



# Sağlık Alanı İçin İnsan Robot Etkileşimlerinde Kullanılacak Yumuşak ve Rijit Yapıda Bir Hibrit Robot Manipülatörün Geliştirilmesi

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Seda Özbek

ORCID 0000-0001-7485-8438

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Erkin Gezgin

Ağustos 2021

İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü öğrencisi **Seda Özbek** tarafından hazırlanan **Sağlık Alanı İçin İnsan Robot Etkileşimlerinde Kullanılacak Yumuşak ve Rijit Yapıda Bir Hibrit Robot Manipülatörün Geliştirilmesi** başlıklı bu çalışma tarafımızca okunmuş olup, yapılan savunma sınavı sonucunda kapsam ve nitelik açısından başarılı bulunarak jürimiz tarafından **YÜKSEK LİSANS** olarak kabul edilmiştir.

**ONAYLAYANLAR:**

**Tez Danışmanı:** **Doç. Dr. Erkin Gezgin** .....  
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

**Jüri Üyeleri:**

**Dr. Öğr. Üyesi Duygu Atcı** .....  
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi Özgün Selvi** .....  
Çankaya Üniversitesi

**Savunma Tarihi: 20.08.2021**

# Yazarlık Beyanı

Ben, **Seda Özbek**, başlığı **Sağlık Alanı İçin İnsan Robot Etkileşimlerinde Kullanılacak Yumuşak ve Rijit Yapıda Bir Hibrit Robot Manipülatörün Geliştirilmesi** olan bu tezimin ve tezin içinde sunulan bilgilerin şahsıma ait olduğunu beyan ederim. Ayrıca:

Bu çalışmanın bütünü veya esası bu üniversitede Yüksek Lisans / Doktora derecesi elde etmek üzere çalıştığım süre içinde gerçekleştirilmiştir.

- Daha önce bu tezin herhangi bir kısmı başka bir derece veya yeterlik almak üzere bu üniversiteye veya başka bir kuruma sunulduysa bu açık biçimde ifade edilmiştir.
- Başkalarının yayımlanmış çalışmalarına başvurduğum durumlarda bu çalışmalara açık biçimde atıfta bulundum.
- Başkalarının çalışmalarından alıntıladığımda kaynağı her zaman belirttim. Tezin bu alıntılar dışında kalan kısmı tümüyle benim kendi çalışmamdır.
- Kayda değer yardım aldığım bütün kaynaklara teşekkür ettim.
- Tezde başkalarıyla birlikte gerçekleştirilen çalışmalar varsa onların katkısını ve kendi yaptıklarımı tam olarak açıkladım.

İmza:

---

Tarih:

29.07.2021

---

# Sağlık Alanı İçin İnsan Robot Etkileşimlerinde Kullanılacak Yumuşak ve Rijit Yapıda Bir Hibrit Robot Manipölatörün Geliştirilmesi

## ÖZ

Hızla gelişen teknolojik ilerlemeler sayesinde robotik teknolojilerin sağlık alanında kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Bu amaçla sağlık alanında ihtiyaç duyulan sağlık personelinin hastalar ile etkileşimini kolaylaştıracak iş birlikçi robotların tasarımlarının gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Bu doğrultuda tez kapsamında iş birlikçi ve yardımcı robot manipölatör olarak kullanılabilen yumuşak ve rijit yapıda bir hibrit modüler robot manipölatörün insan robot etkileşimleri alanında kullanılması hedeflenmiştir. Literatürde robot manipölatör tasarımları incelendiğinde, rijitliğin yüksek hassasiyet gereksinimlerini karşılayabilmek için önemli bir kriter olduğu görülmektedir. Ancak robot manipölatör çalışma hacminde gerçekleşebilecek herhangi bir hata geri dönülemez sonuçlara yol açabilir. Bu nedenle ilgili uygulamalarda kullanılacak robot manipölatörlerin esnek yapıda olması önem kazanmaktadır.

Bu amaçla yumuşak yapıda robotların üretim aşamalarının öğrenilmesi adına hibrit yapıda bir cerrahi robot el projesine çalışılmıştır. Bu çalışma kapsamında, tıbbi operasyonlarda uygulamayı gerçekleştiren cerraha yardımcı olabilmesi için tasarlanmış hibrit yapıda bir cerrahi robot elin, operasyon hacmi içerisinde bulunan

yumuşak dokuların zarar görmeden kavranması ve belli bir noktaya taşınması gibi yüksek hassasiyet gerektiren görevlerde kullanılabilmesini sağlayacak yumuşak parmakların tasarımına odaklanılmıştır. Çalışma sonucunda yumuşak robotun üretilmesi için gerekli olan tasarım kriterleri öğrenilmiştir ve tez kapsamında, sağlık alanında insan robot etkileşimi gerektiren uygulamalarda kullanılacak ve uç nokta hassasiyetinden hibrit yapı sayesinde en az seviyede ödün verilerek esnekliğin sağlanacağı çok serbestlik dereceli yumuşak ve rijit yapıda bir hibrit modüler robot manipülatör geliştirilmesi hedeflenmiştir.Yapısal tasarımı takiben, hem tek modül hem de üst üste montajlanmış modüller için kinematik analiz denklemleri parametrik olarak çıkartılmıştır. Tez çalışmasının sonucunda elde edilen robot manipülatör sistemi insan robot etkileşimleri araştırma alanında yenilikçi ve özgün bir tasarıma sahiptir.

**Anahtar Sözcükler:** İnsan Robot Etkileşimi, Yumuşak Robotlar, İş Birlikçi ve Yardımcı Robotlar, Modüler Robot Manipülatör, Medikal Robotik

# Development of a Modular Robot Manipulator with Soft and Rigid Structure to be Utilized in Human Robot Interactions for Healthcare

## Abstract

Thanks to the rapid development of technology nowadays, utilization of robot manipulators have been started to expand into the various distinct fields from the sole industrial automation. For this purpose, it is aimed to design collaborative robots that will facilitate the interaction of healthcare personnel needed in the healthcare field with patients. Utilization of robot manipulators with rigid structures in certain medical procedures increases the risks of the operation with respect to the tissue integrity, biocompatibility and motion constraints. When robot manipulator designs are examined in the literature, it is seen that rigidity is an important criterion to fulfill high precision requirements. Due to the fact that any unwanted action inside the workspace of the manipulator may result in irreversible vital results, conceptual designs of manipulators with flexible links have gained popularity. In light of this, in order to create safer robotic systems that can interact with patients and surgeons, a new generation of robot manipulators with soft structures have started to be developed.

For this purpose, design of soft fingers for a surgical robotic hand with hybrid structure project has been studied in order to learn the production stages of soft

robots. In light of this, the study focuses on the design of soft fingers that will allow the usage of a robotic hand with hybrid structure on soft tissue handling that requires high precision and compliance. This surgical robotic hand will be utilized during the situations where a delicate tissue handling is necessary during operations such as organ transplantation or take part in serving the necessary equipment such as surgical tool, during the operation. As a result of the study, the design criteria required for the production of the soft robot were learned and within the scope of the thesis, a multi dof hybrid manipulator with soft and rigid structures will be developed for minimum compromise of end eff precision and utilization in healthcare applications requiring human-robot interaction. Following the structural design, kinematic analysis equations for both single module and "n" modules assembled on top of each other were parametrically derived. The robot manipulator system obtained as a result of the thesis work has an innovative and unique design in the field of human-robot interactions research.

**Keywords:** Human Robot Interaction, Soft Robotics, Collaborative and Assistive Robots, Modular Robot Manipulator, Medical Robotics

*Değerli Aileme..*



# Teşekkür

Tezimin tüm aşamalarında sağladığı değerli desteği ve sabrı için danışman hocam Doç. Dr. Erkin GEZGİN'e, her aşamada desteklerini hissettiğim ve parçası olmaktan mutluluk duyduğum Medikal Robotik Laboratuvarı ekibine ve beni yetiştiren ve her kararında beni sonuna kadar destekleyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bu çalışma 1649B021906859 başvuru numaralı TÜBİTAK 2210-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı'nın sağladığı destekle tamamlanmış olup; Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığı'na ve İzmir Katip Çelebi Üniversitesi'ne teşekkürü bir borç biliyor ve şükranlarımı sunuyorum.

# İçindekiler

Yazarlık Beyanı .....	ii
Öz .....	iii
Abstract .....	v
Teşekkür .....	viii
Şekiller Listesi.....	xii
Tablolar Listesi.....	xvii
Kısaltmalar Listesi .....	xviii
Semboller Listesi.....	xix
<b>1 Giriş .....</b>	<b>1</b>
1.1 Biyo-ilhamlı Yumuşak Robotlar .....	2
1.2 Medikal Robotik Ve Yumuşak Robotlar .....	3
1.2.1 Rehabilitasyon Uygulamaları.....	3
1.2.1.1 El Rehabilitasyonu.....	3
1.2.1.2 Bilek Rehabilitasyonu .....	5
1.2.1.3 Omuz Rehabilitasyonu .....	5
1.2.1.4 Dirsek Rehabilitasyonu .....	6
1.2.1.5 Ayak / Ayak Bileği Rehabilitasyonu .....	6
1.2.1.6 Diz Rehabilitasyonu .....	7
1.2.2 Klinik Uygulamalar .....	7

1.2.2.1 Endoskop .....	8
1.2.2.2 Kalp .....	8
1.2.2.3 İdrar Kateteri .....	9
1.2.2.4 Yumuşak Robot Destekli Ultrason Görüntüleme.....	10
1.2.2.5 Mikro Parmak Manipülatör .....	10
1.2.2.6 STIFF-FLOP Manipülator.....	11
<b>2 Hibrit Yapıda Bir Cerrahi El İçin Yumuşak Parmak Tasarımı.....</b>	<b>16</b>
2.1 Kavramsal Tasarım .....	17
2.2 Yumuşak Kalıp Tasarımı ve Malzeme Seçimi .....	18
2.2.1 Prototip 1.....	18
2.2.2 Prototip 2.....	19
2.2.3 Prototip 3.....	21
2.2.4 Prototip 4.....	24
2.2.5 Prototip 5.....	29
2.3 Modüler El Ayası.....	34
2.4 Mekanik Parmakların Tasarım ve Üretim Süreci .....	36
<b>3 Modüler Hibrit Manipülator.....</b>	<b>37</b>
3.1 Yapısal Tasarım .....	37
3.2 Kinematik Analiz .....	40
3.2.1 Ters kinematik .....	42
3.3 Doğrusal Eyleyici Tasarımları .....	51

3.3.1 Prototip 1 .....	52
3.3.2 Prototip 2 – Donut yumuşak eyleyici tasarım 1 .....	53
3.3.3 Prototip 3 – Donut yumuşak eyleyici tasarım 2 .....	55
3.4 Modüler Hibrit Manipülatör - Prototip 1 .....	57
3.5 Modüler Hibrit Manipülatör - Prototip 2 .....	60
<b>4 Sonuçlar .....</b>	<b>63</b>
<b>Kaynaklar .....</b>	<b>65</b>
<b>Özgeçmiş .....</b>	<b>71</b>

# Şekiller Listesi

Şekil 1.1 Yumuşak el prototipi [11].....	4
Şekil 1.2 Yumuşak giyilebilir bir robotik cihazın prototipi [12] .....	4
Şekil 1.3 Bilek için giyilebilir yumuşak robot tasarımı [13].....	5
Şekil 1.4 Yumuşak ortez sistem tasarımı ve prototipi [14].....	6
Şekil 1.5 Dirsek rehabilitasyonu için yumuşak robot tasarımı [15].....	6
Şekil 1.6 Biyo-ilhamlı aktif yumuşak ortez cihazının tasarımı ve prototipi [16].....	7
Şekil 1.7 Diz rehabilitasyonu için yumuşak robot tasarımı ve prototipi [17] .....	7
Şekil 1.8 Kolonoskopi için akışkan robot tasarımı [20].....	8
Şekil 1.9 Fizyolojik hareket üretimi için biyo-ilhamlı yumuşak tahrikli materyalin ilhamı, konsepti ve gerçekleştirilmesi [21] .....	9
Şekil 1.10 Ultrason görüntüleme için kullanılacak yumuşak robot prototipi [23].....	10
Şekil 1.11 Mikro parmakların PBS çözeltisinde denenmesi [24] .....	11
Şekil 1.12 Üç parçayı barındıran silikon silindir için kalıbın montajı akışkan odaları ve merkezi sertleştirme kanalı [25] .....	12
Şekil 2.1 Hibrit yapıdaki cerrahi robot elin tasarımı [49] .....	17
Şekil 2.2 (a)Yumuşak parmak döküm kalıp modeli (b) Parmağın hareket ettirilmemiş durumu (c) Parmağın hareket ettirilmiş durumu [49] .....	18
Şekil 2.3 (a) Pneu Net kalıp modeli parçaları (b/c) Parçaların birleştirilmiş durumu 19	

Şekil 2.4 (a) Silikonun kalıba dökülmesi işlemi (b) Vakumlama işlemi (c/d) Kalıptan çıkan elastomer görüntüleri.....	21
Şekil 2.5 (a)Yumuşak parmak döküm kalıp modeli part I (b) Yumuşak parmak döküm kalıp modeli part II (c) Yumuşak parmağın kalıptan çıkmış görüntüsü .....	22
Şekil 2.6 (a) Alt kalıp ilk tasarımı (b) Duvar yüksekliği doğrusal şekilde atırılan alt kalıp.....	23
Şekil 2.7 (a) 1A:1B oranında hazırlanan kalıp silikonu (b) 1A:1B oranında karıştırılan kalıp silikonu (c) Döküme hazır hale getirilen kalıp silikonun şırınga yardımıyla kalıba enjekte edilmesi.....	23
Şekil 2.8 (a) Yumuşak parmak döküm kalıp modeli part I & II (b) kalıp modelinin çevresinin silikonla kapatılmış hali.....	24
Şekil 2.9 (a) GM 0.5 serisi diyaframlı vakum pompası ve vakum çemberi (b) silikonun kalıpta kürlenme süreci .....	25
Şekil 2.10 (a) Kalıptan çıkan üst elastomer tabakası (b) Üst ve alt tabakaların birleştirilmesi (c) Gerilme önleyici tabakaların şematik gösterimi.....	25
Şekil 2.11 Üst elastomerin ince bir metal çubuk yardımıyla delinmesi.....	26
Şekil 2.12 Mukavemetinin düşük olmasından kaynaklı gözlenen bükülme .....	26
Şekil 2.13 (a) Üst duvarların birbiriyle bağlanması için hazırlanan mini kalıpların kürlenmesi işlemi (b) Kürlenme işlemi tamamlanan elastomer.....	27
Şekil 2.14 Yumuşak parmağın üretilmiş halinin farklı açılardan görüntüsü .....	29
Şekil 2.15 Yumuşak parmak hareketi .....	29
Şekil 2.16 Boş hacmin oluşması için kalıba monte edilecek parçanın görüntüsü .....	30
Şekil 2.17 Kalıbın tasarlanması .....	30
Şekil 2.18 Kalıba silikon kalıp ayırıcı sıkılması .....	30
Şekil 2.19 Birleştirilmiş kalıp .....	31

Şekil 2.20 Kalıba alüminyum çubuğun monte edilmesi .....	31
Şekil 2.21 Silikon karışımın hazırlanması .....	31
Şekil 2.22 Karışım ve kalıbın vakum çemberinde bekletilmesi.....	32
Şekil 2.23 Kalıbın yan yuvarlarının kapatılması.....	32
Şekil 2.24 Silikon dökülmüş kalıbın vakum çemberinde bekletilmesi .....	32
Şekil 2.25 PDMS karışımının hazırlanarak vakum çemberinde bekletilmesi.....	33
Şekil 2.26 PDMS ile üst elastomer tabakasının birleştirilmesi .....	33
Şekil 2.27 Nihai yumuşak parmaklar .....	33
Şekil 2.28 Yumuşak parmak ölçüleri .....	34
Şekil 2.29 Modüler el ayasının montaj aşamaları ve nihai hali .....	34
Şekil 2.30 Modüler el ayasının KUKA6 R900 SIXX üzerine monte edilme aşamaları .....	35
Şekil 2.31 Montajı tamamlanan el ayası ve belirli objeleri kavrarken ki görüntüleri	35
Şekil 2.32 Hibrit yapıda bir cerrahi robot elin nihai üretimi.....	36
Şekil 3.1 Üç Serbestlik Dereceli Yönelim Platformu [52].....	38
Şekil 3.2 Manipülâtörün kinematik gösterimi.....	38
Şekil 3.3 Küresel mafsallardan kaynaklı pasif hareket gösterimi .....	39
Şekil 3.4 Çok Serbestlik Dereceli Modüler Manipülâtör Yapısı [52].....	40
Şekil 3.5 Platformlara kartezyen koordinat sisteminin atanması .....	40
Şekil 3.6 Kapalı devre denklemi gösterimi .....	42
Şekil 3.7 Atanan referansların sistem üzerinde gösterimi.....	43
Şekil 3.8 Alt platform kinematik gösterimi .....	44

Şekil3.9 Üst platform kinematik gösterimi .....	46
Şekil 3.10 Birleştirilmiş platforma atanan koordinatların sistem üzerinde gösterimi	49
Şekil 3.11 Sistemin ana gövdesini ifade eden seri zincir .....	49
Şekil 3.12 Doğrusal uzamayı sağlayacak yumuşak eyleyici döküm kalıbı ve olası hava kabarcıklarından arındırılması işlemi .....	52
Şekil 3.13 Doğrusal uzamayı sağlayacak eyleyicinin şişmeden önceki ve şiştikten sonraki hali .....	52
Şekil 3.14 (a) Yumuşak eyleyicinin şişmesine olanak sağlayacak torus parçaları (b) ana kalıp parçaları (c) birleştirilmiş kalıp .....	53
Şekil 3.15 (a) Silikonun kalıba dökülmesi (b) kalıbın kürlenmiş silikondan ayrılması (c) sensörler için gerekli boş hacmi yaratacak olan parçanın kürlenmiş silikondan ayrılması (d/e)torus parçalarının silikonda ayrılması (f) kalıptan tamamen arındırılan silikon eyleyici (g) dış duvardan ayrılan silikonda meydana gelen yarığın tasarlanan uzun çubuk yardımıyla desteklenmesi (h) donut şeklindeki eyleyicinin son hali.....	54
Şekil 3.16 Donut şeklindeki yumuşak eyleyicinin şişmiş halinin farklı açılardan görüntüsü.....	54
Şekil 3.17 Tasarım gelişim evresi .....	55
Şekil 3.18 Donut şeklindeki doğrusal uzamayı sağlayacak olan eyleyicinin son kalıp parçaları.....	55
Şekil 3.19 (a) kalıp dış duvarı (b) boş hacmin oluşmasına olanak sağlayacak silindirik parçanın dış duvara montajı (c/d/e/f) torus parçalarının montajı (g) birleştirilmiş kalıp (h) sızmanın oluşmasını önlemek için oyun hamuruyla bağlantı yerlerinin kapatılması .....	56
Şekil 3.20 Nihai kalıp döküm işlemi.....	56
Şekil 3.21 Eyleyicinin şişmiş son hali.....	57
Şekil 3.22 Oryantasyon manipülatörü iskelet yapısı montaj sıralaması .....	58



Şekil 3.23 Manipülator uç noktalarına doğrusal yumuşak eyleyicinin bağlanmış görüntüsü.....	58
Şekil 3.24 Oryantasyon platformuna bağlanacak olan doğrusal yumuşak eyleyici tasarım ve üretim aşamaları .....	58
Şekil 3.25 Yumuşak eyleyicinin pnömatik basınç altında uzama durumu .....	59
Şekil 3.26 Montajı tamamlanan manipülatorün hareket durumu.....	59
Şekil 3.27 Yeni oryantasyon manipülatorü iskelet yapısı montaj sıralaması.....	60
Şekil 3.28 Modüler iskelet yapısının parçalarının montajı .....	60
Şekil 3.29 Yeni doğrusal yumuşak eyleyici üretim aşamaları .....	61
Şekil 3.30 Montajı tamamlanan yeni manipülatorün hareket durumu.....	61
Şekil 3.31 Modüler hibrit manipülatorün çeşitli konumlandırılması.....	61
Şekil 3.32 Modüler hibrit manipülator montaj aşaması ve istenilen oryantasyon hareketinin sağlanması .....	61

# Tablolar Listesi

Tablo 2.1 Smooth-on Dragon Skin FX Pro Teknik Özellikler .....	20
Tablo 2.2 Smooth-on Ecoflex 00-30 Teknik Özellikler.....	22
Tablo 2.3 Polidimetilsiloksandan Teknik Özellikler .....	27

# Kısaltmalar Listesi

PDMS	Polidimetilsiloksandan
Pneu-Net	Pnömatik odacık
VUV	Vakumlu ultraviyole sistemi
IMU	Dahili ölçüm birimi
MIT	Massachusetts Teknoloji Enstitüsü
GI	Gastrointestinal kanal

# Semboller Listesi

M	Serbestlik derecesi
$\sum f_i$ :	Platform üzerindeki elementlerin bağlantı noktaları sayısı
N	Platform üzerindeki elementlerin bağlantı noktaları sayısı
$\lambda$	Çalışma uzayı
C	Platformlar arasındaki bağlantı sayısı
B	Platform sayısı
J <sub>p</sub>	Pasif mafsal sayısı

# Bölüm 1

## Giriş

Robotlar karmaşık bir dizi eylemi otomatik olarak gerçekleştirebilen, özellikle bilgisayar tarafından programlanabilen ve harici bir kontrol cihazı tarafından yönlendirilebilen makinelerdir. Robotik sistemler temelinde kullanılan malzemenin ve materyalin yapısına göre sert veya yumuşak robotlar olarak sınıflandırılabilirler. Geleneksel sert robotlar çevreyle etkileşime girme yeteneğini sınırlayan katı temel yapılara sahiplerdir. Endüstri başta olmak üzere çoğu sektörde yaygın olarak kullanılan geleneksel endüstriyel robotların tasarımlarında öncelikli olarak konumlandırma doğruluğu, hız ve yük kapasitesi önem taşıdığından bu robotların tasarımları yapılırken robot kollarının hareket doğruluğunu arttırmak ve titreşimlerini azaltmak için yapılarının mekanik olarak rijit hale getirilmeleri gerekmektedir. Bu nedenle, endüstriyel robot tasarımlarında yumuşak malzemelerden ziyade sert malzemeler kullanılmaktadır. Öte yandan robotun konumlandırma doğruluğunun ve hızının göz ardı edilebileceği durumlarda kullanılan insan ile işbirlikçi çalışmaya uyumlu yumuşak robotlar nazik hareketlerle güvenli ve yumuşak bir dokunuş sergilerler. Bu uyumlu robotları elde etmek için iki farklı yaklaşım gerçekleştirilebilir. İlk olarak katı bağlantılara sahip geleneksel robotlara kuvvet kontrolü gibi çeşitli kontrol yaklaşımları ile gerekli uyumluluk dahil edilebilir. Diğer bir yaklaşım ise robot tasarımları için kauçuk ve elastomer gibi yumuşak malzemelerin kullanılmasıdır. Buradaki avantaj, güvenilirlik ve ucuzluk sağlayan mekanizmanın basitliğidir. Ayrıca yumuşak malzemeler, farklı nesnelerin şekillerini kavrayarak uyumlu şekilde deforme olabildiğinden daha güvenlidir [1].

## 1.1 Biyo-ilhamlı Yumuşak Robotlar

Son yıllarda doğa ve doğa ilkeleri çeşitli sektörlerde çarpıcı yeniliklerin gelişmesinde ilham kaynağı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Doğadaki canlıların bu uyumluluğuna bakıldığında bu tür davranışları mümkün kılan temel kavramları türeterek ve kopyalayarak hayvan yeteneklerini anlamaya ve çoğaltmaya çalışmak kaçınılmazdır [2]. Hayvanlar aleminde, çoğu hareket kasların periyodik olarak salınım veya karşılıklı hareket etmesiyle oluştuğundan fil hortumları, ahtapot kolları, kalamar dokunaçları ve yılanlar gibi doğal manipülatörler, yenilikçi robotik cihazların geliştirilmesi veya geleneksel cihazların performansının (hareket veya kavrama açısından) iyileştirilmesi için yaygın olarak bir model olarak kabul edilmiştir [3–7]. Bu sebeple son yıllarda geniş bir popülerlik kazanan yumuşak robotik alanında biyo-ilhamlı yuvarlanan robot, balık robotu ve dört ayaklı robot gibi birçok mobil yumuşak robot türü geliştirilmiştir [8]. Bununla birlikte, en umut verici ve popüler yumuşak robot mimarilerinden biri de, sürekli yumuşak robotik kollardan oluşur (continuous soft robotic arms). Yüksek el becerisine ve sağlamlığa sahip olan bu robotik kollar insanlarla güvenli bir şekilde etkileşime girebilir [9].

Yumuşak robotlar, teorik olarak sonsuz sayıda serbestlik derecesine sahiplerdir. Bu, robot ucunun sonsuz sayıda konfigürasyonu ile üç boyutlu çalışma alanındaki her noktaya ulaşabileceği aşırı artıksıl bir konfigürasyon alanına yol açar. Yumuşak robotların, sıkıştırıcı kuvvetlere karşı çok az direnç oluşturmaları ve dolayısıyla engellere uyum sağlayabilmeleri bakımından, aşırı artıksıl katı robotlara göre yumuşak ve kırılğan yükleri hasara neden olmadan taşıyabilmeleri gibi ek bir avantajları vardır. Büyük gerinim deformasyonu kullanarak ve cismin anma boyutlarından daha küçük yüzeylerine tutunarak kavrama hareketini gerçekleştirebilirler. Bu da yumuşak robotları, yaralanmaya neden olmadan insanlarla etkileşime girebilen kapalı alanlara ulaşmak için yüksek el becerisi gerektiren servis ve boyama gibi alanlarda, yapılandırılmamış ortamlarda çalışan kurtarma robotları gibi askeri alanlarda ve özellikle de cerrahide kullanım için medikal robotik alanında ideal kılar.

