilir. Platform daha sonra hafifçe yükselir ve ısıtılmış silindir, yeni katmanı yapıştırmak için basınç uygular. Lazer ana hattı keser ve parça tamamlanana kadar işlem tekrarlanır. Bir katman kesildikten sonra, parçayı desteklemek için ekstra malzeme yerinde kalır (Kalmanovich, 1996).



Şekil 1. 21 LOM çalışma prensibi

## 1.4 Tez İçeriği

Bu tez çalışması 4 başlık altında incelenmiştir. Bunlar;

- Giriş bölümü,
- Materyal ve Metot bölümü,
- Bulgular ve Tartışma bölümü,
- Sonuçlar bölümü.

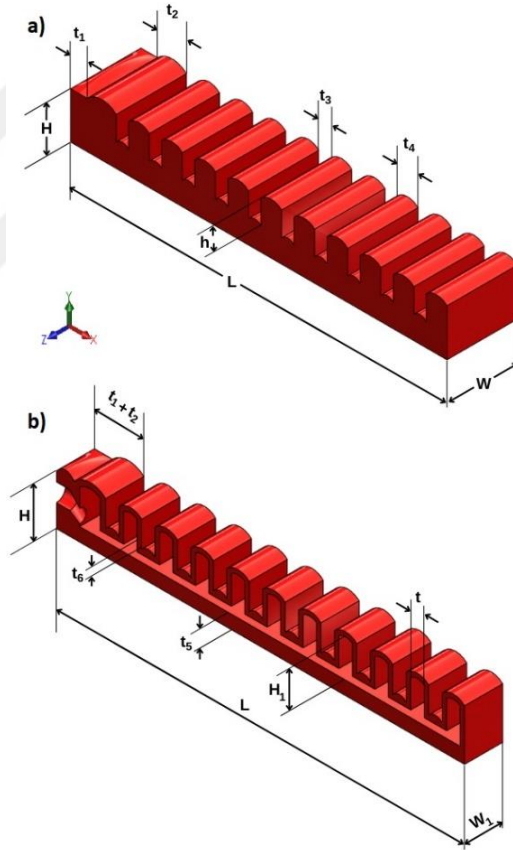
Giriş bölümünde, tez çalışması hakkında bazı temel ve önemli bilgiler verilmiştir. Öncelikle sistemin amacı açık bir şekilde tanımlanmıştır. Ayrıca, esnek elektropnömatik tutucu ile ilgili olarak yapılmış çalışmaların tasarımları ve kontrol stratejileri için literatür taraması anlatılmıştır. İkinici blmde, esnek elektropnömatik tutucunun tasarım ve eklemeli üretim süreci ile birlikte sonlu elemanlar analizleri anlatılmıştır. nc blmde, esnek tutucunun yer değiştirme ve konum kontrolü uygulanmasının detayları ve deneysel çalışmalar sunulmuştur. Dördüncü blmde, sistemin genel olarak sonuçları hakkında bilgi verilerek tez çalışması tamamlanmıştır.

## 2. MATERYAL ve METOT

### 2.1 Tasarım Süreci

#### 2.1.1 Esnek Elektropnömatik Tutucunun Tasarımı

Bu bölümde, esnek elektropnömatik tutucunun 3D tasarım süreci anlatılmıştır. Tasarım süreci bilgisayar destekli tasarım programlarından biri olan SolidWorks yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Temas olgusunu ortaya çıkarmak ve elektropnömatik tutucunun mekanik özelliklerini tahmin etmek için çok noktalı temas yaklaşımı ile geliştirilen model Şekil 2.1 (a)'da gösterilmiştir. İki hava odasının yarısı, tutucunun içyapısını göstermek ve geometrik yapının simetrisini elde etmek için derinlemesine görüntüsü alınmıştır (Şekil 2.2 (a)).

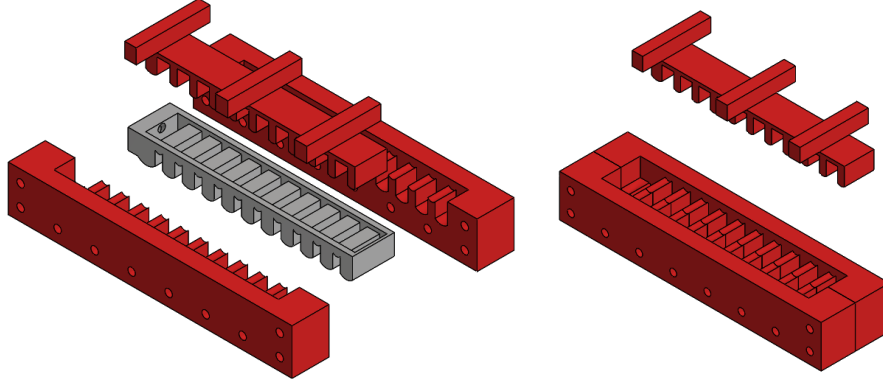


**Şekil 2. 1** Esnek elektropnömatik tutucunun tasarımı (a) Tutucunun bütün görüntüsü (b) Tutucunun yarım görüntüsü

Mekanik tasarım açısından esnek elektropnömatik tutucu iki bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler, basınçlı hava ile çalışan 10 bölümden oluşmuş aktif oda ve PET film ile kaplanan pasif odadır. Tutucunun bükülmesi sırasında, pasif oda içindeki PET film, sıkıştırılmış hava tarafından sıkıştırılmaya başlar. Bunun sonucunda, tutucunun daha yüksek yük tutma kapasitesi gerçekleşir.

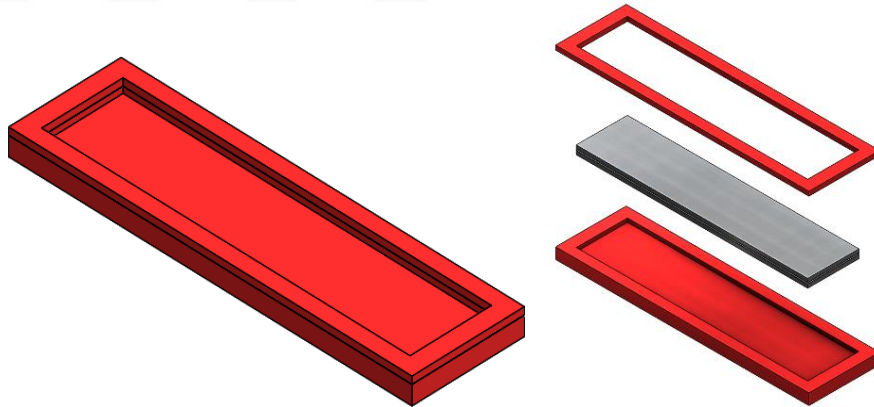
### 2.1.2 Kalıpların Tasarımı

Esnek tutucunun üretim sürecinde kalıplama tekniği kullanılmıştır. Yukarıda bahsedilen aktif ve pasif odalar bu teknik kullanılarak ayrı ayrı üretilmiş ve birleştirme işlemi yapılmıştır. Uygulanan basınçlı hava neticesinde yapısında şekil değiştirme meydana gelen 10 aktif odanın üretiminde kullanılan kalıp Şekil 2.2’de verilmiştir.



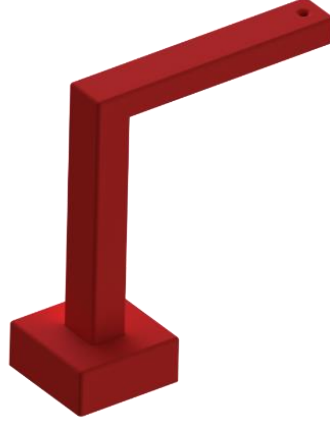
Şekil 2. 2 Esnek elektropnömatik tutucunun aktif odasının üretiminde kullanılan kalıp

Aktif odanın tasarım sürecinden sonra PET filmin yerleştirildiği taban kalıbın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu kalıbın tasarımı Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Taban kalıp iki bölümden oluşturulmuştur. PET film bu iki bölüm arasında yerleştirilerek sabitleme işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. 3 Esnek elektropnömatik tutucunun pasif odasının üretiminde kullanılan kalıp

Bir elektropnömatik valf ile esnek tutucuya hava uygulanmasının bir sonucu olarak, hazneler hava ile dolmaya başlar. Tutucunun özel boyutları:  $L=91$  mm,  $Y=11,15$  mm,  $H1=7,84$  mm,  $w=17$  mm,  $w_1=8,5$  mm,  $h=5,8$  mm,  $t=5$  mm,  $t_1=4$  mm,  $t_2=7$  mm,  $t_3=3$  mm,  $t_4=5$  mm,  $t_5=3$  mm ve  $t_6=1$  mm (Şekil 2.1). Tasarım sürecinde son olarak üretilen esnek elektropnömatik tutucunun yer değiştirme analizlerini yapmak için tutucu bir sistem tasarlanmıştır (Şekil 2.4). Böylelikle tutucunun sabitlenme süreci tamamlanmış ve hava uygulanarak yer değiştirmeleri gözlemlenmiştir.



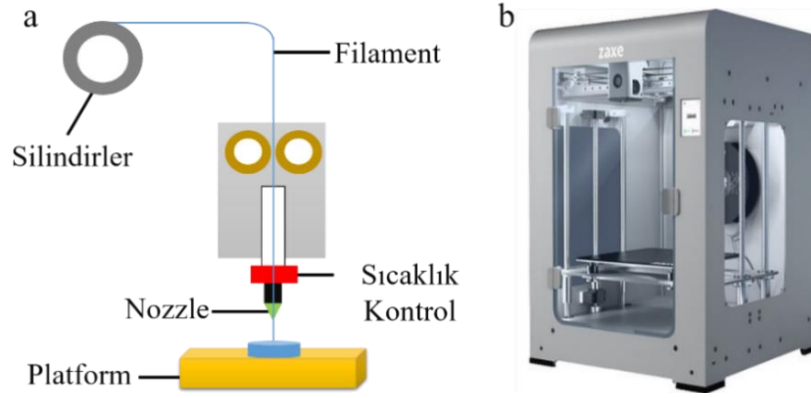
Şekil 2. 4 Esnek elektropnömatik tutucuyu sabitlemek için tasarlanan sistem

## 2.2 Üretim Süreci

### 2.2.1 Esnek Elektropnömatik Tutucunun Üretimi

Esnek elektropnömatik tutucunun eklemeli imalat yöntemiyle üretim süreci bu bölümde anlatılmıştır. Tutucunun üretimde kullanılan kalıplar eriyik yığıma modelleme (FDM) tabanlı 3D yazıcıyla üretilmiştir. FDM teknolojisinin çalışma prensibi Şekil 2.5 (a)'da gösterilmiştir. Şekilde gösterildiği üzere belirli bir makaraya sarılı, belirli kalınlıktaki termoplastik malzeme, ittiriciler yardımıyla hareket ettirilerek belirli sıcaklıkta ve üzerinde sıcaklık kontrol ünitesi bulunan nozul dan geçirilerek, kontrol sistemi ile istenilen parça üretilmektedir. FDM teknolojisinde inşa ve destek malzemesi olarak ABS, polikarbonat, PetG ve PLA gibi yüzlerce polimer malzeme kullanılır. ABS ve PLA, her iki malzeme de termoplastikler olarak bilinirler; ısıtıldıklarında yumuşayan hatta kalıplanabilen ve soğuduğunda ise katı bir şekle bürünebilirler. Bu malzemeler filament formuna getirilerek eklemeli üretimde kullanılmaktadır. Filamentler farklı çeşitlere sahiptir. Baktığımızda PLA, ABS ve PETG filamentler en sık kullanılan malzemelerdir. Bu 3 filament arasından ise en çok tercih edilen filament çeşidi ise PLA filamenttir.

