

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PNÖMATİK YAPAY KAS TABANLI VE ÇALIŞMA ALANI
DEĞİŞTİRİLEBİLEN ESNEK ROBOTİK KAVRAYICI
GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seyda Emir ŞİMŞİR

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

HAZİRAN 2025

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PNÖMATİK YAPAY KAS TABANLI VE ÇALIŞMA ALANI
DEĞİŞTİRİLEBİLEN ESNEK ROBOTİK KAVRAYICI
GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Seyda Emir ŞİMŞİR

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Akın Oğuz KAPTI

HAZİRAN 2025

Seyda Emir ŞİMŞİR tarafından hazırlanan “Pnömatik Yapay Kas Tabanlı ve Çalışma Alanı Değiştirilebilen Esnek Robotik Kavrayıcı Geliştirilmesi” adlı tez çalışması 27.06.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Makina Tasarım ve İmalat Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :

Jüri Üyesi :

Jüri Üyesi :



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “PNÖMATİK YAPAY KAS TABANLI VE ÇALIŞMA ALANI DEĞİŞTİRİLEBİLEN ESNEK ROBOTİK KAVRAYICI GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

27/06/2025

Seyda Emir ŞİMŞİR





Aileme, eşime ve doğmamış çocuklarıma...



TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 122M619 numaralı TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında desteklenmiştir. Bu çalışmaya sağlanan destek için TÜBİTAK’a teşekkür ederiz.

Yüksek lisans eğitimim süresince bana her konuda destek olduğunu hissettiren tez danışmanım ve aynı zamanda 122M619 numaralı TÜBİTAK 1001 projesi yürütücüsü sayın Prof. Dr. Akın Oğuz KAPTI’ya, proje kapsamında yaptığımız çalışmalara teknik anlamda önemli yardımları dokunan sayın Doç. Dr. Sedat İRİÇ’e, laboratuvar çalışmalarımızı yaparken bana destek olan sayın Arş. Gör. Muhammed Ömer İBİŞ’e ve sayın Ramazan ÖZTÜRK’e teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca bugün olduğum konuma gelmemi sağlayan canım aileme ve beni akademik çalışma hayatına teşvik eden sevgili eşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Seyda Emir ŞİMŞİR



İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR.....	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY.....	xxv
1. GİRİŞ... ..	1
1.1. Tezin Kapsamı.....	1
1.2. Tezin Amacı.....	2
1.2.1. Tezin ikincil amacı	2
1.3. Literatür Araştırması	2
1.4. Hipotez	7
1.4.1. Hipotezin öngörülleri	8
2. YÖNTEM VE BULGULAR.....	11
2.1. Pnömatik Yapay Kaslar	11
2.1.1. PYK çeşitleri	11
2.1.1.1. Örgülü PYK (Brained PAM).....	11
2.1.1.2. Pileli PYK (Pleated PAM).....	12
2.1.1.3. Ağlı PYK (Netted PAM)	12
2.1.1.4. Gömülü PYK (Embebbded PAM).....	13
2.1.1.5. Festo PYK (Festo PAM)	15
2.1.1.6. Kısalan PYK	15
2.1.1.7. Burulan PYK.....	16
2.1.1.8. Eğilen PYK	16
2.1.2. PYK genel özellikleri.....	17
2.1.3. PYK kullanım alanları.....	18
2.2. EPYK İçin Malzeme Seçimi	18
2.2.1. Esnek malzeme çeşitleri.....	18
2.2.1.1. Silikon elastomer malzemeler	19
2.2.1.2. Poliüretan malzemeler.....	19
2.2.1.3. Termoplastik malzemeler	20
2.2.2. Kullanılacak malzemenin belirlenmesi	20
2.2.2.1. Malzeme Testleri	26
2.3. Silikon Parmak Üretimi.....	45
2.3.1. Silikon parmak tasarımı	46
2.3.2. Sonlu elemanlar analizi	50
2.3.3. Kalıpların üretilmesi	56
2.3.4. Silikon parmakların üretilmesi.....	61
2.4. Silikon Parmakların Performanslarının Belirlenmesi	67

2.4.1. Deney düzeneği tanıtımı.....	68
2.4.2. Basınç dayanım testi.....	71
2.4.3. Eğilme açısı deneyi	71
2.4.4. Parmak ucu kuvveti deneyi	75
2.4.5. İdeal duvar kalınlığına sahip parmağın seçimi.....	76
2.5. Esnek Robotik Kavrayıcı Tasarımı ve Üretimi	78
2.5.1. Hareket kısıtlamaları ve sınır şartları	79
2.5.2. Motor elemanı seçimi.....	81
2.5.3. Yazılımsal kontrol ve hareketleri kodlama	82
2.5.4. Mekanik parçaların malzeme listesi	87
2.6. Esnek Robotik Kavrayıcı İşlevsellik Deneyleri	94
2.6.1. Deney düzeneği tanıtımı.....	94
2.6.2. Farklı cisimleri kavrama kabiliyetinin ölçülmesi.....	95
2.6.3. Farklı kütledeki cisimleri kaldırma kabiliyetinin ölçülmesi	96
3. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	99
KAYNAKLAR.....	107
EKLER.....	113
ÖZGEÇMİŞ.....	129

KISALTMALAR

3D	: 3 Dimensional
AC	: Alternating Current
BPYK	: Burulan Pnömatik Yapay Kas
DC	: Direct Current
EPYK	: Eğilen Pnömatik Yapay Kas
KPYK	: Kısalan Pnömatik Yapay Kas
PAM	: Pneumatic Artificial Muscle
PLA	: Polylactic Acid
PYK	: Pnömatik Yapay Kas
ROMAC	: Robotic Muscle Actuator
RTV	: Room Temperature Vulcanizing
STL	: Stereolithography
TPC-ET	: Thermoplastic Polyester Elastomer
TPE	: Thermoplastic Elastomer
TPU	: Thermoplastic Polyurethane



SİMGELER

m	: Kütle [g]
A_ç	: Çekme Testi Numunesi Kesit Alanı [mm ²]
L_ç	: Çekme Testi Numunesi İlk Boyu [mm]
ΔL_{kort}	: Çekme Testi Numunesi Ortalama Kopma Uzama Miktarı [mm]
ΔL_ç	: Çekme Testi Numunesi Uzama Miktarı [mm]
ΔL_{çort}	: Çekme Testi Numunesi Ortalama Uzama Miktarı [mm]
P	: Parmaklara Uygulanan Basınç [bar]
F_{kort}	: Çekme Testi Numunesi Ortalama Kopma Kuvveti [N]
F_ç	: Çekme Testi Numunesi Kuvveti [N]
F_{çort}	: Çekme Testi Numunesi Ortalama Kuvveti [N]
F	: Parmak Ucu Kuvveti [N]
θ	: Eğilme Açısı [°]
μ	: Viskozite [mPa.s]
σ_{çort}	: Çekme Testi Ortalama Gerilmesi [MPa]
σ_y	: Yırtılma Mukavemeti [kN/m]
σ_ç	: Çekme Mukavemeti [MPa]
σ	: Gerilme [MPa]
ε	: Yüzde Uzama [%]
ε_{kort}	: Çekme Testi Numunesi Ortalama Kopma Uzaması [%]
ε_{çort}	: Çekme Testi Numunesi Ortalama Uzaması
t	: Parmak Duvar Kalınlığı [mm]



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Malzeme türlerinin özellikleri.	21
Tablo 2.2. Shore gruplarının sertlik değerleri.	23
Tablo 2.3. 20 Shore RTV-2 Kalıp Silikonu (VRM-520) özellikleri.	24
Tablo 2.4. 20 Shore Platinum RTV-2 Kalıp Silikonu (VRM-620) özellikleri.	24
Tablo 2.5. 40 Shore RTV-2 Kalıp Silikonu (VRM-540) özellikleri.	25
Tablo 2.6. 20 Shore RTV-2 Kalıp Silikonu (AKSİL-G20) özellikleri.	25
Tablo 2.7. 40 Shore RTV-2 Kalıp Silikonu (AKSİL-G40) özellikleri.	26
Tablo 2.8. Farklı malzemeler için ortalama kopma kuvveti, ortalama uzama miktarı ve ortalama kopma uzaması değerleri.	41
Tablo 2.9. VRM-520 malzemesinden üretilmiş numunelerin kuvvet ve uzama değerleri.	41
Tablo 2.10. VRM-520 malzemesinden üretilmiş numunelerin ortalama kuvvet, ortalama uzama, ortalama gerilme ve ortalama gerinim değerleri.	43
Tablo 2.11. Eğilme açısı sonlu elemanlar analizi sonuçları.	55
Tablo 2.12. Eğilme açısı deneyi sonuçları.	74
Tablo 2.13. Parmak ucu kuvveti deneyi sonuçları.	76
Tablo 2.14. Farklı duvar kalınlıklarına sahip parmakların performans özet tablosu.	78
Tablo 2.15. Malzeme listesi.	90
Tablo 3.1. Parmak eğilme açısı sonlu elemanlar analizleri ile deneysel verilerin sapma oranı.	103