## 1.2 Medikal Robotik Ve Yumuşak Robotlar

Önceki bölümde de değinildiği üzere yumuşak robotlar canlı hücreler ve insan vücudu ile fiziksel temasa geçme gibi sistemin kinematik parametrelerinin önceden tanımlanmadığı durumlarda yüksek performans potansiyeline sahiptir. Bu sebeple yumuşak robotlar, farklı disiplinlere sahip bilim insanları tarafından iş birlikçi ve yardımcı robotik uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. Bu doğrultuda takip eden kısımda yumuşak robotların rehabilitasyon ve medikal uygulamalarındaki çalışmalarına değinilmiştir.

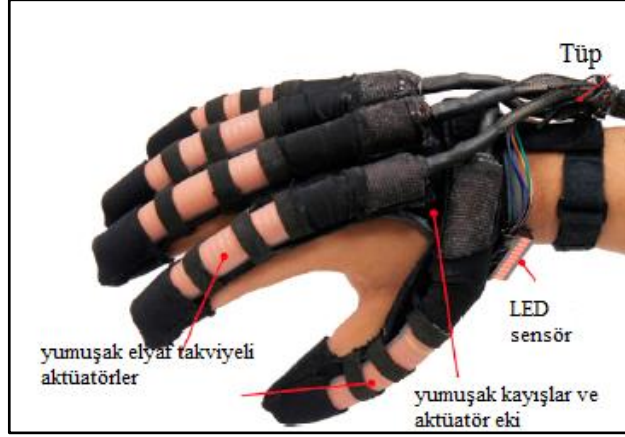
### 1.2.1 Rehabilitasyon Uygulamaları

Yumuşak robotiğin sıklıkla kullanıldığı alanlardan en önemlileri içerisinde rehabilitasyon ve fizik tedavi uygulamaları yer almaktadır. Küresel olarak gelişmiş ülkelerde hemiparezi veya diğer benzer rahatsızlıkları olan yaklaşık on milyon kronik inme hastası vardır [10]. Bahsedilen sağlık sorunları, kişinin günlük yaşam aktivitelerini büyük ölçüde engelleyerek kişinin yaşam kalitesini önemli ölçüde azaltabilmektedir. Vücut fonksiyonunu iyileştirmek ve belirli hareketlerin doğruluğunu ve hareket açıklığını geliştirmek için genellikle bir fizik tedavi uzmanı eşliğinde tedaviler uygulanmaktadır. Ancak bu yöntemler yoğun emek, maliyet ve zaman gerektirdiğinden hasta ile uyumu zor olmaktadır. Hastaların evde veya klinikte kendi başlarına egzersiz yapabilecekleri bir sistem, fizik tedaviyi daha erişilebilir, uygun maliyetli, sonuç odaklı hale getirecek ve daha iyi sonuç alma potansiyelini artıracaktır. Bu yüzden literatürde hem omuz, dirsek, bilek ve parmak gibi alanları hedefleyen üst vücut rehabilitasyonuna hem de kalça, ayak, yürüyüş eğitimi, diz ve ayak bileği gibi alanları hedefleyen alt ekstremitte rehabilitasyonuna yönelik çok sayıda yumuşak robotik rehabilitasyon sistemleri geliştirilmiştir [11,12].

#### 1.2.1.1 El Rehabilitasyonu

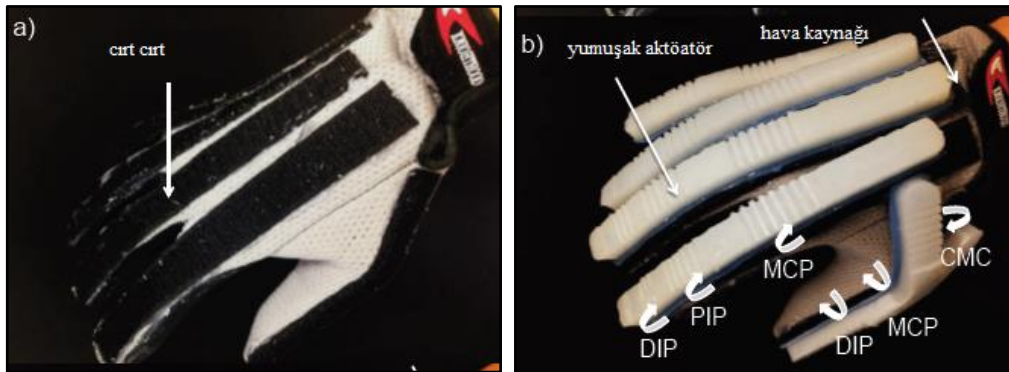
Harvard Üniversitesi'nde yapılan araştırmalarda fonksiyonel kavrama patolojileri olan hastalar için tekrarlayan görev uygulamalarına yardımcı olan yumuşak bir robotik eldiven geliştirilmiştir [11]. Beş parmağın hepsinin sırt tarafında açık avuç içi eldiveni ve yumuşak aktüatörler içeren sistemde eyleyiciler hidrolik basınçla

kontrol edilir ve portatif bir bel kemeri paketine monte edilmiş bir su pompasına ve hazneye bağlanır. Pakette ayrıca kontrol kartları ve pil takımı olduğundan tüm sistem taşınmaya elverişlidir. Açık avuç tasarımıyla birlikte taşınabilirlik, eldivenin yalnızca rehabilitasyon için uygun olmadığı, aynı zamanda kavrama gerektiren günlük işlerde de yardımcı olabileceği anlamına gelmektedir.



Şekil 1.1: Yumuşak el prototipi [11]

Bir diğer çalışma ise Singapur Ulusal Üniversitesi'ndeki araştırmacılar tarafından geliştirilen tekrarlayan görev el rehabilitasyonu ve kavrama ve çimdiklemeyi içeren günlük görevlerde yardım için robotik bir eldivendir [12]. Sistem, bir kumaş eldiven, beş parmağın hepsinin sırt tarafı boyunca yerleştirilmiş yumuşak pnömatik eyleyiciler, boru, hava kompresörü/pompa ve Arduino denetleyicisi içerir (Şekil 1.). Eldivenin en önemli özelliği, farklı terapiler için farklı el hareketleri gerçekleştirmelerini ve çok çeşitli el boyutlarına uymalarını sağlayan son derece özelleştirilebilir gömülü eyleyiciler olmasıdır.

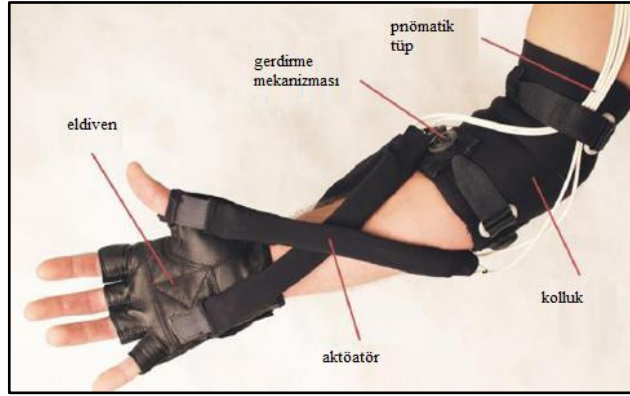


Şekil 1.2: Yumuşak giyilebilir bir robotik cihazın prototipi [12]



### 1.2.1.2 Bilek Rehabilitasyonu

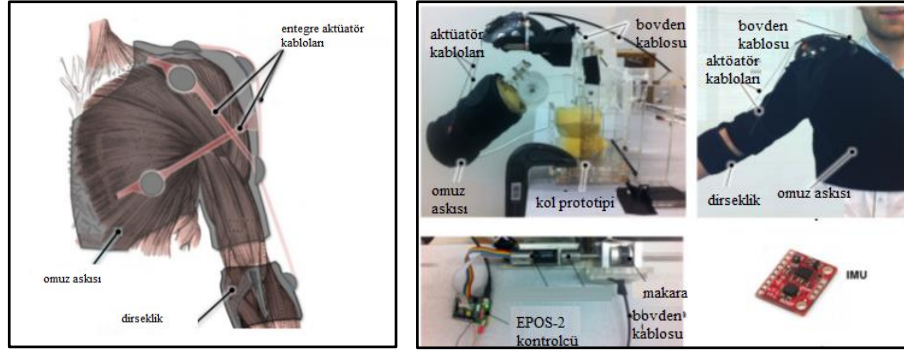
Harvard Üniversitesi'nde yapılan çalışmalarda, inme sonrası meydana gelen felç durumundan sonra motor fonksiyonların yeniden kazanılması adına yumuşak bir robotik ortez tasarlanmıştır [13]. Eldiven ve dirsek manşonuna takılan pnömatrik eyleyicileri ve eyleyicilerin boruları Arduino ile kontrol edilen bir hava pompasına bağlanır. Eldivenin en önemli yönü ise bilek hareketleri gerektiren (fleksiyon/ekstansiyon, supinasyon/pronasyon ve radyal/ulnar) tedavilere yardımcı olabilmesidir (Şekil 1.).



Şekil 1.3: Bilek için giyilebilir yumuşak robot tasarımı [13]

### 1.2.1.3 Omuz Rehabilitasyonu

Harvard Üniversitesi ve Worcester Polytechnic Enstitüsü'nün ortak çalışmaları sonucunda, hastaların felçten sonra motor fonksiyonlarını yeniden kazanmalarına yardımcı olmak için omuz abdüksiyonuna yardımcı olan giyilebilir bir omuz rehabilitasyon cihazı geliştirilmiştir [14]. Prototip, omzun 3 serbestlik derecesinden yalnızca birini sağlayabilse de doğrusal ve açısız yanlış hizalamaları başarıyla algılayabilmekte ve eksen dışı torklar oluşmaması için bunları düzeltebilmektedir. Bir EPOS-2 24/2 dijital konumlandırma kontrolörü, IMU'lar, Maxon Motors eyleyici paketi, Bowden kabloları ve kumaş giysi için sistemin olası yanlış hizamaları tolere ederek güvenli, rahat ve farklı anatomilere uyarlanabilir hale getirilmesine olanak sağlanmıştır (Şekil 1.4). Bu sayede hastalar sistemi ev gibi kişisel ortamlarda güvenle kullanabilmektedirler.



Şekil 1.4: Yumuşak ortez sistem tasarımı ve prototipi [14]

#### 1.2.1.4 Dirsek Rehabilitasyonu

İngiltere'deki Reading Üniversitesi ve Japonya'daki Ritsumeikan Üniversitesi'nden araştırmacılar, felçli hastaların motor işlevlerini yeniden kazanmalarına yardımcı olacak bir dirsek rehabilitasyon sistemi geliştirmiştir [15]. Hareket aralığı  $90^{\circ}$  -  $130^{\circ}$  olan Robot, dirseğin esnemesine ve ekstansiyonuna yardımcı olan yumuşak malzemelerden (%100 silikon) üretilmiş, düşük maliyetli, hafif ve giyilebilir bir cihazdır (Şekil 1.5). Bir web kamerası, PIC mikro denetleyici, hava pompası, basınç sensörleri, şişirilebilir yumuşak modüller ve yumuşak kol ekleri içeren sistem fizik tedavi kliniklerinde kullanılmasının yanı sıra hastaların evde kullanabilmelerine de olanak sağlamaktadır.

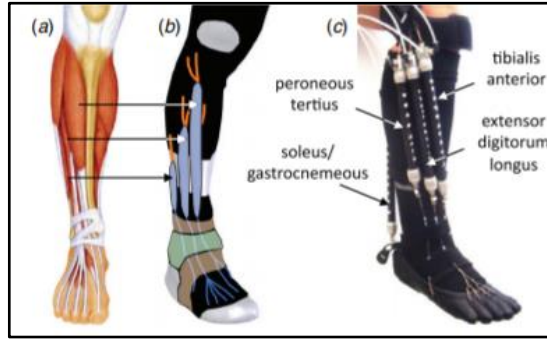


Şekil 1.5: Dirsek rehabilitasyonu için yumuşak robot tasarımı [15]

#### 1.2.1.5 Ayak / Ayak Bileği Rehabilitasyonu

Carnegie Mellon Üniversitesi, BioSensics, Güney Kaliforniya Üniversitesi, MIT, Harvard Üniversitesi ve Boston Çocuk Hastanesi'nden yapılan çalışmalar doğrultusunda, dorsifleksiyon ve inversiyona aktif yardım sağlayan yumuşak bir yapıya sahip bir ayak bileği rehabilitasyon cihazının prototipi geliştirilmiştir. Cilt, kaslar, tendonlar ve bağlar arasındaki biyolojik etkileşimlere dayanan cihaz tasarımı

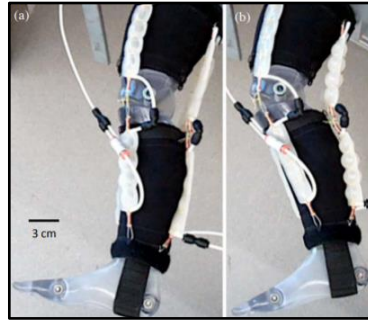
tamamen yumuşak ve esnek malzemelerden yapıldığı için doğal hareket aralığını kısıtlamadan bacağın dışına uyum sağlamaktadır [16].



Şekil 1.6: Biyo-ilhamlı aktif yumuşak ortez cihazının tasarımı ve prototipi [16]

#### 1.2.1.6 Diz Rehabilitasyonu

Carnegie Mellon Üniversitesi ve Harvard Üniversitesi'nde yapılan çalışmalarda sinir sistemi hasarlı olan bebeklerin ve küçük çocukların rehabilitasyonunda kullanılmak üzere diz fleksiyonu ve ekstansiyonuna yardımcı olmak için yumuşak, giyilebilir bir robotik cihaz tasarlanmıştır (Şekil 1.7) [17]. Cihaz sinir sistemi hasar almış bebeklerin ve küçük çocukların rehabilitasyonunda yönelik yapılmıştır. Ve cihaza entegre olan yumuşak robot çalıştırılmadan önce hava odalarının sıfır hacmine sahip olması nedeniyle çalıştırıldıktan sonra geleneksel pnömatik kaslara nazaran daha yoğun olan düz pnömatik kasların tasarımını vurgulamaktadır.



Şekil 1. 7: Diz rehabilitasyonu için yumuşak robot tasarımı ve prototipi [17]

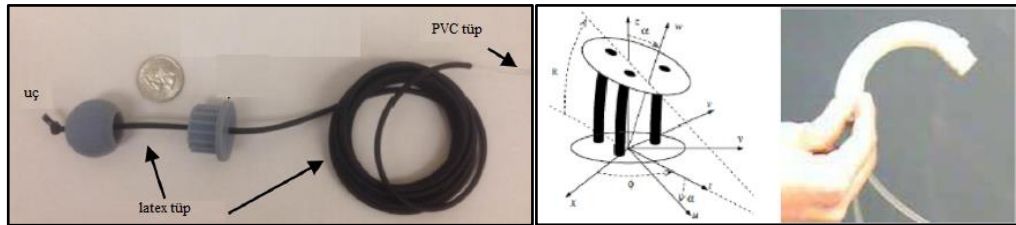
#### 1.2.2 Klinik Uygulamalar

Son zamanlarda tıbbi prosedür uygulamalarında dokuya zarar verme riskini azaltmak, esnekliğı artırmak, biyouyumluluğı iyileştirmek, mevcut teknolojiyi geliştirmek ve biyolojik işlevleri modellemek için yumuşak ve uyumlu malzemeler

üzerinde yoğunlaşmıştır. Kolonoskopi, ventriküler yardım ve modelleme ve üriner kateterler dahil olmak üzere cerrahi uygulamalar için yumuşak robotikte ilerlemeler kaydedilmiştir. İlgili riteratürde yumuşak endoskoplar, yumuşak kalpler, yumuşak kateterler ve ultrason görüntüleme sistemleri gibi bir çok uygulama yer almaktadır [18].

#### 1.2.2.1 Endoskop

Standart kolonoskopiler, hem endoskopun yaptığı manevra hareketlerinden hem de hastaya işlem sırasında gerekli durumlarda anestezi ile yarı uyur halde insuflasyon işlemi gerektirdiğinden hastalar için yavaş ve ağrılı bir süreçtir. Bu doğrultuda ilgili çalışmalarda endoskopi ve kolonoskopi işlemlerini iyileştirmesi için Gastrointestinal (GI) kanaldan kendi kendine hareket edebilen yumuşak robotik sistemler önerilmiştir. Genel olarak, daha önce önerilen kolonoskopi robotlarında doku hasarı, yörünge üzerinde kontrol eksikliği, yavaş ilerleme, yüksek maliyet, uzun prosedür süresiyle beraberinde gelen artan riskler gibi birçok sorun olduğundan çalışmalar bu noktalarda yoğunlaşmıştır. Bu doğrultuda Nebraska-Lincoln Üniversitesi'nde yapılan çalışmalarda, kullanımı basit, üretimi kolay, ucuz ve tek kullanımlık, kendinden tahrikli bir robot tasarlanmıştır. Tasarım içerisinde sahip olduğu yuvarlak uç, lateks borulu pnömatik eyleyici, anal introduser ve erken ventriküler kasılma (PVC) borusu ile minimal şekilde tasarlanmıştır. Bu tahrik modunda, solucanlarda gözlemlenen sağınım hareketinden esinlenilmiştir [19]. Bu hareket modelinde pnömatik eyleyiciler önce radyal sonra aksenel olarak genişleyecek yapıya sahiptir. Aksenel genişleme sonucunda robot ileri doğru hareketini gerçekleştirir (Şekil 1.8) [20].

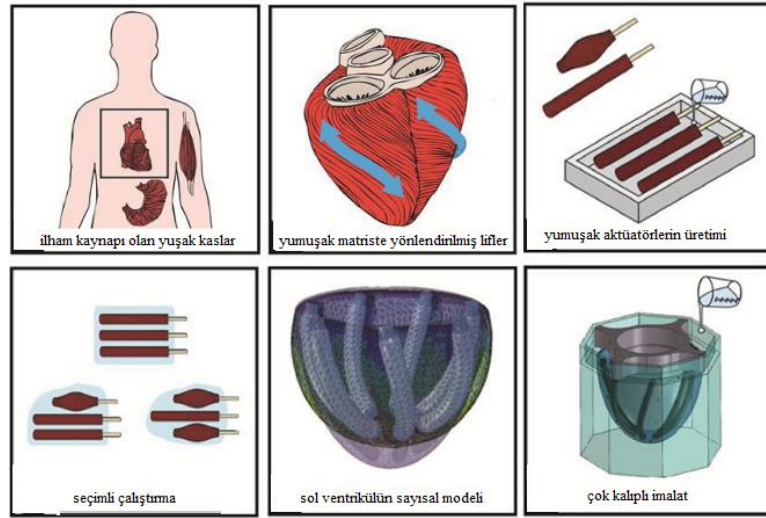


Şekil 1.8: Kolonoskopi için akışkan robot tasarımı [20]

#### 1.2.2.2 Kalp

Harvard Üniversitesi, Münih Teknik Üniversitesi, Almanya ve Boston Çocuk Hastanesinin yaptıkları ortak çalışmasında kalbin hem normal hem de patolojik

hareketlerini modelleyebilen, kalbin sol ventrikülünün bir modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan model üç boyutlu bir elastomerik dizey içinde düzenlenmiş olup basit kasılma eyleycilerinden oluşmaktadır (Şekil 2.2). Farklı tasarımların performansını tahmin etmek için doğrusal olmayan sonlu eleman kodunu içeren Sol ventrikül vaka çalışması, çeşitli biyolojik hareketleri modelleyebilen yumuşak tahrikli materyallerin simülasyonunu, üretimini ve deneysel karakterizasyonunu doğrulamanın bir yolu olarak sunulmuştur [21].



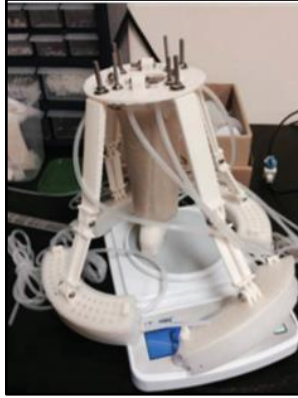
Şekil 1.9: Fizyolojik hareket üretimi için biyo-ilhamlı yumuşak tahrikli materyalin ilhamı, konsepti ve gerçekleştirilmesi [21]

### 1.2.2.3 İdrar Kateteri

Sağlık hizmetlerinde yaygın ve zorlayıcı bir konu olan üriner kateterlerin bakteriyel biyofilmlerle olan enfeksiyonu Duke Üniversitesi'nden araştırmacılar tarafından ele alınmıştır [22]. Biyofilmleri mekanik olarak bozmak ve çıkarmak için isteğe bağlı bir kirlilik giderme metodolojisi sunan ve üriner kateterlerin daha önce erişilemeyen ana drenaj lümeninden bulaşıcı biyofilmlerin aktif olarak çıkarılması için bu yöntemi öneren ilgili çalışma biyofilm ile kateterin iç yüzeyi arasındaki bağların, iç yüzeye nispeten yüksek bir gerinim hızı uygulandığında ve gerinim kritik bir değere ulaştığında koptuğunu da göstermiştir. Bu doğrultuda ilgili çalışmada hidrolik veya pnömatik eyleycili bir elastomerik kateter geliştirilmiştir.

#### 1.2.2.4 Yumuşak Robot Destekli Ultrason Görüntüleme

Singapur Ulusal Üniversitesi'nde yapılan çalışmalarda, uyumlu ve daha güvenli görüntüleme sağlamak için vücuda bağlı yumuşak bir robotik sistem oluşturulmuştur. Yumuşak pnömatik eyleyici, aspirasyon ünitesi ve tüm cihazın dengesini korumak için gerekli destekleyici yapılardan oluşan ve vücuda takılan bu yumuşak robotik platform, yüksek kaliteli ultrason görüntüleme için temas kuvvetini optimize ederek prob yönlendirmesini taklit etmektedir (Şekil 2.3). Bu yumuşak robot manipülatöre ilişkin ön veriler, uygulanan hava basıncı ile yumuşak robota uygulanan kuvvet arasındaki doğrusal ilişkileri göstermektedir. Bu şekilde yumuşak pnömatik eyleyicinin bükülme açısı, basınçlı hava basıncı ile orantılı olarak değişmektedir. Deneysel sonuçlar, yumuşak robot destekli platformun daha az insan etkileşimi ile daha güvenli ve daha uyumlu ultrason görüntüleme sağlayabileceğini göstermektedir [23].

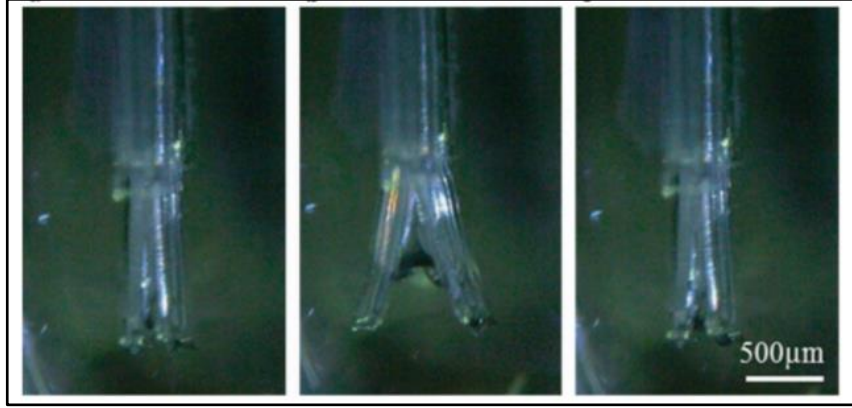


Şekil 1.10: Ultrason görüntüleme için kullanılacak yumuşak robot prototipi [23]

#### 1.2.2.5 Mikro Parmak Manipülator

Konishi ve ekibi tarafından hücre sel kümeleri hareket ettirmek için bir manipülator sistemi tasarlanmıştır. Bu çalışma kapsamında, yumuşak mikro parmaklar polidimetilsiloksandandan (PDMS) kullanılarak termal kütleme yöntemiyle üretilmiş ve daha sonra aynı anda basınçlandırmaya olanak sağlamak için içerisinde hava boşlukları olacak şekilde birleştirilmiştir. Yumuşak pnömatik eyleyici mantığında görev yapan her bir mikro parmak, basınçlandırmanın artırılmasıyla açılmakta ve aynı şekilde basınçlandırmanın azaltılmasıyla da kapanmaktadır. Mikro parmakların nemli nesnelere kavrama yeteneğini geliştirmek için mikro parmakların yüzeyine vakumlu ultraviyole (VUV) sistemi entegre edilmiştir. Mikro parmakları hareket

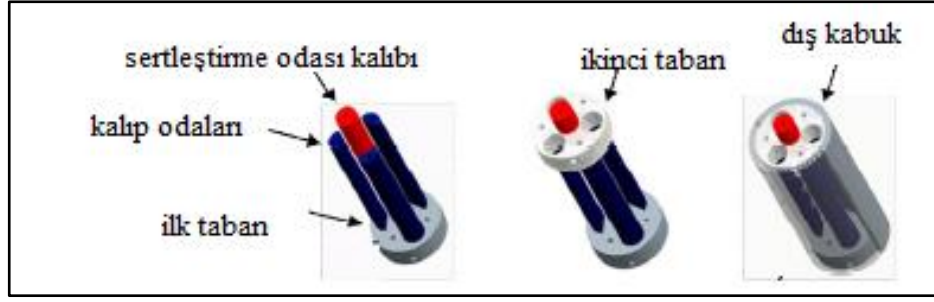
ettirmek için motorlu bir konumlandırma aşaması ve mikro parmakları harekete geçirmek için bir pnömatik sistem kullanılan sistemde tek seferde bir hücresel kümeyi bir konumdan alıp başka bir konuma bırakabilmektedir (Şekil 2.4) [24].