Bu çalışmada FDM tabanlı üretim için 300x300x300 mm baskı hacmine ve 50-400 micron katman çözünürlüğüne sahip Zaxe Z1 Plus 3D yazıcı kullanılmıştır (Şekil 2.5 (b)). Bu yazıcıyla ABS, PLA, Nylon, Flex, PETG, Carbon Fiber ve Wood gibi malzemeler üretilmek mümkündür. Bu çalışmadaki kalıpların üretiminde ABS tipi filament malzeme tercih edilmiştir. Bu malzeme, düşük sıcaklıklarda dahi güçlü ve dayanıklı olan yapısı sayesinde ısı ve kimyasallara karşı iyi direnç gösterir ve işlenmesi kolaydır.



**Şekil 2. 5** Esnek elektropnömatik tutucunun üretiminde kullanılan yöntem ve ekipmanlar (a) FDM üretim süreci (b) FDM tabanlı 3D yazıcı

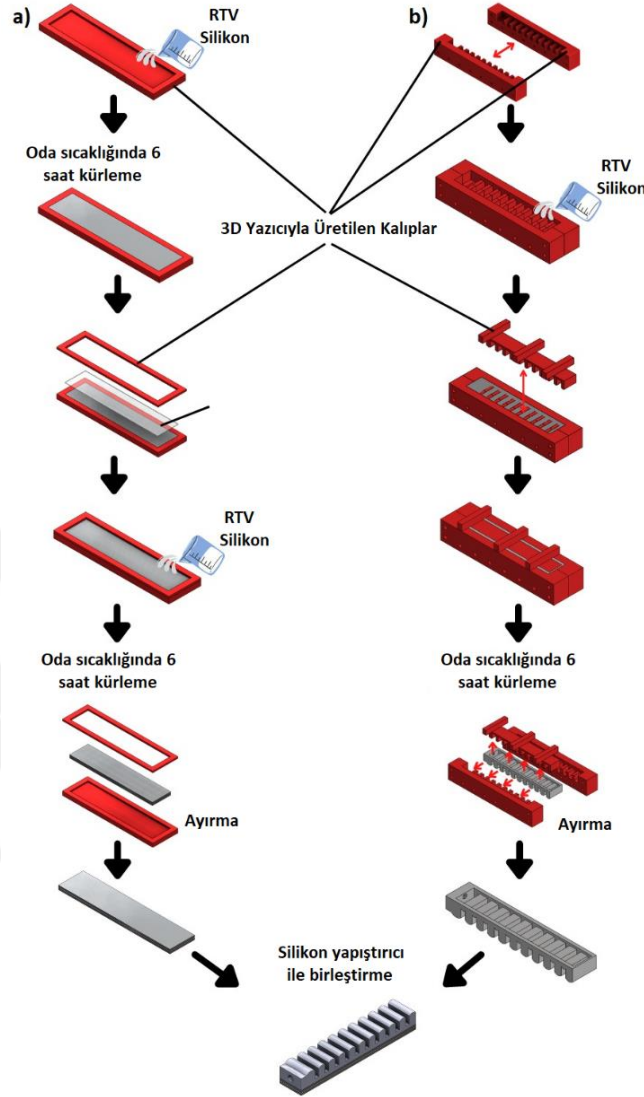
Esnek elektropnömatik tutucunun üretiminde kullanılan kalıpların 3D yazıcıyla üretilmiş görüntüleri Şekil 2.6'da verilmiştir. Üretimde kahverengi bir ABS filament tercih edilmiştir. Üç parça olacak biçimde üretilen kalıp vida ve somun aparatları kullanılarak birleştirilmiş ve içerisine silikon dökülerek esnek elektropnömatik tutucunun üretimi gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 2. 6** Esnek elektropnömatik tutucunun üretiminde kullanılan kalıplar

Esnek elektropnömatik tutucu alt ve üst katman olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Tutucunun çok aşamalı kalıp üretim süreci Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Bu çalışmada, daha önceki çalışmalarda hiç kullanılmayan oda sıcaklığında vulkanize (RTV-3015) kalıp silikonu esnek elektropnömatik tutucu malzemesi olarak uygulanmıştır. RTV silikonunun temel özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir. SPA tamamen RTV silikon malzemesi kullanılarak üretilmiştir. Bu malzemenin minimum büzülme, yüksek mukavemet, yüksek sıcaklık dayanımı ve tekrarlı kullanım gibi avantajları vardır. RTV'nin silikon katalizör ile karıştırılmasıyla hazırlanan kalıp malzemesi belirli bir süre

içerisinde oda sıcaklığında (minimum 10°C, maksimum 70°C) donar. Donma süresi katalizöre bağlı olarak 2-24 saat arasında değişir.



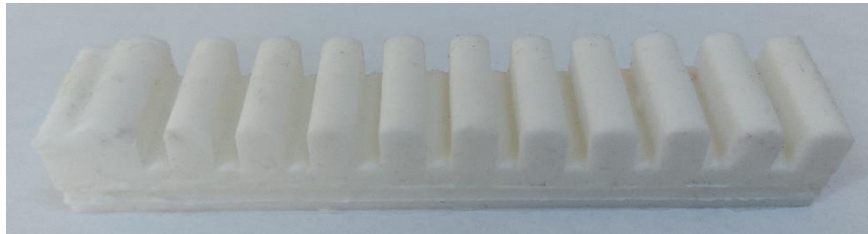
**Şekil 2.7** Esnek elektroaktif tutucunun üretim süreci (a) Tutucudaki pasif odanın üretimi (b) Tutucudaki aktif odanın üretimi

Esnek tutucudaki pasif odanın üretim süreci Şekil 2.7 (a)'da gösterilmektedir. Şekil 2.7 (a)'daki kalıp, bir 3D yazıcı tarafından üretilen iki gövdenin birleşimidir. Bu kalıp, yumuşak kavrayıcının uzayamayan alt tabaka kısmı için kullanılmıştır. Silikon malzeme kalıba dökülmeden önce %1 oranında katalizör eklenir. İlk adım, yumuşak silikon malzemenin kalıba dökülmesini ve oda sıcaklığında 6 saat kürlenmesini içerir. 200 µm kalınlığında bir PET film daha sonra kürlenmiş silikona yapışır. PET film, tutucunun sertliğini artırmak, şeklini korumak ve kavrama kabiliyetini artırmak için bir omurga görevi görür. PET film yerleştirildikten sonra 1,25 mm kalınlığındaki ikinci kalıp yerleştirilir ve ardından tüm kalıbı dolduracak şekilde RTV silikonu dökülür. Kalıplar çıkarılır ve kürlenme işleminden sonra pasif oda elde edilir.

**Çizelge 2. 1** RTV silikonunun temel özellikleri

<b>Fiziksel Özellikleri</b>	
Özgül ağırlık	1,29 g/cc
Viskozite	80000 cP
<b>Mekanik Özellikler</b>	
Sertlik, Shore A	59
Çekme dayanımı	650 psi
Kopma uzaması	200 %
Yırtılma dayanımı	85
<b>Tanımlayıcı Özellikler</b>	
Renk	Beyaz
Karışım oranı	10
Çalışma süresi	90

Esnek tutucudaki aktif odanın üretim süreci Şekil 2.7 (b)'de verilmiştir. Oda tabanlı yapı için Şekil 2.6'da verilen 3D baskılı bir kalıp kullanıldı. Bu kalıp, uzayabilir üst tabakayı oluşturmak için kullanıldı. İlk olarak silikon malzeme 3D baskılı kalıba dökülüyor. Kalıpta 6 saatlik kürleme süresinden sonra tutucu kalıptan çıkarılır. Kürleme işleminden sonra, hava sızıntısını önlemek ve esnekliği korumak için her iki katman da bir silikon kauçuk katmanıyla birleştirilir. Birleştirme sonucunda ortaya çıkan esnek elektropnömatik tutucunun görüntüsü Şekil 2.8'de verilmiştir.

**Şekil 2. 8** Kalıplama tekniğiyle üretilen esnek elektropnömatik tutucu

### 2.3 Sonlu Elemanlar Analizi

COMSOL programı, Group şirketi Svante Littmarck ve Farhad Saeidi tarafından 1986 yılında kurulmuştur. Şirket 1998 yılında, COMSOL Multiphysics®'in ilk versiyonunu piyasaya sürmüştür. Daha sonraki yıllarda, yapısal mekanik, yüksek frekanslı elektromanyetik, akışkan akışı, ısı transferi, kimyasal reaksiyonlar ve akustik gibi birçok araç kutusuna sahip ürünlerini piyasaya sürmüştür. Bu program hava ile çalışan sistemlerin analizleri için piyasadaki en iyi programlardan biri olup birçok kurum tarafından da kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, esnek elektropnömatik tutucunun sonlu elemanlar analizleri COMSOL programı ile yapılmıştır. COMSOL programının akışkanlar araç kutusu

kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu program ile ilgili temel analiz adımları bu bölümde verilmiştir. COMSOL Multiphysics Platformu, pnömötik tutucunun analizi için aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır.