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. McKibben tipi pnömatik yapay kas (Chou ve Hannaford, 1994).....	4
Şekil 1.2. Pnömatik yapay kasların çalışma prensibi (Hall, 2011).	8
Şekil 2.1. Örgülü PYK (Daerden ve Lefeber, 2002).....	12
Şekil 2.2. Pileli PYK (Daerden ve Lefeber, 2002).....	12
Şekil 2.3. Yarlott PYK (Yarlott, 1972).....	13
Şekil 2.4. ROMAC PYK (Immega, 1986).....	13
Şekil 2.5. Kukolj PYK (Kukolj, 1988).	13
Şekil 2.6. Baldwin PYK (Daerden ve Lefeber, 2002).	14
Şekil 2.7. Morin PYK (Morin, 1953).....	14
Şekil 2.8. Paynter Hyperboloid PYK (Paynter, 1988).	14
Şekil 2.9. Festo PYK (Festo, 2022).	15
Şekil 2.10. Kısalan PYK (Wickramatunge ve Leephakpreeda, 2010).....	15
Şekil 2.11. Burulan PYK (Xiao ve ark., 2021).	16
Şekil 2.12. Eğilen PYK (Mosadegh ve ark., 2014).....	16
Şekil 2.13. Elastik malzemeler ve hiperelastik malzemeler için gerilme-gerinim grafiği karşılaştırması.	27
Şekil 2.14. Hiperelastik malzeme eğrisi.	28
Şekil 2.15. Tek eksenli çekme testi.	28
Şekil 2.16. Çift eksenli çekme testi.....	29
Şekil 2.17. Düzlemsel kesme testi.	29
Şekil 2.18. Saf kesme testi.	30
Şekil 2.19. Tek eksenli basma testi.	30
Şekil 2.20. Hacimsel sıkıştırma testi.....	31
Şekil 2.21. Histerezis eğrisi.	31
Şekil 2.22. Aksil kalıp silikonları: A) AKSİL-G20, B) AKSİL-G40, C) AKSİL-G20 Katalizör, D) AKSİL-G40 Katalizörü.	32
Şekil 2.23. VRM kalıp silikonları: A) VRM-520 ve VRM-540 Katalizörü, B) VRM-520, C) VRM-620, D) VRM-620 Katalizörü, E) VRM-540.....	33
Şekil 2.24. Karışım oranının ayarlanması: A) Darası alınmış kap, B) Ham silikon, C) Ham silikon ve katalizör karışımı.	33
Şekil 2.25. Vakum seti: A) Vakum tankı, B) Vakum pompası.	34
Şekil 2.26. Kalıp ayırıcı sprey.....	34
Şekil 2.27. Silikon tabakaların kalıplanması: A) Cam alt taban, B) Plastik kalıp, C) Kalıptan çıkan silikon tabaka numune.	35
Şekil 2.28. Çekme testi numunesi hazırlama ekipmanları: A) Kesme cihazı, B) Kesme kalıbı, C) Kesme işlemi.....	35
Şekil 2.29. Çekme testine hazır numuneler.....	36
Şekil 2.30. Metrios HD profil projeksiyon ölçüm cihazı.....	36
Şekil 2.31. Asimeto kalınlık komparatörü.	37
Şekil 2.32. Devotrans tablalı shoremetre.	37
Şekil 2.33. Standart ölçülerin numune ölçüleri ile karşılaştırılması.	38

Şekil 2.34. Devotrans çekme testi cihazı.	38
Şekil 2.35. Çekme testi aşamaları: A) Çekme öncesi, B) Çekme sırası, C) Çekme sonrası.....	39
Şekil 2.36. Çekme testi cihazından elde edilen örnek bir kuvvet-uzama grafiği.....	40
Şekil 2.37. VRM-520 malzemesi için ortalama gerilme (MPa)-gerinim grafiği.	45
Şekil 2.38. Parmağın üretim aşamaları.	47
Şekil 2.39. Üretimi tamamlanmış parmakların ölçüleri.	49
Şekil 2.40. Sonlu elemanlar analizinde kullanılacak geometri.	51
Şekil 2.41. $t = 2$ mm duvar kalınlığına sahip parmağın eğilme performansı analiz sonuçları: A) 0 bar, B) 0,1 bar, C) 0,2 bar, D) 0,3 bar, E) 0,4 bar, F) 0,5 bar.	52
Şekil 2.42. $t = 3$ mm duvar kalınlığına sahip parmağın eğilme performansı analiz sonuçları: A) 0 bar, B) 0,1 bar, C) 0,2 bar, D) 0,3 bar, E) 0,4 bar, F) 0,5 bar, G) 0,6 bar, H) 0,7 bar, I) 0,8 bar.	53
Şekil 2.43. $t = 4$ mm duvar kalınlığına sahip parmağın eğilme performansı analiz sonuçları: A) 0 bar, B) 0,1 bar, C) 0,2 bar, D) 0,3 bar, E) 0,4 bar, F) 0,5 bar, G) 0,6 bar, H) 0,7 bar, I) 0,8 bar, J) 0,9 bar, K) 1,0 bar, L) 1,1 bar, M) 1,2 bar, N) 1,3 bar.	53
Şekil 2.44. Eğilme açısı sonlu elemanlar analizi sonuçları grafiği.	54
Şekil 2.45. Dış yüzey kalıplarının 3D tasarımı ve ölçüleri: A) 2 mm duvar kalınlıklı kalıp, B) 3 mm duvar kalınlıklı kalıp, C) 4 mm duvar kalınlıklı kalıp.	56
Şekil 2.46. İç odacık kalıplarının 3D tasarımı ve ölçüleri: A) 2 mm duvar kalınlıklı kalıp, B) 3 mm duvar kalınlıklı kalıp, C) 4 mm duvar kalınlıklı kalıp.	56
Şekil 2.47. Alt parça kalıpların 3D tasarımı ve ölçüleri: A) 2 mm duvar kalınlıklı kalıp, B) 3 mm duvar kalınlıklı kalıp, C) 4 mm duvar kalınlıklı kalıp.	56
Şekil 2.48. Kalıpların montajlanması: A) 2 mm duvar kalınlıklı üst gövdenin kalıplanması, B) 3 mm duvar kalınlıklı üst gövdenin kalıplanması, C) 4 mm duvar kalınlıklı üst gövdenin kalıplanması, D) 2 mm duvar kalınlıklı alt tabanın kalıplanması, E) 3 mm duvar kalınlıklı alt tabanın kalıplanması, F) 4 mm duvar kalınlıklı alt tabanın kalıplanması.	57
Şekil 2.49. Konnektör bağlantısı kalıbı tasarımı: A) Konnektörün kalıplanması, B) Konnektör kalıbının tasarımı ve ölçüleri.....	58
Şekil 2.50. Baskı sonrası üst gövde kalıpları: A) 2 mm duvar kalınlıklı üst gövdenin kalıpları, B) 3 mm duvar kalınlıklı üst gövdenin kalıpları, C) 4 mm duvar kalınlıklı üst gövdenin kalıpları.....	59
Şekil 2.51. Baskı sonrası üst gövde kalıplarının montajlanması: A) 2 mm duvar kalınlıklı üst gövdenin kalıpları, B) 3 mm duvar kalınlıklı üst gövdenin kalıpları, C) 4 mm duvar kalınlıklı üst gövdenin kalıpları.	60
Şekil 2.52. Baskı sonrası alt taban kalıpları: A) 2 mm duvar kalınlıklı alt taban kalıbı, B) 3 mm duvar kalınlıklı alt taban kalıbı, C) 4 mm duvar kalınlıklı alt taban kalıbı.....	60
Şekil 2.53. Baskı sonrası konnektör kalıpları.	61
Şekil 2.54. Üst gövde üretimi: A) Dış yüzey kalıbına sıvı silikon dökülmesi, B) İç odacık kalıbının dış yüzey kalıbına yerleştirilmesi ve sıvı silikon dökülmesi, C) Kalıpların üzerine asetat kâğıdı serilmesi.	62
Şekil 2.55. Cam elyaf şeridi.	63
Şekil 2.56. Alt taban üretimi: A) Alt taban kalıbına cam elyaf şeridi yerleştirilmesi, B) Alt taban kalıbına sıvı silikon dökülmesi, C) Kalıpların üzerine asetat kâğıdı serilmesi.	63

Şekil 2.57. Kalıptan ayırma işlemi: A) Kalıplarda kürlenmiş parçalar, B) Kalıplardan çıkartılmış parçalar.	64
Şekil 2.58. Birleştirme işlemi.	65
Şekil 2.59. JalasanJ İkiz Tüp epoksi yapıştırıcı.	65
Şekil 2.60. Epoksi uygulaması.	66
Şekil 2.61. Konnektör kalıplama işlemi.	66
Şekil 2.62. Konnektör kalıbından çıkan parçalar.	67
Şekil 2.63. Deney düzeneği pnömatik akış şeması: A) Kompresör, B) Şartlandırıcı, C) Oransal regülatör, D) Basınç sensörü, E) Silikon parmak.	68
Şekil 2.64. Test arayüzü: A) Arayüzün ekranı, B) Basınç seçme menüsü.	69
Şekil 2.65. Deney düzeneği.	70
Şekil 2.66. Parmak sabitleme fikstürü: A) Fikstürün tasarımı, B) Fikstürün üretilmesi (İbiş ve ark., 2024).	70
Şekil 2.67. Farklı eğilme açılarında parmak konumları.	71
Şekil 2.68. $t = 2$ mm duvar kalınlığına sahip parmağın eğilme performansı deney sonuçları: A) 0 bar, B) 0,1 bar, C) 0,2 bar, D) 0,3 bar, E) 0,4 bar, F) 0,5 bar.	72
Şekil 2.69. $t = 3$ mm duvar kalınlığına sahip parmağın eğilme performansı deney sonuçları: A) 0 bar, B) 0,1 bar, C) 0,2 bar, D) 0,3 bar, E) 0,4 bar, F) 0,5 bar, G) 0,6 bar, H) 0,7 bar, I) 0,8 bar.	72
Şekil 2.70. $t = 4$ mm duvar kalınlığına sahip parmağın eğilme performansı deney sonuçları: A) 0 bar, B) 0,1 bar, C) 0,2 bar, D) 0,3 bar, E) 0,4 bar, F) 0,5 bar, G) 0,6 bar, H) 0,7 bar, I) 0,8 bar, J) 0,9 bar, K) 1,0 bar, L) 1,1 bar, M) 1,2 bar, N) 1,3 bar.	73
Şekil 2.71. Kuvvet ölçümü: A) Serbest hal, B) Basınçlandırılmış hal.	75
Şekil 2.72. Patlama testi sonuçları grafiği.	77
Şekil 2.73. Eğilme açısı testi sonuçları grafiği.	77
Şekil 2.74. Parmak ucu kuvveti testi sonuçları grafiği.	78
Şekil 2.75. Kavrayıcının 3D tasarımı: A) Önden görünüş, B) Arkadan görünüş, C) Üstten görünüş.	79
Şekil 2.76. Esnek robotik kavrayıcının hareket kısıtlamaları: A) En yüksek konum, B) en alçak konum, C) Maksimum kol açıklığı, D) Minimum kol açıklığı, E) Farklı kol pozisyonları, F) Farklı kol pozisyonları.	81
Şekil 2.77. Manuel kontrol ekipmanları.	84
Şekil 2.78. Hedef düzlemi.	85
Şekil 2.79. Filtreleme ve kenar algılama algoritması.	85
Şekil 2.80. Temel kavrama adımları: A) Başlangıç pozisyonu, B) Ön kavrama pozisyonu, C) Basınçlandırma işlemi, D) Kaldırma işlemi.	86
Şekil 2.81. Kontrol arayüzü.	87
Şekil 2.82. Malzeme listesi numaralandırma grupları.	87
Şekil 2.83. Kavrayıcı gövde grubu bom listi.	88
Şekil 2.84. Kavrayıcı kamera grubu bom listi.	88
Şekil 2.85. Kavrayıcı sol kol grubu bom listi.	89
Şekil 2.86. Kavrayıcı sağ kol grubu bom listi.	89
Şekil 2.87. Kavrayıcı ayak grubu bom listi.	90
Şekil 2.88. Kavrayıcı deney düzeneği.	95
Şekil 2.89. Farklı cisimlerin kavranması.	96
Şekil 2.90. Cıvata dolu kutu: A) Üstten görünüm, B) Yandan görünüm.	96
Şekil 2.91. Manipüle edilebilen nesnelerin maksimum ağırlıkları grafiği.	97
Şekil 3.1. Eğilme açısı deney verileri ile analiz verileri karşılaştırma grafiği.	102