Şekil 1.11: Mikro parmakların PBS çözeltisinde denenmesi [24]

#### 1.2.2.6 STIFF-FLOP Manipülatör

Cianchetti ve ekibi çalışmalarını robotik laparoskopik cerrahisi için esnek bir manipülatörün tasarımına uygulanabilecek çeşitli teknolojilerine evriltmişlerdir. STIFF-FLOP teknolojisine (cerrahi operasyonlar için sertlik kontrollü esnek ve öğrenilebilir manipülatör) dayanan önerilen çözüm, uzama ve bükülmeyi kontrol etmek için esnek akışkan aktüatörleri ve değişken sertlik sağlamak için granüler sıkışmayı birleştiren yeni bir tasarımıdır. Modül, kıvrımlı bir kılıfla çevrelenen elastomerik bir silindir içine yerleştirilmiş üç akışkan odası ve bir merkezi sertleştirme odasından oluşur. Akışkan odacıkları, akışkan basıncındaki değişikliklere paralel olarak hacim olarak değişir. Modülün hareketi, her üç bölmedeki sıvı basıncının değiştirilmesi ve böylece modülün istenen bükülmesini veya uzamasını sağlamak için bir, iki veya üç bölmeyi aynı anda harekete geçirerek kontrol edilir. Sertleştirme odası granül kahve tozu ile doldurulmuş bir lateks zardan oluşmaktadır. Sıkışma, sertleştirme odasındaki vakum seviyesinin değiştirilmesiyle kontrol edilir, bu da odanın sertliğini ve dolayısıyla tüm modülün sertliğini değiştirir (Şekil 2.5) [25,27].



Şekil 1.12: Üç parçayı barındıran silikon silindir için kalıbın montajı akışkan odaları ve merkezi sertleştirme kanalı [25]

Bugüne kadar yapılan çalışmalarda yumuşak robotlara öncelikle elastomerik matrisler içine yerleştirilmiş pnömatik ağlar sayesinde tahrik verilse de pnömatik olarak çalıştırılan robotların çoğu hareket için yeterli kuvvetleri oluşturabilmek adına katı güç ve kontrol sistemlerine bağlı olmalıdır [27–30]. Son zamanlarda, yumuşak robotlar için bir alternatif olarak dış ve iç uyaranlara (örneğin, sıcaklık, ışık, kimyasal gradyanlar ve elektrik alanları) yanıt olarak kendi kendine harekete geçen aktif maddeler araştırılmıştır [31,32]. Ancak aktif materyallerin de üstesinden gelinmesi gereken bazı sınırlamaları vardır. Bu sınırlamalara örnek olarak, elektroaktif eyleyicilerin katı güç kaynaklarına bağlanması [33,34] ve şekil hafızalı polimerlerin manuel olarak yeniden programlanması gerekliliği [35,36], diferansiyel büyümeye maruz kalan malzemelerden yapılmış çift katmanlı şeritler hacimsel olarak pahalı olması [37,38] ve hidrojel bazlı eyleyicilerin hızlı bir şekilde büyük kuvvetleri üretmek için pnömatik sistemlerle eşleştirilmesi gereklilikleri verilebilir [39].

Görüldüğü gibi hızla gelişen teknolojik ilerlemeler sayesinde robotik teknolojilerin sağlık alanında kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Günümüzde, içerisinde bulunduğumuz coğrafyanın gelecek dönemdeki teknolojik yol haritalarını belirleyen Ufuk (Horizon) 2020 ve Robotik (Robotics) 2020 gibi birçok güncel araştırma ve inovasyon programlarında da robotik teknolojilerin sağlık alanına entegrasyonu detaylı bir şekilde vurgulanmış ve ele alınmıştır. Bu kapsamda hazırlanan raporlar incelendiğinde sağlık alanında ihtiyaç duyulan sağlık personelinin hastalar ile etkileşimini kolaylaştıracak iş birlikçi robotların ve bakıma ihtiyaç duyan hastaların gündelik yaşamını rahatlatacak yardımcı robotların tasarımlarının gerçekleştirilmesinin yakın gelecek için kurgulanan en önemli alanlardan biri olduğu net bir şekilde görülmektedir [40]. Bu doğrultuda yapılan çalışma, bilimsel açıdan güncelliği doğrulanmış ve ilgili literatür içerisinde her geçen gün artan çalışmalar ile



sürekli gelişmekte olan insan robot etkileşimleri alanında kurgulanarak, tez kapsamında iş birlikçi ve yardımcı robot manipülatör olarak kullanılabilen yumuşak ve rijit yapıda bir hibrit modüler robot manipülatörlerin geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Günümüzde hızla artan nüfusa paralel olarak tedavi ihtiyacı duyan birey sayılarında, alanda hizmet verebilecek deneyimli sağlık personeline oranla daha hızlı bir artış görülmektedir. Ancak tedavi ve bakım süreçlerinde hastaların yanında bulunması gereken, alanlarında uzman sağlık personel sayıları aynı oranda yükselmemektedir. Bu nedenle de tedavi/bakım süreçleri aksamakta, çok ileri bir tarihe ertelenmek zorunda kalmakta veya hiç uygulanmamaktadır. Bu noktada tedavi hizmeti veren alanlara, ilaçların hastaya verilmesi, hasta hijyeninin sağlanması, hasta üzerinden örnek alınması ve rutin bakımların gerçekleştirilmesi gibi uygulamalarda sağlık personeliyle paralel çalışabilecek iş birlikçi robot sistemlerinin entegre edilmesi, sağlık personelinin aynı anda daha fazla birey ile verimli bir şekilde ilgilenebilmesini destekleyerek, kritik vakalara daha çok zaman ayırabilmelerini sağlayacaktır. Bu sürece sağlık koşullarındaki iyileşmeye bağlı olarak artmakta olan yaşlı nüfusu da eklendiğinde, yaşlı bireylerin ihtiyaç duyabileceği ve rutin gündelik yaşamlarını rahatlatacak uygulamaların, sağlık personeli veya bakıcılar yerine kullanılacak yardımcı robotlar yardımıyla gerçekleştirilmesi, ilgili personelin daha verimli olarak kullanımına olanak sağlayacaktır. İnsan robot etkileşiminin çok yüksek olduğu bu gibi olanakların başarılı bir şekilde sağlanabilmesi için uygun robot manipülatör tasarımının gerçekleştirilebilmesi en önemli başarı ölçütlerinden biridir.

Günümüzde farklı alanlarda uygulama çalışmaları gerçekleştirilen birçok iş birlikçi ve yardımcı robotik uygulamaları incelendiğinde uygulamalarda ağırlıklı olarak rijit yapıya sahip, klasik endüstriyel otomasyon sistemleri için geliştirilmiş farklı serbestlik dereceli robot manipülatörlerin kullanıldığı görülmektedir [41–44]. Her ne kadar rijitlik manipülatör uç nokta hassasiyetinin yakalanabilmesi için önemli bir özellik olsa da, insanın etkileşiminin ağırlıklı olarak yer aldığı iş birlikçi ve yardımcı robotik uygulamalarında, rijit bir sistemin robot manipülatör çalışma hacminde gerçekleştirilecek herhangi bir hata sonucunda güvenlik riski oluşturabileceği göz ardı edilemez. Bu nedenle ilgili uygulamalarda özellikle de sağlık alanında

kullanılacak robot manipülatörlerin esnek yapıda olması önem kazanmaktadır. Bu kapsamda yumuşak robot çalışmaları literatür içerisinde hızla artmaktadır.

Rossiter ve Hauser yumuşak robotik sistemlerin önemini net olarak belirtmişlerdir [45]. Çalışmalarında vurgulanan en önemli unsur; yumuşak robotik sistemlerin insan ile fiziksel etkileşim gerektiren uygulamalarda esnek yapıları sayesinde doğal bir güvenlik bariyeri oluşturma yetenekleridir. İnsan hareketlerinin önceden tahmin edilmesinin de çok zor olduğu göz önüne alındığında yumuşak robotik sistemlerin güvenli insan-robot etkileşimini sağlamada yüksek potansiyeli olduğu vurgulanmıştır. Kim ve arkadaşları kapsamlı incelemelerinde yumuşak robotların kullanım alanlarını gelecekte aşılması gereken zorluklar ile birlikte belirtmiştir [3]. Çalışma dahilinde biyo esinlenme sayesinde yumuşak yapıda tasarlanmış hareket sistemlerinden, kavramaya yönelik uç nokta tasarımlarına kadar birçok bilimsel araştırma incelenmiştir. Her ne kadar yüksek uygulama potansiyeline sahip olsalar bile yumuşak robotik sistemlerin belirli bir görev dahilinde istenilen kuvvetleri sağlayabilmesi için değişken rijitlik geçişine ihtiyaçları vardır. Bu da esnek yapıda yüksek kuvvet üretebilecek yumuşak eyleyici tasarımlarının önemini göz önüne sermektedir. Ayrıca rijit manipülatör sistemlerinde belirli olan mafsallık yerleşimleri yumuşak robotlarda bulunmadığından, belirli bir hareketi oluşturulabilmek için tüm yumuşak robot gövdesinin bir bütün olarak hareket ettirilmesi gerekmektedir. Bu da beraberinde deformasyon ve uç nokta hassasiyetinin azalması gibi sorunları gündeme getirmektedir. Cianchetti ve arkadaşları çalışmalarında istenilen kuvvetleri uygulayabilecek, çok bölümlü olarak tasarlanan ve her bölümün değişken rijitlikte çalışmasının mümkün olduğu, tek insizyondan laparoskopik cerrahi uygulamalar için geliştirilmiş bir yumuşak robot manipülatör önermiştir [46]. Çalışmada manipülatör gövdesinin bağımsız ve değişken hareket ettirilebilmesini sağlayan çoklu bölme kullanımının uç nokta hassasiyeti ve yumuşak manipülatör çevikliğine etkisi net olarak görülmektedir. Aynı yazarın gerçekleştirdiği bir başka inceleme çalışmasında ise sağlık alanındaki günümüz güncel yumuşak robotik uygulamaları robotik cerrahi, vücut içerisinde ilaç iletimi, rehabilitasyon, yardımcı robotik, giyilebilir ortezler, protezler, yapay organlar ve uzuv mock-up ları olarak belirtilmiş, yumuşak robotik ile ilgili gelecek yaklaşımları tartışılmıştır [47].

Bu doğrultuda, tez kapsamında, sağlık alanında insan robot etkileşimi gerektiren uygulamalarda kullanılabilir ve uç nokta hassasiyetinden en az seviyede ödün verilerek esnekliğin sağlanacağı çok serbestlik dereceli yumuşak ve rijit yapıda hibrit modüler robot manipölatörlerin geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Tez kapsamında Bölüm 2’de elastik yapıya sahip olan yumuşak robotların üretilebilmesi için gerekli olan malzeme seçimleri, kalıp tasarımları ve üretim yöntemleri gibi birikimlerin kazanılması adına, cerrahi ve işbirlikçi robotik alanında kullanılabilir hibrit yapıda bir cerrahi robot elin yumuşak parmak tasarımlarının gerçekleştirilmesi ve üretilmesine odaklanılmıştır. Bu kapsamda bir çok farklı prototip çalışması yapılarak geliştirilen elastomer tabanlı yumuşak parmak, deriyle temasa uygun özellikte bir malzemeden tasarlanmış ve içerisinde bulunan pnömatrik odacıklar sayesinde basınçlı hava ile eyletilerek yeterli kavrama geometrisini alabilmesi sağlanmıştır. Süreç içerisinde farklı kalıp tasarımları ve malzemeler denenmiş ve nihayetinde elde edilen sonuçlar değerlendirilerek yumuşak parmağın üretilmesi için gerekli olan tasarım kriterleri öğrenilmiştir.

Bölüm 3’de sağlık alanında insan robot etkileşimi gerektiren uygulamalarda kullanılabilir ve uç nokta hassasiyetinden en az seviyede ödün verilerek esnekliğin sağlanacağı çok serbestlik dereceli yumuşak ve rijit yapıda bir hibrit modüler robot manipölatör geliştirilmiştir. Süreç içerisinde doğrusal yumuşak eyleyici için farklı kalıp tasarımları ve modüler oryantasyon platformu için farklı prototipler denenmiş ve nihayetinde elde edilen sonuçlar değerlendirilerek sağlık alanı için insan robot etkileşimlerinde kullanılacak yumuşak ve rijit yapıda bir hibrit robot manipölatörü üretilmiştir.

## Bölüm 2

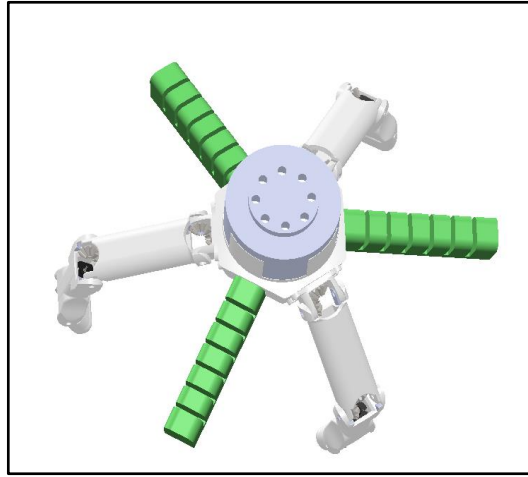
# Hibrit Yapıda Bir Cerrahi El İçin Yumuşak Parmak Tasarımı

Günümüzde hızla gelişen teknoloji sayesinde robot manipülatörlerin kullanımı geleneksel endüstriyel alanlar dışında da yaygınlaşmaktadır. Sağlık alanı ise bahsedilen bu alanlar içerisinde önemli bir yere sahiptir. Robotik sistemlerin medikal uygulamalarda kullanımının yaygınlaşmasının temel etkenleri arasında hassas çalışma, çeviklik ve yinelenebilir işlemler yer alsa da, bu bağlamda kullanılacak klasik sert yapıya sahip robotlar, çevreleriyle etkileşime girme yeteneklerini sınırlayan katı temel yapılara sahiplerdir. Rijit yapılardan oluşan geleneksel sert robotların belirli medikal operasyonlarda kullanımı, doku bütünlüğü, hareket özgürlüğü ve insan-robot biyo uyumluluğu gibi konularda operasyon riskini arttırmaktadır. Belirtilen sebeplerden dolayı robot manipülatör çalışma hacminde gerçekleşebilecek herhangi bir hata geri dönülemez sonuçlara yol açabileceğinden, ilgili uygulamalarda kullanılacak robot manipülatörlerin esnek yapıda olabilmesi önem kazanmaktadır. Bu yüzden insanlarla daha güvenli bir şekilde etkileşime girebilecek robotik sistemleri oluşturabilmek için denizanası, ahtapot, salyangoz gibi hayvanların esneyebilir vücut özelliklerinden esinlenilerek yeni nesil yumuşak robotlar geliştirilmeye başlanmıştır [48]. Rijitlik açısından canlı dokuya benzer yumuşaklıkta olan bu robot sistemlerin kullanımında, karmaşık cerrahi operasyonlar sırasında gerek doku bütünlüğünün korunmasını gerekse biyolojik sistemlere olan adaptasyonun sağlanmasını amaçlanmaktadır. Kavramsal olarak sert ve yumuşak dokuya sahip robotların avantaj ve dezavantajları göz önüne alınarak önceki çalışmalarda kavramsal tasarımı ve mekanik parmak yapıları geliştirilen cerrahi ve işbirlikçi robotik alanında kullanılacak hibrit yapıda bir cerrahi robot elin tez kapsamında yumuşak parmak tasarımlarının gerçekleştirilmesi ve üretilmesi

amaçlanmıştır [49]. Bu kapsamda bir çok farklı prototip çalışması yapılarak geliştirilen elastomer tabanlı yumuşak parmak, deriyle temasa uygun özellikte bir malzemeden tasarlanmış ve içerisinde bulunan pnömatik odacıklar sayesinde basınçlı hava ile eyletilerek yeterli kavrama geometrisini alabilmesi sağlanmıştır.

## 2.1 Kavramsal Tasarım

Medikal ve işbirlikçi robotik alanında kullanılacak hibrit yapıdaki cerrahi robot elin parmak tasarımı Şekil 2.1’de görüldüğü üzere 3’ü mekanik 3’ü yumuşak olmak üzere toplam 6 parmaktan oluşmaktadır. Her bir parmak simetrik dağılıma sahip olabilecekleri ortak bir gövdeye entegre edilerek belirli görevlerde kullanılacaktır.



Şekil 2.1: Hibrit yapıdaki cerrahi robot elin tasarımı [49]

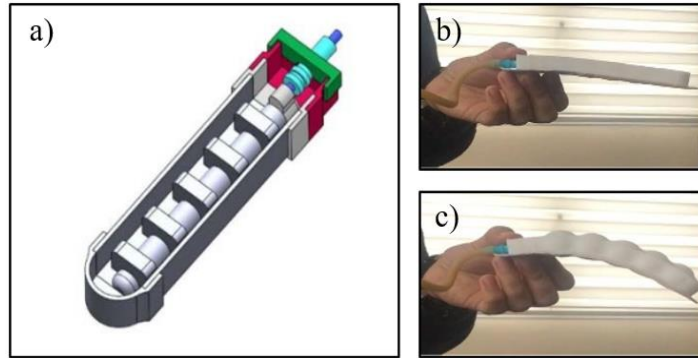
Her biri 3 serbestlik derecesine sahip olan mekanik parmaklar, operasyon sırasında cerraha kesici uç gibi gerekli donanımların servis edilmesinde görev alabileceklerdir. Aynı zamanda bu mekanik parmaklar sayesinde endoskop gibi görüntüleme cihazlarının kontrol edilerek cerrahın elinin boşa çıkarılması amaçlanmaktadır. Organ nakli gibi hasta vücudundan çıkartılacak herhangi bir yumuşak dokunun zarar görmeden kavranması ve belli bir noktaya taşınması gibi görevlerde ise yumuşak parmaklar devreye girecektir. Buna ek olarak hibrit elin kavramsal tasarımında, ihtiyaç duyulması halinde mekanik veya yumuşak parmakların sistemden sökülerek yerlerine aydınlatma, görüntüleme, vakumlama gibi farklı aygıtların da takılabilmeye olanak sağlanmıştır.

## 2.2 Yumuşak Kalıp Tasarımı ve Malzeme Seçimi

Çalışma kapsamında tasarlanan yumuşak parmaklar deriyle temasa uygun özellikte bir malzemedan üretilmiş olup, yapıları içerisinde pnömatik odacıklar ve kanallar barındırırlar. Esneyebilir bir elastomer tabakasına gömülü halde bulunan ve ‘Pneu-Net’ olarak adlandırılan bu pnömatik odacıklar gerilme önleyici bir tabaka ile birleştirilerek bir dizi haline getirilirler [50]. Sonrasında yumuşak parmaklar basınçlı hava ile eyletildiğinde içerisinde sahip oldukları pnömatik odacık hacimlerinin genişlemesiyle şişerek hareket kazanırlar. Çalışma sürecinde ilgili yumuşak parmak yapılarının ve istenilen hareketin oluşturulabilmesi için birçok farklı kalıp tasarımı ve malzeme denenmiştir.

### 2.2.1 Prototip 1

Yumuşak parmağın önceki çalışmada belirtilen ilk tasarımı, tek aşamada üretilmek üzere planlanmış olup ilgili kalıp parçaları hızlı prototipleme cihazında basılmıştır [49]. Şekil 2.2 a’da ilk kalıp tasarımı ve bahsi geçen boş hava kanallarını oluşturacak olan odacıklar görülebilmektedir.

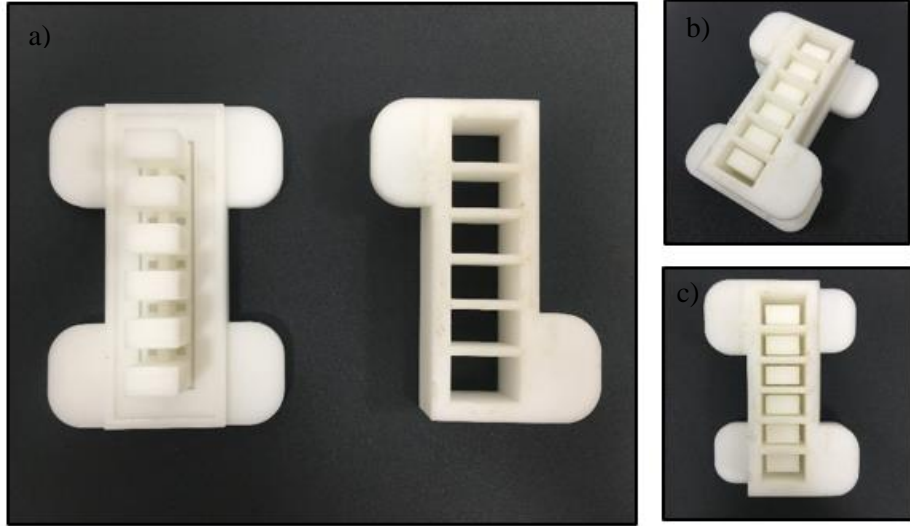


Şekil 2.2: (a)Yumuşak parmak döküm kalıp modeli (b) Parmağın hareket ettirilmemiş durumu (c) Parmağın hareket ettirilmiş durumu [49]

İmalat süreci içerisinde döküm malzemesi olarak klasik beyaz kalıp silikonu kullanılmıştır. Fakat gerek kalıp tasarımından gerekse malzeme seçiminden istenilen bükülme tam olarak gerçekleşmemiştir (Şekil 2.2 b/c). Bu yüzden sistemde istenilen bükülmenin sağlanması amacıyla ikinci kalıp tasarımına geçilmiştir.

## 2.2.2 Prototip 2

Bölüm 2.1’de bahsedildiği üzere kalıp tasarımında Pneu-Net modeli (düşük basınçlarla (yaklaşık 50 kP(a) şişirilebilen elastomerik yapılara gömülü küçük kanallardan oluşan ağlar) esas alınarak değişikliklere gidilmiştir [51]. Soft Robotics Toolkit sayfasında paylaşılan kalıp tasarımı, kendi sistemimize entegre edilebilecek şekilde en iyi odacık sayısına evriltilerek düzenlenmiş ve laboratuvarımız bünyesinde bulunan Zortrax M200 üç boyutlu hızlı prototipleme cihazıyla üretilmiştir. Kalıbımız Şekil 2.3 a’da görüldüğü üzere iki parçadan oluşmaktadır. Alt kısımdaki parça şişmenin gerçekleşmesini sağlayacak hava odacıklarını içerirken üst kısımdaki parça ise bu odacıkların birbirinden ayrılması için gerekli duvarları içermektedir.



Şekil 2.3: (a) Pneu Net kalıp modeli parçaları (b-c) Parçaların birleştirilmiş durumu

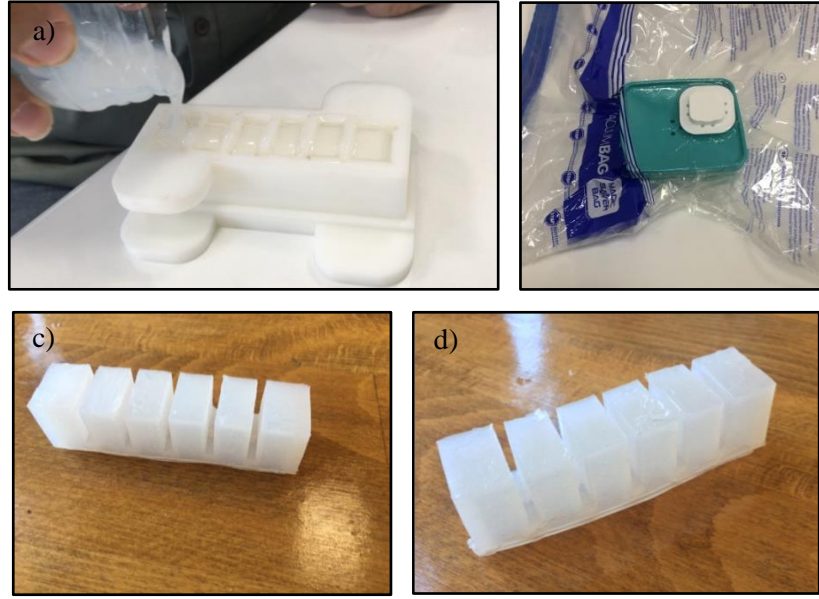
Sonrasında tasarlanan alt parça ve üst parça birleştirilerek kalıp silikonu dökmeye hazır hale getirilmiştir (Şekil 2.3 b/c). Fakat ilk prototipte kullanılan kalıp silikonun malzeme özellikleri açısından bükülme hareketini yapmaya elverişli olmadığı gözlemlendiğinden malzemede değişikliğe gidilmiştir. Ve laboratuvarımız bünyesinde bulunan “Smooth-on Dragon Skin FX Pro” deriyle temasa uygun kalıp silikonu kullanılmıştır (Tablo 2.1).

Tablo 2.1 Smooth-on Dragon Skin FX Pro Teknik Özellikler

Ağırlıkça Karışım Oranı	1A:1B
Hacimce Karışım Oranı	1A:1B
Özgül Ağırlık	1,062 g/cc
Özgül Hacim	1.56 m <sup>3</sup> /kg (25,0 cu.in./lb.)
Karışımın Ömrü	12 dakika
Kürlenme Süresi	40 dakika
Shore Sertliği	2
Renk	Saydam
Çekme Dayanımı	19.85 Bar (288 psi)
100% Modül	2.6 Bar (37.8 psi)
Kopma Anındaki Uzama	763 %
Die B kopma Kuvveti	10.68 N/m(61 pli)
Çekme Payı	<,001 in./in.
Karışım Viskozitesi	18.000 cps

Kalıba dökülmek için 1A:1B oranında hazırlanan kalıp silikonunda karıştırma işlemi süresince hava kabarcıkları meydana geldiğinden karışımın bu hava kabarcıklarından arındırılması adına vakumlama işleminin yapılması gerekmektedir (Şekil 2.4 (a)). Fakat ilk denemelerde laboratuvarımız bünyesinde vakum çemberi bulunmadığı için kalıbımız bir kap içerisinde vakum çantasının içine konularak Bosch Professional GAS 35 M AFC endüstriyel elektrik süpürgesiyle içerisindeki hava çekilerek vakumlama işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.4 b). 45 dakikalık kürlenme süresinin sonunda elastomer tabanlı silikon kalıptan çıkartılmıştır (Şekil 2.4 c/d).