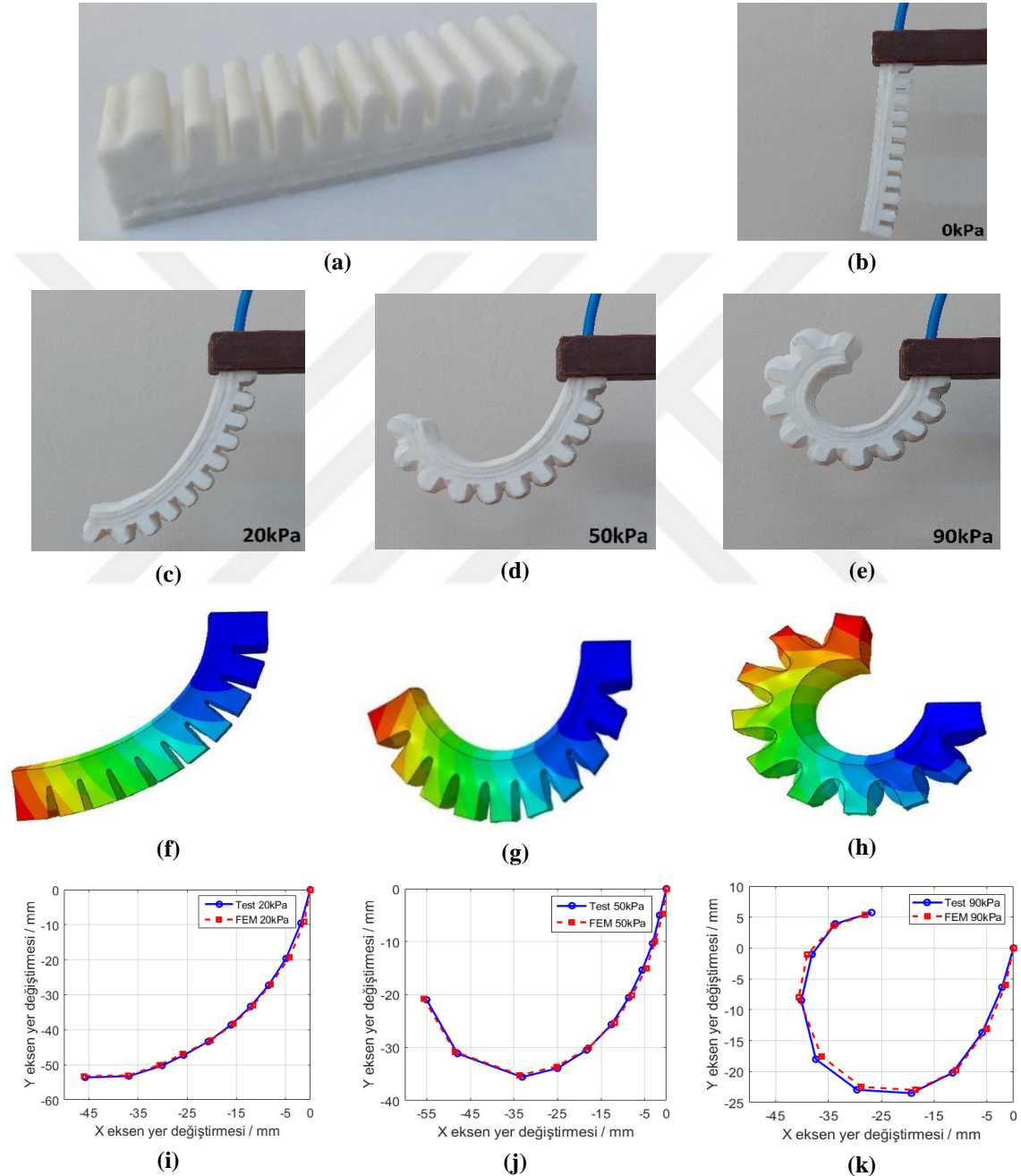
- Program Setup-Program Başlatılması
- Defining Parameters-Parametrelerin Tanımlanması
- Building Geometry-Geometrinin Yapılması
- Defining Materials-Malzeme Tanımlanması
- Defining Mesh-Mesh İşleminin Yapılması
- Configuring Study-Sonuç için Çalışmanın Gerçekleştirilmesi

Yukarıda verilen adımlar sırayla uygulanarak esnek elektropnömötik tutucunun analizi gerçekleştirilmiştir. Parametre tanımlama sürecinden sonra analizi yapılacak tasarımın oluşturulması gerekmektedir. Bunun için gerekli olan bilgisayar destekli tasarımı (CAD) hem COMSOL hem de SolidWorks programlarıyla yapılmıştır. Gerekli malzeme tanımlaması sürecinden sonra mesh işlemleri yapılarak sonlu elemanlar analizi tamamlanmıştır.

Esnek elektropnömötik tutucunun sonlu elemanlar analizi sonuçlarını gerçek zamanlı yer değiştirme değerleriyle kıyaslamak için bir dizi deneysel çalışma yapılmıştır. Öncelikle, elektropnömötik tutucunun stabilitesini sağlamak için bir 3D yazıcıda tutucu sistemi üretilmiştir. Bu sistem ile ilgili detaylar Bölüm 2.1’de verilmiştir. Daha sonra, esnek elektropnömötik tutucu Şekil 2.9 (a)’daki gibi kalıplama tekniğiyle üretilmiştir. Deney süresince tutucunun çalışma süreci kayıt altına alınmıştır. Elektropnömötik oransal valf (FESTO, MPYE5-1/8-HF-010 B) tarafından kontrol edilen farklı basınçlarla tutucunun yer değiştirmesi milimetrik kâğıt kullanılarak ölçüldü. Böylelikle istenilen basınç seviyesinde elektropnömötik tutucunun yer değiştirmesi hesaplanmıştır. Şekil 2.9 (c)-(e)’de verilen görüntüler milimetrik kâğıt çıkarıldıktan sonra çekilmiştir. Şekil 2.9 (b)-(e), esnek tutucunun sırasıyla 0 kPa, 20 kPa, 50 kPa ve 90 kPa basınçlar altındaki yer değiştirmesini göstermektedir. Bükülen tutucu, hava basıncı 90 kPa değerini aştığında hareketinde bozulmalar ortaya çıkmıştır.

Bu yer değiştirme değerleri COMSOL programında yapılan sonlu elemanlar analiziyle kıyaslanmıştır. Elektropnömötik esnek tutucunun çeşitli basınçlar altında yer değiştirmesinin sonlu elemanlar analiz sonuçları, Şekil 2.9 (f)-(h)’de gösterilmektedir. Ayrıca esnek tutucuların çeşitli basınçlar altında yer değiştirme değerlerinin deneysel ve analiz sonuçları da karşılaştırılmıştır. Yer değiştirme değeri, eğri üzerinde işaretlenmiş

bir dizi eşit aralıklı nokta ile gösterilir (Şekil 2.9 (i)-(k)). Deneysel çalışmalar beş kez gerçekleştirildi ve Şekil 2.9 (i)-(k)'de gösterildiği gibi analiz sonuçlarıyla karşılaştırmak için ortalama değerler kullanıldı. Şekil 2.9 (i)-(k)'den bu çalışmanın deneysel sonuçlarının simülasyon sonuçlarıyla örtüştüğü görülmektedir. Esnek elektropnömatik tutucunu nispeten düşük hava basıncı altında yeterli büyük yer değiştirme gösterdiği de tespit edilmiştir.



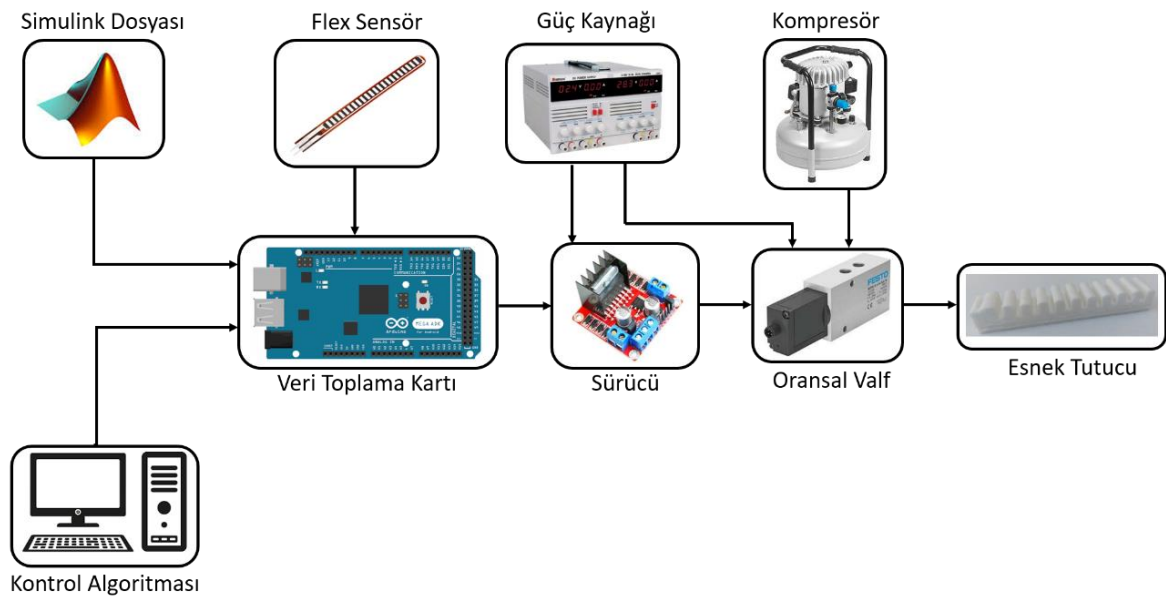
**Şekil 2. 9** Esnek tutucunun sonlu eleman simülasyonu ve deneysel sonuçlar (a) Orijinal boyutta esnek elektropnömatik tutucunun fabrikasyon bir görüntüsü (b)-(e) Tutucunun 0 kPa, 20 kPa, 50 kPa, 90 kPa giriş hava basıncı altında çalıştırma deneyi (f)-(h) 20 kPa, 50 kPa, 90 kPa giriş hava basıncı altında tutucunun deformasyonunun FEM sonuçları (i)-(k) 20 kPa, 50 kPa, 90 kPa giriş hava basıncı altında esnek tutucunun deneysel ve FEM sonuçlarının karşılaştırılması

## 2.4 Elektronik Sistem Tasarımı

Esnek elektro pnömatik tutucunun kontrol sisteminin elektronik şeması Şekil 2.10'da verilmiştir. Tutucunun yer değiştirmesi veya bükülmesi uygulanan pnömatik hava ile gerçekleşmektedir. Gerekli olan bu hava kaynağı kompresör ile sağlanmaktadır. Kompresör tarafından sağlanan havanın aktüatörlere akışını kontrol etmek için bir L298N sürücü kartı ve oransal yön kontrol valfi kullanılmıştır. Hava akış kontrolü, darbe genişlik modülasyonu (PWM) tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Oransal valf için 24 V ve sürücü için ise 12 V güç kaynağı kullanılmıştır.

Esnek elektro pnömatik tutucunun konum verisini ölçmek için flex sensör kullanılmıştır. Sensörün çıkışı açısız konuma çevrildi. Sistemin girişi açısız pozisyonudur. Cihazın pozisyon bilgilerinin ölçülmesi için gerçek zamanlı kontrol uygulamalarına uygun biçimde ATmega328 işlemci tabanlı Arduino Mega 2560 veri toplama kartı kullanılmıştır. Esnek tutucu cihazının parametre kestirimi için kullanılan I/O verileri 100 µs örnekleme zamanı ile toplanmıştır.

Esnek tutucunun kontrol algoritmalarının yazılımları, Matlab/M-File/Simulink yazılımında gerçekleştirilmiştir. Simulink, çok alanlı simülasyon ve Model Tabanlı Tasarım için bir blok diyagram ortamıdır. Sistem düzeyinde tasarım, simülasyon, otomatik kod oluşturma ve gömülü sistemlerin sürekli test ve doğrulamasını destekler. Önerilen kontrolör, xPC Target dosyasına dönüştürülerek cihazın kontrolü gerçekleştirilmiştir.