PNÖMATİK YAPAY KAS TABANLI VE ÇALIŞMA ALANI DEĞİŞTİRİLEBİLEN ESNEK ROBOTİK KAVRAYICI GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Pnömatik yapay kaslar, hava basıncına maruz kaldığında kasılan ve biyolojik kasların doğal hareketlerine benzer şekilde tek yönlü çekme kuvveti uygulayan eyleyicilerdir. Her ne kadar pnömatik yapay kaslar, 1950'lerde McKibben yapay kasları adı altında keşfedilmiş olsa da günümüze kadar popülerlik kazanamamış, endüstriyel uygulamalarda geleneksel yöntemlerin yerini alamamıştır. Bugünlerde malzeme biliminin gelişiminden ivme kazanarak popüler hale gelen pnömatik yapay kaslar, bilimsel araştırmalarda tercih edilen bir alan olmuştur. Eğilen, burulan, kasılan gibi birçok çeşidi bulunan yapay kaslar, çalışma mantığı olarak aynı gözükseler de kendi içlerinde farklı kuvvet ve farklı kullanım alanları oluşturmaktadırlar.

Bu çalışmada eğilen pnömatik yapay kas temelli esnek robotik kavrayıcı ele alınmıştır. Eğilen tür yapay kaslar, içerilerinde bulunan odacıklara basınç uygulandığında şişerek genişlemesi, uygulanan basınç kaldırıldığında ise eski haline geri dönmesi ile elde edilen çift yönlü eğilme hareketi oluşturulmasına olanak tanır. Eğilen pnömatik kasların bu özelliğinden faydalanarak, çalışma alanı genişletilebilen, kırılğan ve deforme olabilen cisimlere zarar vermeden farklı şekil ve boyutlardaki nesneleri kavrayabilen esnek robotik kavrayıcı geliştirilmiştir. Yapay kasın üretileceği malzemeyi belirlemek için farklı malzemelerden çekme testi numunesi üretilmiştir. Numunelerin üretimi için 3D yazıcı kullanılarak kalıplar oluşturulmuş ve silikon dökümler yapılmıştır. Ardından standartlara uygun çekme testleri yapılarak bu testler doğrultusunda belirlenmiş silikon malzeme ile yapay kasların üretimi yapılmıştır. Geliştirme sürecinde bilgisayar destekli tasarım metotları ile 3 farklı eğilen pnömatik yapay kas tasarlanmış ve eğilme performanslarını incelemek amacıyla sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Tasarlanan kasları oluşturmak için 3D yazıcı kullanarak imal edilecek olan kalıplar kurgulanıp üretilmiştir. Üretilen yapay kaslar belirli testlere tabi tutularak farklı basınçlardaki kuvvet ve dönme açısı verileri elde edilmiştir. Deneysel çalışmadaki sonuçlar incelenerek kavrayıcıda kullanılacak olan nihai yapay kas belirlenmiştir. Nihai yapay kasın belirlenmesinin ardından silikon kasları kontrol edecek bir sistem tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu bağlamda robotik kavrayıcının; 4 adet eğilen pnömatik yapay kasa sahip olması, çalışma alanının yatay olarak 50x50 mm ile 200x200 mm arasında, dikey olarak ise 330 mm kadar değişebilmesi, kütlesi 600 g'a kadar olan farklı yapılarda ve geometrilerdeki cisimleri kavrayabilmesi hedeflenmiştir. Kavrayıcının kontrolü için görüntü işleme algoritması kullanılmıştır. Sistem bir kamera yardımıyla manipüle edeceği nesnenin boyutlarını algılayarak ön kavrama pozisyonunu ayarlayabilmiştir. Tutuş pozisyonu optimum konuma getirildiğinde parmaklara basınç verilerek kavrama işlemi başlamış ve nesne zeminden ayrılıp yukarı doğru kaldırılmıştır. Esnek robotik kavrayıcı ile yapılan deneyler sonucunda; kavrayıcının maksimum 0,8 bar'da 600 g kütle kaldıracabildiği, 600 g'dan fazla kütleler için step motorların yetersiz kaldığı, 12 mm'den ince nesnelerin kavranamadığı, nesne incelidikçe basıncın düşmesi ile kavrama veriminin arttığı ve yalnızca kare ve dikdörtgen kesitli nesnelerin manipüle edildiği gözlemlenmiştir.



DEVELOPMENT OF A PNEUMATIC ARTIFICIAL MUSCLE-BASED FLEXIBLE ROBOTIC GRIPPER WITH CHANGEABLE WORKSPACE

SUMMARY

Pneumatic artificial muscles are actuators that contract when subjected to air pressure and exert a unidirectional pulling force, similar to the natural movements of biological muscles. Although pneumatic artificial muscles were discovered in the 1950s under the name McKibben artificial muscles, they have not gained popularity until today and have not replaced traditional methods in industrial applications. Nowadays, pneumatic artificial muscles, which have become popular by gaining momentum from the development of material science, have become a preferred field in scientific research. Artificial muscles, which have many types such as bending, twisting and contracting, create different forces and different usage areas within themselves, even though they seem to be the same in terms of working logic. In this study, a flexible robotic gripper based on a bending pneumatic artificial muscle will be discussed. Bending type artificial muscles allow the creation of bidirectional bending motion, which is achieved by inflating and expanding when pressure is applied to the chambers inside them, and returning to its original state when the pressure is removed. By utilizing this feature of bending pneumatic muscles, a flexible robotic gripper will be developed that can expand the working area and grasp objects of different shapes and sizes without damaging fragile and deformable objects.

In this study, an automatic and manually controlled flexible robotic gripper based on a bending pneumatic artificial muscle, with 4 fingers, with a gripping range that can be changed in x, y and z axis, with a width and length between 50 mm and 200 mm, with a height between 12 mm and 330 mm, capable of grasping rectangular and square prism objects with a mass of 600 g or less, capable of positioning to the pre-grip position according to different objects with image processing, was designed and manufactured.

Material selection was made for the fingers to be used in the flexible robotic gripper. Five types of RTV-2 molding silicones, 20 Shore VRM-520, 20 Shore VRM-620, 20 Shore Aksil-G20, 40 Shore VRM-540, 40 Shore Aksil-G40, were selected due to their availability in the market, low cost and biocompatibility. The selected materials were supplied and casting processes were carried out in the molds produced in order to be subjected to tensile tests. The resulting silicone plates were inserted into the cutting mold to produce a tensile test specimen similar to a dog bone. Tensile tests were performed on 4 specimens produced from each material group. Tensile strength and elongation data obtained from 4 specimens of each material group were averaged for each material group. When the results were compared, 20 Shore VRM-520 material, which is the most ideal material in terms of both flexibility and durability, was selected for finger production. For the selected material, 4 different force-extension graphs obtained by tensile test were converted into numerical data with PilotDigitizer program. The numerical data of 4 samples were averaged and converted into a single

table. The stress-strain graph of 20 Shore VRM-520 material was created using the table created. This graph can be used in computer-aided simulations in future studies.

After determining the material, the production of the fingers was started. Since there are many parameters in finger design, wall thicknesses were determined as variables. It was decided to produce 3 different types of fingers with 2 mm, 3 mm and 4 mm wall thickness. The dimensions other than the total height of the fingers remain constant. For this reason, as the wall thickness increased, the material consumption increased and the internal chamber volume decreased.

In addition, the production was carried out in 4 stages, in parts, so that the fingers could be easily demolded. The design of the finger consists of 1 upper body, 1 inextensible base and 1 connector connection. In order to produce all these parts, plastic molds were designed and produced using a 3D printer. The molds consist of 4 parts: inner chamber mold, outer surface mold, bottom base mold and connector mold, one for each wall thickness. After the silicone raw material and catalyst are mixed and vacuumed, they are ready for use. Liquid silicone was first poured into the outer surface molds. Inner chamber molds were placed on the outer surface molds and liquid silicone was added to the empty parts. The upper body parts were left to cure in this way. Then the glass fiber strip was placed in the bottom base molds and liquid silicone was poured into the molds. The lower base parts were left to cure in this way. After curing, the upper body and lower base parts were removed from the molds and glued together with liquid silicone and left to cure. When the bonding process was completed, epoxy adhesive was applied to the air inlet of the finger, a pneumatic tube was attached, liquid silicone was poured on it using a connector mold and left to cure. When curing was completed, the fingers were ready for use.