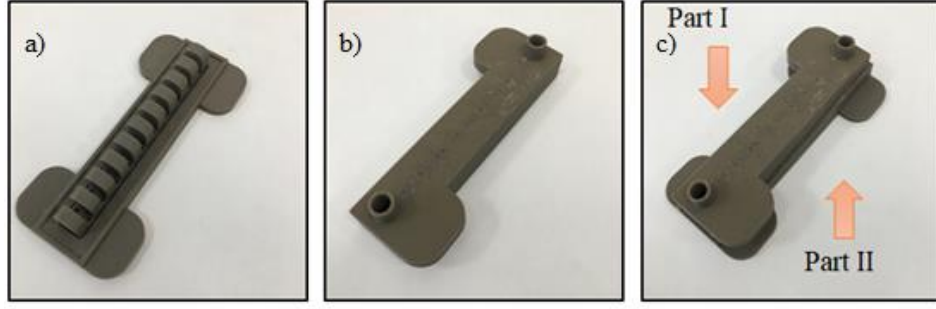


Şekil 2.4: (a) Silikonun kalıba dökülmesi işlemi b) Vakumlama işlemi c/d) Kalıptan çıkan elastomer görüntüleri

Fakat malzemenin akışkanlığının ve kürlenme süresinin uygun olmamasından dolayı üretim sürecinde zorluklar gözlemlenmiştir. Aynı zamanda her ne kadar hava kabarcıklarından kurtulabilmek adına vakum çantasıyla bir düzenek kurulmuş olsa da endüstriyel elektrik süpürGESİNDEN ÇEKTIĞİMİZ BASINÇ HAVA KABARCIKLARININ PATLAMASINDA ETKİLİ OLAMAMIŞTIR. Bu nedenlerle kalıp tasarımında tekrar değişikliğe gidilmesine ve malzeme seçiminin farklılaştırılmasına karar verilmiştir.

### 2.2.3 Prototip 3

Döküm sırasında meydana gelen hava kabarcıklarının önüne geçilebilmesi adına kalıp tasarımında plastik enjeksiyon mantığı kullanılarak döküm işlemi şırınga yardımıyla kulelerden enjekte edilerek gerçekleştirilmiştir. Bir önceki prototipte bahsi geçen Pneu-Net modeli entegre edilecek el ayasına uygun boyutta olmadığı için kalıp 1.25 oranında büyütülerek tekrar tasarlanmıştır. Ve enjeksiyon işlemi sırasında içteki kulelerin üst kısmında sıkışabilecek olası havayı tahliye etmek amacıyla kulelerin üst kısmına 1 mm çapında delikler bırakılmıştır (Şekil 2.5).



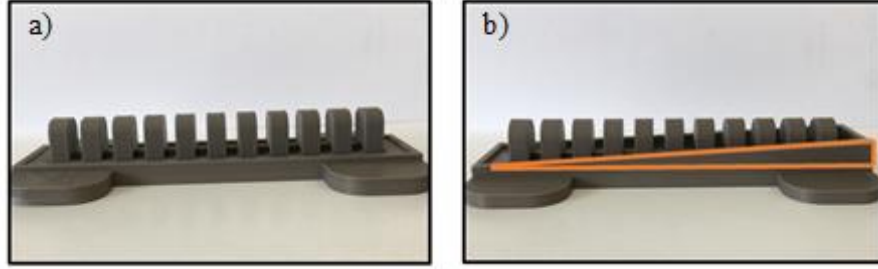
Şekil 2.5: (a)Yumuşak parmak döküm kalıp modeli part I b) Yumuşak parmak döküm kalıp modeli part II (c) Yumuşak parmağın kalıptan çıkmış görüntüsü

Aynı zamanda akışkanlık ve karışım ömrü gibi başlıca sebeplerden dolayı malzemede de değişikliğe gidilerek, döküm malzemesi olarak “Smooth-on Ecoflex 00-30” deriyle temasa uygun kalıp silikonu kullanılmıştır (Tablo 2.2).

Tablo 2.2. Smooth-on Ecoflex 00-30 Teknik Özellikler

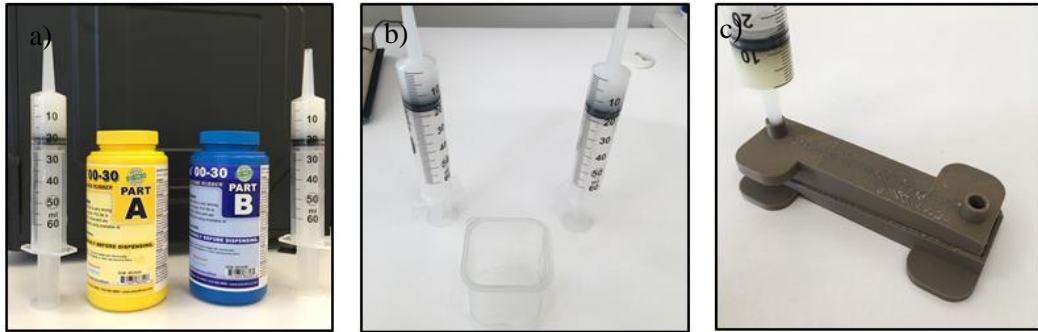
Ağırlıkça Karışım Oranı	1A:1B
Hacimce Karışım Oranı	1A:1B
Özgül Ağırlık	1,07 g/cc
Özgül Hacim	1.62 m <sup>3</sup> /kg (25,0 cu.in./lb.)
Karışımın Ömrü	45 dakika
Kürleme Süresi	4 saat
Shore Sertliği	00-30
Renk	Saydam
Çekme Dayanımı	13.78 Bar (200 psi)
100% Modül	0.689 Bar (10 psi)
Kopma Anındaki Uzama	900 %
Die B kopma Kuvveti	38 pli
Çekme Payı	<,001 in./in.
Karışım Viskozitesi	3.000 cps

Kullandığımız kalıp silikonu akışkan bir yapıya sahip olduğu için döküm işlemi sırasında kalıpta sızıntılar gözlemlenmiştir. Bu oluşabilecek sızıntıları minimize edebilmek amacıyla kalıpta tasarımsal değişikliklere gidilerek alt kalıbın duvar yüksekliği doğrusal şekilde arttırılmış ve nihayetinde üçgen duvar elde edilmiştir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6: (a) Alt kalıp ilk tasarımı (b) Duvar yüksekliği doğrusal şekilde arttırılan alt kalıp

Tasarımı tamamlanarak döküm işlemine hazır hale getirilen kalıba 1A:1B oranında hazırlanan kalıp silikonu şırınga yardımıyla kulelerden enjekte edilerek üretim aşaması tamamlanmıştır (Şekil 2.7).

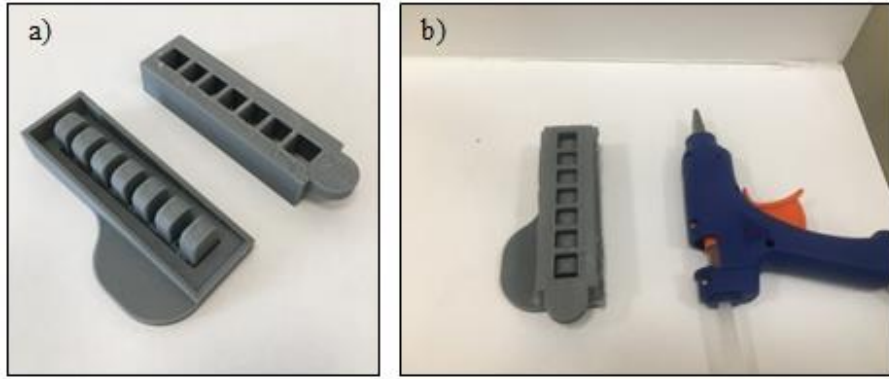


Şekil 2.7: (a) 1A:1B oranında hazırlanan kalıp silikonu (b) 1A:1B oranında karıştırılan kalıp silikonu (c) Döküme hazır hale getirilen kalıp silikonun şırınga yardımıyla kalıba enjekte edilmesi.

Fakat 4 saatlik kürlenme işleminin sonucunda kalıptan çıkartılan prototip, döküm sürecinde oluşan hava kabarcıklarından tam olarak arındırılmadığında kalıp tasarımında tekrar değişikliğe gidilmesine karar verilmiştir. Bu noktada laboratuvarımız bünyesine vakum çemberi temin edilme kararı alınmıştır.

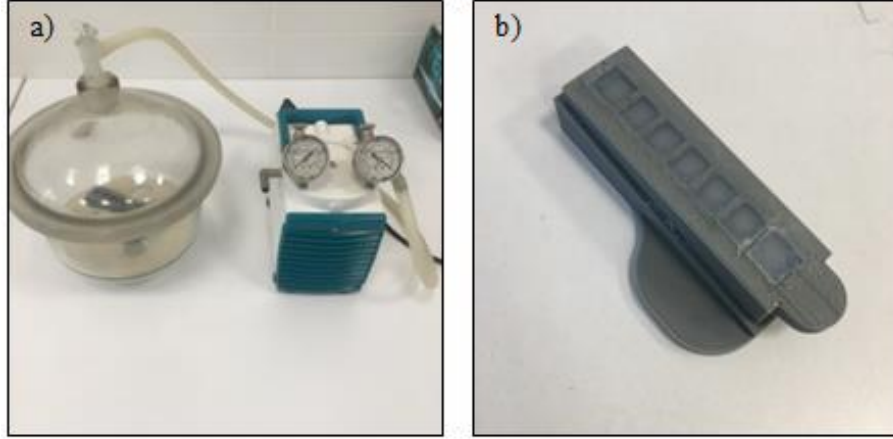
## 2.2.4 Prototip 4

Önceki prototip çalışmaları incelenerek ortaya çıkan sonuçlar değerlendirilmiş ve tasarımsal olarak hava kabarcıklarının oluşmasını engellemek amacıyla kalıba entegre edilen enjeksiyon kuleleri iptal edilmiş ve odacıkların oluşmasını sağlayacak bölmelerin üstleri açılmıştır. Bu sayede döküm esnasında hava kabarcıklarının oluşumunu engelleyebilmek için vakum çemberi kullanılabilmesinin önü açılmıştır. Kalıptan çıkacak olan nihai silikonun yapısının parmak yapısına daha çok benzemesi açısından üst kalıbın bölmelerinin üstüne radyus verilmiştir. Vakum çemberine konulacak olan silikon kalıbın modele yapışmasını önlemek amacıyla kalıp modele silikon sprej kalıp ayırıcı sıkılmıştır. Daha sonra alt kalıp ve üst kalıp şeklindeki gibi birleştirilmiş, dökülecek olan kalıp silikonunun sızmaması adına da yanları sıcak silikonla kapatılmıştır.



Şekil 2.8: (a) Yumuşak parmak döküm kalıp modeli part I & II (b) kalıp modelinin çevresinin silikonla kapatılmış hali

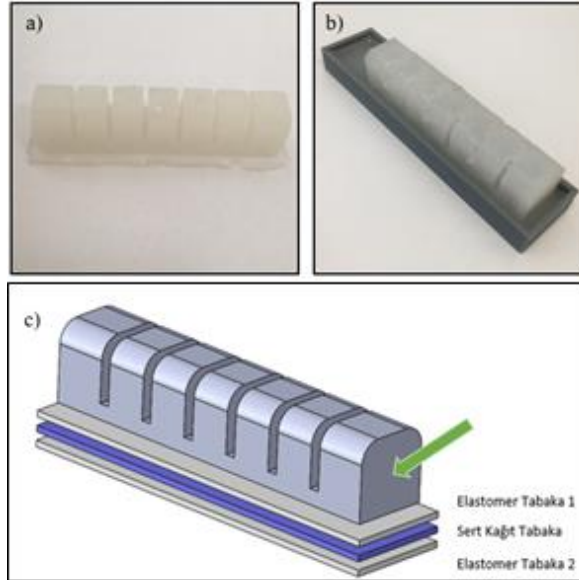
1A:1B oranında hazırlanan kalıp silikonu, tasarlanan kalıba dökülmüş ve kürlenme süresince GM 0.5 serisi diyaframlı vakum pompasına bağlı olan vakum çemberinde bekletilmiştir.



Şekil 2.9: (a) GM 0.5 serisi diyaframlı vakum pompası ve vakum çemberi (b) silikonun kalıpta kürlenme süreci

Böylece içerisinde pnömatik odacıklar gömülü olan esnek yapıdaki üst elastomer tabakasının üretimi, hem silikonun malzeme yapısının uygun olmasından hem de tasarımsal olarak doğru kalıbın kullanılmasından dolayı başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir.

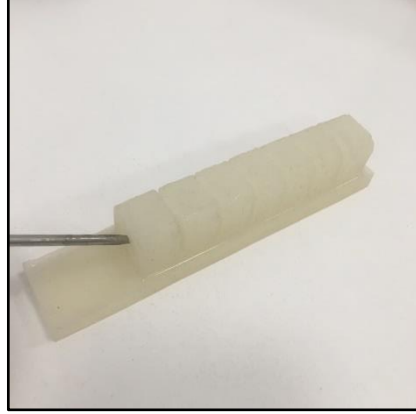
Üretimin ikinci aşamasında eğilme hareketinin gerçekleşebilmesi adına üst elastomer tabakası, iki yüzeyinde de silikon kaplı hafif sert bir film tabaka olan gerilme önleyici alt parça ile ayrı bir kalıpta birleştirilmiştir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10: (a) Kalıptan çıkan üst elastomer tabakası (b) Üst ve alt tabakaların birleştirilmesi (c) Gerilme önleyici tabakaların şematik gösterimi

Tüm bu üretim aşamalarını sonucunda üretilen yumuşak parmak, odacıklara pnömatik boru yardımıyla havanın beslenebilmesi için her iki taraftan da eşit

mesafede olacak şekilde ince bir metal çubuk yardımıyla delinmiştir (Şekil 2.11). Ve bu delme işlemi sırasında üst elastomerin iç duvarına zarar vermeden merkezi kanala ulaşılmasına özen gösterilmiştir.



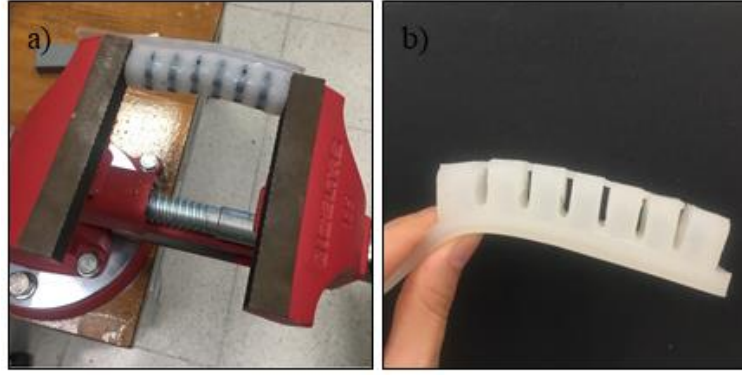
Şekil 2.11: Üst elastomerin ince bir metal çubuk yardımıyla delinmesi

Delme işleminin ardından elastomer, uç kısmından yere paralel olacak şekilde tutulduğunda alt elastomer tabakasının mukavemetinin düşük olmasından kaynaklı bükülme gözlenmiştir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12: Mukavemetinin düşük olmasından kaynaklı gözlenen bükülme

Hem bu bükülmenin önüne geçilebilmesi hem de şişme işleminin Pneu-Net odalarında homojen olarak gerçekleşebilmesi adına, Pneu-Net odalarının aralarına elastomerin üst ve yan duvarlarını birbirleriyle bağlayacak olan farklı mini kalıp parçalar tasarlanmıştır. Ve bu tasarlanan kalıp parçalara tekrar silikon karışımı hazırlanarak dökülmüş ve kürlenme işleminin sonucunda parçalar çıkartılmıştır (Şekil 2.13).



Şekil 2.13: (a) Üst duvarların birbiriyle bağlanması için hazırlanan mini kalıpların kürlenmesi işlemi (b) Kürlenme işlemi tamamlanan elastomer

Ancak elastomerin alt kısmında gerilme önleyici olarak kullandığınız her iki tarafı da elastomer kaplı sert film tabaka daha sonra PDMS (polidimetilsiloksandan) ile değiştirilmiştir [Tablo 2.3]. Malzemede böyle bir değişikliğe gidilmesindeki temel sebep yapısal olarak Ecoflex 00-30'un PDMS ile çok katmanlı yapılar oluşturmaya daha yatkın olmasıdır (27).

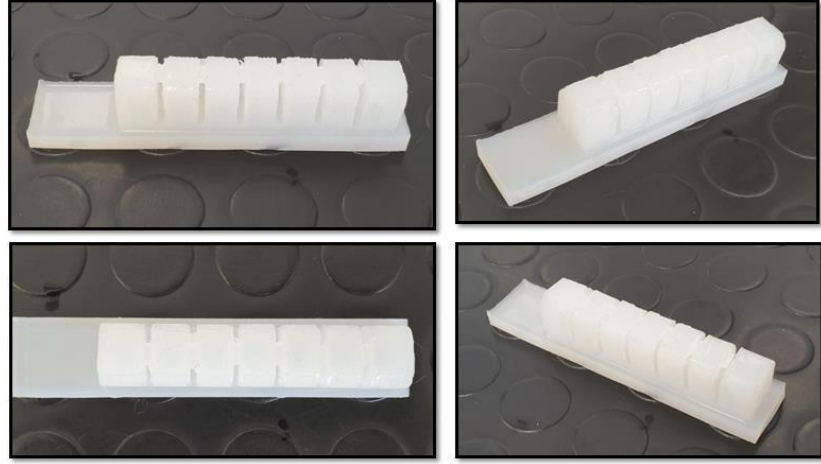
Tablo 2.3 Polidimetilsiloksandan Teknik Özellikler

Özellik	Birim	Sonuç
Bir ya da iki Parça		İki
Renk		Saydam
Ağırlıkça Karışım Oranı		10A:1B
Viskozite (Taban)	cP	5100
	Pa-sec	5.1
Viskozite (Karışım)	cP	3500
	Pa-sec	3.5
Isıl İletim Katsayısı	btu/hr ft °F	0.15
	W/m °K	0.27
Özgül Ağırlık (Kürlenmiş)		1.03
25 °C'de Çalışma Süresi	saat	1.5
25 °C' de Kürlenme Süresi	saat	48

100 °C’de Kürlenme Süresi	dakika	38
125 °C’ de Kürlenme Süresi	dakika	20
150 °C’ de Kürlenme Süresi	dakika	10
Durometre Takviyesi		43
Hacimsel Özdirenç	ohm*cm	2.9E+14
Dielektrik Dayanımı	volts/mil	500
	kV/mm	19
100 Hz’de Dağılma Faktörü		0.00257
100 kHz’de Dağılma Faktörü		0.00133
100 Hz’de Dielektrik sabiti		2.72
100 kHz’de Dielektrik sabiti		2.68
Çekme Direnci	PSI	980
	MPa	6.7
	Kg/cm <sup>2</sup>	69
Kırılma İndeksi	@ 589 nm	1.14118
Kırılma İndeksi	@ 632.8 nm	1.4225
Kırılma İndeksi	@ 1321 nm	1.4028
Kırılma İndeksi	@ 1554 nm	1.3997
UL RTI Derecesi	°C	150

Şekil 2.14’de üretim aşamaları tamamlanan yumuşak parmağın farklı açılardan görüntüleri gösterilmiştir.





Şekil 2.14: Yumuşak parmağın üretilmiş halinin farklı açılardan görüntüsü

Üretimi gerçekleştiren yumuşak parmak, içerisine piston yardımıyla basınçlı hava verildiğinde Şekil 2.15’de görüldüğü gibi istenilen bükülme hareketinin gerçekleştiği ve havanın elastomerin içerisinde homojen bir şekilde dağılım gösterdiği görülmüştür.



Şekil 2.15: Yumuşak parmak hareketi

### 2.2.5 Prototip 5

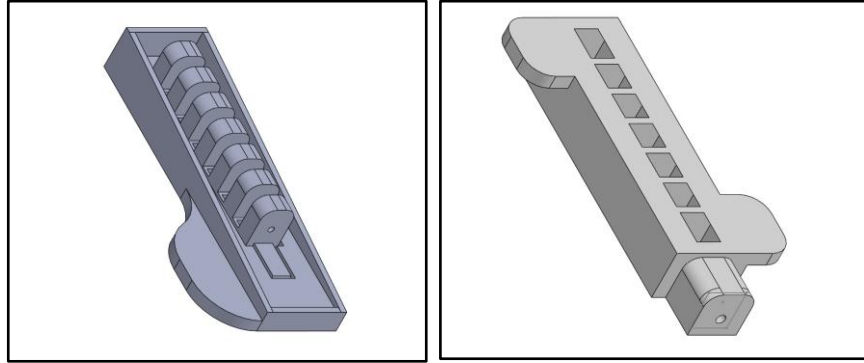
Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere yumuşak parmağın üretilmesi için çeşitli prototip denemeleri yapılmış ve her aşamada tasarımda ve malzemede iyileştirmeler yapılarak bir sonraki prototip aşamasına geçilmiştir. Bu prototipte önceki prototipe ek olarak kalıbın uç kısmı yumuşak parmağın el ayasına monte edilmesine olanak sağlayacak şekilde uzatılmıştır. Ve kalıpta, bu pnömomatik borunun girmesine olanak sağlayacak boş hacmin oluşması için 3 mm çapında alüminyum çubuk, kalıba monte edilebilecek şekilde tornada işlenerek üretilmiştir (Şekil 2.16).



Şekil 2.16: Boş hacmin oluşması için kalıba monte edilecek parçanın görüntüsü

Çalışmanın bu aşamasına kadar yumuşak parmağın üretilmesi için pek çok farklı malzeme, kalıp tasarımı ve üretim yöntemi denenmiş olup nihayetinde izlenecek prosedür aşamaları ortaya çıkartılmış ve aşağıda maddeler halinde detaylandırılmıştır.