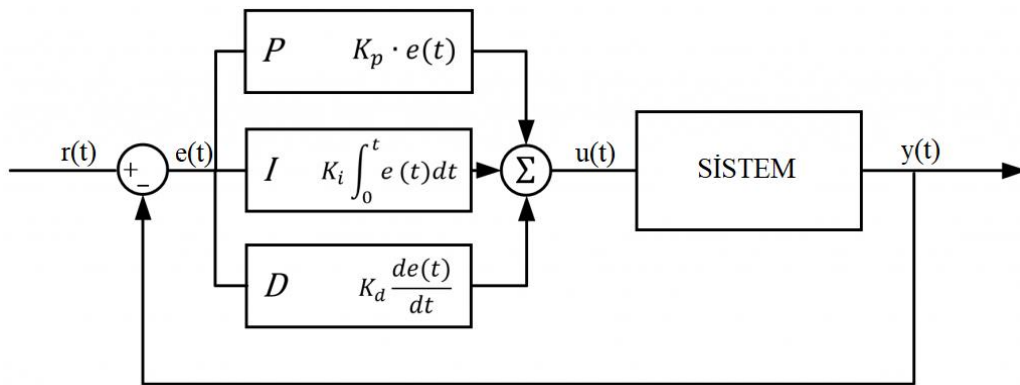


Şekil 2. 10 Esnek tutucunun kontrol sisteminin elektronik bileşenleri

## 2.5 Kontrol Sistem Tasarımı

Oransal-İntegral-Türevsel (PID) denetleyiciler, mekanik bir aktüatörün veya pnömatik bir sistemin optimum değere hızlı ve doğru bir şekilde ulaşabilmesi için birçok alanda kullanılmaktadır. Bu optimum değer geri besleme sensörü tarafından okunan veridir. PID denetleyicisi bir hata terimi hesaplar ve hatayı telafi etme amacına sahiptir. Buradaki hata kavramı istenilen ayar noktası ile sensör okuması arasındaki farktır.

PID denetleyici hesaplaması, bir “sürece” (elektromekanik bir işlem) girdi olarak kullanılan bir değer vermektedir. Bu değeri ayarlamak için kullanılan birkaç kuralcı kural vardır. En etkili yöntemler genellikle bir tür süreç modelinin geliştirilmesini içerir ve ardından dinamik model parametrelerine dayalı olarak P, I ve D'yi seçer (Tehrani ve Mpanda, 2012). Sensör çıkışı "proses değişkeni" olarak bilinir ve t zaman alanında hesaplanan denklemin girdisi olarak işlev görür. Geri besleme döngüsü boyunca, zamanlama yakalanır ve Şekil 2.11'de gösterildiği gibi denklemin girdisi elde edilir.



Şekil 2. 11 PID kontrol blok şeması

Şekil 2.11'deki e değişkeni izleme hatasını, istenen çıktı r(t) ile gerçek çıktı y(t) arasındaki farkı temsil etmektedir. Buradaki ölçülen çıkış değeri, girişe geri dönmektedir. Ayrıca Orantılı, İntegral ve Türev değerlerinin her birinin nasıl hesaplandığına ve toplandığına dikkat edilmesi gerekmektedir. Yukarıdaki blok şeması aşağıdaki denklem formunda yazılabilmektedir:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Bu denklemdeki oransal, integral ve türev parametrelerinin asıl görevleri aşağıdaki gibidir:

P (oransal): Akım hatası büyükse, çıkış önemli bir düzeltmeye neden olacak şekilde orantılı olarak büyük olacaktır.

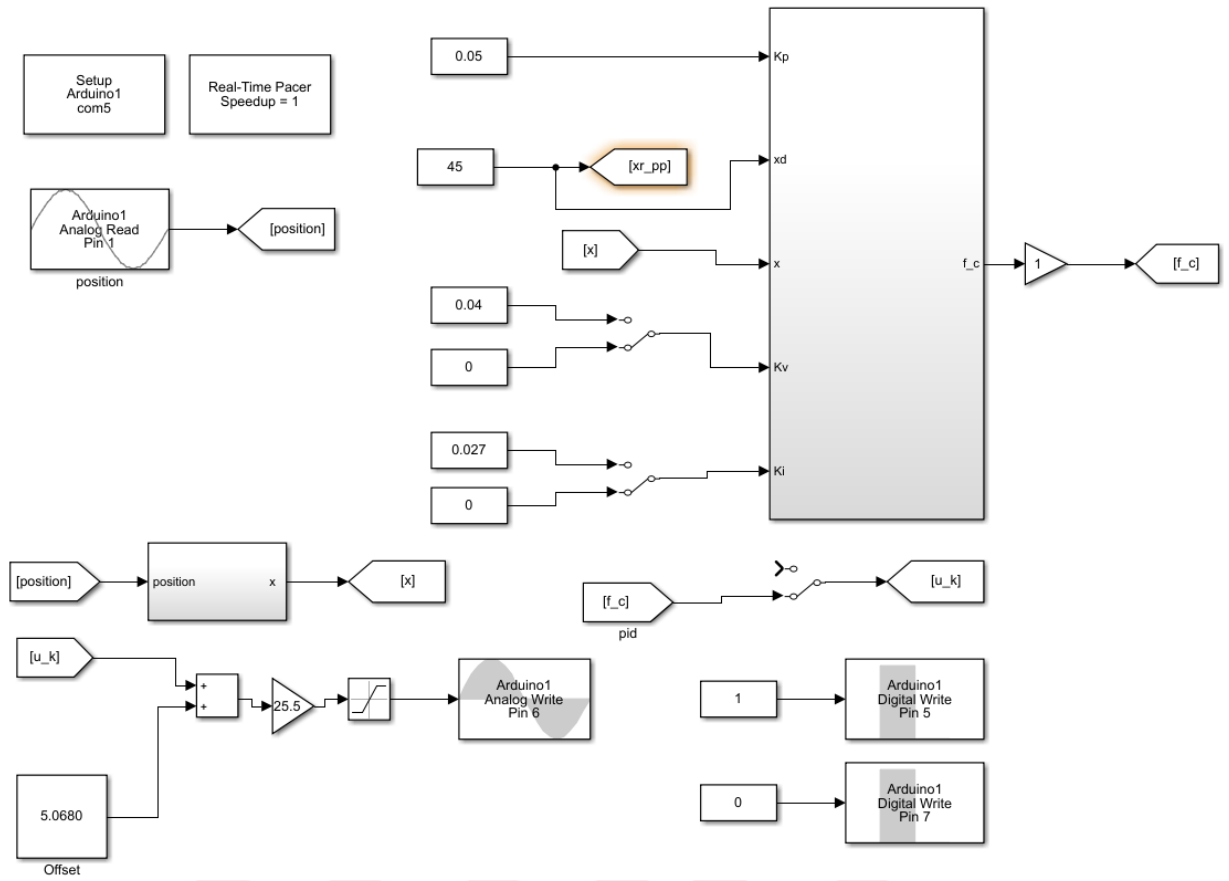
I (integral): Hatanın tarihsel değerleri zaman içinde entegre edilir. Hatayı azaltmak için daha az önemli düzeltmeler yapılır. Hata giderilirse bu terim büyümeyecektir.

D (türev): Bu terim geleceği öngörür. Aslında, bir sönümlenme yöntemidir(Yosafat ve ark., 2017).

Burada önemli olan  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$  kazançlarının belirlenmesidir. Bu katsayıların uygun şartlarda sistemi kontrol etmesi için belirlenmesi gerekir. Bunu belirlemek kolay değildir ve net bir cevabı yoktur. En uygun ayar için en az ve sıfır hata, sistemde minimum aşım, kısa sürede hatayı giderme ve sistemde kararlılığı sağlama gibi kriterleri yerine getirecek  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$  kazançları seçilmelidir. Yani sistemin çıkışında en küçük hatayı en az zamanda ve en az salınım yapması gerekir.  $K_p$ ,  $K_i$  ve  $K_d$  kazançlarının belirlenmesi için analog ve deneysel yöntemler kullanılır.

Önerilen PID kontrol algoritması Matlab/Simulink yazılımı kullanılarak esnek elektropnömatik tutucuya uygulanmıştır. Bu uygulama için öncelikle uygulamada kullanılan Arduino Mega 2560 programla kartının Matlab programına tanıtılması gerekmektedir. Arduino Donanımı için Simulink Destek Paketi, Arduino kartı üzerinde Simulink modelleri oluşturmanıza ve çalıştırmanıza olanak sağlar. Hedef, Arduino sensörlerini, aktüatörleri ve iletişim arayüzlerini yapılandırmak ve bunlara erişmek için Simulink bloklarından oluşan bir kütüphane oluşturmak. Ek olarak hedef, algoritmaları geliştirdiğiniz aynı Simulink modellerinden Arduino kartında çalışan algoritmaları izlemenizi ve ayarlamınızı sağlar.

Matlab programına Arduino içeriklerinin tanıtılmasından sonra Simulink ortamında bloklar yardımıyla modelleme gerçekleştirilmiştir. Esnek elektropnömatik tutucu için geliştirilen PID kontrol algoritması Şekil 2.12'de verilmiştir. Burada Arduino Analog Read bloğuyla flex sensörden veri okuması sağlanmıştır. Okunan konum bilgisi, oluşturulan PID kontrol algoritması bloklarına uygulanmıştır. İstenilen referans açısız konum ile mevcut konum bu algortmada değerlendirilerek kontrol sinyali elde edilmiştir. Son olarak bu kontrol sinyali oransal valfe uygulanarak esnek tutucunun konumu istenilen seviyede tutulmuştur. Kontrol sinyali oransal valfe darbe genişlik modülasyonu (PWM) tekniği ile uygulanmıştır. Burada Arduino Analog Write bloğu valfe kontrol sinyalini göndermek için kullanılmıştır. Modelleme için kullanılan Digital Write bloğu ise L298N sürücüsünün çıkışlarından bir tanesini dijital olarak aktif etmek için kullanılmıştır.