Computer-aided finite element analyses were conducted to examine the bending performance of three types of fingers with completed designs. Analyses were conducted using a monolithic silicone body and a 0.15 mm thick glass fiber geometry that fully contacted the lower surface of the body. The stress-strain values of the silicone material, previously determined through tensile tests, were defined in the simulation. To ensure inextensibility, the mechanical properties of the glass fiber were defined in the simulation. Because the silicone material is flexible, the analysis was performed using the Yeoh model, a hyperelastic material model requiring only uniaxial tensile testing. A nonlinear mesh was assigned to the geometries. Mesh elements were designated as hexahedrons. Tetrahedron and pyramid elements were allowed in the transition regions if necessary. After the necessary boundary conditions for the silicone body and glass fiber to move together were met, the fingers were fixed at the air inlet surface. Gravitational acceleration was defined perpendicular to the inlet surface and directed toward the fingertip. The internal chambers of the finger were pressurized starting from 0 bar pressure and increasing in 0.1 bar increments until the finger reached its maximum bending angle. All analyses were conducted for fingers with 2 mm, 3 mm, and 4 mm wall thicknesses. As a result of the analyses, the finger with a 2 mm wall thickness reached a maximum bending angle of 295° at a pressure of 0.5 bar. The finger with a 3 mm wall thickness reached a bending angle of 295° at a pressure of 0.8 bar. The finger with a 4 mm wall thickness reached a bending angle of 295° at a pressure of 1.3 mm. It was observed that the bending angle decreased as the wall thickness increased.

In order to select the finger with the most efficient wall thickness, an experimental setup was built and the compressive strengths, holding forces and bending

performances of the fingers were investigated. The experimental setup is controlled by a control interface through a computer. Pressure was applied to the finger types with gradual increments of 0.1 bar. It was observed that the finger with 2 mm wall thickness exploded at 1.1 bar pressure, the finger with 3 mm wall thickness exploded at 1.3 bar pressure, and the finger with 4 mm wall thickness exploded at 1.4 bar pressure. It was determined that the compressive strength increased with increasing wall thickness. In terms of compressive strength, the finger with 4 mm wall thickness was the best performing finger, while the finger with 2 mm wall thickness was the least performing finger. The bending performances of the fingers were monitored by pressurizing the fingers with gradual increases of 0.1 bar from the burst pressure of the fingers to 0.1 bar lower pressure. The bending angle was determined as the angle of the finger end surface with the ground and measurements were made. The finger with 2 mm wall thickness reached the maximum rotation angle at 0.5 bar by reaching the position where it could not rotate further. The finger with 3 mm wall thickness reached an angle of 295° at 0.8 bar. The finger with 4 mm wall thickness reached 295° angle at 1.3 bar. When the data were evaluated, it was determined that the bending angle decreased with increasing wall thickness. In terms of bending angle, the finger with 2 mm wall thickness was the most performing finger, while the finger with 4 mm wall thickness was the least performing finger. In the fingertip force experiments, the fingers were pressurized up to 0.1 bar lower than the burst pressure of the fingers with gradual increases of 0.1 bar. When the values measured with the force meter were analyzed, it was observed that the finger with 2 mm wall thickness produced a force of 4.08 N at 1 bar, the finger with 3 mm wall thickness produced a force of 3.31 N at 1.2 bar, and the finger with 4 mm wall thickness produced a force of 1.27 N at 1.3 bar. According to the collected data, it was observed that the fingertip force decreased as the wall thickness increased. In terms of fingertip force, the best performing finger was the finger with 2 mm wall thickness, while the least performing finger was the finger with 4 mm wall thickness. Considering all the experimental data obtained, it was decided to use the 3 mm wall thickness finger, which showed a balanced performance.

A gripper was developed to control the fingers. The gripper mechanism is based on moving the fingers positioned on ball screws with stepper motors. Horizontal movement is provided by 1 stepper motor. 2 fingers connected on 2 motors move opposite and equal to each other and change the gripping range. One motor allows the fingers to move vertically. Thanks to the camera integrated into the gripper, the external dimensions of the object are detected and the fingers are brought to the pre-grip position according to the object. After the pre-grip position, the object is grasped and the contact with the ground is interrupted. An experimental setup was developed to measure the grasping ability. The manipulability of objects of different sizes was examined. As a result of the studies, it was observed that objects in the shape of a rectangular or square prism with a width and length ranging from 50 mm to 200 mm and a height ranging from 12 mm to 330 mm could be grasped. It was understood that as the height of the object decreases, the pressure value used should also decrease. However, the decrease in pressure also reduces the gripping force. In order to determine the load capacity of the gripper, the maximum mass that it can lift at 0.2 bar, 0.4 bar, 0.6 bar and 0.8 bar pressure was determined. The mass values that the gripper can lift efficiently were determined as 50 g at 0.2 bar, 200 g at 0.4 bar, 400 g at 0.6 bar and 600 g at 0.8 bar. Pressure values of 1 bar and 1.2 bar were not tested because the stepper motor providing vertical movement was insufficient after 600 g load.



1. GİRİŞ

Pnömatik yapay kas (PYK), hava basıncına maruz kaldığında kasılan ve biyolojik kasların doğal hareketine benzer şekilde tek yönlü çekme kuvveti uygulayan bir eyleyicidir. Eğilen pnömatik yapay kas ise (EPYK), odacıklara pozitif basınç uygulandığında genişlemesi ve negatif basınç uygulandığında kendi içine çökmesi/büzülmesi ile iki yönlü bir eğilme hareketinin elde edilmesini sağlayan bir yapıdır. Tez kapsamında çalışma alanı genişletilebilen, kırılğan ve deforme olabilen cisimlere zarar vermeden farklı şekil ve boyutlardaki tüm nesneleri kavrayabilen esnek bir robotik kavrayıcı geliştirilecektir. Geliştirme sürecinde bilgisayar destekli tasarım metotları ile parmaklar tasarlanacak ve analizleri yapılacak, parmakların üretiminde kullanılacak ve 3D yazıcı kullanılarak kalıplar tasarlanıp üretilecek, ardından çekme testleri yapılmış elastik malzemeler ile parmakların üretimleri yapılacaktır. Deneysel çalışmaların ve sonlu elemanlar analizlerinin sonuçları incelenerek optimum yapay kas tasarımı belirlenecektir. Nihai üretim sonunda parmakları kontrol edecek bir sistem tasarlanacaktır. Böylece robotik kavrayıcı farklı boyut ve şekillerdeki kırılğan veya rijit malzemeleri kavrayabilecektir.

1.1. Tezin Kapsamı

Endüstriyel robotlarda kullanılan güncel robotik kavrayıcılar sert yapıda olmaları, dokunsal kuvvet geri bildirimi ve karmaşık kontrol algoritmaları gerektirmeleri ve sadece belirli şekil ve boyuttaki nesneler için tasarlanmaları nedenleriyle, farklı şekil ve boyutlardaki kırılğan ve deforme olabilen nesnelerin tutulması için uygun değildir. Bu sebeple tezin konusu pnömatik yapay kas tabanlı esnek bir robotik kavrayıcı geliştirilmesi olarak belirlenmiştir. Bu sayede robotik kavrayıcı, farklı boyut ve geometrilerdeki, simetrik ya da asimetrik, kırılğan ya da deforme olabilen çok çeşitli nesneleri güvenli bir şekilde kavrayabilecek ve manipülasyonunu gerektiren her türlü otomasyon uygulamasında kullanılabilecektir.

1.2. Tezin Amacı

Çalışmanın amacı eğilen pnömatik yapay kas tabanlı, çalışma alanı genişletilebilen esnek bir robotik kavrayıcının tasarım ve üretiminin gerçekleştirilmesidir. Bu bağlamda robotik kavrayıcının; kütlesi 600 g'a kadar olan, farklı yapılara sahip objelerin manipülasyonuna uygun olması, eğilen pnömatik yapay kas tabanlı dört parmağa sahip olması, çalışma alanının yatay olarak 50x50 mm ile 200x200 mm aralığında, dikey olarak ise 330 mm kadar değiştirilebilmesi hedeflenmektedir. Görüntü işleme özelliği sayesinde kaldıracağı cismin boyutlarını algılayıp cisme özel ön kavrama pozisyonuna konumlanması amaçlandığından farklı şekil ve boyuttaki nesneler kavranabilecektir.

1.2.1. Tezin ikincil amacı

Pnömatik yapay kas tabanlı kavrayıcıların endüstriyel alanda yer edinebilme kapasitesi, geleneksel rijit kavrayıcılara kıyasla oldukça azdır. Önerilen çalışma sonucunda elde edilen kavrayıcı ile hassas, kırılğan ve farklı geometrideki cisimlerin manipüle edilmesi hedeflenmektedir. Bunun yanında tasarlanan kavrayıcının masa üstüne konumlanabilmesi ve portatif olması bakımından insanlarla iş birliği içerisinde çalışabilmesi öngörülmektedir. Dolayısıyla bu kavrayıcının endüstriyel alanda kendisine yer edinebilmesi olağan bir durum olarak gözlemlenmektedir.