1. 7 adet Pneu-Net'den oluşacak olan elastomer tabanlı yumuşak parmak kalıp tasarımının SolidWorks programıyla çizilerek Zortrax M200 üç boyutlu hızlı prototipleme cihazıyla üretilmesi



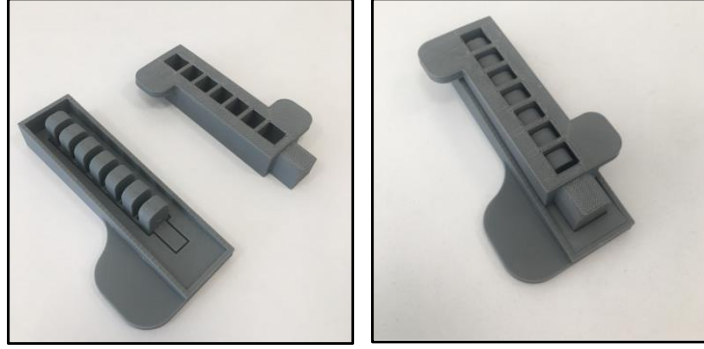
Şekil: 2.17: Kalıbın tasarlanması

2. Vakum çemberine konulacak olan silikon kalıbın modele yapışmasını önlemek amacıyla kalıp modele silikon sprey kalıp ayırıcı sıkılması



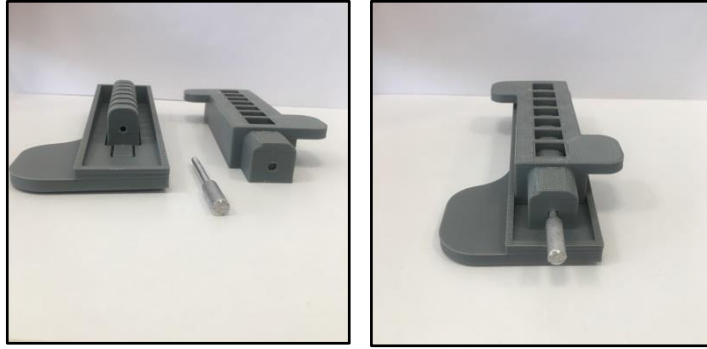
Şekil 2.18: Kalıba silikon kalıp ayırıcı sıkılması

3. Silikon kalıp ayırıcı sıkılan alt parça ve üst parçanın birleştirilmesi



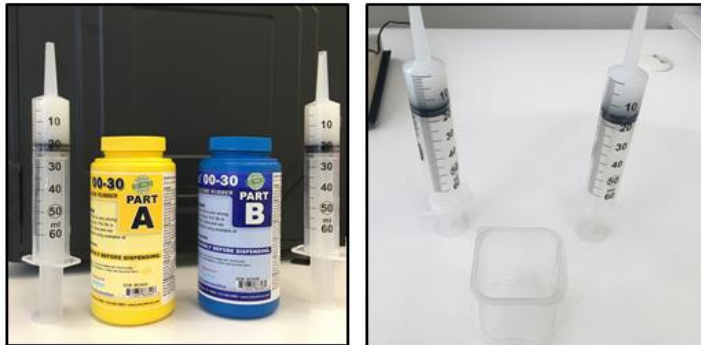
Şekil 2.19: Birleştirilmiş kalıp

4. Pnömatik borunun girmesine olanak sağlayacak boş hacmin oluşması için 3 mm çapında alüminyum çubuğun kalıba monte edilmesi



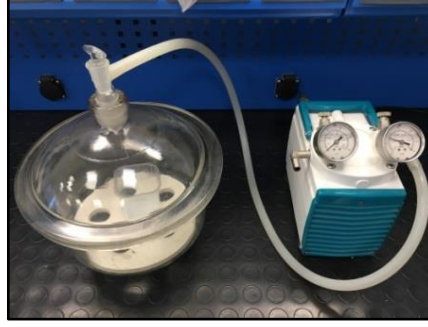
Şekil 2.20: Kalıba alüminyum çubuğun monte edilmesi

5. Döküm malzemesi olan “Smooth-on Ecoflex 00-30” deriyle temasa uygun kalıp silikonunun 1A:1B oranında hazırlanması



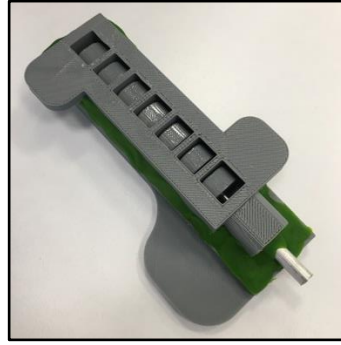
Şekil 2.21: Silikon karışımının hazırlanması

6. Hazırlanan karışımın olası hava kabarcıklarından arındırılması adına, GM 0.5 serisi diyaframlı vakum pompasına bağlı olan vakum çemberinde bekletilmesi



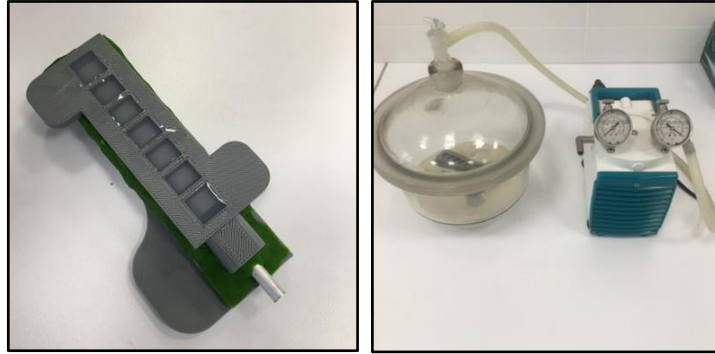
Şekil 2.22: Karışım ve kalıbın vakum çemberinde bekletilmesi

7. Kalıp silikonunun kalıp modelden sızması adına yan duvarlarının oyun hamuruyla kapatılması



Şekil 2.23: Kalıbın yan yuvarlarının kapatılması

8. Hava kabarcıklarından arındırılmış ve döküme hazır olan silikonun model kalıba dökülmesi ve tekrar vakum çemberinde bekletilmesi



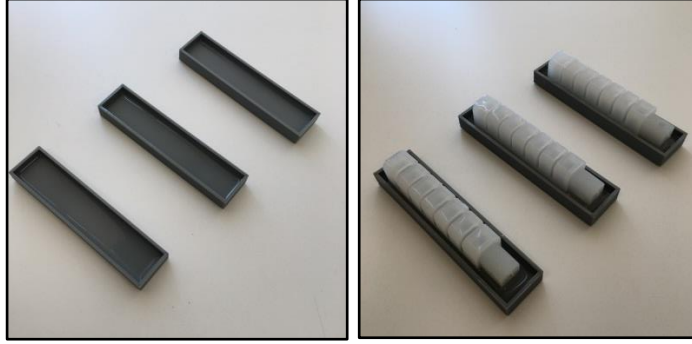
Şekil 2.24: Silikon dökülmüş kalıbın vakum çemberinde bekletilmesi

9. Elastomerin alt kısmında gerilme önleyici olarak kullanacağımız PDMS karışımının 10A:1B oranında hazırlanarak vakum çemberinde bekletilmesi



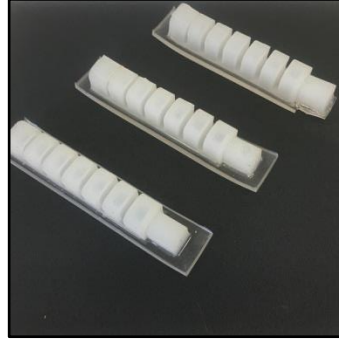
Şekil 2.25: PDMS karışımının hazırlanarak vakum çemberinde bekletilmesi

10. Hazırlanan PDMS karışımının, kurlenme işlemi tamamlanan elastomer üst tabaka ile ayrı kalıpta birleştirilmesi



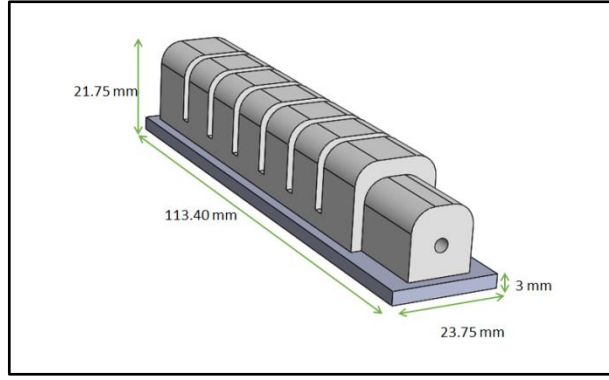
Şekil 2.26: PDMS ile üst elastomer tabakasının birleştirilmesi

11. Kurlenme işleminin ardından el ayasına monte edilecek yumuşak parmağın kalıptan çıkartılması



Şekil 2.27: Nihai yumuşak parmaklar

Medikal ve işbirlikçi robotik alanında kullanılabilecek olan ve 7 adet Pneu-Net'den oluşan elastomer tabanlı yumuşak parmak, ortalama insan el parmağı boyutlarında olacak şekilde tasarlanmış ve yukarıda belirtilen aşamalar izlenerek üretimi nihai olarak tamamlanmıştır (Şekil 2.28).



Şekil 2.28: Yumuşak parmak ölçüleri

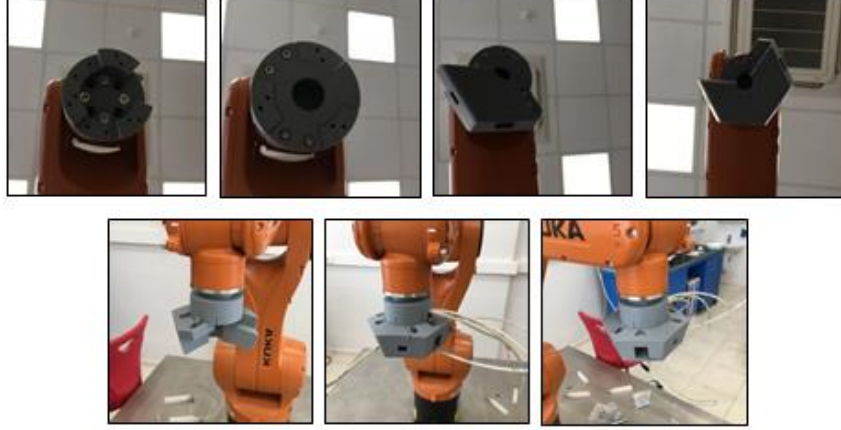
## 2.3 Modüler El Ayası

Üretimi tamamlanan parmakların entegre edileceği ortak hazne simetrik dağılıma sahip olacak şekilde tasarlanmış olup gövdenin iç yapısı, ihtiyaç duyulması halinde mekanik veya yumuşak parmakların sistemden sökülerek yerlerine aydınlatma, görüntüleme, vakumlama gibi farklı aygıtların da takılabilesine olanak sağlayacak şekilde modüler olarak tasarlanmıştır. Tasarlanan el ayası SolidWorks programında 3 boyutlu olarak modellenerek Zortrax M200 hızlı prototipleme cihazında ABS Z filament ile üretilmiştir. Şekil 2.29’da tasarlanan el ayasının modüler şekilde montaj sıralamaları gösterilmiştir.

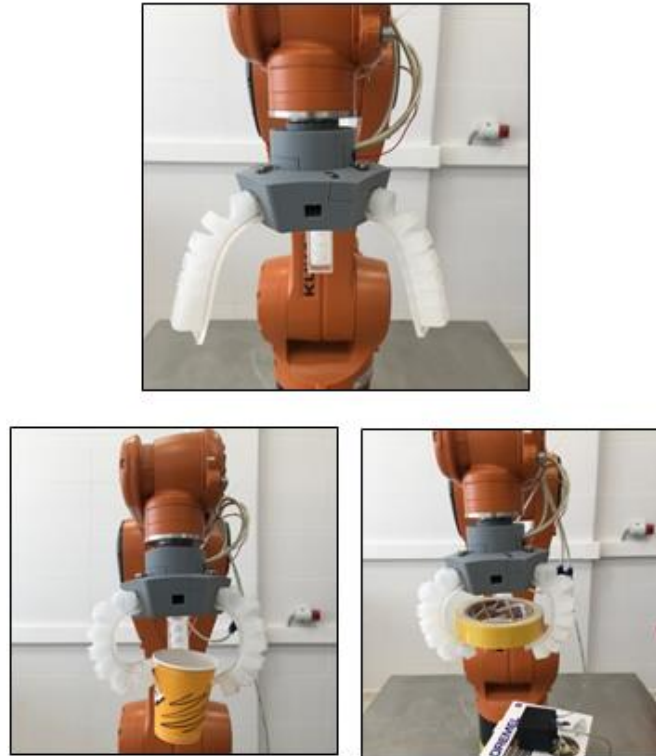


Şekil 2.29: Modüler el ayasının montaj aşamaları ve nihai hali

Daha sonra üretimi tamamlanan el ayası, montajın doğrulanması ve kullanımın görselleştirilmesi adına klasik altı serbestlik dereceli endüstriyel tip robot manipülatör KUKA6 R900 SIXX üzerine monte edilmiştir (Şekil 2.30).



Şekil 2.30: Modüler el ayasının KUKA6 R900 SIXX üzerine monte edilme aşamaları  
Takip eden aşamada KUKA6 R900 SIXX üzerine monte edilen el ayasına deriyle temasa uygun özelliklere sahip silikondan üretilen yumuşak parmaklar bağlanarak gerekli pnömatik basınç verilmiş ve belirli objeleri kavrama durumu gözlemlenmiştir (Şekil 2.31).

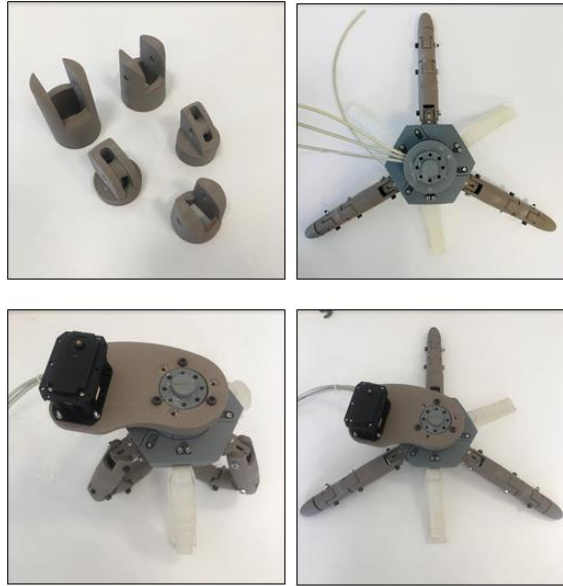


Şekil 2.31: Montajı tamamlanan el ayası ve belirli objeleri kavrarken ki görüntüleri

## 2.4 Mekanik Parmakların Tasarım ve Üretim Süreci

Bölüm 2’de kavramsal olarak sert ve yumuşak dokuya sahip robotların avantaj ve dezavantajları göz önüne alınarak, cerrahi ve işbirlikçi robotik alanında kullanılabilen hibrit yapıda bir cerrahi robot elin yumuşak parmak tasarımlarının gerçekleştirilmesi ve üretilmesi sonrasında bu yumuşak parmakların bağlanabileceği el ayasının üretilmesi işlemleri detaylandırılmıştır. Takip eden bu aşamada önceki çalışmada konsept tasarımı yapılan ve her biri bir serbestlik derecesine sahip olan üç adet mekanik parmakların üretime odaklanılmıştır. Mekanik parmaklar operasyon sırasında cerraha kesici uç gibi gerekli donanımları servis edilmesinde görev alacaklardır. Aynı zamanda bu mekanik parmaklar sayesinde endoskop gibi görüntüleme cihazlarının kontrol edilerek cerrahın elinin boşa çıkarılması amaçlanmaktadır.

Mekanik parmakların tasarımı açık kaynak olarak literatüre sunulan In moov robot elin parmak tasarımından yola çıkılarak el ayasına monte edilecek şekilde değiştirilmiş boyutu yumuşak parmağa uyumlu olacak şekilde tekrar tasarlanmış ve üretilmiştir. Şekil 3.32’de sistemimize entegre edebileceğimiz şekilde evriltirilerek üretilen parmak parçalarını ve el ayasına monte edilmiş görüntüleri detaylandırılmıştır.



Şekil 2.32: Hibrit yapıda bir cerrahi robot elin nihai üretimi



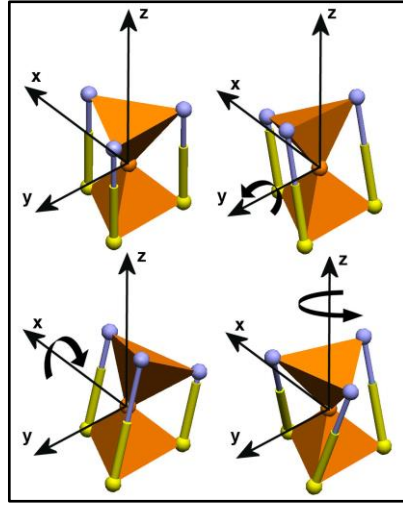
## Bölüm 3

# Modüler Hibrit Manipülatör

İlgili literatür ve gelecek robotik yol haritaları incelendiğinde yumuşak robotik ile iş birlikçi ve yardımcı robotik alanında kurulmaya çalışılan entegrasyon açık bir şekilde vurgulanmıştır. Günümüzde insan-robot etkileşimi çerçevesindeki uygulamalarının da ağırlıklı olarak rijit yapıya sahip, klasik endüstriyel otomasyon sistemleri için geliştirilmekte olduğu göz önüne alındığında, ilgili alan içerisine yumuşak robot entegrasyonunun ucu açık bir problem olduğu görülmektedir. Yumuşak robotiğin günümüz uygulamaları incelendiğinde kuvvet iletimi konusundaki eksiklikleri göz ardı edilemez. Bu noktada çalışma rijit bir paralel manipülatör yapısına yumuşak eyleyiciler entegre edilerek manipülatör yapısının esnekliğinin artırılması üzerine kurgulanmıştır. Manipülatör hassasiyeti ve çevikliği ise manipülatör modüllerinin üst üste konumlandırılmasıyla oluşturulacak modüler robot manipülatör kurgusuyla sağlanmıştır.

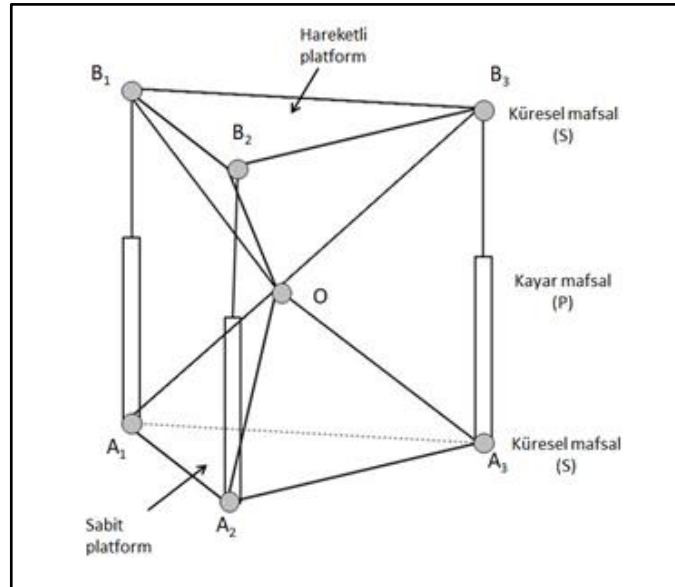
### 3.1 Yapısal Tasarım

Tez kapsamında sağlık alanında insanın da etkin bir şekilde yer aldığı iş birlikçi ve yardımcı robotik uygulamalarında kullanılabilecek ilgili çalışma uzayında manipülatör uç noktasının istenilen herhangi bir poza (yönelim+konum) ulaştırılmasını sağlayacak çok serbestlik dereceli yumuşak ve rijit yapıda bir hibrit modüler robot manipülatör yapısal ön tasarımı rijit eyleyici ve uzuvlar ile gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda kullanılan paralel modül yapısı Şekil 3.1' de yapısal modeli gösterilen her eksen etrafında bağımsız dönebilen ve üç adet doğrusal eyleyici ile üç serbestlik derecesine sahip yönelim platformu olarak belirlenmiştir [52].



Şekil 3.1: Üç Serbestlik Dereceli Yönelim Platformu [52]

İlgili manipülâtör, hareketli platform, sabit platform ve doğrusal olarak uzayabilen 3 uzuvdan oluşmaktadır. Eşkenar üçgen piramit yapısına sahip olan  $OA_1A_2A_3$  sabit platformu ve  $OB_1B_2B_3$  hareketli platformu birbirlerine doğrudan küresel mafsal ile bağlanmıştır. Ek olarak 3 uzayabilir uzuv,  $B_i$  noktalarındaki hareketli platformu, küresel mafsallarla  $A_i$  noktalarındaki sabit platforma bağlamaktadır. Her uzuv, kayar bir mafsalla birbirine bağlanan bir üst link ve bir alt link oluşmaktadır. Yani toplamda birbirine 8 adet link ile bağlanan sistem, serbestlik derecesi 3 olan 7 adet küresel mafsala ve serbestlik derecesi 1 olan 3 adet kayar mafsala sahiptir (Şekil 3.2).



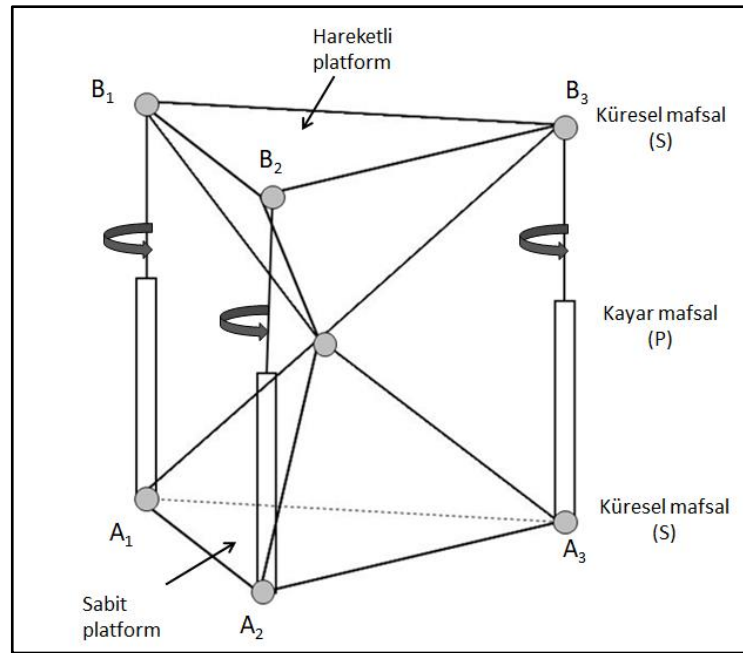
Şekil3.2: Manipülâtörün kinematik gösterimi

Sistemin serbestlik derecesi aşağıda belirtilen Alizade evrensel mobilite denklemini hesaplanabilir.

$$\begin{aligned}
M &= \sum fi - \lambda(N - C - B) - Jp \\
M &= (7 \times 3 + 3 \times 1) - 6 \times (4 - 0 - 1) - 3 \\
M &= 24 - 18 - 3 \\
M &= 3
\end{aligned}
\tag{3.1}$$

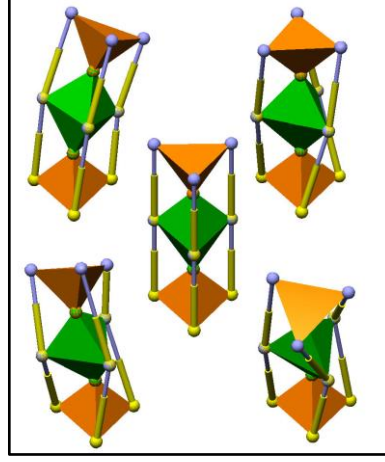
Denklem 3.1’de M: Serbestlik derecesini,  $\sum fi$ : Tüm mafsalların toplam serbestlik derecesini, N: Platform üzerindeki elementlerin bağlantı noktaları sayısını,  $\lambda$ : Çalışma uzayını, C: Platformlar arasındaki bağlantı sayısını, B: Platform sayısını ve  $Jp$ : Pasif mafsal sayısını ifade etmektedir.

Hesaplamalar sonucunda sistemin serbestlik derecesi 6 çıkmaktadır. Fakat Şekil 3.3’te de görüldüğü üzere her 3 uzayabilir uzuv kendi ekseninde pasif dönme hareketine sahip olduğundan temel serbestlik derecesinden çıkartılır. Bu nedenle hareketli platform 3 bağımsız serbestlik derecesine sahiptir.



Şekil 3.3: Küresel mafsallardan kaynaklı pasif hareket gösterimi

Manipülator sistemine çalışma uzayında bağımsız olarak öteleme hareketinin de kazandırılabilmesi için Şekil 3.1’de gösterilen modüllerin, yeterli sayıda üst üste montajlanarak modüler yapıda çok serbestlik dereceli bir robot manipülator elde edilmiştir (Şekil 3.4).

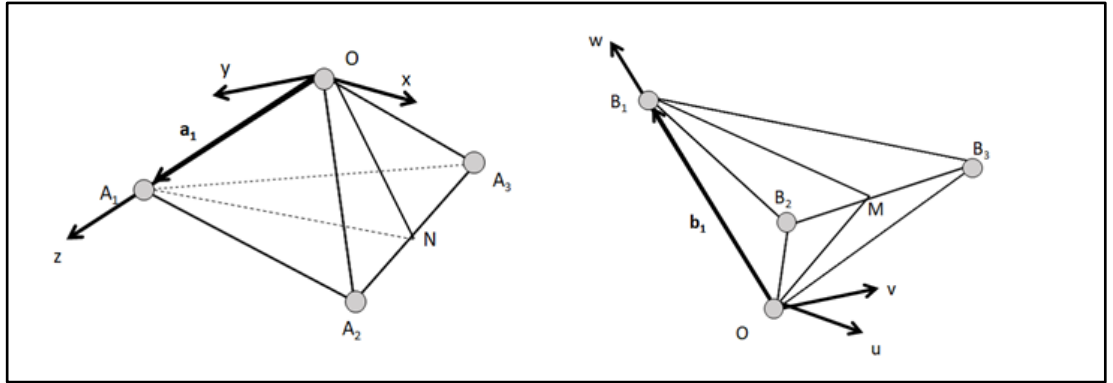


Şekil 3.4: Çok Serbestlik Dereceli Modüler Manipülör Yapısı [52]

### 3.2 Kinematik Analiz

Takip eden kısımda 3 serbestlik derecesine sahip olan modüler yapıdaki paralel manipülörün kinematik denklemlerinin çözümlenmesi detaylandırılmıştır [53].

Kinematik analiz için, iki kartezyen koordinat sistemi  $A(x,y,z)$  ve  $B(u,v,w)$  sırasıyla sabit platforma ve hareketli platforma Şekil 3.5'te gösterildiği gibi atanmıştır[50]. Genelliği kaybetmeden, sabit platform olan A referansının koordinat noktasının orijininin sabit O noktasında olduğunu, z ekseninin  $\overline{OA_1}$  doğrultusu boyunca olduğunu, x ekseninin de  $OA_1A_2$  düzlemi üzerinde olduğunu kabul edilir ve y eksenini sağ el kuralı ile bulunur. Benzer şekilde hareketli platform olan B referansının koordinat noktasının orijininin sabit O noktasında olduğunu, w ekseninin  $\overline{OB_1}$  doğrultusu boyunca olduğunu, u ekseninin de  $OB_1B_2$  düzlemi üzerinde olduğunu kabul edilir ve v eksenini sağ el kuralı ile bulunur.



Şekil 3.5: Platformlara kartezyen koordinat sisteminin atanması

Hareketli platform B'den sabit platform A'ya olan dönüşüm, aşağıdaki Euler açıları ile tanımlanan 3x3'lük rotasyon dizeyi olan  ${}^A R_B$  ile tanımlanmıştır. İlgili rotasyon dizeyi hareketli platform B'nin ilk konumunun sabit platform A ile çakıştığı ve nihai konumun, ilk olarak  $w$  eksenini etrafında  $\psi$  açısıyla döndürülmesi, ardından yer değiştirmiş olan yeni  $u$  eksenini etrafında  $\Omega$  açısı kadar ikinci bir dönüş yapması ve son olarak da tekrar yer değiştirmiş olan yeni  $w$  eksenini etrafında  $\phi$  açısı kadar döndürülmesiyle elde edilir. Elde edilen rotasyon dizeyi denklem 3.2 'de ifade edilmiştir.

$${}^A R_B = \begin{bmatrix} C\phi C\psi - C\Omega S\phi S\psi & -C\psi \cos\Omega S\phi - C\phi S\psi & S\phi S\Omega \\ C\psi S\phi + C\phi C\Omega S\psi & C\phi C\psi C\Omega - S\phi S\psi & -C\phi S\Omega \\ S\psi S\Omega & C\psi S\Omega & C\Omega \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$B_i$  noktasının B platformunun koordinat düzlemine göre konum vektörü denklem 3.3'te ifade edilmiştir.

$${}^B \mathbf{b}_i = \begin{bmatrix} b_{iu} \\ b_{iv} \\ b_{iw} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$A_i$  noktasının A platformunun koordinat düzlemine göre konum vektörü denklem 3.4'te ifade edilmiştir.

$${}^A \mathbf{a}_i = \begin{bmatrix} a_{iu} \\ a_{iv} \\ a_{iw} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$B_i$  noktasının A platformunun koordinat düzlemine göre konum vektörü ise denklem 3.5 ile ifade edilebilir.