Şekil 2. 12 Önerilen PID kontrol algoritması

### 3. BULGULAR ve TARTIŞMA

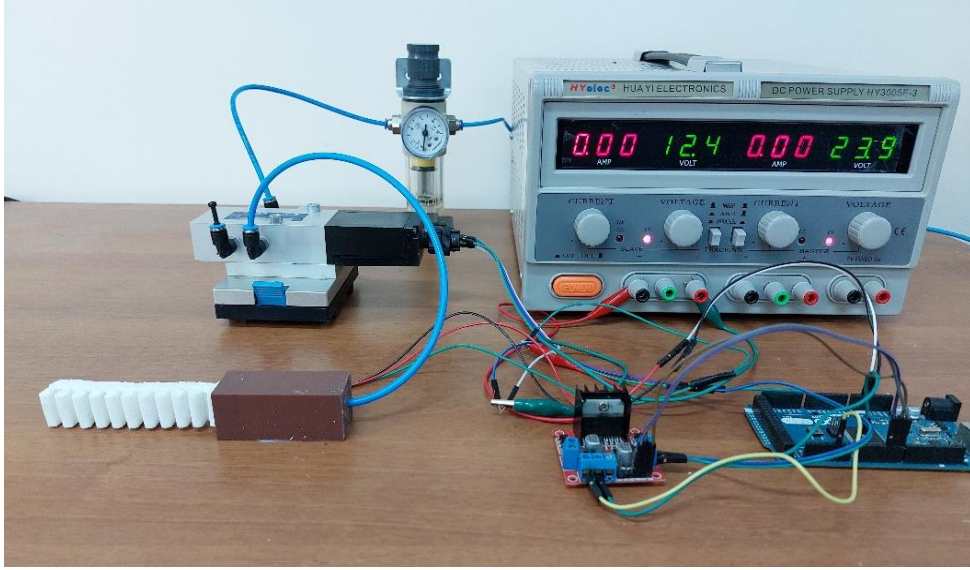
Geliştirilen esnek elektropnömatik tutucunun performansını bir bütün olarak göstermek ve önerilen PID kontrolörün performansını görmek için çeşitli koşullar ve referans girişlerde testler yapılmıştır. Sisteme uygulanan referans girişler sırasıyla; basamak fonksiyonu, değişken basamak fonksiyonu, yörünge takibi ve sinüs fonksiyonudur.

Deneylerde kontrolörlerin zaman davranışı görmek için, ilk önce basamak cevabı testi gerçekleştirilmiştir. Esnek elektropnömatik tutucu, sabitleme aparatına takılarak bir masaya sabitlendi ve testler gerçekleştirildi. Referans konumu olarak cihaza 30 derecelik giriş verilmiştir. Daha sonra kontrolörün değişken basamak referanslar altında performansı gözlenmiştir. Referans pozisyon olarak 5 er saniye aralıklarla sırasıyla 20, 40 ve 60 derecelik basamak girişler verilmiştir. Son olarak, kontrolörün yörünge takip performansı ve 60 derece genlikli sinüs sinyali takip performansı gözlemlenmiştir. Gerçekleştirilecek bütün deneylerde aynı şartlar altında PID kontrol algoritması kullanılarak karşılaştırılmalar yapılmış ve performanslar değerlendirilmiştir.

#### 3.1 Tutucunun Konum Geribildirimi Karakterizasyonu

Esnek elektropnömatik tutucunun donanımsal içeriği, kontrol sinyalini bir mikrodenetleyici (ATmega 2560) aracılığıyla bir oransal valfe (FESTO, MPYE-5-1/8-HF-010 B) göndermek için bir bilgisayarı kapsamaktadır. Dijital sinyali analog voltaja dönüştürerek devreyi (L298N) çalıştırır. Hava, kullanılan basınç kaynağından enjekte edilir. Esnek bir flex sensör, esnek tutucunun açısal konumunu ölçer. Kontrolörün yer değiştirme performansını gözlemlemek için oluşturulan deney düzeneği Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasında, elektropnömatik tutucunun ilk hava giriş odası 3D baskılı bir parçaya sabitlenmiş ve tutucunun konumunu kontrol etmek için bir PID kontrol algoritması uygulanmıştır. Tutucu, açısal konum sensörünü 0 ila 90 derecelik bir çalışma aralığında hareket yönü boyunca bükme için kuvvetler üretir. Deneyler 80 kPa basınç altında yapılmıştır ve önerilen kontrolör, Matlab/Simulink kullanılarak bir PC üzerinde gerçekleştirilmiştir.

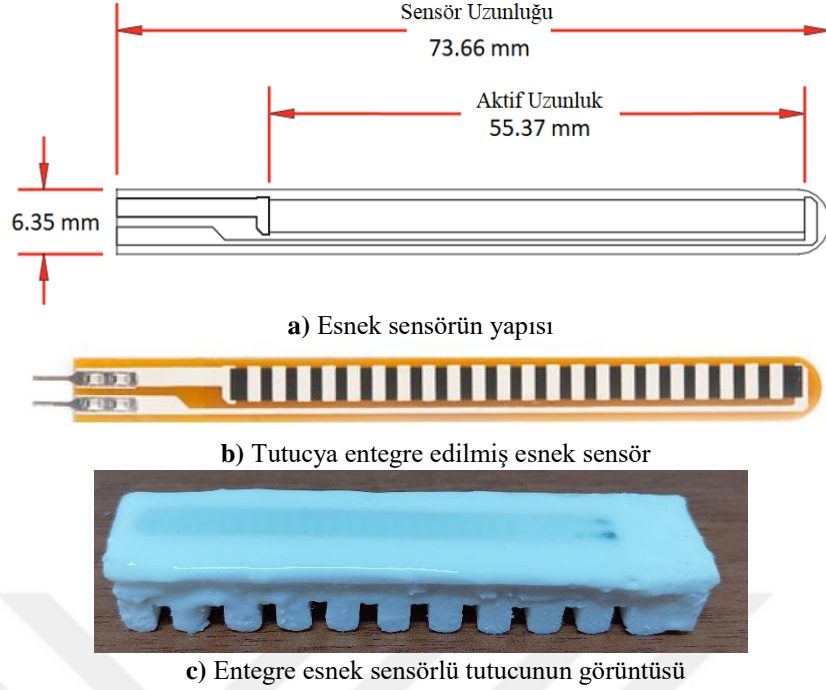


**Şekil 3. 1** Konum geri bildirim sisteminin gerçek zamanlı deneysel kurulumu

Esnek elektropnömatik tutucunun konumu, tutucuya takılı bir esnek sensör kullanılarak doğrudan ölçülmüştür. Esnek sensör, iletken bir film ve esnek bir alt tabakadan oluşan sıkıştırılmış bir yapıya sahiptir. Esnek sensörü tutucunun bir parçası olarak entegre etmek için RTV silikonu kullanıldı. Sonuç olarak, sensör yumuşak kısıya ile deforme olacak ve eğrilik ölçümlerini sağlayacaktır. Şekil 3.2 (a)'da verildiği gibi, esnek sensör 6,35 mm x 55,37 mm'lik bir algılama kapsamına sahiptir ve bağlantı kabloları 1,5 mm genişliğe sahip kompozit algılama pedi ile birlikte esnek sensörün kalınlığı 0,48 mm'dir. Sensörün ağırlığı 0,27 gr'dır. Elektropnömatik tutucu büküldüğünde algılama yastığının ve bağlantı tellerinin direnci değişir. Bükülmediğinde yaklaşık 25 k $\Omega$  olan bu sensörün direnci büküldüğünde 100 k $\Omega$ 'a kadar çıkabilmektedir. Tutucuya entegre edilmiş esnek sensör, Şekil 3.2 (b)'de gösterilmektedir.

Şekil 3.2 (c), esneme sensörünün entegrasyon sürecini göstermektedir. Bu süreç aşağıdaki adımlar tamamlanarak gerçekleştirilmiştir:

- Entegre edilecek esnek sensörün uçlarına iletken teller lehimlenmiştir.
- 3 gram silisyum ve 0.03 gram katalizör karışımı yapılarak bir kaptaki karıştırılmıştır.
- Fabrikasyon esnek elektropnömatik tutucunun tabanına yani hava uygulandığında bükülecek ön bölgeye sensör yerleştirilmiştir.
- Daha sonra sensörün üzeri dolana kadar silikon karışımı dökülmüştür.
- 6 saatlik sertleşmeden sonra, sensör ile tutucu arasında güçlü bir arayüz yapışması sağlanır.



Şekil 3. 2 Esnek sensörün tasarımı ve tutucuya entegrasyon süreci

### 3.2 Deneysel Sonuçlar

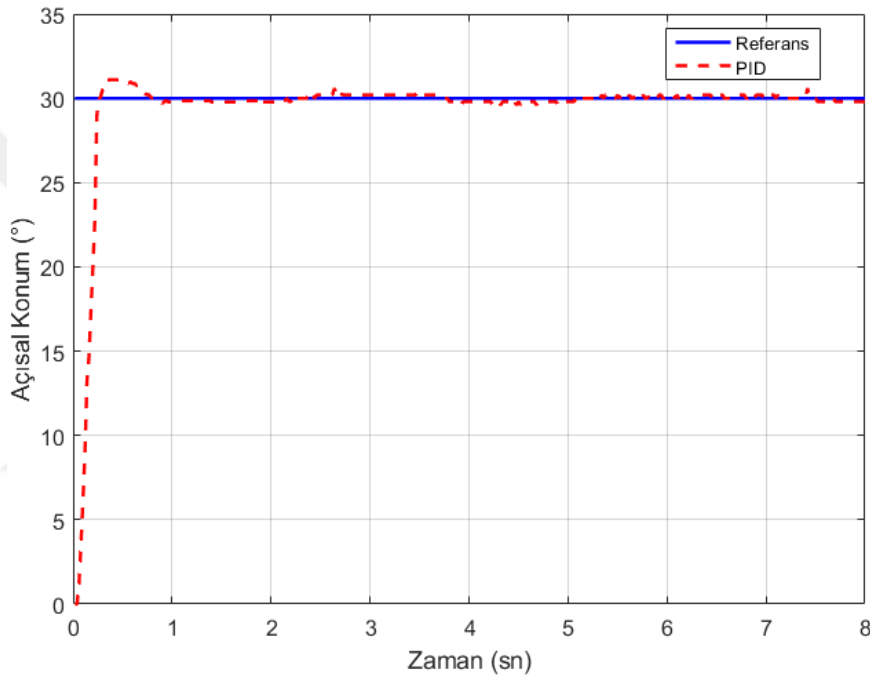
Esnek elektropnömatik tutucu cihazının ve önerilen PID denetleyicinin performansını göstermek için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Kontrolörün katsayıları  $K_p=4$ ,  $K_i=2$  ve  $K_d=1$  olarak seçilmiştir. Deneysel çalışmalar, basamak yanıtı, değişken basamak yanıt, yörünge izleme ve sinüs sinyali izlemeyi içerir. İlk olarak, denetleyicilerin zaman tepkilerini karşılaştırmak için basamak ve değişken basamak referanslar uygulanır.  $30^\circ$  basamak girişi ve  $[20^\circ, 40^\circ, 60^\circ]$  aralığındaki değişken basamak yörünge, esnek elektropnömatik tutucuya referans konumları olarak verilmiştir. PID denetleyicinin basamak ve değişken basamak girişlere verdiği yanıtlar analiz edilmiştir. Ardından, tutucunun yörünge izleme performansını karakterize etmek için farklı genlik referans sinyalleri ve sinüzoidal sinyaller uygulanır. Sinüs sinyalinin genliği 60 derece olarak belirlendi. Kontrol algoritması, MATLAB tarafından 100 ms örnekleme süresi ile bir PC üzerinde uygulanmıştır. Bu örnekleme süresi, optimum bir kontrol performansı elde etmek için seçilmiştir. Esnek elektropnömatik tutucunun çalışma aralıkları aşağıdaki gibi ayarlandı:

$$u \in [0; 10](V) \quad y \in [0; 90](^\circ) \quad P \in [0; 100](kPa)$$

Burada  $u$ ,  $y$  ve  $P$ , sırasıyla valfin tahrik voltaj aralığı, açısal konumu ve esnek elektropnömatik tutucunun basıncıdır.