1.3. Literatür Araştırması

Çağımızın en önemli teknolojik alanlarından biri haline gelen robotik, mekanik sistemlerin tasarımı, üretimi, kontrolü ve kullanımını kapsayan disiplinler arası bir bilim dalıdır. Makine mühendisliği, elektrik elektronik mühendisliği, bilgisayar mühendisliği, yazılım mühendisliği gibi birçok disiplinin bir arada çalışmasına olanak sağlayan robotik bilimi; endüstriyel üretimlerden tıbbi kullanımlara kadar büyük bir çerçevede uygulama alanına sahiptir. Özellikle yapay zekâ ve makine öğrenmesi ile birleştirildiğinde, robotların yetenekleri günden güne daha da kompleks ve etkileyici hale gelmektedir. Sürekli gelişen bu sistemleri oluşturan yapılar arasında mekanik sistemler, elektronik sistemler, kontrol sistemleri vb. sistemler bulunmaktadır.

Robotlar; algılama, karar verme ve hareket etme olmak üzere genellikle üç temel özelliğe sahiptirler. Üzerine konumlandırılmış sensörler sayesinde çevresini algılar ve karar vererek önceden tanımlanmış görevini motorlar ve aktüatörler sayesinde yerine

getirirler. Son yıllarda robotik alanında kaydedilen ilerlemeler bu teknolojinin daha da ileriye gitmesine olanak sağlamıştır. Endüstri 4.0 hareketiyle birleştirilen bu teknolojinin kullanımı, akıllı fabrika konseptindeki üretim sahalarında sıkça karşılaştığımız bir durum haline gelmiştir. Örneğin metal enjeksiyon makinesi ile alüminyum döküm yapan bir firma, endüstri 4.0 devrimi ile geliştirdiği robot kol sayesinde, dökümü yapılan sıcak ürünü kalıptan çıkartıp soğuk suya daldırdıktan sonra hava ile kurulama ünitesine sokmaktadır. Ardından üniteden çıkan ürünü çapak almak için kullanılan hidrolik pres kalıbına yerleştirmektedir. Çapakları temizlenen temiz ürünü sevkiyat kasasına dizmektedir. Böylece metal enjeksiyon makinesinin başında bu işleri yapacak bir personel bulunmasına gerek kalmamaktadır. Robotik yalnızca endüstriyel üretim yapan fabrikalarda değil birçok alanda da görülebilen bir teknolojidir. Örneğin Matheson ve ark. (2019), Roza ve ark. (2016) ve Wang ve ark. (2019) işçilerle birlikte çalışan kolaboratif robotlar alanında, Desai ve ark. (2019), Howe ve Matsuoka (1999) ve Peters ve ark. (2018) cerrahi amaçlı kullanılan hassas robotlar alanında, Chang ve Kim (2013), Gassert ve Dietz (2018) ve Liu ve ark. (2020) rehabilitasyon ve fizik tedavi robotları alanında, Hu ve Assaad (2023), Lim ve ark. (2021) ve Sumetheeprasit ve ark. (2024) insansız hava araçları alanında, Cymerman ve ark. (2019), Figliozi (2020) ve Pretto ve ark. (2021) otonom kara araçları alanında, Flores-Abad ve ark. (2014), Shi ve ark. (2017) ve Yim ve ark. (2003) ise uzay robotları alanında çalışmalar yapmıştır. Hatta artık neredeyse her evde bulunan robot süpürgeler bile robotiğin gelmiş olduğu noktayı anlamamıza olanak sağlamaktadır.

Robotiğin alt dallarından biri olan yumuşak robotik, son yıllarda teknolojinin gelişmesiyle birlikte bilimsel araştırmacılar arasında oldukça popüler bir araştırma konusu olmuştur. Yumuşak robotik, geleneksel sert ve rijit yapılara nazaran daha esnek ve temas edeceği cismin karakteristik özelliklerine uygun davranabilen bir yapıda gelişim göstermektedir. Kendi içindeki gelişimini, biyomimetik yaklaşımların ışığında, canlı organizmaların doğal hareketlerini ve davranışlarını taklit ederek sağlamayı amaçlamaktadır. Bunu yaparken sert ve rijit malzemeler yerine, silikon, kauçuk, hidrojel gibi esnek ve deformasyona izin veren malzemeler kullanılmaktadır. Geleneksel sert robotik sistemler hız, hassasiyet, güç, rijitlik konularında avantajlar sağlasalar da karmaşık ve hassas manipülasyon gerektiren uygulamalarda sınırlı kalmakta, her cisim için farklı kavrama metodu gerektirmektedirler. Bu durum yumuşak robotik sistemlerin öne çıkmasını sağlamış ve birçok araştırmacının farklı

dallarda bu konuya yönelmesine sebep olmuştur. Örneğin Caldwell ve Tsagarakis (2002), Ferris ve ark. (2005), Leclair ve ark. (2020) ve Xu ve ark. (2022) biyomedikal alanında, Kaptı (2023), Kaptı ve Atakul (2023), Robinson ve ark. (2014), Stoll ve ark. (2020) ve Van Damme ve ark. (2005) endüstriyel otomasyon alanında, Armanini ve ark. (2024) ve Tennakoon ve ark. (2022) gıda endüstrisi alanında çalışmalar yapmıştır. Yumuşak robotik, verilen örneklerin yanı sıra lojistik ve dağıtım noktaları, paketleme ve ambalajlama uygulamaları vb. gibi birçok uygulama alanına sahiptir.

Yumuşak robotiğin en önemli bileşenlerinden biri olan ve ilk olarak 1950'lerin sonunda McKibben adıyla ortaya çıkan pnömatik yapay kaslar (PYK); kısalan, burulan ve eğilen gibi farklı çalışma sistemlerine sahip olabilen, pnömatik hava basıncı ile tahrik edilerek kasılıp kısalan ve tek yönlü çekme kuvveti oluşturan yapılardır. Şekil 1.1'de gösterildiği gibi McKibben yapay kasları, iki uç noktasına monte edilmiş bağlantı noktasından ve çapraz şekilde sarılmış fiber takviyeli ağ ile desteklenen esnek bir borudan oluşur. Uç bağlantı noktalarından birisi hava giriş ve çıkış portu olarak görev yapmakta, diğer bağlantı noktası ise manipüle edilmek istenen nesneye bağlanmaktadır. Uç bağlantıları ve fiber takviyeli esnek boru sayesinde iç hazne basıncının atmosfer ile teması tamamen kesilmektedir. İç yüzeye etki eden hava basıncı yapay kasın eksenel boyunu kısaltarak eksenel bir çekme kuvveti oluşturur ve silindirik yapıyı deforme ederek şişirir. Basınç boşaltıldığında ise silindirik yapı uzayarak eski haline gelir ve bir boru gibi görünür.



Şekil 1.1. McKibben tipi pnömatik yapay kas (Chou ve Hannaford, 1994).

Zamanla geliştirilen pnömatik yapay kaslar; eğilen, burulan, kısalan, uzayan vb. birçok farklı geometride ortaya çıkmıştır. Günümüzde pnömatik yapay kas alandaki en dikkat çekici uygulamalardan birisi silikondan imal edilmiş pnömatik hava tahrikli parmak kavrayıcılarıdır. Bu kavrayıcılar esneklikleri ve uyum kabiliyetleriyle karmaşık nesneleri manipüle etme yeteneği sunarlar. Ayrıca insan parmaklarına benzer şekilde hareket ettiklerinden dolayı giyilebilir orteز olarak kullanılabilirler. Bu tür kaslar art arda sıralanmış odacıklardan oluşan bir üst gövde ve bu odacıkların atmosfere kapalı hale gelmesini sağlayan bir alt gövdeden oluşmaktadır. Alt gövde, cam elyaf kumaş ile desteklenerek insan parmağında olduğu gibi uzamaz hala

getirilmektedir. Odacıkların içerisine basınç uygulandığında odacıklar şişmekte, odacıkların dış duvarları ise birbirlerine değerek birbirlerini itmektedir. Böylece silikon parmak kıvrılarak kavrama hareketini yapmaktadır. Basınç boşaltıldığında ise pnömatik silikon parmak eski haline dönmektedir.

Silikon parmak konusunda farklı çalışmalar yapılmıştır. Cui ve ark. (2021) yapmış oldukları çalışmada rijit kavrayıcıların narin nesnelere zarar verdiğini ve yüksek maliyete sahip olduğunu düşünerek silikon parmaklı tutucu geliştirmişlerdir. Parmakların üretimi için önce Ecoflex 0030 malzemesinden kalıp üretilip, bu kalıbın içerisinde Dragon Skin 30 malzeme dökerek üretim yapmışlardır. Parmak tasarımında azalan genişlik (fast-pneu-net) yapısı tercih edilmiştir. Parmak ucuna doğru gittikçe eğrilik oranını azaltmak adına hem odacık genişliği hem de odacık yüksekliği azalan şekilde tasarlanmıştır. Fakat bu durum parmak ucunda kavrama kuvvetini azaltmıştır. Wang ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada vakum etkisine gerek kalmadan parmakları dışa doğru bükülebildiği bir yapı tasarlamışlardır. Bu yapı aynı zamanda parmakların kavrama alanını da genişletmektedir. TangoPlus malzeme kullanılarak 3D yazıcı ile üretilen parmak, alt ve üst gövde olarak iki parçadan oluşmaktadır. Basıncsız durumda parmakların dış bükey kalmasını sağlamak için alt gövde üst gövdeye ThreeBond 1521B yapıştırıcısı ile yapıştırılırken gerilmesi sağlanmıştır. Böylece yapışmadan sonra alt yüzey eski haline gelmek isteyerek parmakları dışa doğru bükülmüştür. Esnetme miktarının etkisini araştırmak için 0, 6, 10 ve 14 mm'lik esnetmelerle üretim yapılmıştır. En optimum sonuç 10 mm esnemede görülmüştür. Ön gerilmeyi yenmek için 30 kPa basınç uygulanması gerektiği tespit edilmiştir. Zhong ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada 10 odacığa sahip 88x20x15 mm boyutlarında silikon parmak geliştirmiştir. Parmak üç parçadan oluşmaktadır. Üst gövde Dragon Skin 30 malzemesinden oluşmakta, alt yüzey Dragon Skin 30 kaplanmış elyaf kâğıttan oluşmakta, konnektör ise reçine malzeme kullanılarak 3D yazıcıda üretilmiştir. Kavrama sırasındaki tutuculuğu artırmak için alt yüzeye sekiz adet birbirine paralel konumlanmış dış bükey yüzeyler eklenmiştir. Reçine malzeme kullanılarak 3D yazıcıda üretilen parmak kalıplarına sıvı haldeki Dragon-Skin 30 malzemesi dökülmüştür. Oluşan hava kabarcıkları manuel olarak temizlenmiştir. Alt yüzeye silikon dökümü yapılmadan önce kalıp tabanına elyaf kâğıt serilmiştir. Dökümü yapılan kalıplar 2 saat boyunca 60 °C sıcaklıktaki vakumlu fırında kürlenmeye bırakılmıştır. Silikon parçalar, kürlenme sonrası oda sıcaklığında birkaç saat