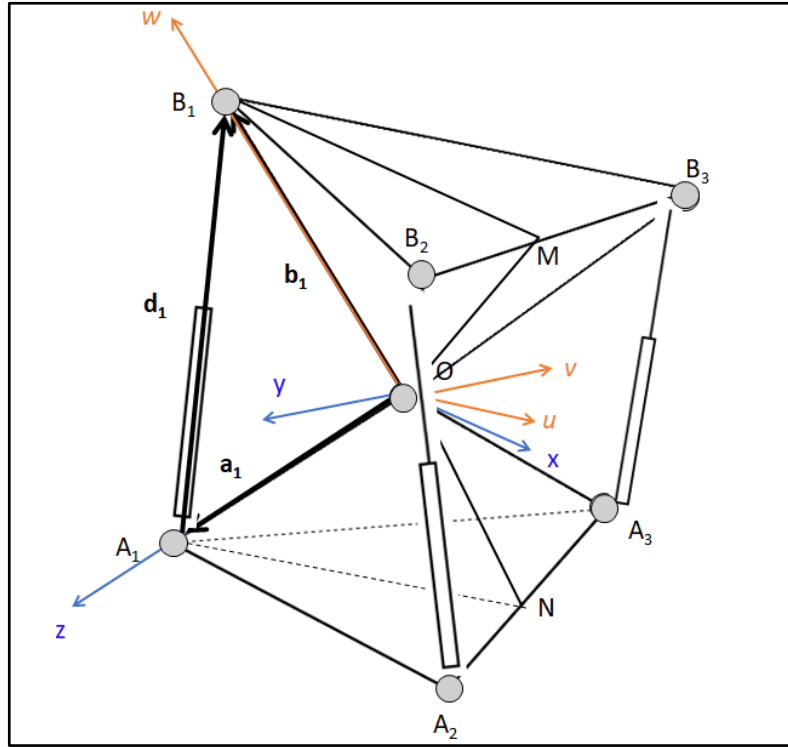
$${}^A \mathbf{b}_i = {}^A R_B {}^B \mathbf{b}_i \quad (3.5)$$

Gerekli parametreler çıkartıldıktan sonra uzuv boylarının A platformunun koordinat düzlemine göre kapalı devre denkleminde göre denklem 3.6'da belirtilmiştir (Şekil 3.6).

$${}^A \mathbf{d}_i = {}^A \mathbf{b}_i - {}^A \mathbf{a}_i \quad (3.6)$$

Denklem 3.6'nın kendisiyle skaler çarpımı sonucunda  $i$  uzvu için kısıt denklemi denklem 3.7'de ifade edilebilir.

$$d_i^2 = \mathbf{a}_i^2 + \mathbf{b}_i^2 - 2 \mathbf{b}_i \mathbf{a}_i^T \mathbf{b}_i \quad (3.7)$$



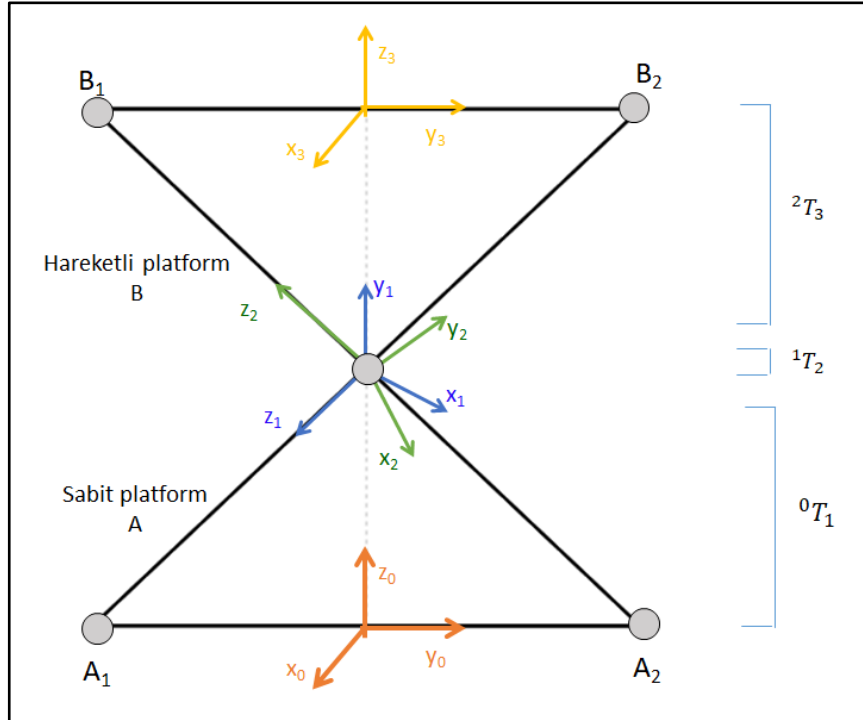
Şekil 3.6: Kapalı devre denklemi gösterimi

### 3.2.1 Ters kinematik

Ters kinematik hesaplamalarında amaç, yönelimi bilinen sistemin uç noktasının belirli bir noktaya gittiğindeki mevcut  $d_1, d_2, d_3$  uzuv uzunluklarını bulmaktır. Hareketli platformun oryantasyonu, üç Euler açısı  $\phi, \Omega, \psi$  ile tanımlanır. Ve hareketli platformun oryantasyonu bilindiğinde,  $i=1,2,3$  için  $B_i$  noktalarının konumu hesaplanabilir. Dolayısıyla karşılık gelen uzuv uzunlukları  $d_i, i=1,2,3$  için hesaplanabilir.

$$d_i = \mp \sqrt{\mathbf{a}_i^2 + \mathbf{b}_i^2 - 2 \mathbf{b}_i \mathbf{a}_i^T \mathbf{b}_i} \quad (3.8)$$

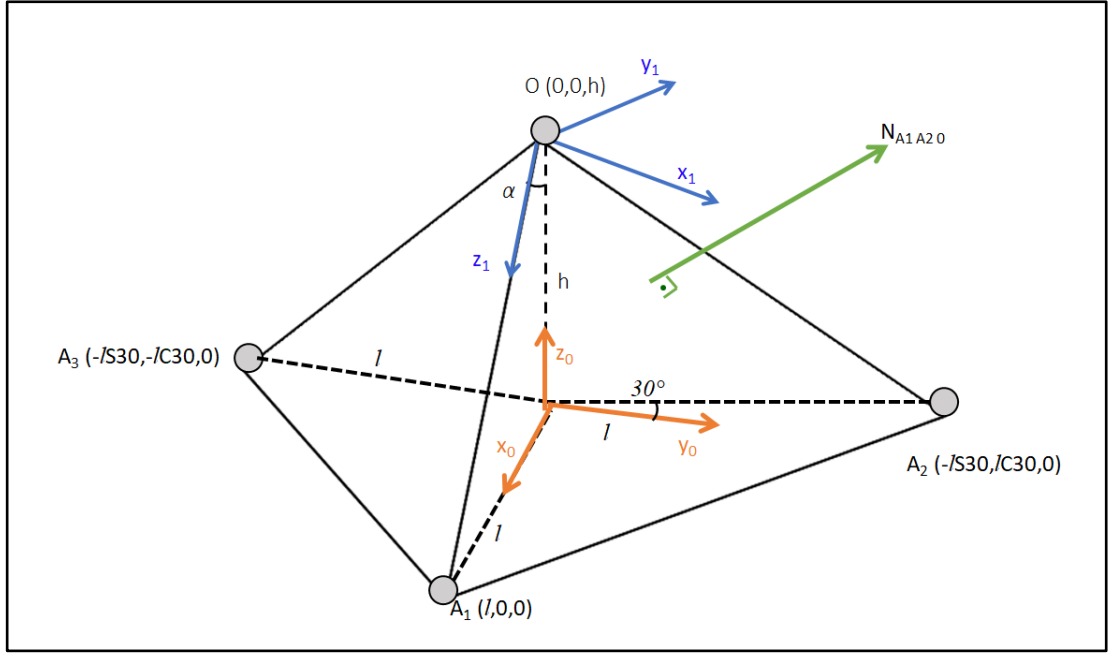
Ek olarak ilgili manipülatörün uç noktasından sabit platformun ana referans noktasına olan uzama da hesaplanabilir. Bu amaçla Şekil 3.6’da basitleştirilmiş olarak ifade edilen sisteme farklı referans sistemleri atanarak sırasıyla dönüşüm dizeyleri sembolize edilmiş ve Şekil 3.7’de sabit platformun kinematik yapısı belirtilmiştir.



Şekil 3.7: Atanan referansların sistem üzerinde gösterimi

Kinematik yapısı belirtilen sistemin sabit referans koordinat noktasından hareketli platformun orta uç noktasına olan dönüşüm dizeyi denklem 3.9’daki gibi ifade edilmiştir.  ${}^0T_3$  dönüşüm dizeyinin ifade edilebilmesi için gerekli olan dönüşüm dizeyleri denklem 3.10/19/21’de belirtilmiştir. Ve takip eden denklemlerde  $\cos x \rightarrow C$  harfi,  $\sin \rightarrow S$  harfi ile gösterilmiştir.

$${}^0T_3 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \quad (3.9)$$



Şekil 3.8: Alt platform kinematik gösterimi

Ana referans koordinat sistemi eşkenar üçgen piramit şeklindeki sabit platformun tabanının merkezine, diğer koordinat sistemi ise sabit platforma bağlı olan küresel mafsalsın merkezine atanmıştır. Bu iki koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm dizeyi ve bileşenleri, denklem 3.10-3.12’de gösterilmiştir.

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} & & & 0 \\ & {}^0R_1 & & 0 \\ & & & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$${}^0R_1 = \begin{bmatrix} {}^0X_{1X} & {}^0Y_{1X} & {}^0Z_{1X} \\ {}^0X_{1Y} & {}^0Y_{1Y} & {}^0Z_{1Y} \\ {}^0X_{1Z} & {}^0Y_{1Z} & {}^0Z_{1Z} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$${}^0Z_1 = \begin{bmatrix} S\alpha \\ 0 \\ -C\alpha \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

${}^0Y_1$  dizeyi,  $OA_1A_2$  düzleminin doğrultu vektörüne dik olan normal vektörü bulunup uzunluğuna bölünerek bulunmuştur. Bunun için önce 3 noktası bilinen düzlemin normal denklemi çıkartılmıştır.  $A_1(l, 0, 0)$ ,  $A_2(-l\sqrt{3}/2, l\sqrt{3}/2, 0)$ ,  $O(0, 0, h)$  noktaları için  $\vec{N}$  doğrusu takip eden denklemlerde ifade edilmiştir.



$$\overrightarrow{OA1} \times \overrightarrow{OA2} = \overrightarrow{N} = (h l C30 \hat{i} + h l (1 + S30) \hat{j} + l^2 C30 \hat{k}) \quad (3.13)$$

$$\|\overrightarrow{N}\| = \sqrt{(h l C30 \hat{i})^2 + (h l (1 + S30) \hat{j})^2 + (l^2 C30 \hat{k})^2} \quad (3.14)$$

$$\frac{\overrightarrow{N}}{\|\overrightarrow{N}\|} = \frac{(h l C30 \hat{i} + h l (1 + S30) \hat{j} + l^2 C30 \hat{k})}{\sqrt{(h l C30 \hat{i})^2 + (h l (1 + S30) \hat{j})^2 + (l^2 C30 \hat{k})^2}} \quad (3.15)$$

$${}^0 Y_1 = \begin{bmatrix} \frac{h l C30}{\sqrt{(h l C30 \hat{i})^2 + (h l (1 + S30) \hat{j})^2 + (l^2 C30 \hat{k})^2}} \\ \frac{h l (1 + S30)}{\sqrt{(h l C30 \hat{i})^2 + (h l (1 + S30) \hat{j})^2 + (l^2 C30 \hat{k})^2}} \\ \frac{l^2 C30}{\sqrt{(h l C30 \hat{i})^2 + (h l (1 + S30) \hat{j})^2 + (l^2 C30 \hat{k})^2}} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

${}^0 X_1$  dizeyini ise quaternion hesaplamaları yardımıyla çıkartılmıştır.

$${}^0 X_1 = q_1 ({}^0 Z_1) q_1^{-1} \quad (3.17)$$

$$q_1 = C \frac{\pi}{4} + {}^0 Y_1 S \frac{\pi}{4}$$

$$q_1^{-1} = C \frac{\pi}{4} - {}^0 Y_1 S \frac{\pi}{4} \quad (3.18)$$

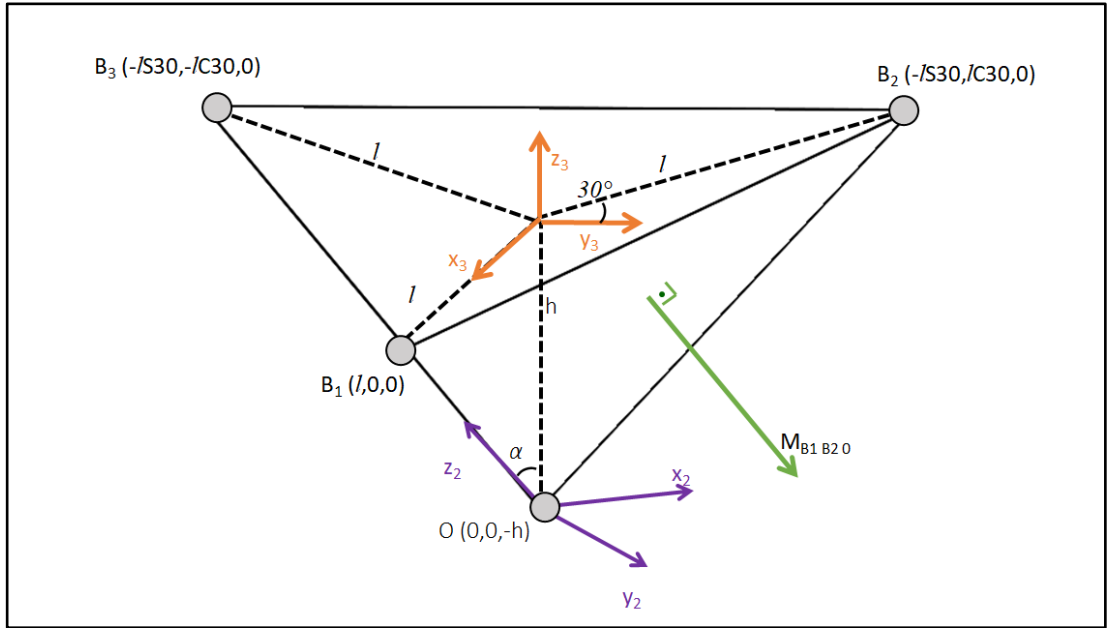
Bilgisayar ortamında denklem (3.17) ve denklem (3.18) beraber çözülerek  ${}^0 X_1$  dizeyi elde edilmiştir. Bu çözümlemeyle birlikte denklem (3.12), (3.16) ve (3.17) birleştirilerek yazıldığında denklem (3.9)'de ifade edilen  ${}^0 T_1$  dönüşüm dizeyi elde edilir.

Hareketli platform B'den sabit platform A'ya olan dönüşümü ifade eden  ${}^1T_2$  dönüşüm dizeyi denklem (3.19)'de tanımlanmıştır. İki platform arasındaki Euler açıları z ekseninde  $\psi$ , x ekseninde  $\Omega$ , z ekseninde  $\phi$  açısı kadardır.

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ & {}^1R_2 & & \\ & & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$${}^1R_2 = \begin{bmatrix} C\phi C\psi - C\Omega S\phi S\psi & -C\psi C\Omega S\phi - C\phi S\psi & S\phi S\Omega \\ C\psi S\phi + C\phi C\Omega S\psi & C\phi C\psi C\Omega - S\phi S\psi & -C\phi S\Omega \\ S\psi S\Omega & C\psi S\Omega & C\Omega \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Aynı şekilde sabit platformda olduğu gibi 3. koordinat sistemi eşkenar üçgen piramit şeklindeki hareketli platformun tavanının merkezine, 2. koordinat sistemi ise hareketli platforma bağlı olan küresel mafsalin merkezine atanmıştır (şekil 3.9).



Şekil3.9: Üst platform kinematik gösterimi

Bu iki koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm dizeyi denklem 3.21'de ifade edilmiştir.

$${}^3T_2 = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ & {}^3R_2 & & \\ & & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$${}^3R_2 = \begin{bmatrix} {}^3X_{2X} & {}^3Y_{2X} & {}^3Z_{2X} \\ {}^3X_{2Y} & {}^3Y_{2Y} & {}^3Z_{2Y} \\ {}^3X_{2Z} & {}^3Y_{2Z} & {}^3Z_{2Z} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$${}^3Z_2 = \begin{bmatrix} S\alpha \\ 0 \\ C\alpha \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

${}^3Y_2$  dizeyi,  $OB_1B_2$  düzleminin doğrultu vektörüne dik olan normal vektörü bulunup uzunluğuna bölünerek bulunmuştur. Bunun için önce 3 noktası bilinen düzlemin normal denklemi çıkartılmıştır.  $B_1 (l,0,0)$ ,  $A_2 (-l S 30, l C 30, 0)$ ,  $O (0, 0, -h)$  için  $\vec{M}$  doğrusu takip eden denklemlerde ifade edilmiştir.

$$\vec{OB_1} \times \vec{OB_2} = \vec{M} = (-h l C 30 \hat{i} + (-h l (1 + S 30)) \hat{j} + l^2 C 30 \hat{k}) \quad (3.24)$$

$$\|\vec{M}\| = \sqrt{(-h l C 30 \hat{i})^2 + (-h l (1 + S 30)) \hat{j})^2 + (l^2 C 30 \hat{k})^2} \quad (3.25)$$

$$\frac{\vec{M}}{\|\vec{M}\|} = \frac{(-h l C 30 \hat{i} + (-h l (1 + S 30)) \hat{j} + l^2 C 30 \hat{k})}{\sqrt{(-h l C 30 \hat{i})^2 + (-h l (1 + S 30)) \hat{j})^2 + (l^2 C 30 \hat{k})^2}} \quad (3.26)$$

$${}^3Y_2 = \begin{bmatrix} \frac{-h l C 30}{\sqrt{(-h l C 30 \hat{i})^2 + (-h l (1 + S 30)) \hat{j})^2 + (l^2 C 30 \hat{k})^2}} \\ \frac{-h l (1 + S 30)}{\sqrt{(-h l C 30 \hat{i})^2 + (-h l (1 + S 30)) \hat{j})^2 + (l^2 C 30 \hat{k})^2}} \\ \frac{l^2 C 30}{\sqrt{(-h l C 30 \hat{i})^2 + (-h l (1 + S 30)) \hat{j})^2 + (l^2 C 30 \hat{k})^2}} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

${}^3X_2$  dizeyini ise quaternion hesaplamaları yardımıyla çıkartılmıştır.

$${}^3X_2 = q_2 ({}^3Z_2) q_2^{-1} \quad (3.28)$$

$$\begin{aligned} q_2 &= C \frac{\pi}{4} + {}^3Y_2 S \frac{\pi}{4} \\ q_2^{-1} &= C \frac{\pi}{4} - {}^3Y_2 S \frac{\pi}{4} \end{aligned} \quad (3.29)$$

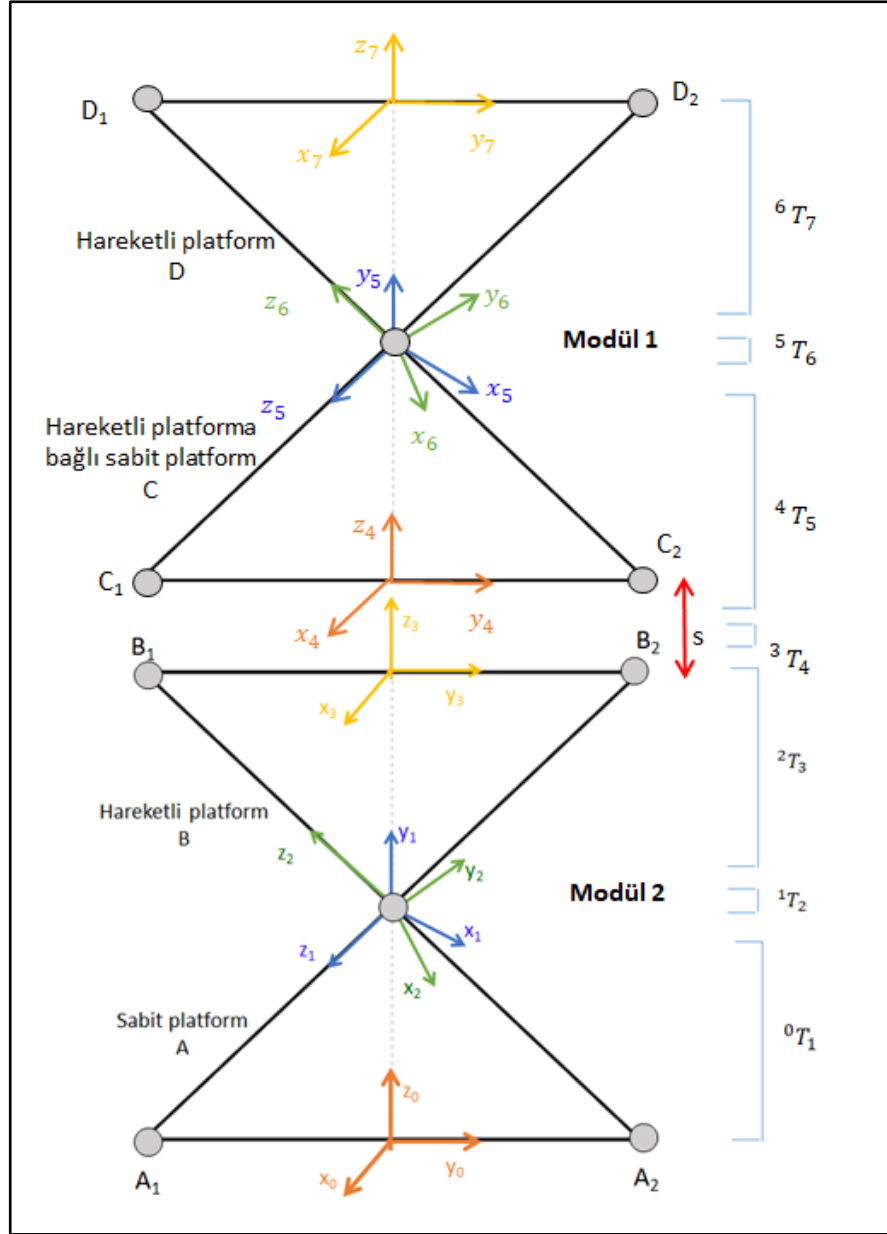
Bilgisayar ortamında denklem (3.28) ve denklem (3.29) beraber çözülerek  ${}^3X_2$  dizeyi elde edilmiştir. Bu çözümlemeyle birlikte denklem (3.23), (3.27) ve (3.28) birleştirilerek yazıldığında denklem (3.21)'de ifade edilen  ${}^3T_2$  dönüşüm dizeyi çıkartılmıştır.

$${}^3T_2 = \begin{bmatrix} & & & 0 \\ & {}^3R_2 & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -h \\ & & & 1 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

${}^3T_2$  olarak ifade edilen dönüşüm dizeyi tersi alınarak denklem 3.9'a yerleştirildiğinde ana referans koordinat sisteminden manipülatör uç noktasına olan tüm dönüşüm dizeyleri parametrik olarak çıkartılmış olur. Parametrik olarak çıkartılan bu  ${}^0T_3$  dönüşüm dizeyi içerisinde birbirinden bağımsız 3 denklem alınarak denklemin sağ tarafındaki bilinmeyen üç Euler açısı (  $\phi$  ,  $\Omega$  ,  $\psi$  ) bulunur. Yani hareketli platformun oryantasyonu yukarıda takip edilen işlemlerle bulunduğu göre  $B_i$  noktalarının konumu dolayısıyla da denklem 3.8'de belirtilen,  $d_i, i=1,2,3$  için karşılık gelen uzuv uzunlukları hesaplanabilir.

Bu bölüme kadar ilk modülün ters kinematik hesapları yukarıda görüldüğü üzere detaylandırılmıştır. Takip eden aşamada manipülatöre birinci modüle özdeş olan ikinci bir modül eklendiğinde, manipülatörün uç noktasından sabit platformun ana referans noktasına olan uzaması parametrik olarak ifade edilecektir. Bu amaçla Şekil 3.3'te basitleştirilmiş olarak ifade edilen modüler sisteme farklı koordinat sistemleri atanarak sırasıyla dönüşüm dizeyleri sembolize edilmiş ve Şekil 3.10'da sabit platformun kinematik yapısı belirtilmiştir.

İki modüllü kinematik yapısı belirtilen sistemin sabit referans koordinat noktasından en uçtaki hareketli platformun orta uç noktasına olan dönüşüm dizeyi denklem 3.31'deki gibi ifade edilmiştir.



Şekil 3.10: Birleştirilmiş platforma atanan koordinatların sistem üzerinde gösterimi

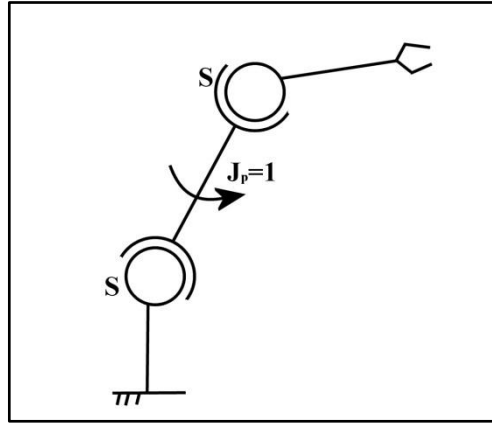
$${}^0T_7 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 {}^6T_7 \quad (3.31)$$

Sisteme bir modül daha eklendiğinde ana referansa göre sistem uç noktasının dönüşümünü ifade eden  ${}^0T_7$  dönüşüm düzeyinin çıkartılması için birinci modülün dönüşüm düzeyi olan  ${}^0T_3$ , ikinci modülün dönüşüm düzeyi olan  ${}^4T_7$  ve bu iki modülün birbirleri arasında dönüşüm düzeyi olan  ${}^3T_4$  ün ayrı ayrı ifade edilmesi gerekmektedir. Birbirinin özdeşi olan birinci ve ikinci modülün kendi içindeki dönüşüm düzeyleri parametrik olarak aynı şekilde ifade edildiğinden bu aşamada sadece  ${}^3T_4$  ün dönüşüm düzeyinin yazılması yeterli görülmüştür.