### 3.2.1 Kontrolörün Basamak Referans Altında Çalıştırılması

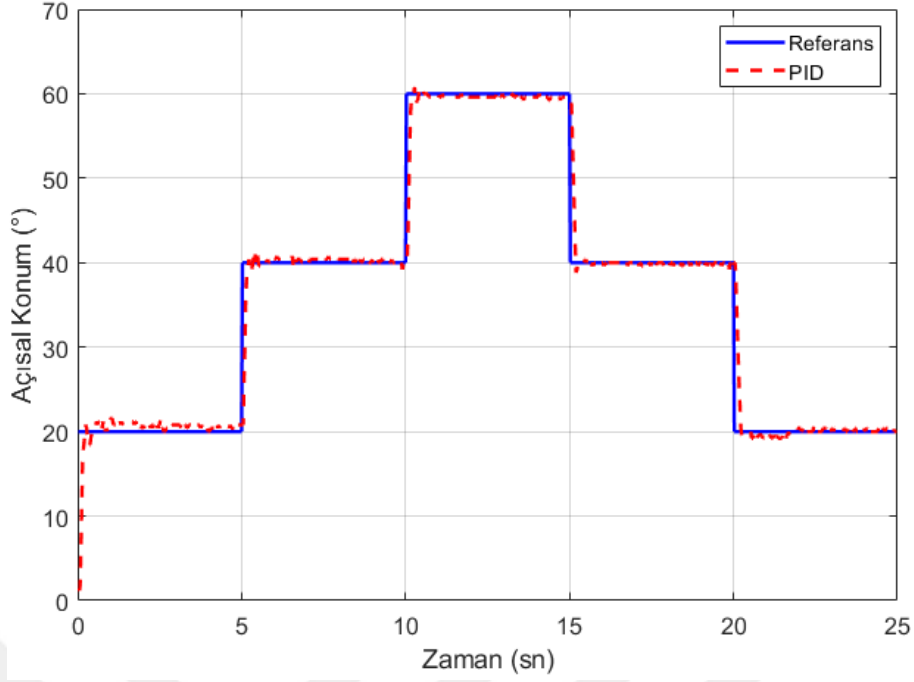
Esnek elektro pnömatik tutucuya uygulanan basınçlı hava sonucunda PID denetleyicinin  $30^\circ$  açısal konum adımı girişine karşı kaydedilen tepkiler Şekil 3.3'de verilmiştir. Referans için çalışma süresi 8 saniye olarak belirlenmiştir. Tüm deneylerde, koyu mavi çizgi referans açısal konum girişini temsil ederken, kırmızı çizgi kontrolörün tepkisini sembolize eder. Şekil 3.3'de görüldüğü gibi yüzde aşım, yükselme zamanı, oturma zamanı ve RMS hata ölçümü sırasıyla %7,46, 0,52 s, 2,5 s ve %1,95 olarak belirlenmiştir. Yüzde aşımı biraz yüksek olsa da kısılcacın yükselme ve oturma süreleri kabul edilebilir aralıktadır.



Şekil 3. 3 Basamak fonksiyonu referans değerleri için PID kontrolörün cevabı

### 3.2.2 Kontrolörün Değişken Referans Altında Çalıştırılması

Esnek elektro pnömatik tutucuya uygulanan basınçlı hava sonucunda PID denetleyicinin  $20^\circ$ ,  $40^\circ$  ve  $60^\circ$  açısal pozisyon değişken basamak girişlerine karşı kaydedilen tepkiler Şekil 3.4'de verilmiştir. Her bir referans için çalışma süresi 5 saniye olarak belirlenmiştir. Kontrolörün gerçekleştirilen deneylerdeki performans göstergeleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Bu deneylerde performans kriteri olarak yükselme zamanı, oturma zamanı ve yüzde aşım değerleri alınmıştır.



**Şekil 3. 4** Değişken basamak fonksiyonu referans değerleri için PID kontrolörün cevabı

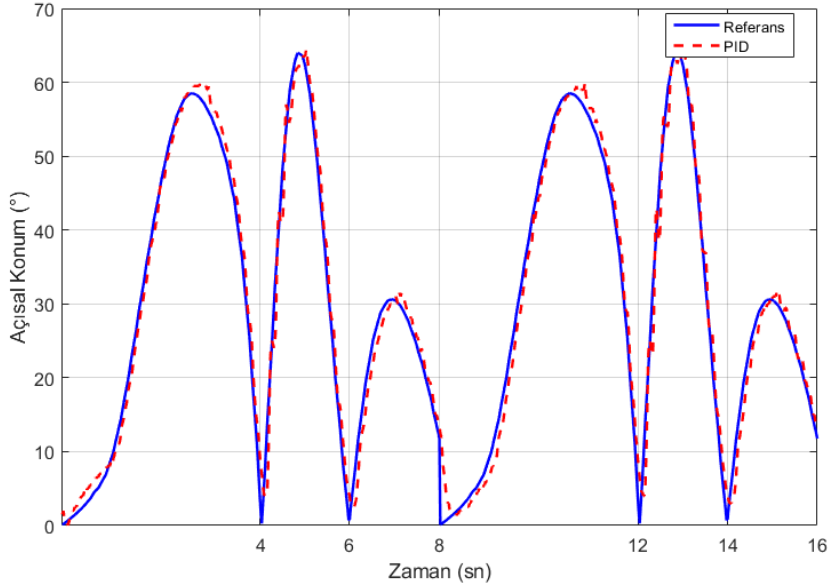
Deneysel sonuçlar incelendiğinde, PID denetleyici ile değişken basamak yanıtlarda esnek elektropnömatik tutucunun konumunun istenilen düzeyde kontrol edilebildiği görülmektedir. Tüm referans değerlerinde, kontrolör iyi geçici yanıt ve sabit durum performansı sergiledi.

**Çizelge 3. 1** Sistemin değişken basamak fonksiyonu referans değerleri için PID kontrolörün cevabı

	20°	40°	60°
Aşım (%)	4,82	3,51	2,74
Yükselme zamanı (s)	0,51	0,45	0,47
Oturma zamanı (s)	4,25	3,95	4,12

### 3.2.3 Kontrolörün Farklı Frekanslarda Yörünge Takibi

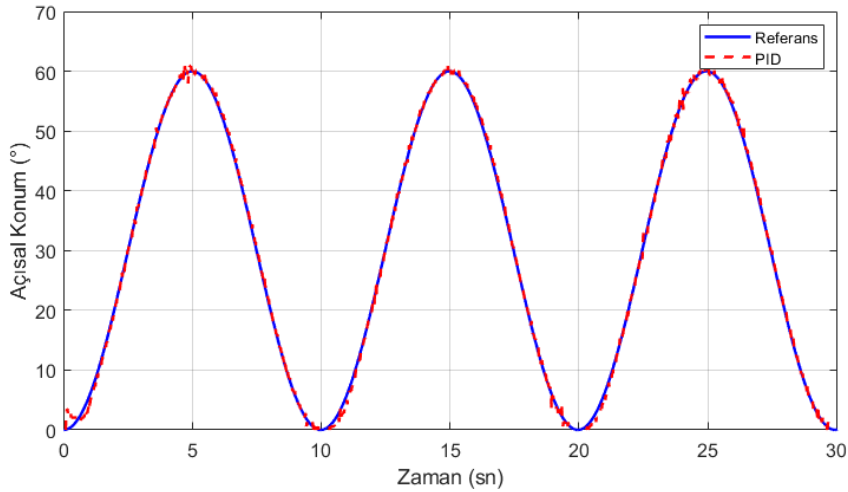
Son olarak, PID denetleyicinin yörünge izleme performansı gözlenir. Farklı frekanslarda ve genliklerde referans girişine karşı PID denetleyicisinin yörünge izleme sonuçları Şekil 3.5'de gösterilmektedir. Konum için açı (°) cinsinden RMS hata ölçümleri hesaplandı. Kontrolör için RMS değeri 0,1945° olarak hesaplanmıştır. Bu değer, düşük konum izleme hatası gereksinimini karşılamaktadır.



Şekil 3. 5 Değişken genlikteki yörünge takip fonksiyonu referans değerleri için PID kontrolörün cevabı

### 3.2.4 Kontrolörün Sinüs Yörünge Takibi

PID denetleyicisinin  $60^\circ$  genlikte ve 0.1 Hz frekanslı referans girişine karşı sinüs dalgası izleme sonuçları Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Kontrolör için RMS değeri  $0,1245^\circ$  olarak hesaplanmıştır. Sabit genlikli sinüs sinyalinin izleme performansı, farklı genlikli bir sinyalden çok daha iyidir.



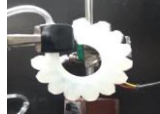


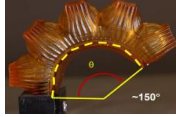



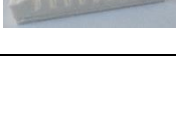
Şekil 3. 6 Sinüs sinyali fonksiyonu için PID kontrolörün cevabı

### 3.3 Tartışma

Literatürde yapılan bazı son teknoloji esnek pnömatik tutucular Çizelge 3.2'de gösterilmiştir. Kontrolör yapısı, farklı eklemeli imalat teknikleri kullanılarak üretilen tutucuları ayıran en önemli özelliğdir. Mevcut yumuşak tabanlı kısaçlar, basit uygun sensörler olmadan yalnızca açık döngü kontrolünde çalışır. Bu tez çalışması, kapalı bir

döngü olarak çalışan kompakt bir esnek sensör yapısına sahip bir pnömatik tutucuyu ortaya koymaktadır. Bu tutucunun bükülme açısının PID kontrol algoritması ile kontrol edilmesi de yumuşak tutucu alanında ciddi bir yeniliktir.