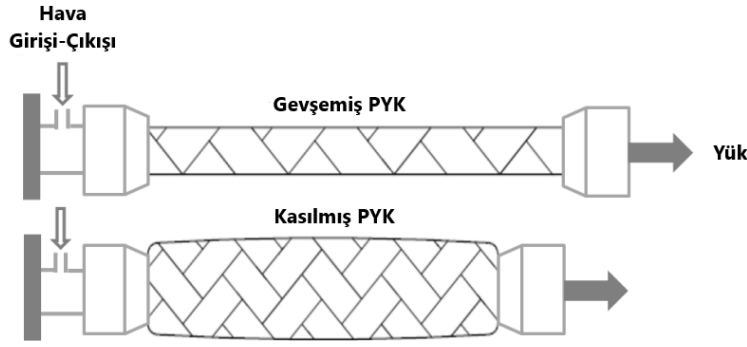
dinlendikten sonra kalıplardan çıkartılmıştır. Alt yüzey ile üst gövde Sil-Poxy yapıştırıcısı ile birbirlerine yapıştırılmıştır. Ardından konnektör parçası yapıştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda üretilen parmakların düşük basınçta yüksek eğilme deformasyonuna sahip olduğu görülmüştür. 50 kPa basınçta parmak ucu kuvveti 0,65 N'dir.

Silikon parmaklar tek başlarına efektif olarak kullanılamayacağı için bu parmakları manipüle edecek bir kavrayıcıya ihtiyaç duyulmaktadır. Kavrayıcılar konusunda birtakım çalışmalar yapılmıştır. Yu ve ark. (2022) yaptıkları çalışmada üç adet esnek pnömatik parmağı tamamen hareketsiz bir fikstüre sabitlemiştir. Kavrayıcı gövdesi rijit bir yapı olduğundan parmakların konumları değişmemektedir. Kavrama aralığı sabit olan bu yapı yalnızca belirli aralıkta dış boyutlara sahip nesneleri manipüle edebilmektedir. Lei ve ark. (2022) yaptıkları çalışmada iki farklı kavrayıcı gövdesi tasarlamışlardır. Bir kavrayıcı gövdesi dört adet pnömatik parmak ile çalışırken diğer tasarım üç adet parmakla çalışmaktadır. İki tasarım da temelde parmakları sabit bir noktada tutmaktadır. Fakat kavrayıcı gövdesinin üzerindeki montaj delikleri sayesinde parmaklar istenilen noktalara manuel olarak konumlandırılabilir. Cui ve ark. (2021) yaptıkları çalışmada maksimum 100x60x170 mm kavrama ebatına sahip, ayarlanabilir ön kavrama duruşlu pnömatik tutucu tasarlamışlardır. Kavrayıcı, her bir kavrama noktası 3 farklı modüle sahip olan toplam 4 adet kavrama noktasından oluşmaktadır. Üç modülden birisi parmaklar arası lineer mesafeyi ayarlamaya olanak sağlamaktadır. İkinci modül ise parmaklar arası açı ayarı yapılmasını sağlamaktadır. Son modül ise kavrama işlemini yapan parmak aktüatörüdür. Üretilen kavrayıcı maksimum 2,1 g kaldırabilmektedir. Ayrıca 4 parmak için ayrı ayrı ön kavrama pozisyonu ayarı yapılabilir. Yatay mesafe 0 mm ile 64,4 mm arasında, parmak ile zemin arasındaki açı 0° ile 140° arasında, kavranacak nesne çapı 0,5 mm ile 180 mm arasında, kavranacak nesne uzunluğu 10 mm ile 325 mm arasında değişmektedir. Wang ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada, gıda endüstrisinde kullanılmak üzere iki farklı kavrama modu bulunan bir kavrayıcı geliştirmiştir. Kavrayıcı gövdesi ile parmakların konnektörleri arasında vidasız sökölüp takılmaya olanak sağlayan bir sistem kullanılmıştır. Pnömatik parmakların kavrama öncesi konumlarını kolayca değiştirebilmek amacıyla parmakların manuel olarak sökölerek kare, dikdörtgen, silindir, küre gibi farklı şekillerdeki nesnelerin tümünün kavranması sağlanmıştır. Silindir şeklindeki nesneler için ikinci yuva kullanılırken, kare ve küre tarzındaki

şekiller için birinci yuva kullanılmıştır. Zhong ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada kavrama aralığını farklı boyut ve geometrideki nesneler için değiştirebilen değişken kavrama modlu yumuşak pnömatik kavrayıcı geliştirmişlerdir. Dört adet yumuşak parmağın bağlı olduğu kavrayıcının parçaları 3D yazıcı kullanılarak üretilmiş olan bir adet cenevre mekanizmasından, bir adet dişli mekanizmasından ve bir adet adsorpsiyon mekanizmasından oluşmaktadır. Ayrıca kavrayıcının merkez noktasına bağlı ve negatif basınç ile vakum sağlayan bir emici, pnömatik silindir ile 40 mm hareket ederek kavramanın etkisini artırmaktadır. Tasarlanan sistem sayesinde kavrayıcı dikey mod, paralel mod, iki parmak mod ve emici mod olmak üzere dört farklı moda girebilmektedir. Kavrayıcı dikey moddayken ve basınçsız durumdayken iki parmak arası mesafe 62 mm'dir. Kavranabilen en küçük nesnenin çapı ise 20 mm'dir. Paralel modda basınçsız durumda ise iki parmak arası mesafe 40,2 mm'dir. Bu pozisyonda kavranacak nesne büyük en boy oranına sahip olmalıdır. İki parmak modunda küçük nesneler kavranmaktadır. Emici modda ise küçük ve hafif nesneler taşınabilmektedir. Sandoval ve ark. (2022) ise tasarladıkları esnek parmakları rijit bir düzeneğe sabitledikten sonra, bu düzeneği doğrudan hazır bir robot kol mekanizmasına entegre etmişlerdir. Bu sayede parmaklar, robot kolun sahip olduğu serbestlik derecesi kadar hareket kabiliyetine sahip olmuştur. Her ne kadar kolay kuruluma sahip bir sistem olsa da maliyet açısından diğer çalışmalardan oldukça fazla gidere sahiptir.

1.4. Hipotez

Pnömatik yapay kaslar, kompresör yardımıyla basınçlandırılan hava ile kontrol edilen eyleyicilerdir. Bu kaslara uygulanan basınçlı hava ile kasılıp gevşeme tepkileri elde edilir. Kasılmış ve gevşemiş durum Şekil 1.2'de gösterilmiştir. Kasılıp gevşeme durumu yaylara benzetilebilir. Yayların sıkışarak mekanik enerji depolamasına benzer olarak basınçlandırılan yapay kasın yumuşak yüzeyleri gerilir ve enerji depolar. Basınç ortadan kaldırıldığında esnek malzeme ilk haline dönmek için harekete geçer.



Şekil 1.2. Pnömatik yapay kasların çalışma prensibi (Hall, 2011).

Pnömatik yapay kasları belirli bir amaca dayandırmak için bir kavrayıcı düzeneğine ihtiyaç vardır. Pnömatik parmaklar bu düzeneğe bağlanarak istenilen şekilde kontrol edilebilir. Parmaklar tek başına belirli bir konuma hareket edemeyeceğinden, kavrayıcı düzeneği parmakları belirlenmiş konuma götürerek kavrama işleminin gerçekleşmesini sağlar. Parmakları yönlendirme işlemi bir kamera yardımıyla yapılmaktadır. Parmakların birleştiği noktaya koyulan nesnenin dış boyutları kamera tarafından belirlenir. Belirlenen boyutlara göre parmaklar bulundukları konumdan yatay olarak nesneye doğru harekete geçer. Nesnenin yüzeyine ulaştığında parmaklar durur ve zemine doğru hareket eder. Zemine ulaşan parmaklar artık kavrama yapmaya hazır pozisyona ulaştığından basınçlandırma işlemi başlar. Parmaklara basınç verilmesi ile parmaklar eğilir ve nesneyi kavrar. Nesnenin kavranmasından sonra parmaklar tekrar yukarı doğru harekete geçer. Böylece nesne bulunduğu konumdan alınmış olur.

1.4.1. Hipotezin öngörülleri

- Eğilen pnömatik yapay kasların farklı tasarımlarda değişen özellikleri ve bu değişimin sebepleri incelenerek en verimli pnömatik yapay parmak tasarlanabilir.
- Eğilen pnömatik yapay kasların farklı tasarımlarda sonlu elemanlar analizleri yapılarak en verimli kas tasarımına ulaşılabilir.
- Pnömatik yapay parmaklar, tasarlanan deney seti ile test edilebilir ve kıyaslanabilir.
- Kavrayıcı mekanizması, pnömatik yapay kasların konumunu istenilen konuma yönlendirebilir.
- Kavrayıcı mekanizması, görüntü işleme temelli kontrol algoritması ile farklı nesneleri kamera aracılığıyla algılayarak parmakların ön kavrama pozisyonuna gelmesini sağlar.