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & s \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Nihayetinde  ${}^3T_4$  dönüşüm dizeyinin de çıkartılmasıyla denklem 3.31 parametrik olarak ifade edilmiş olur. Ters kinematikte denklem 3.31'e göre eşitliğin sol tarafında olan  ${}^0T_7$  bilinmektedir. Eşitliğin sağ tarafında  ${}^1T_2$  ve  ${}^5T_6$  dönüşüm dizeylerinden gelen 6 Euler açısı ise bilinmemektedir.

Sistem ters kinematik çözümlmesine geçilmeden önce dikkat edilmesi gereken en önemli nokta modüler olarak birleştirilmiş platform her biri 3 serbestlik derecesine sahip iki modülden oluştuğu ve bu kapsamda birleştirilmiş platformun toplam serbestlik derecesinin 6'ya eşit olmasıdır. Ancak şekil (3.11)'de de görülebileceği üzere, eyleyiciler çıkarıldığında sistemin temel yapısı iki küresel mafsala sahip seri zincirden meydana gelmektedir.



Şekil 3.11: Sistemin ana gövdesini ifade eden seri zincir

Bu sebeple iki küresel mafsala aradaki uzuv kendi eksenini etrafında pasif dönme hareketine sahiptir ve bu hareket sistem uç noktasının bağımsız serbestlik derecesi sayısını bir düşürmektedir. Sonuç olarak iki modülden oluşan sistemin uç noktasının bağımsız olarak gerçekleştirebileceği 5 hareket vardır. Sistemin serbestlik derecesi pasif dönme hareketinden kaynaklı 5 olduğundan ilgili Euler açılarının çözülebilmesi için her hangi bir Euler açısının çözüm sırasında kabul edilmesi gerekmektedir. Sonrasında eşitliğin sağ tarafında parametrik olarak elde edilen bu  ${}^0T_7$  eşit olan dönüşüm dizeyi içerisinden birbirinden bağımsız 5 eleman alınarak denklemin sol tarafında bilinen değerler ile eşitlenerek elde edilen 5 bağımsız denklem ortak olarak

çözülerek bilinmeyen 5 Euler açısı bulunabilir. Buna bağlı olarak da denklem 3.8’de ifade edilen kapalı devre denklemine göre  $d_i$ ,  $i=1,2,3$  için karşılık gelen uzuv uzunlukları hesaplanabilir.

Bu bağlamda yapısal tasarımı ve kinematik analizi gerçekleştirilen modüler yapıdaki robot manipülatöre, insan robot etkileşimleri dahilinde önem kazanan esnekliğin kazandırılabilmesi için, rijit yapıdaki doğrusal eyleyicilerin yerini alabilecek aynı hareket kabiliyetine ve çalışma parametrelerine sahip yumuşak yapıda bir doğrusal eyleyici tasarlanması ve modellenmesi gerçekleştirilmiştir [54]. Bu bağlamda tez kapsamında edinilen bilgiler kullanılarak doğrusal yumuşak eyleyicilerin üretimleri gerçekleştirilmiştir.

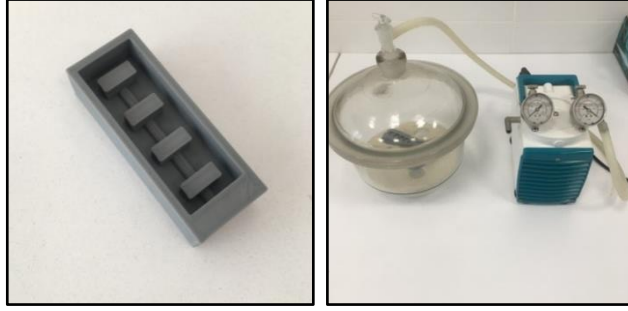
### 3.3 Doğrusal Eyleyici Tasarımları

Bölüm 2’de bahsedildiği üzere üretilmek istenen ve bu doğrultuda tasarlanan yumuşak robotlar deriyle temasa uygun özellikte bir malzemeden üretilmiş olup, yapıları içerisinde pnömatik odacıklar ve kanallar barındırırlar. Esneyebilir bir elastomer tabakasına gömülü halde bulunan ve ‘Pneu-Net’ olarak adlandırılan bu pnömatik odacıklar gerilme önleyici bir tabaka ile birleştirilerek bir dizi haline getirilirler. Ve gerekli bükülmenin gerçekleşebilmesi için mukavemeti daha yüksek olan malzemeye birleştirilirler. Sonrasında yumuşak parmaklar basınçlı hava ile eyletildiğinde içerisinde sahip oldukları pnömatik odacık hacimlerinin genişlemesiyle şişerek hareket kazanırlar.

Fakat bu bölümde Şekil 3.2’deki ilgili manipülatörün hem insanlarla daha güvenli bir şekilde etkileşime girmesine olanak sağlamak hem de çalışma hacmini genişletmek amacıyla manipülatörde kullanılan doğrusal mafsallar doğrusal uzama sağlayacak olan yumuşak eyleyicilerle yer değiştirecektir. Bu doğrultuda çalışma sürecinde ilgili doğrusal uzamayı sağlayabilecek farklı yumuşak eyleyici prototip denemeleri yapılmıştır.

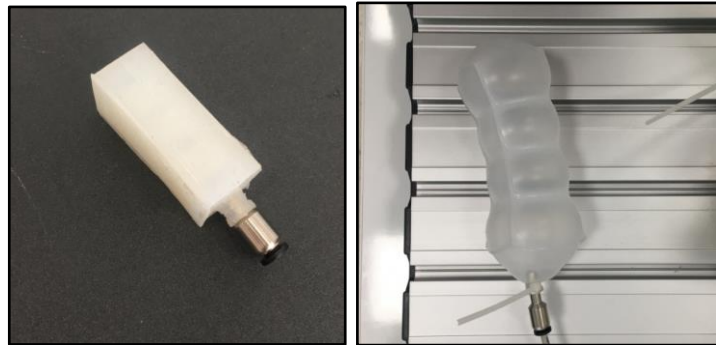
### 3.3.1 Prototip 1

Bu bölümde, tez kapsamında tasarlanması planlanan manipülatörün doğrusal uzamayı sağlayacak olan yumuşak eyleyici kalıp tasarımı üzerine yoğunlaşmıştır. Eğilme hareketini sağlayacak olan yumuşak parmak tasarımından uzaklaşarak hava kanallarının şekli değiştirilmiştir (Şekil 3.12). 3 boyutlu hızlı prototipleme cihazı ile üretilen döküm kalıbı, içeriğinde 4 adet “Pneu-Net” olacak şekilde tekrardan tasarlanmıştır. Daha sonra deriyle temasa uygun özelliklere sahip olan Ecoflex 00-30 kalıp silikonu 1A:1B oranında hazırlanarak, tasarlanan kalıba dökülmüş ve kürlenme süresince oluşabilecek olası hava kabarcıklarının önüne geçilebilmesi adına GM 0.5 serisi diyaframli vakum pompasına bağlı olan vakum çemberinde bekletilmiştir.



Şekil 3.12: Doğrusal uzamayı sağlayacak yumuşak eyleyici döküm kalıbı ve olası hava kabarcıklarından arındırılması işlemi

Kürlenme işleminin ardından kalıptan ayrılan elastomerden iki adet üretilmiştir. Bu üretilen 2 özdeş elastomer daha sonra iç yüzeylerinden birleştirilmiş ve pnömatrik basınç uygulanarak şişme durumu incelenmiştir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13: Doğrusal uzamayı sağlayacak eyleyicinin şişmeden önceki ve şiştikten sonraki hali

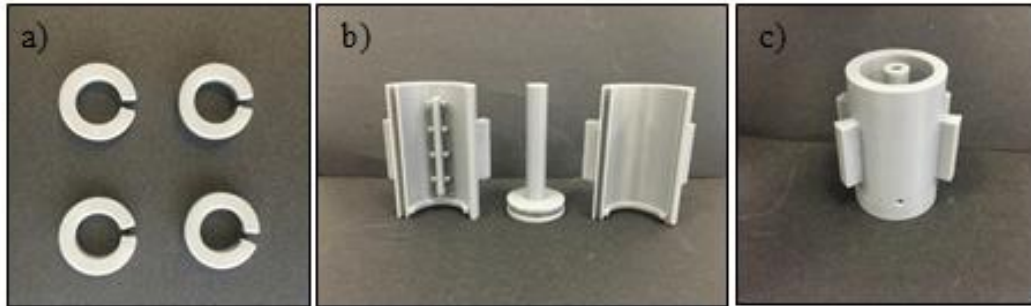
Şişirme işleminden sonra doğrusal uzama istenilen şekilde gerçekleştiğinden gerekli tasarım kriterlerinin doğru bir şekilde gerçekleştirildiği anlaşılmıştır. İleriki



aşamalarda kontrol çalışmaları için gerçekleşen uzama miktarının doğru bir şekilde ölçülmesi gerekmektedir. Bu uzama miktarının ölçülebilmesi için tel enkoder kullanılabilir. Uzama miktarının ölçülebilmesi için sensörün yumuşak eyleyicinin orta nokta çizgisinden bağlanmasının ölçümün daha verimli olmasının sağlanması ön görülmektedir. Fakat tasarımsal olarak ilgili yapıda bahsedilen unsur mümkün olmadığı için ikinci bir doğrusal yumuşak eyleyici tasarımına geçilmiştir.

### 3.3.2 Prototip 2 – Donut yumuşak eyleyici tasarım 1

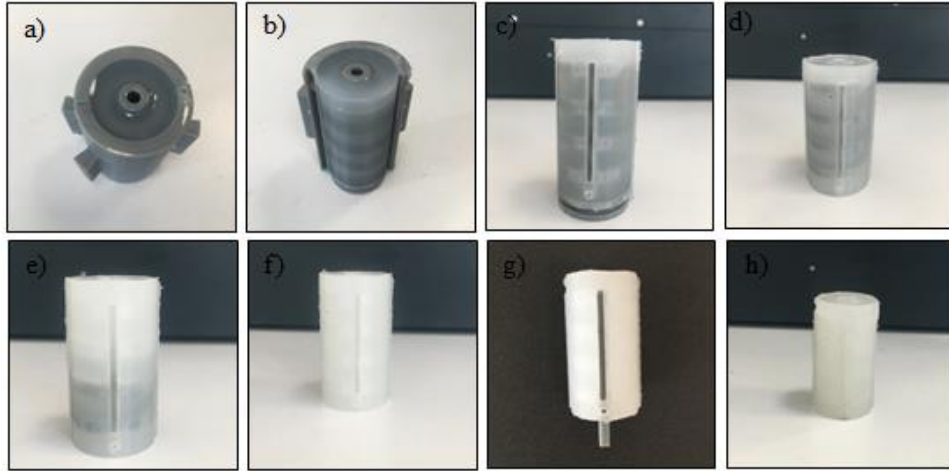
Bölüm 3.2.1’de üretilen doğrusal yumuşak eyleyici sonraki aşamalarda manipülatöre entegre edildiğinde gerçekleşecek olan uzama miktarının kesin bir şekilde sensörlerle ölçülebilmesi için eyleyici orta nokta çizgisinden belirli bir boş hacmin bulunması gerekmektedir. Bu amaçla kalıp, merkez kısmında 10 mm’lik boş hacim bulunacak silindir şeklinde tasarlanmıştır. Ve tasarlanan eyleyici kalıp içerisinde, şişmenin gerçekleşeceği 4 adet torus şeklinde kanal yer almaktadır. Şekil 3.14 a’da gösterilen bu torus hacminin oluşmasını sağlamak için tasarlanan parçalar, Şekil 3.14 b’de gösterilen ana kalıp parçalarına bağlanarak şekil 3.14 c’deki gibi birleştirilecektir.



Şekil 3.14: (a) Yumuşak eyleyicinin şişmesine olanak sağlayacak torus parçaları (b) ana kalıp parçaları (c) birleştirilmiş kalıp

Takip eden kısımda birleştirilen kalıba deriyle temasa uygun bir malzeme olan Ecoflex 00-30 dökülmüş ve 4.5 saatlik kurlenme işleminin sonucunda kalıbın dış duvarları demonte edilmiştir. Ve sonrasında sırasıyla önce iç hacmin meydana gelmesini sağlayan silindir parça daha sonra da torus şeklinde hava kanallarının oluşmasını sağlayacak olan ara parçalar kalıptan sökülmüştür. Dış duvarda torus parçalarını tutacak olan çubuğun meydana getirdiği yarık 3 boyutlu prototipleme

cihazından üretilen parçayla kapatılıp silikon elastomerle tekrar birleştirilmiştir (Şekil 3.15).



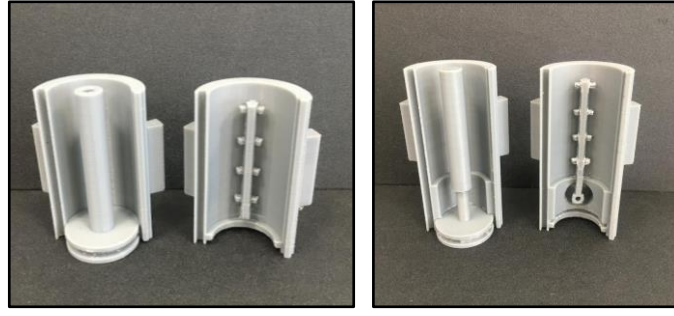
Şekil 3.15: (a) Silikonun kalıba dökülmesi (b) kalıbın kürlenmiş silikondan ayrılması (c) sensörler için gerekli boş hacmi yaratacak olan parçanın kürlenmiş silikondan ayrılması (d/e) torus parçalarının silikonda ayrılması (f) kalıptan tamamen arındırılan silikon eyleyici (g) dış duvardan ayrılan silikonda meydana gelen yarığın tasarlanan uzun çubuk yardımıyla desteklenmesi (h) donut şeklindeki eyleyicinin son hali

Üretimi tamamlanan yumuşak eyleyicimize daha sonra pnömatik valf yardımıyla hava basıncı uyguladığımızda gerçekleşen şişme Şekil 3.16’da görülmektedir. Fakat yarık olan kısma silikonla sonradan yama işlemi yapıldığı için şişirme esnasında yumuşak eyleyicimiz yama yapılan kısma doğru hafif bükülmektedir. Bu durumda yama yapılarak birleştirilen kısmın kalıbında bir takım değişikliklere gidilmiştir. Aynı zamanda dış duvar kalıbı eyleyici uç noktasının daha fazla şişmesine olanak sağlayacak şekilde değiştirilmiştir.



Şekil 3.16: Donut şeklindeki yumuşak eyleyicinin şişmiş halinin farklı açılardan görüntüsü

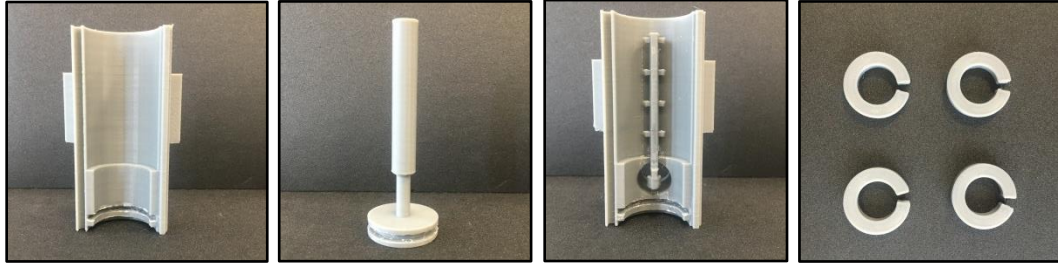
Şekil 3.17’de kalıpta yapılan tasarımsal değişiklikler görsek olarak net bir şekilde ifade edilmiştir.



Şekil 3.17: Tasarım gelişim evresi

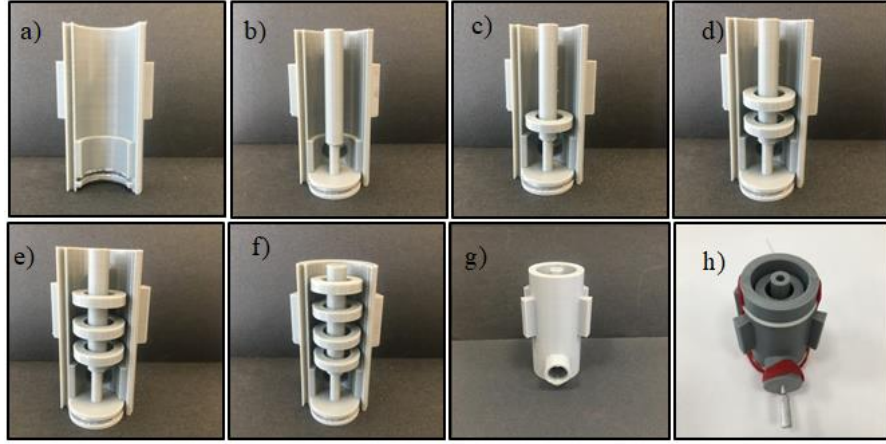
### 3.3.3 Prototip 3 – Donut yumuşak eyleyici tasarım 2

Bölüm 3.2.2’de üretimi tamamlanan doğrusal uzamayı sağlayacak olan donut şeklindeki yumuşak eyleyicide gözlemlenen eksiklikleri bu prototip çalışmasında tamamlayarak yeni bir kalıp üretimi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.18’de kalıp ana ve ara parçalarına yer verilmiştir.



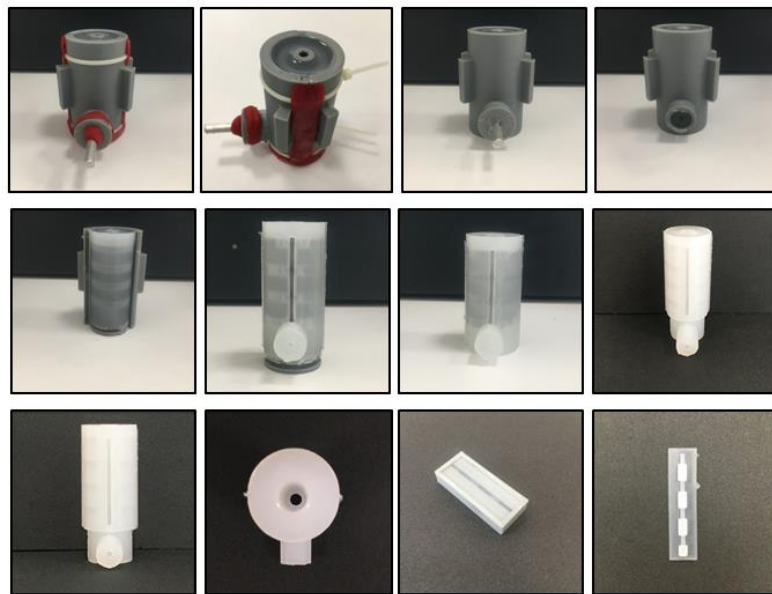
Şekil 3.18: Donut şeklindeki doğrusal uzamayı sağlayacak olan eyleyicinin son kalıp parçaları

Üretimi tamamlanan gerekli kalıp parçalarının montaj sıralamaları bu prototipte daha detaylı şekilde aktarılmıştır. Öncelikle boş hacmin oluşmasını sağlayacak silindir parça dış duvara sıkı geçme olacak şekilde geçirilmiş (Şekil 3.19 b) daha sonra şişme işlemine izin verecek olan torus paçaları aşağıdan yukarı olacak şekilde dış duvar parçasına bağlanmıştır (Şekil 3.19 c/d/e/f). Torus parçaları takılan dış duvar, diğer duvarla birleştirilerek (Şekil 3.19 g) dökülecek olan silikonun sızması adına etrafı oyun hamuruyla çevrilmiştir (Şekil 3.19 h). Ayrıca bu kalıba, pnömatrik valfin takılmasına olanak sağlayan ana kalıba ek bir silindirik hat ve bu hattın içerinden geçecek 3 mm çapında alüminyum çubukta kalıba eklenmiştir.



Şekil 3.19: (a) kalıp dış duvarı (b) boş hacmin oluşmasına olanak sağlayacak silindir parçanın duş duvara montajı (c/d/e/f) torus parçalarının montajı (g) birleştirilmiş kalıp (h) sızmanın oluşmasını önlemek için oyun hamuruyla bağlantı yerlerinin kapatılması

Birleştirilen ve daha sonra birleşim hatları oyun hamuruyla kapatılan kalıba Ecoflex 00-30 dökülmüş ve 4.5 saatlik kürleme işleminin sonucunda önce hava kanalını oluşturacak olan alüminyum çubuk daha sonra sökülmüş daha sonra kalıbın dış duvarları demonte edilmiştir. Takip eden aşamada bölüm 3.2.2'deki prosedürler talip edilerek önce iç hacmin meydana gelmesini sağlayan silindir parça daha sonra da torus şeklinde hava kanallarının oluşmasını sağlayacak olan ara parçalar kalıptan sökülmüştür. Dış duvarda torus parçalarını tutacak olan çubuğun meydana getirdiği yarığı kapatmak için yeni bir kalıp tasarımına gidilmiş ve üretilen silikon elastomer parça yumuşak eyleyiciyle birleştirilmiştir (Şekil 3.20).



Şekil 3.20: Nihai kalıp döküm işlemi

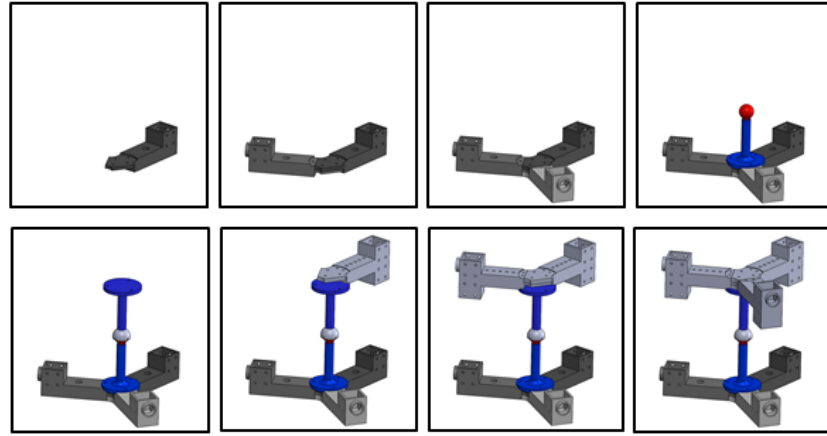
Birleştirme işlemi gerçekleştikten sonra yumuşak eyleyiciye pnömatik basınç verilerek şişme ve uzama durumu kontrol edilmiş ve bir önceki prototipte gözlemlenen bükülme sorunu kısmen çözülmüştür (Şekil 3.21). Fakat sistem geometrisindeki heterojenlik devam etmektedir. Bu kapsamda bölüm 3.2.1’de tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen prototip çalışmasının şu aşamada sistemimize daha uygun olduğuna karar verilmiş ve donut prototip çalışması geliştirilmek üzere ileriki çalışmalara ertelenmiştir.



Şekil 3.21: Eyleyicinin şişmiş son hali

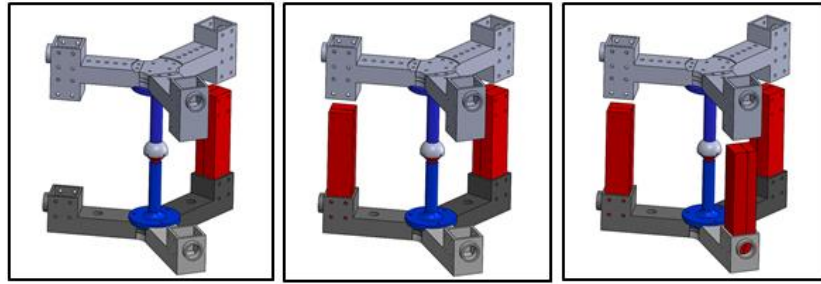
### 3.4 Modüler Hibrit Manipülatör - Prototip 1

Şekil 3.2’deki ilgili manipülatörün çalışma hacmini genişletmek amacıyla manipülatörde kullanılan doğrusal mafsallar doğrusal uzama sağlayacak olan yumuşak eyleyicilerle yer değiştireceğinden doğrusal uzamayı sağlayabilecek farklı yumuşak eyleyici prototip denemeleri yapılmış olup en uygun çalışmanın ilk prototip denemesi olduğuna karar verilmiştir. Bu amaçla ilgili manipülatör iskelet yapısı korunarak yeni bir oryantasyon platformu tasarlanmış ve platform SolidWorks programında 3 boyutlu olarak modellenerek Zortrax M200 hızlı prototipleme cihazında ABS Z filament ile üretilmiştir. Şekil 3.22’de tasarlanan oryantasyon platform, modüler şekilde montaj sıralamaları ile gösterilmiştir.



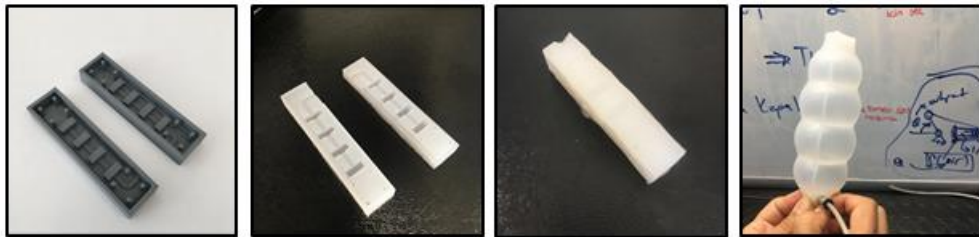
Şekil 3.22: Oryantasyon manipülatörü iskelet yapısı montaj sıralaması

Birbirine merkezlerinden küresel mafsalla bağlı olan alt platform ve üst platform daha sonra uç noktalarından doğrusal yumuşak eyleyici ile Şekil 3.23'teki gibi bağlanacaktır.