**Çizelge 3. 2** Literatürdeki en gelişmiş 3D baskılı esnek pnömatik tutucular

Üretim	Malzeme	Çalıştırma	Kontrolör	Üretilen Tutucu
FDM ( <u>Plott ve Shih, 2017</u> )	Silikon Elastomer	Bükülme	Açık Döngü	
SLS ( <u>Scharff ve ark., 2017</u> )	Esnek Poliüretan	Çift Yönlü	-	
DLP ( <u>Ge ve ark., 2018</u> )	Tangoplus FLX930	Bükülme	-	
SLA ( <u>Mishra ve ark., 2020</u> )	Hidrojel	Bükülme	Kapalı Döngü	
DIW ( <u>Byrne ve ark., 2018</u> )	Dragon Skin 10	Bidirectional	-	
FPP ( <u>Khondoker ve Sameoto, 2019</u> )	Kraton G1657	Bükülme	-	
FFF ( <u>Anver ve ark., 2017</u> )	Termoplastik Elastomer	Bükülme	Açık Döngü	
Bu Çalışma	RTV-3015	Bükülme	Kapalı Döngü	

#### 4. SONUÇLAR

Esnek elektro pnömatik tutucular, yumuşak robotik cihazların geliştirilmesine ve yumuşak robotlar için farklı ve karmaşık donanım tasarımlarının etkinleştirilmesine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında, bir esnek elektro pnömatik tutucunun konum kontrolü üzerine üretim, modelleme ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Esnek tutucunun tasarımında SolidWorks katı modelleme programı kullanılmıştır. Üretim için kullanılan parçalar 3D yazıcı kullanılarak, satın alınarak ya da üretilerek tedarik edilmiştir. Tutucunun üretimi kalıplama tekniği ile gerçekleştirilmiştir. Bu kalıplar FDM tabanlı 3D yazıcı ile eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiştir. Üretilen kalıpların montaj işlemi yapılarak içerisine kullanılacak olan silikon malzeme dökülmüştür. Tutucunun yapısı, kalıplanmış silikon (RTV-3015) ve haznelerden oluşan polietilen tereftalat (PET) filmden oluşmaktadır. Bu bölmeler, basınçlı hava ile çalışabilen 10 adet hava geçirmez bölmeden oluşan aktif bir bölme ve PET film ile kaplanmış bir pasif bölmedir. Esnek tutucunun bükülmesi sırasında, pasif hazne içindeki PET film basınçlı hava tarafından sıkıştırılmaya başlar ve bu da tutucunun daha yüksek bir yük tutma kapasitesiyle sonuçlanmaktadır. Ayrıca esnek sensörden yapılan geri besleme modülünün konumu fabrikasyon sırasında entegre edilmiştir.

Esnek elektro pnömatik tutucu modelini simüle etmek için COMSOL yazılımında sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Bu analiz ile farklı basınç değerleri uygulanarak tutucunun açısız yer değiştirme gözlemlenmiştir. Yapılan analiz neticesinde esnek tutucunun maksimum 90 kPa basınca dayanabileceği belirlenmiştir. Gerçek zamanlı yapılan yer değiştirme deney sonuçlarıyla sonlu elemanlar analizi sonuçlarının uyumlu olduğu bulunmuştur. Esnek elektro pnömatik tutucunun nispeten düşük hava basıncı altında yeterli yüksek yer değiştirme gösterdiği tespit edilmiştir.

Son olarak, elektro pnömatik tutucunun konum izleme performansını gözlemlemek için gerçek zamanlı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar, basamak, değişken basamak yanıtı, sinüs dalga izleme ve yörünge izlemeyi içermektedir. Pozisyon izleme, PID kontrol algoritması ile kapalı döngü olarak gerçekleştirilmiştir. Esnek elektro pnömatik tutucunun konumu, tutucuya üretim sırasında entegre edilen bir flex sensör kullanılarak doğrudan ölçülmüştür. Denetleyici, tüm referans değerlerinde yeterli geçici yanıt ve sabit durum performansı gösterdi. Sabit genlik sinüsünün izleme performansı, farklı genlik sinyalinin çok daha iyidir. Kontrolör için RMS hata değeri

0,1245° olarak hesaplanmıştır. Bu değer, düşük konum izleme hatası gereksinimini karşılar.

Bu araştırmanın başlıca katkıları şunlardır:

1. Yumuşak malzemeden yapılmıştır ve elektro pnömatik olarak çalışan tutucunun orijinal tasarımıdır.

2. Esnek tutucu, kalıplama tekniği kullanılarak iki parça halinde eklemeli imalat tekniğiyle üretimidir.

3. Tutucuya entegre flex sensör ile bükme açısını ve kapalı çevrim PID kontrolör ile konum takibini tespit etmesidir.

Gelecekteki çalışmalar için, esnek elektro pnömatik imalatında farklı malzeme ve tekniklerin test edilmesi planlanmaktadır. Böylece daha yüksek mukavemet ve esnekliğe sahip tutucular elde edilmesi amaçlanmaktadır. Tutucunun kapalı döngü kontrolüne ek olarak kuvvet analizi de yapılacaktır. Esnek sensör gerinim tepkisi, tekrarlanabilirlik ve histerezis açısından kalibre edilecektir.

## KAYNAKLAR

- Ahn, D., Kweon, J.-H., Kwon, S., Song, J., Lee, S. 2009. Representation of surface roughness in fused deposition modeling, *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (15-16), 5593-5600.
- Amiri Moghadam, A.A., Alaie, S., Deb Nath, S., Aghasizade Shaarbaf, M., Min, J.K., Dunham, S., Mosadegh, B. 2018. Laser cutting as a rapid method for fabricating thin soft pneumatic actuators and robots, *Soft robotics*, 5 (4), 443-451.
- Anver, H.M., Mutlu, R., Alici, G., 2017, 3D printing of a thin-wall soft and monolithic gripper using fused filament fabrication, *2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, IEEE, 442-447.
- Bartlett, N.W., Tolley, M.T., Overvelde, J.T., Weaver, J.C., Mosadegh, B., Bertoldi, K., Whitesides, G.M., Wood, R.J. 2015. A 3D-printed, functionally graded soft robot powered by combustion, *Science*, 349 (6244), 161-165.
- Biagiotti, L., Lotti, F., Melchiorri, C., Vassura, G. 2004. How far is the human hand? a review on anthropomorphic robotic end-effectors.
- Bozkurt, Y., Gülsoy, H., Karayel, E. 2021. Eklemeli imalat teknolojilerinin tıbbi ekipmanların üretiminde kullanımı, *El-Cezeri*, 8 (2), 962-980.
- Brown, E., Rodenberg, N., Amend, J., Mozeika, A., Steltz, E., Zakin, M.R., Lipson, H., Jaeger, H.M. 2010. Universal robotic gripper based on the jamming of granular material, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107 (44), 18809-18814.
- Byrne, O., Coulter, F., Glynn, M., Jones, J.F., Ní Annaidh, A., O'Cearbhaill, E.D., Holland, D.P. 2018. Additive manufacture of composite soft pneumatic actuators, *Soft robotics*, 5 (6), 726-736.
- Deimel, R., Brock, O. 2016. A novel type of compliant and underactuated robotic hand for dexterous grasping, *The International Journal of Robotics Research*, 35 (1-3), 161-185.
- Firouzeh, A., Paik, J. 2017. An under-actuated origami gripper with adjustable stiffness joints for multiple grasp modes, *Smart Materials and Structures*, 26 (5), 055035.
- Galloway, K.C., Becker, K.P., Phillips, B., Kirby, J., Licht, S., Tchernov, D., Wood, R.J., Gruber, D.F. 2016. Soft robotic grippers for biological sampling on deep reefs, *Soft robotics*, 3 (1), 23-33.
- Ge, L., Dong, L., Wang, D., Ge, Q., Gu, G. 2018. A digital light processing 3D printer for fast and high-precision fabrication of soft pneumatic actuators, *Sensors and Actuators A: Physical*, 273, 285-292.
- Glick, P., Suresh, S.A., Ruffatto, D., Cutkosky, M., Tolley, M.T., Parness, A. 2018. A soft robotic gripper with gecko-inspired adhesive, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3 (2), 903-910.
- Gorissen, B., Chishiro, T., Shimomura, S., Reynaerts, D., De Volder, M., Konishi, S. 2014. Flexible pneumatic twisting actuators and their application to tilting micromirrors, *Sensors and Actuators A: Physical*, 216, 426-431.
- Gorissen, B., Vincentie, W., Al-Bender, F., Reynaerts, D., De Volder, M. 2013. Modeling and bonding-free fabrication of flexible fluidic microactuators with a bending motion, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 23 (4), 045012.
- Guo, J., Sun, Y., Liang, X., Low, J.-H., Wong, Y.-R., Tay, V.S.-C., Yeow, C.-H., 2017, Design and fabrication of a pneumatic soft robotic gripper for delicate surgical manipulation, *2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, IEEE, 1069-1074.

- Hannan, M.W., Walker, I.D. 2003. Kinematics and the implementation of an elephant's trunk manipulator and other continuum style robots, *Journal of robotic systems*, 20 (2), 45-63.
- Hao, Y., Gong, Z., Xie, Z., Guan, S., Yang, X., Ren, Z., Wang, T., Wen, L., 2016, Universal soft pneumatic robotic gripper with variable effective length, *2016 35th Chinese control conference (CCC)*, IEEE, 6109-6114.
- Hao, Y., Wang, T., Ren, Z., Gong, Z., Wang, H., Yang, X., Guan, S., Wen, L. 2017. Modeling and experiments of a soft robotic gripper in amphibious environments, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 14 (3), 1729881417707148.
- Homberg, B.S., Katzschmann, R.K., Dogar, M.R., Rus, D., 2015, Haptic identification of objects using a modular soft robotic gripper, *2015 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS)*, IEEE, 1698-1705.
- Ilievski, F., Mazzeo, A.D., Shepherd, R.F., Chen, X., Whitesides, G.M. 2011. Soft robotics for chemists, *Angewandte Chemie*, 123 (8), 1930-1935.
- Jeong, O.C., Konishi, S. 2006. All PDMS pneumatic microfinger with bidirectional motion and its application, *Journal of microelectromechanical systems*, 15 (4), 896-903.
- Kalmanovich, G., 1996, " Curved-Layer" Laminated Object Manufacturing, *1996 International Solid Freeform Fabrication Symposium*.
- Khin, P.M., Yap, H.K., Ang, M.H., Yeow, C.-H., 2017, Fabric-based actuator modules for building soft pneumatic structures with high payload-to-weight ratio, *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 2744-2750.
- Khondoker, M.A.H., Sameoto, D. 2019. Direct coupling of fixed screw extruders using flexible heated hoses for FDM printing of extremely soft thermoplastic elastomers, *Progress in Additive Manufacturing*, 4 (3), 197-209.
- Kim, S., Laschi, C., Trimmer, B. 2013. Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics, *Trends in biotechnology*, 31 (5), 287-294.
- Konta, A.A., García-Piña, M., Serrano, D.R. 2017. Personalised 3D printed medicines: which techniques and polymers are more successful?, *Bioengineering*, 4 (4), 79.
- Kornbluh, R.D., Prahald, H., Pelrine, R., Stanford, S., Rosenthal, M.A., von Guggenberg, P.A., 2004, Rubber to rigid, clamped to undamped: toward composite materials with wide-range controllable stiffness and damping, *Smart Structures and Materials 2004: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, SPIE, 372-386.
- Laschi, C., Mazzolai, B., Mattoli, V., Cianchetti, M., Dario, P. 2009. Design of a biomimetic robotic octopus arm, *Bioinspiration & biomimetics*, 4 (1), 015006.
- Lee, C., Kim, M., Kim, Y.J., Hong, N., Ryu, S., Kim, H.J., Kim, S. 2017. Soft robot review, *International Journal of Control, Automation and Systems*, 15 (1), 3-15.
- Li, H., Yao, J., Zhou, P., Chen, X., Xu, Y., Zhao, Y. 2020. High-force soft pneumatic actuators based on novel casting method for robotic applications, *Sensors and Actuators A: Physical*, 306, 111957.
- Liang, X., Sun, Y., Ren, H. 2016. A flexible fabrication approach toward the shape engineering of microscale soft pneumatic actuators, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2 (1), 165-170.
- Lin, H.-T., Leisk, G.G., Trimmer, B. 2011. GoQBot: a caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot, *Bioinspiration & biomimetics*, 6 (2), 026007.
- Lipson, H. 2014. Challenges and opportunities for design, simulation, and fabrication of soft robots, *Soft Robotics*, 1 (1), 21-27.