- Görüntü işlemeli kontrol algoritmasının hassaslığı ve geri besleme yeteneği sayesinde sistem içerisinde istenmeyen durumların önüne geçilmesi sağlanır.
- Kavrayıcı mekanizması hassas ürünler için iyi bir işbirlikçi mekanizma olabilir ve endüstriyel anlamda üretim hatlarında kullanılabilir.
- Kavrayıcı mekanizmasının farklı ağırlıkta, farklı şekilde ve farklı boyuttaki nesneleri kavrama ve kaldırma testleri yapılabilir.

Bu hipotez, kavrayıcı mekanizmasında kullanılacak pnömatik yapay kasların optimum tasarımı deneysel yollarla belirlendikten sonra görüntü işleme temelli kontrol mekanizması ile kontrol edilecek bir manipülatör tasarlanmasını öne sürmektedir. Kavrayıcı mekanizmasının farklı ağırlık, şekil ve boyuttaki nesneleri manipüle etme yeteneğine sahip olması beklenmektedir. Bunun için kamera yardımıyla nesnenin görüntüsü işlenerek boyutları belirlenecek, belirlenen boyutlara göre pnömatik parmaklar otomatik olarak ön kavrama pozisyonuna getirilecektir. Ön kavrama pozisyonuna ulaşan parmaklara basınç verilerek nesne kavranacak, ardından yukarı yönlü kaldırılacaktır. Manipülatörün kavrama aralığı yatay olarak en az 50 mm, en çok 200 mm olacak şekilde belirlenmiştir. Dikey olarak 330 mm hareket mesafesine sahiptir. Kaldırdığı nesnelerin kütleleri ise maksimum 600 g ile sınırlandırılmıştır.



2. YÖNTEM VE BULGULAR

2.1. Pnömatik Yapay Kaslar

Pnömatik yapay kaslar (PYK), basınçlı hava kullanarak kasılma ve genişleme hareketi gerçekleştiren yumuşak aktüatörlerdir. Geleneksel motorlu aktüatörlere kıyasla daha hafif, esnek ve enerji tüketimi bakımından verimli olmaları nedeniyle biyomekanik, robotik, rehabilitasyon cihazları ve endüstriyel otomasyon gibi pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. PYK'ler, tasarım farklılıklarına ve işleyiş prensiplerine göre çeşitli kategorilere ayrılmaktadır. Bu sınıflandırmalar, aktüatörlerin performansını, kullanım alanlarını ve avantajlarını belirleyen temel unsurlar arasında yer almaktadır.

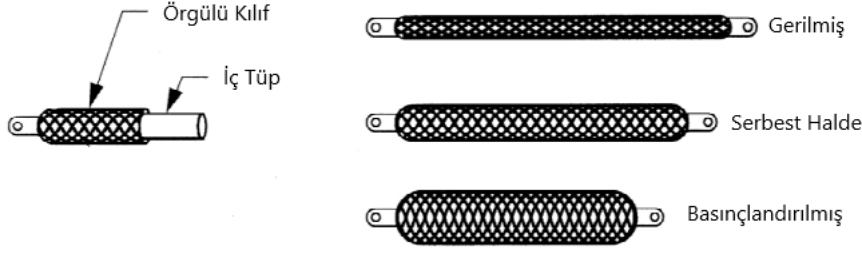
2.1.1. PYK çeşitleri

Daerden ve Lefeber (2002), yaptıkları çalışmada pnömatik yapay kasları temel olarak örgülü, pileli, ağırlı ve gömülü olmak üzere aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır:

2.1.1.1. Örgülü PYK (Brained PAM)

Şekil 2.1'de gösterilen Örgülü PYK'ler, elastik bir iç tüpün etrafına sarılmış örgü liflerinden oluşmaktadır. Örgü lifleri, kasın boylamsal eksenini boyunca helezonik bir yapıya sahiptir ve belirli bir örgü açısı ile yerleştirilmiştir. Basınç uygulandığında, elastik tüp genişleyerek örgü kılıfa doğru bir yanıl basınç uygular ve bu durum eksenel kısaltmaya yol açar. Örgü liflerinin gerilimi iç basıncı dengeleyerek kasın işlevselliğini sağlamaktadır.

Manşonlu membran kası (Sleeved bladder muscle) gibi farklı türleri olsa da bu kas grubunun en bilinen örneği McKibben kasıdır. 1950'lerde Joseph L. McKibben tarafından çocuk felci hastalarına yönelik ortotik bir cihaz geliştirmek amacıyla tasarlanmıştır. McKibben kasları, biyolojik kasların uzunluk-kuvvet eğrilerine benzer şekilde çalışmaktadır. Genel olarak bu kaslar, esneklik, yüksek güç-ağırlık oranı ve basit montaj imkânı sunmaları nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir. Bununla birlikte, örgülü PYK'ler düşük basınçlarda çalışmaya uygun değildir ve örgü lifleri ile elastik tüp arasındaki temasın sürekli olması gerekmektedir.

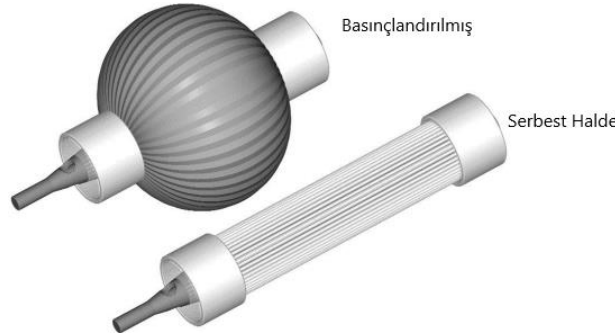


Şekil 2.1. Örgülü PYK (Daerden ve Lefeber, 2002).

2.1.1.2. Pileli PYK (Pleated PAM)

Şekil 2.2'de gösterilen Pileli PYK'ler, aksenal yönde düzenlenmiş çok sayıda pileye (katlama) sahip bir membran yapısından oluşmaktadır. Bu tasarım, kasın şişmesi sırasında pilelerin açılmasına olanak tanıyarak kasılma hareketini üretir. Bu tür kasların geliştirilmesinde Daerden ve Lefeber önemli çalışmalar yapmıştır. Pileli tasarım, malzeme gerilimini minimuma indirdiği gibi, sürtünme oluşumunu da engeller. Ayrıca, histerezis etkisinin gözlemlenmemesi ve düşük enerji ihtiyacı ile çalışma avantajı sunmaktadır.

Pileli PYK'lerin en önemli avantajlarından biri, büyük deformasyonlara dayanıklı olması ve düşük basınç seviyelerinde çalışabilmesidir. Ancak bu tür kasların mekanik yapısı örgülü PYK'lere göre daha karmaşıktır ve üretim süreçleri daha detaylı bir mühendislik gerektirmektedir.

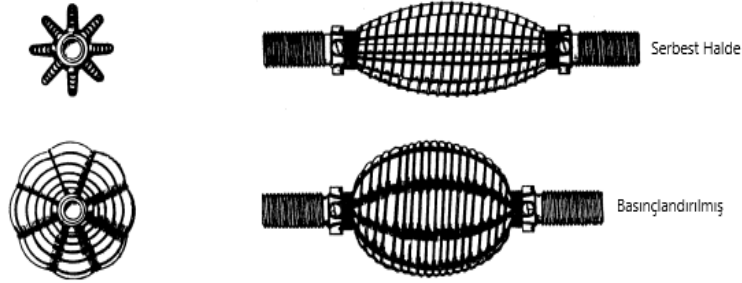


Şekil 2.2. Pileli PYK (Daerden ve Lefeber, 2002).

2.1.1.3. Ağlı PYK (Netted PAM)

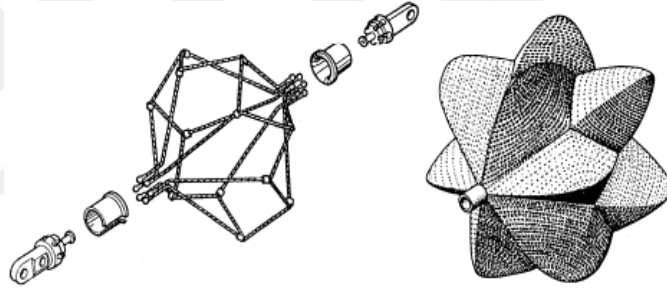
Ağlı PYK'ler, örgülü kaslara benzer bir yapıya sahiptir ancak örgü yoğunluğu daha seyrektir ve daha geniş delikli bir örgü yapısına sahiptir. Bu tasarım, kasın düşük basınç seviyelerinde çalışmasını sağlarken aynı zamanda esnekliğini artırır. Ancak, örgü yoğunluğunun düşük olması nedeniyle ağlı PYK'ler genellikle düşük dayanıklılığa sahiptir ve yüksek basınçlara karşı daha az direnç gösterebilir.

Bu tür kaslar arasında Yarlott, ROMAC ve Kukolj kasları önemli örneklerdir. Şekil 2.3'te gösterilen Yarlott kasları, elastomerik bir keseye sahip olup eksenel yönde ipliklerle güçlendirilmiştir. Şişme sırasında küresel bir şekil alırken, uzatıldığında girintili çıkıntılı bir yapı kazanır.



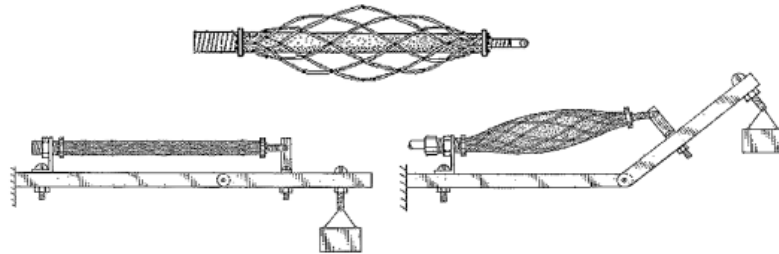
Şekil 2.3. Yarlott PYK (Yarlott, 1972).