Şekil 3.23: Manipülatör uç noktalarına doğrusal yumuşak eyleyicinin bağlanmış görüntüsü

Bu amaçla prototip 1' de üretilen doğrusal yumuşak eyleyici kalıbı, platform uç noktasına 4 noktadan monte edilecek şekilde tekrar tasarlanmıştır. Ve Ecoflex 00-30 döküm kalıbı kullanılarak üretimi tamamlandıktan sonra şişme kontrolleri yapılmıştır.



Şekil 3.24: Oryantasyon platformuna bağlanacak olan doğrusal yumuşak eyleyici tasarım ve üretim aşamaları

Pnömatik basınç verilmeden önce 50 mm olarak ölçülen doğrusal yumuşak eyleyiciye daha sonra pnömatik basınç uygulandığında eyleyicide 150 mm'ye kadar

bir uzama gözlemlenmiştir. Bu da maksimum 1:1 oranında çalışabilen rijit yapıdaki doğrusal mafsal yerine yumuşak yapıdaki doğrusal eyleyici kullanıldığında çalışma kapasitesinin arttırılabileceğini ortaya koymuştur Fakat güvenli alanda çalışmak amacı ile eyleyicinin başlangıç uzama miktarı 120 mm olarak belirlenmiştir (Şekil 3.25).



Şekil 3.25: Yumuşak eyleyicinin pnömatrik basınç altında uzama durumu

Platformların tabanları arasındaki mesafe doğrusal eyleyicinin başlangıç konumundaki uzama miktarına eşit olacak şekilde belirlenmiştir. Sonrasında üretimi tamamlanan modüler iskelet yapısının montaj işlemi yapılarak sırayla doğrusal yumuşak eyleyiciler oryantasyon platformuna bağlanmış ve pnömatrik basınç verilerek sistemin hareket durumu gözlemlenmiştir (Şekil 3.26).

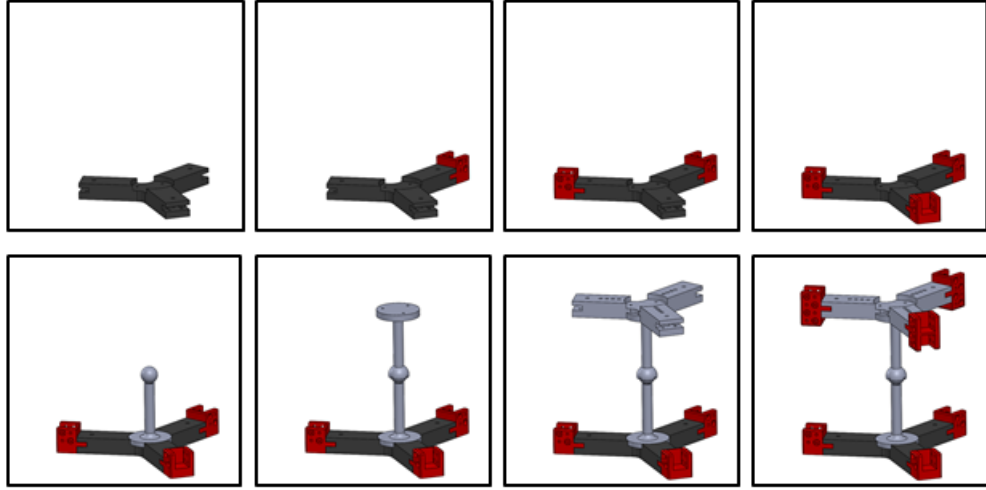


Şekil 3.26 : Montajı tamamlanan manipölatörün hareket durumu

Fakat doğrusal yumuşak eyleyici tasarlanan oryantasyon platformunun uç noktasına bağlandığında iskelet yapı doğrusal yumuşak eyleyicinin uç kısımlarındaki odacıkları sınırlandırdığından tam bir şişme sağlanamamıştır. Olası bir patlama durumuna karşı da tasarımda değişikliğe gidilmiştir.

### 3.5 Modüler Hibrit Manipülâtör - Prototip 2

Bu prototip çalışmasında oryantasyon platformunun iskelet yapı ölçüleri korunarak eyleyicilerin modüler olarak monte edilmesine olanak sağlayacak şekilde tekrar tasarlanmış ve doğrusal yumuşak eyleyicinin kalıp tasarımı değiştirilmiştir (Şekil 3.27).



Şekil 3.27: Yeni oryantasyon manipülâtörü iskelet yapısı montaj sıralaması

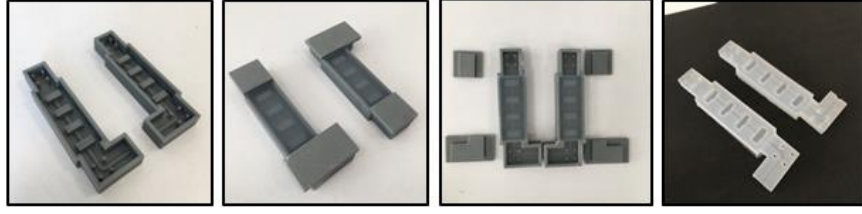
Tasarımı gerçekleştirilen modüler iskelet yapısının parçaları, laboratuvarımız bünyesinde bulunan Zortrax M200 üç boyutlu hızlı prototipleme cihazıyla üretilmiştir (Şekil 3.28).



Şekil 3.28: Modüler iskelet yapısının parçalarının montajı

Platform uç noktasına 4 noktadan monte edilecek şekilde tekrar tasarlanan doğrusal yumuşak eyleyici, iskelet yapısına değdiğinde olası patlama durumuna karşı bağlantı yerleri 2 mm içeride kalacak şekilde düzenlenerek Ecoflex 00-30 döküm kalıbı ile üretimi tamamlanmış (Şekil 3.29) ve iskelet yapıya bağlanarak oryantasyon platformunun hareket kabiliyeti gözlemlenmiştir. (Şekil 3.30).



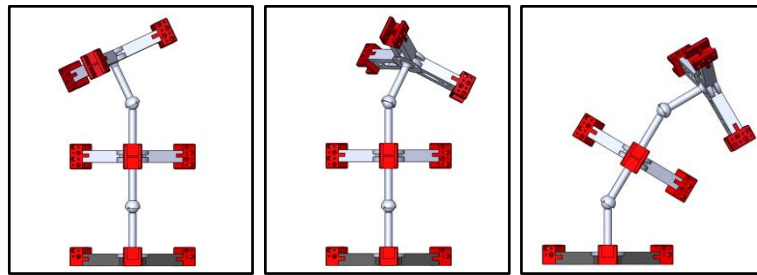


Şekil 3.29: Yeni doğrusal yumuşak eyleyici üretim aşamaları



Şekil 3.30: Montajı tamamlanan yeni manipülâtörün hareket durumu

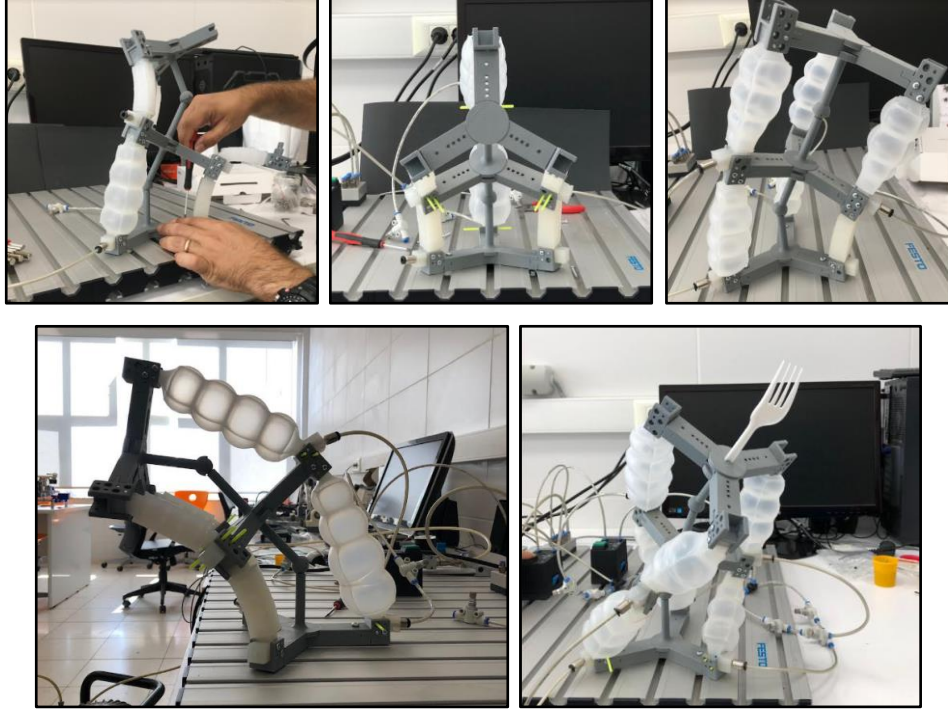
Montaj işlemi tamamlanan manipülâtörün yumuşak eyleyicilerine pnömatrik basınç verildiğinde, manipülâtör istenilen oryantasyon hareketini sağladığından çalışılan prototip 2 modelinin uygun olduğuna karar verilmiştir. Bu aşamada planlanan modüler hibrit manipülâtörün oluşturulması adına iskelet yapıya ek bir modül daha eklenerek beraberinde 3 adet doğrusal eyleyici daha üretilmiştir (Şekil 3.31).



Şekil 3.31: Modüler hibrit manipülâtörün çeşitli konumlandırılması

Üretilen iskelet yapının parçalarının kendi aralarındaki montaj işlemi ve beraberinde doğrusal eyleyicilerin manipülâtöre eklenmesi şekil 3.32’de detaylandırılmıştır. Ek olarak platformların tabanından küresel mafsala kadar olan mesafe lineer eyleyicinin ulaşabileceği en kısa ve en uzun mesafenin ortalaması olacak şekilde

belirlendiğinden montaj işleminin gerçekleştirilmesi için öncelikle doğrusal eyleyiciler bir miktar şişirmiş sonrasında montaj işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.32: Modüler hibrit manipülatör montaj aşaması ve istenilen oryantasyon hareketinin sağlanması

## Bölüm 4

### Sonuçlar

İnsan etkileşiminin ağırlıklı olarak yer aldığı iş birlikçi ve yardımcı robotik uygulamalarında, rijit robot manipülatör çalışma hacminde gerçekleşebilecek herhangi bir hata geri dönülemez sonuçlara yol açabileceğinden, ilgili uygulamalarda kullanılacak robot manipülatörlerin esnek yapıda olabilmesi önem kazanmıştır. Bu bilgiler ışığında tez kapsamında, sağlık alanında insan robot etkileşimi gerektiren uygulamalarda kullanılacak ve uç nokta hassasiyetinden en az seviyede ödün verilerek esnekliğin sağlanacağı çok serbestlik dereceli yumuşak ve rijit yapıda hibrit modüler robot manipülatörler geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Bu doğrultusunda, çalışma kapsamında ilk olarak medikal ve işbirlikçi robotik alanında kullanılmak üzere geliştirilmiş hibrit yapıdaki cerrahi robot elde bulunan yumuşak parmak yapılarının üretilebilmesine odaklanılmıştır. Çalışma boyunca farklı kalıp tasarımları ve malzemeler denenmiş, elde edilen sonuçlar değerlendirilerek tasarımda iyileştirmelere gidilmiştir. Nihai olarak elde edilen elastomer tabanlı yumuşak parmak, içerisinde bulunan pnömatik odacıklar sayesinde basınçlı hava ile eyletilerek yeterli kavrama geometrisini alabilmesi sağlanmıştır. Tüm bileşenleri tasarlanmış olan hibrit yapıdaki cerrahi robot elin üretilmesiyle, operasyon sırasında cerraha farklı donanımların servis edilmesi, endoskop gibi görüntüleme cihazlarının kontrolü, organ nakli gibi hasta vücudundan çıkartılacak herhangi bir yumuşak dokunun zarar görmeden kavranması ve belli bir noktaya taşınması gibi görevler ilgili uygulamalarda gerçekleştirilebilecektir. Aynı zamanda bu çalışma sonucunda yumuşak robotun üretilmesi için gerekli olan tasarım kriterleri öğrenilmiştir ve tez doğrultusunda, sağlık alanında ilaçların hastaya verilmesi, hasta hijyeninin sağlanması, hasta üzerinden örnek alınması, rutin bakımların gerçekleştirilmesi ve yardıma ihtiyacı olan bireylerin gündelik yaşantısında rutin

işlemlerine yardımcı olunması gibi uygulamalarda kullanılacak, çok serbestlik dereceli yumuşak ve rijit yapıda bir hibrit modüler robot manipülatör yapısı kurgulanmıştır. Ve yapısal tasarımı takiben, hem tek modül hem de üst üste montajlanmış “n” adet modül için kinematik analiz denklemleri parametrik olarak çıkartılarak, modüler yapı çalışma hacminin parametrik olarak tanımlanmıştır. Tasarlanan modül boyutlandırılmaları görev kriterlerine göre belirlenmiş ve belirlenen rijit eyleyici özelliklerini karşılayabilecek, aynı hareket kabiliyetinde esnek ve yumuşak yapıda bir doğrusal yumuşak eyleyici tasarlanmıştır. Nihayetinde rijit yapıdaki manipülatör omurgası ile yumuşak yapıdaki manipülatör eyleyicilerinin prototip üretiminin gerçekleştirilerek montaj çalışmalarını tamamlanmıştır. Bu rijit paralel manipülatör yapısına yumuşak eyleyiciler entegre edildiğinde manipülatör yapısının esnekliği başarılı bir şekilde arttırılmıştır.

# Kaynaklar

- [1] Suzumori K. Robotics and Autonomous Systems Elastic materials producing compliant robots. *Robotics and Autonomous Systems* 1996;18(1-2):135–40.
- [2] Ranzani T, Gerboni G, Cianchetti M, Menciassi A. A bioinspired soft manipulator for minimally invasive surgery. *Bioinspiration and Biomimetics* 2015;10(3).
- [3] Kim S, Laschi C, Trimmer B. Soft robotics: A bioinspired evolution in robotics. *Trends in Biotechnology* 2013;31(5):287–94.
- [4] Trivedi D, Rahn CD, Kier WM, Walker ID. Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research. *Applied Bionics and Biomechanics* 2008;5(3):99–117.
- [5] Xi S, Scientific T. Sigma Xi , The Scientific Research Society Trunks , Tongues , and Tentacles : Moving with Skeletons of Muscle. *The Scientific Research Society* 2016;77(1):28–35.
- [6] Margheri L, Laschi C, Mazzolai B. Soft robotic arm inspired by the octopus: I. from biological functions to artificial requirements. *Bioinspiration and Biomimetics* 2012;7(2).
- [7] Lin HT, Leisk GG, Trimmer B. GoQBot: A caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot. *Bioinspiration and Biomimetics* 2011;6(2).
- [8] Marchese AD, Onal CD, Rus D. Autonomous Soft Robotic Fish Capable of Escape Maneuvers Using Fluidic Elastomer Actuators. *Soft Robotics* 2014;1(1):75–87.
- [9] Cacucciolo V, Ansari Y, Leylavi Shoushtari A, Cianchetti M, Laschi C. Adaptive locomotion on uneven terrains by means of a functional separation

of time scales in the design and control of robots. In Proceedings of AMAM - Adaptive Motion in Animals and Machines 2015;4–7.

- [10] Roger VL, Go AS, Lloyd-Jones DM, Benjamin EJ, Berry JD, Borden WB, et al. Heart disease and stroke statistics-2012 update: A report from the American heart association. *Circulation* 2012;125(1).
- [11] Polygerinos P, Wang Z, Galloway KC, Wood RJ, Walsh CJ. Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation. In *Robotics and Autonomous Systems* 2015; 125(1): 135–143.
- [12] Yap HK, Lim JH, Nasrallah F, Goh, JCH, Yeow RCH. A soft exoskeleton for hand assistive and rehabilitation application using pneumatic actuators with variable stiffness. *Proc. - IEEE International Conference on Robotics and Automation 2015*: 4967–4972.
- [13] Bartlett NW, Lyau V, Raiford WA, Holland D, Gafford JB, Ellis TD, et al. A soft robotic orthosis for wrist rehabilitation. *Journal of Medical Devices, Trans ASME* 2015;9(3)
- [14] Galiana I, Hammond FL, Howe RD, Popovic MB. Wearable soft robotic device for post-stroke shoulder rehabilitation: Identifying misalignments. *IEEE International Conference on Robotics and Automation* 2012;317–322.
- [15] Oguntosin V, Harwin WS, Kawamura S, Nasuto SJ, Hayashi Y. Development of a wearable assistive soft robotic device for elbow rehabilitation. *IEEE International Conference on Robotics and Automation 2015*; 747–752.
- [16] Park YL, Chen BR, Pérez Arancibia NO, Young D, Stirling L, Wood RJ, ve diğ. Design and control of a bio-inspired soft wearable robotic device for ankle-foot rehabilitation. *Bioinspiration and Biomimetics* 2014; 9(1).
- [17] Mengüç Y, Park YL, Pei H, Vogt D, Aubin PM, Winchell E, ve diğ. Wearable soft sensing suit for human gait measurement. *The International Journal of Robotics Research* 2014; 33(14):1748–1764.
- [18] Burgner-Kahrs J, Rucker DC, Choset H. Continuum Robots for Medical

- Applications: A Survey. *IEEE Transactions on Robotics* 2015; *31(6)*:1261–1280.
- [19] Arezzo A, Menciassi A, Valdastri P, Ciuti G, Lucarini G, Salerno M, ve diğ. Experimental assessment of a novel robotically-driven endoscopic capsule compared to traditional colonoscopy. *Digestive and Liver Disease* 2013; *45(8)*, 657–662.
- [20] Pourghodrat A, Dehghani H, Nelson CA, Oleynikov D, Dasgupta P, Terry BS. Disposable fluidic self-propelling robot for colonoscopy. *Journal of Medical Devices* 2014; *8(3)*: 1–2.
- [21] Roche ET, Wohlfarth R, Overvelde JTB, Vasilyev NV, Pigula FA, Mooney DJ ve diğ. A bioinspired soft actuated material. *Advanced Materials* 2014; *26(8)*:1200–1206.
- [22] Levering V, Wang Q, Shivapooja P, Zhao X, López GP. Soft robotic concepts in catheter design: An on-demand fouling-release urinary catheter. *Advanced Healthcare Materials* 2014; *3(10)*: 1588–1596.
- [23] Ren H, Gu X, Lin K. Human-Compliant Body-Attached Soft Robots Towards Automatic Cooperative Ultrasound Imaging. *IEEE 20th International Conf. on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*, Nanchang, China, 2016, 653–658.
- [24] Konishi S, Shimomura S, Tajima S, Tabata Y. Implementation of soft microfingers for a hMSC aggregate manipulation system. *Microsystems Nanoengineering* 2016;2(1).
- [25]. Cianchetti M, Ranzani T, Gerboni G, De Falco I, Laschi C, Menciassi A. STIFF-FLOP surgical manipulator: Mechanical design and experimental characterization of the single module. In: *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2013; 3576–3581.
- [26] Ranzani T, Cianchetti M, Gerboni G, Falco I De, Menciassi A. A Soft Modular Manipulator for Minimally Invasive Surgery: Design and Characterization of a Single Module. *IEEE Transactions on Robotics*.

2016;32(1):187–200.

- [27] Ilievski F, Mazzeo AD, Shepherd RF, Chen X, Whitesides GM. Soft robotics for chemists. *Angewandte Chemie* 2011;50(8):1890–5.
- [28] Wehner M, Truby RL, Fitzgerald DJ, Mosadegh B, Whitesides GM, Lewis JA, et al. An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots. *Nature*. 2016;536(7617):451–455.
- [29] Shepherd RF, Ilievski F, Choi W, Morin SA, Stokes AA, Mazzeo AD, ve diğ. Multigait soft robot. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America* 2011;108(51):20400–20403.
- [30] Suzumori K, Endo S, Kanda T, Kato N, Suzuki H. A bending pneumatic rubber actuator realizing soft-bodied manta swimming robot. *Proc - IEEE International Conference on Robotics and Automatio* 2007;4975–4980.
- [31] Hawkes E, An B, Bebbornou NM. Programmable matter by folding. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2010;107(28):12441-12445
- [32] Thakur OP, Singh AK. A review on dielectric elastomer and its application. *Journal of Multi Disciplinary Engineering Technologies* 2011;5(2)
- [33] O’Halloran A, O’Malley F, McHugh P. A review on dielectric elastomer actuators, technology, applications, and challenges. *Journal of Applied Physics*. 2008;104(7):071101
- [34] Kellaris N, Venkata VG, Smith GM, Mitchell SK, Keplinger C. Actuators Muscle-mimetic, electrohydraulic transducers that linearly contract. *Science Robotics* 2018;3(14)
- [35] Ge Q, Dunn CK, Qi HJ, Dunn ML. Active origami by 4D printing. *Smart Materials and Structures* 2014; 23(9):094007
- [36] Chen T, Bilal OR, Shea K, Daraio C. Harnessing bistability for directional propulsion of soft, untethered robots. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 2018;115(22):5698–5702.



- [37] Zhang Q, Zhang K, Hu G. Smart three-dimensional lightweight structure triggered from a thin composite sheet via 3D printing technique. *Scientific Reports* 2016;6:22431
- [38] Yuan C, Roach DJ, Dunn CK, Mu Q, Kuang X, Yakacki CM, ve diğ. 3D printed reversible shape changing soft actuators assisted by liquid crystal elastomers. *Soft Matter* 2017;13(33):5558–68.
- [39] Rich SI, Wood RJ, Majidi C. Untethered soft robotics. *Nature Electronics* 2018;1(2):102–112.
- [40] AISBL EUR. Robotics 2020 Multi-Annual Roadmap for Robotics in Europe SPARC Robotics, EU Robotics, Initial Release B. 2014;15(01)
- [41] Gopinath D, Jain S, Argall BD. User-driven Optimization of Shared Autonomy in Assistive Robotics. *IEEE Robotics and Automation Letters* 2017;2(1):2–4.
- [42] Moreno P, Nunes R, Figueiredo R, Ferreira R, Bernardino A, Santos-Victor J, ve diğ. Vizzy: A humanoid on wheels for assistive robotics. *Advances in Intelligent Systems and Computing* 2016;417:17–28.
- [43] Elprama SA, Jewell CIC, Jacobs A, El Makrini I, Vanderborcht B. Attitudes of factory workers towards industrial and collaborative robots. *Proceedings of the Companion of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction* 2017;113–114.
- [44] Esposito M, Busam B, Hengersperger C, Rackerseder J, Navab N, Frisch B. Multimodal US–gamma imaging using collaborative robotics for cancer staging biopsies. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* 2016;11(9):1561–71.
- [45] Rossiter J, Hauser H. Soft robotics - The next industrial revolution? [Industrial Activities]. *IEEE Robotics & Automation Magazine* 2016;23(3):17–20.

- [46] Cianchetti M, Ranzani T, Gerboni G, Nanayakkara T. Soft Robotics Technologies to Adress Shortcoming in Today's Minimally Invasive Surgery: The STIFF-FLOOP Approach. *Soft Robotics* 2014;1(2):122-131.
- [47] Cianchetti M, Laschi C, Menciassi A, Dario P. Biomedical applications of soft robotics. *Nature Reviews Materials* 2018;3(6):143–153.
- [48] Hsiao JH, Chang JY, Cheng CM. Soft medical robotics: clinical and biomedical applications, challenges, and future directions. *Advanced Robotics* 2019;33(21):1099–1111.
- [49] Yazıcı MV, Kahveci A, Kızıldağ FS, Mülayim N, Gezgin E. Hibrit yapıda bir cerrahi robot elin tasarımı ve geliştirilmesi. *Tıp Teknolojileri Kongresi* 2018.
- [50] Ilievski F, Mazzeo AD, Shepherd RF, Chen X, Whitesides GM. Soft Robotics for Chemists. *Angew Chemie* 2011;123(8):1930–5.
- [51] de Payrebrune KM, O'Reilly OM. On constitutive relations for a rod-based model of a pneu-net bending actuator. *Extreme Mechanics Letters* To appear 2016;1(8):38–46.
- [52] Gezgin E. Biokinematic analysis of human body (doktora tezi). İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü; 2011
- [53] Tsai LW. Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators. Kanada: John Wiley & Sons; 1999.
- [54] Skorina EH, Luo M, Oo WY, Tao W, Chen F, Youssefian S, ve diğ. Reverse pneumatic artificial muscles (rPAMs): Modeling, integration, and control. *PLOS One* 2018;13(10):1–24.

# Özgeçmiş

Adı Soyadı: Seda Özbek

Eğitim:

2013–2019 İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Makine Müh. Bölümü

2019–2021 İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Makine Müh. Bölümü

İş Deneyimi:

2016 – Yaz ayı Stajyer – Çınarlı Endüstri Meslek Lisesi

2017 – Yaz ayı Stajyer – Stackpole International Otomotiv Ürünleri Ltd. Şti.

2017 – Yaz ayı Stajyer – Doğu Pres

2019-2020 – Tübitak 2210-C Öncelikli Alanlar Programı Bursiyer

Yayınlar (varsa):

1. Özbek S, Yazıcı M.V, Gezgin E. Hibrit Yapıda Bir Cerrahi Robot El için Yumuşak Parmakların Tasarımı. Journal of Intelligent Systems with Applications Volume:4, Issue:1,2021, pp:38-41
2. Özbek S, Yazıcı M.V, Gezgin E. Development of Soft Finger and Palm Design for a Hybrid Surgical Robotic Hand. 34th Florida Conference on Recent Advances in Robotics FCRAR 2021
3. Özbek S, Yazıcı M.V, Gezgin E. Hibrit Yapıda Bir Cerrahi Robot El için Yumuşak Parmakların Tasarımı