- Low, J.H., Lee, W.W., Khin, P.M., Thakor, N.V., Kukreja, S.L., Ren, H.L., Yeow, C.H. 2017. Hybrid tele-manipulation system using a sensorized 3-D-printed soft robotic gripper and a soft fabric-based haptic glove, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2 (2), 880-887.
- Majidi, C. (2014). Soft robotics: a perspective—current trends and prospects for the future. *Soft robotics*, 1(1), 5-11.
- Manti, M., Cacucciolo, V., Cianchetti, M. 2016. Stiffening in soft robotics: A review of the state of the art, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 23 (3), 93-106.
- Marchese, A. D., Katzschmann, R. K., & Rus, D. (2015). A recipe for soft fluidic elastomer robots. *Soft robotics*, 2(1), 7-25.
- Marchese, A.D., Onal, C.D., Rus, D. 2014. Autonomous soft robotic fish capable of escape maneuvers using fluidic elastomer actuators, *Soft robotics*, 1 (1), 75-87.
- Martín-Montal, J., Pernas-Sánchez, J., Varas, D. 2021. Experimental characterization framework for SLA additive manufacturing materials, *Polymers*, 13 (7), 1147.
- McEvoy, M.A., Correll, N. 2015. Thermoplastic variable stiffness composites with embedded, networked sensing, actuation, and control, *Journal of Composite Materials*, 49 (15), 1799-1808.
- McMahan, W., Jones, B.A., Walker, I.D., 2005, Design and implementation of a multi-section continuum robot: Air-octor, *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2578-2585.
- Mishra, A.K., Wallin, T.J., Pan, W., Xu, P., Wang, K., Giannelis, E.P., Mazzolai, B., Shepherd, R.F. 2020. Autonomic perspiration in 3D-printed hydrogel actuators, *Science Robotics*, 5 (38), eaaz3918. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aaz3918>
- Moderator:, Long Jr, J.H., Participants:, Combes, S., Nawroth, J., Hale, M., Lauder, G., Swartz, S., Quinn, R., Chiel, H. 2014. How does soft robotics drive research in animal locomotion?, *Soft Robotics*, 1 (3), 161-168.
- Mosadegh, B., Polygerinos, P., Keplinger, C., Wennstedt, S., Shepherd, R.F., Gupta, U., Shim, J., Bertoldi, K., Walsh, C.J., Whitesides, G.M. 2014. Pneumatic networks for soft robotics that actuate rapidly, *Advanced functional materials*, 24 (15), 2163-2170.
- Natividad, R., Del Rosario Jr, M., Chen, P.C., Yeow, C.-H. 2018. A reconfigurable pneumatic bending actuator with replaceable inflation modules, *Soft Robotics*, 5 (3), 304-317.
- Onal, C.D., Rus, D., 2012, A modular approach to soft robots, *2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob)*, IEEE, 1038-1045.
- Özsoy, K., Duman, B. 2017. Ekllemeli İmalat (3 Boyutlu Baskı) Teknolojilerinin Eğitimde Kullanılabilirliği, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1 (1), 36-48.
- Park, Y.-L., Chen, B.-r., Pérez-Arancibia, N.O., Young, D., Stirling, L., Wood, R.J., Goldfield, E.C., Nagpal, R. 2014. Design and control of a bio-inspired soft wearable robotic device for ankle-foot rehabilitation, *Bioinspiration & biomimetics*, 9 (1), 016007.
- Pelrine, R., Carpi, F., De Rossi, D., Kornbluh, R., Pelrine, R., Sommer-Larsen, P. 2008. Variable stiffness mode: devices and applications, *Dielectric elastomers as electromechanical transducers: fundamentals, materials, devices, models and applications of an emerging electroactive polymer technology*, 141-145.
- Plott, J., Shih, A. 2017. The extrusion-based additive manufacturing of moisture-cured silicone elastomer with minimal void for pneumatic actuators, *Additive Manufacturing*, 17, 1-14.

- Polygerinos, P., Wang, Z., Overvelde, J.T., Galloway, K.C., Wood, R.J., Bertoldi, K., Walsh, C.J. 2015. Modeling of soft fiber-reinforced bending actuators, *IEEE Transactions on Robotics*, 31 (3), 778-789.
- Ren, Z., Yang, X., Wang, T., Wen, L. 2016. Hydrodynamics of a robotic fish tail: effects of the caudal peduncle, fin ray motions and the flow speed, *Bioinspiration & biomimetics*, 11 (1), 016008.
- Rus, D., Tolley, M.T. 2015. Design, fabrication and control of soft robots, *Nature*, 521 (7553), 467-475.
- Salomon, O., Wolf, A. 2012. Inclined links hyper-redundant elephant trunk-like robot, *Journal of Mechanisms and robotics*, 4 (4).
- Scharff, R.B., Doubrovski, E.L., Poelman, W.A., Jonker, P.P., Wang, C.C., Geraedts, J.M. 2017. Towards behavior design of a 3D-printed soft robotic hand. in: *Soft Robotics: Trends, Applications and Challenges*, Springer, pp. 23-29.
- Schubert, B.E., Floreano, D. 2013. Variable stiffness material based on rigid low-melting-point-alloy microstructures embedded in soft poly (dimethylsiloxane)(PDMS), *Rsc Advances*, 3 (46), 24671-24679.
- Seok, S., Onal, C.D., Cho, K.-J., Wood, R.J., Rus, D., Kim, S. 2012. Meshworm: a peristaltic soft robot with antagonistic nickel titanium coil actuators, *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, 18 (5), 1485-1497.
- Shepherd, R.F., Iliovski, F., Choi, W., Morin, S.A., Stokes, A.A., Mazzeo, A.D., Chen, X., Wang, M., Whitesides, G.M. 2011. Multigait soft robot, *Proceedings of the national academy of sciences*, 108 (51), 20400-20403.
- Shepherd, R.F., Stokes, A.A., Freake, J., Barber, J., Snyder, P.W., Mazzeo, A.D., Cademartiri, L., Morin, S.A., Whitesides, G.M. 2013. Using explosions to power a soft robot, *Angewandte Chemie International Edition*, 52 (10), 2892-2896.
- Stansbury, J.W., Idacavage, M.J. 2016. 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities, *Dental materials*, 32 (1), 54-64.
- Sun, Y., Ren, H. 2015. Soft transnasal endoscopic robot for patient-administered nasopharynx inspection, *Journal of Medical Devices*, 9 (2).
- Sun, Y., Song, S., Liang, X., Ren, H. 2016. A miniature soft robotic manipulator based on novel fabrication methods, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 1 (2), 617-623.
- Suzumori, K., Wakimoto, S., Miyoshi, K., Iwata, K., 2013, Long bending rubber mechanism combined contracting and extending fluidic actuators, *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 4454-4459.
- Sürmen, H.K. 2019. Eklemeli İmalat (3B Baskı): Teknolojiler ve Uygulamalar, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24 (2), 373-392.
- Tagliaferri, V., Trovalusci, F., Guarino, S., Venettacci, S. 2019. Environmental and economic analysis of FDM, SLS and MJF additive manufacturing technologies, *Materials*, 12 (24), 4161.
- Tawk, C., Gao, Y., Mutlu, R., Alici, G., 2019, Fully 3D printed monolithic soft gripper with high conformal grasping capability, *2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, IEEE, 1139-1144.
- Tehrani, K.A., Mpanda, A. 2012. PID control theory. in: *Introduction to PID Controllers-Theory, Tuning and Application to Frontier Areas*, IntechOpen.
- Terryn, S., Brancart, J., Lefeber, D., Van Assche, G., Vanderborght, B. 2017. Self-healing soft pneumatic robots, *Science Robotics*, 2 (9), ean4268.
- Udroiu, R., Braga, I.C., 2017, Polyjet technology applications for rapid tooling, *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, 03011.

- Wang, L., Yang, Y., Chen, Y., Majidi, C., Iida, F., Askounis, E., Pei, Q. 2018. Controllable and reversible tuning of material rigidity for robot applications, *Materials Today*, 21 (5), 563-576.
- Whitesides, G.M. 2018. Soft robotics, *Angewandte Chemie International Edition*, 57 (16), 4258-4273.
- Xu, Q., Liu, J. 2020. Effective enhanced model for a large deformable soft pneumatic actuator, *Acta Mechanica Sinica*, 36 (1), 245-255.
- Yang, Y., Chen, Y., Li, Y., Chen, M.Z., Wei, Y. 2017. Bioinspired robotic fingers based on pneumatic actuator and 3D printing of smart material, *Soft robotics*, 4 (2), 147-162.
- Yang, Y., Li, Y., Chen, Y., Li, Y., Ren, T., Ren, Y. 2020. Design and automatic fabrication of novel bio-inspired soft smart robotic hands, *IEEE Access*, 8, 155912-155925.
- Yap, H.K., Ng, H.Y., Yeow, C.-H. 2016. High-force soft printable pneumatics for soft robotic applications, *Soft Robotics*, 3 (3), 144-158.
- Yeow, C.-H., Baisch, A., Talbot, S., Walsh, C. 2014. Cable-driven finger exercise device with extension return springs for recreating standard therapy exercises, *Journal of Medical Devices*, 8 (1).
- Yosafat, S.R., Machbub, C., Hidayat, E.M., 2017, Design and implementation of Pan-Tilt control for face tracking, *2017 7th IEEE International Conference on System Engineering and Technology (ICSET)*, IEEE, 217-222.
- Zhai, Y., Galarraga, H., Lados, D.A. 2016. Microstructure, static properties, and fatigue crack growth mechanisms in Ti-6Al-4V fabricated by additive manufacturing: LENS and EBM, *Engineering failure analysis*, 69, 3-14.
- Zhu, M., Wang, Z., Hirai, S., Kawamura, S., 2017, Design and fabrication of a soft-bodied gripper with integrated curvature sensors, *2017 24th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP)*, IEEE, 1-6.
- Zolfagharian, A., Kouzani, A.Z., Khoo, S.Y., Moghadam, A.A.A., Gibson, I., Kaynak, A. 2016. Evolution of 3D printed soft actuators, *Sensors and Actuators A: Physical*, 250, 258-272.