Şekil 2.4'te gösterilen ROMAC kasları esnek ve hafif tasarımlar sunarak çeşitli robotik ve otomasyon uygulamalarında kullanılmaktadır.



Şekil 2.4. ROMAC PYK (Immega, 1986).

Şekil 2.5'te gösterilen Kukolj kasları da benzer şekilde esnek ve hafif tasarımlar sunarak çeşitli robotik ve otomasyon uygulamalarında kullanılmaktadır.



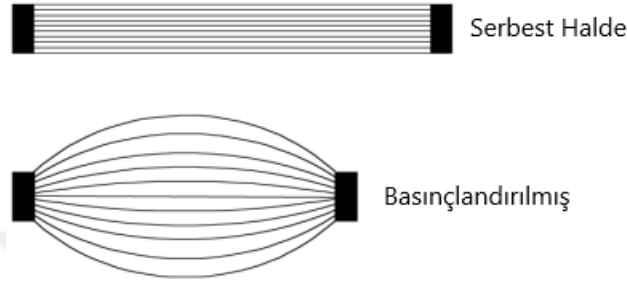
Şekil 2.5. Kukolj PYK (Kukolj, 1988).

2.1.1.4. Gömülü PYK (Embebbed PAM)

Gömülü PYK'ler, yük taşıyan yapının doğrudan membranın içine gömüldüğü bir tasarıma sahiptir. Bu yapı, sürtünmeyi minimize ederken düşük eşik basıncı ve düşük

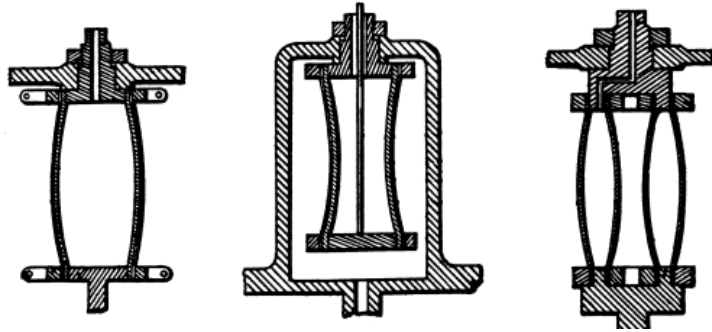
histerezis avantajı sunar. Ancak, yüksek radyal genişleme gösterdiğinden çalışma basıncı genellikle 10-100 kPa arasında sınırlandırılmalıdır.

Morin, UPAM, Paynter Örgü, Paynter Hiperboloid gibi çeşitleri olan bu kategoride en bilinen kaslardan biri Şekil 2.6’da gösterilen Baldwin kasıdır. Cam liflerin elastomerik bir membrana gömülü olduğu bu kas, yüksek mukavemetli bir yapı sunarak 1600 N’a kadar kuvvet üretebilmektedir.



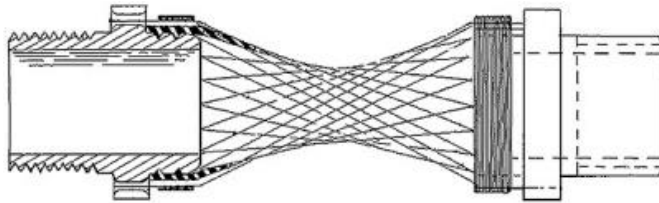
Şekil 2.6. Baldwin PYK (Daerden ve Lefeber, 2002).

Şekil 2.7’de gösterilen Morin kası, yüksek gerilimli ipliklerin elastomerik bir tüp içine gömülmesiyle oluşturulmuştur ve basınç altında şekil değiştirerek çalışmaktadır.



Şekil 2.7. Morin PYK (Morin, 1953).

Şekil 2.8’de gösterilen Paynter Hiperboloid kası, esnek liflerle güçlendirilmiş bir hiperboloid yapıya sahip olup özel mekanik uygulamalarda tercih edilmektedir.



Şekil 2.8. Paynter Hiperboloid PYK (Paynter, 1988).

2.1.1.5. Festo PYK (Festo PAM)

Festo firması tarafından 2002 yılında geliştirilen bu kaslar, esnek ve dayanıklı kauçuk malzemeden üretilmiştir ve yüksek mukavemetli liflerle desteklenmiştir. Şekil 2.9'da gösterilen Festo PYK'ler, biyolojik kaslara en yakın hareketi taklit eden sistemlerden biri olup, robotik ve endüstriyel otomasyon alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek basınç dayanımı, düşük enerji tüketimi ve uzun ömürlü performansı sayesinde, günümüzde en popüler PYK türlerinden biri haline gelmiştir.

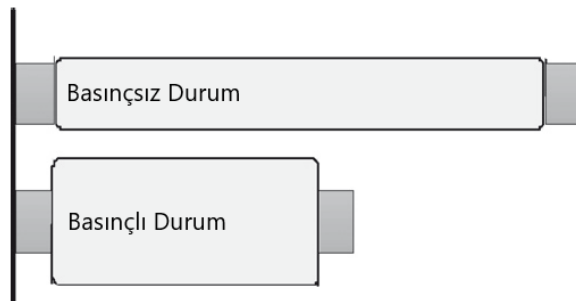


Şekil 2.9. Festo PYK (Festo, 2022).

Pnömatik yapay kaslar, şekilleri ve çalışma biçimleri sebebiyle aşağıdaki şekilde de sınıflandırılabilirler.

2.1.1.6. Kısalan PYK

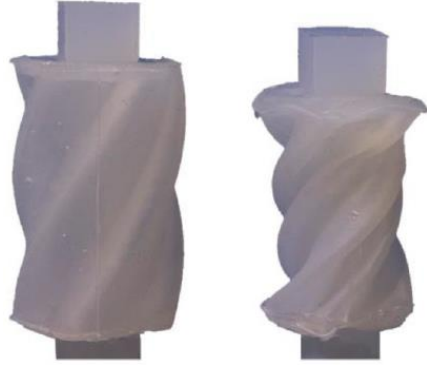
Esnek bir tüpün üzerine çapraz sarımlı fiber takviye kaplandığında yalnızca eksenel uzamaya olanak sağlayan pnömatik yapay kas tipi KPYK olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.10'da da görüldüğü gibi bu tür kaslar, tüpün içerisine basınç uygulandığında kasılma/kısalma, tüpün içerisindeki basınç boşaltıldığında ise gevşeme hareketi yapmaktadır.



Şekil 2.10. Kısalan PYK (Wickramatunge ve Leephakpreeda, 2010).

2.1.1.7. Burulan PYK

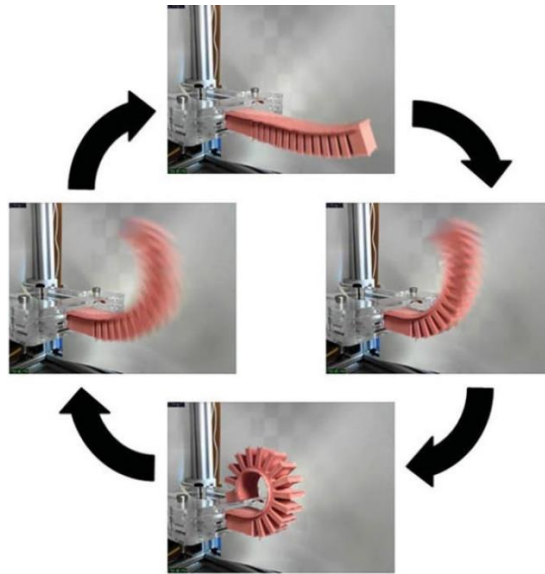
Şekil 2.11’de gösterilen eksen doğrultusu boyunca sarmal bir yapıda ilerleyen BPYK tipine basınç uygulandığında veya uygulanan basınç boşaltıldığında, yapay kasın uç noktası kendi eksenini etrafında dönme hareketi yapmaktadır.



Şekil 2.11. Burulan PYK (Xiao ve ark., 2021).

2.1.1.8. Eğilen PYK

Bir ucu sabit, bir ucu serbest olacak şekilde kullanılabilen eğilen kas tipi; sıralı dizilmiş odacıklardan oluşan bir üst gövdeden ve bu odacıkların atmosfer ile ilişkisini kesecek bir alt gövdeden oluşmaktadır. Odacıkların içerisine basınç uygulandığında, odacıkların dış duvarları şişerek birbirlerini itmektedir. Bu sayede Şekil 2.12’de de gözüktüğü gibi yapay kasın serbest ucu, sabitlenmiş ucuna doğru radyal olarak hareket etmektedir.



Şekil 2.12. Eğilen PYK (Mosadegh ve ark., 2014).

2.1.2. PYK genel özellikleri

Pnömatik yapay kaslar, hafiflik, esneklik ve yüksek güç-ağırlık oranı gibi avantajları nedeniyle mekanik sistemlerde önemli bir yere sahiptir. PYK'ler, kullanılan malzeme ve tasarım parametrelerine bağlı olarak farklı mekanik özellikler göstermektedir. Örgülü kaslar yüksek dayanıklılık sağlarken, pileli kaslar düşük enerji tüketimi sunar. Ağırlı kaslar daha esnek yapıya sahipken, gömülü kaslar sürtünmeyi azaltarak daha düşük histerezis sağlar. Festo PYK'lar ise ticari olarak en yaygın kullanılan sistemlerden biridir. Bu farklı tasarımlar, biyomimetik sistemlerden endüstriyel robotlara kadar geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır.

Pnömatik yapay kaslar yapıları itibariyle geleneksel aktüatörlere kıyasla çeşitli avantajlara sahiptir. Bu avantajların çoğu pnömatik yapay kasın yapısının esnek ve yumuşak olmasından kaynaklanır. Başlıca avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Kendi ağırlığının 400 katı kadar kuvvet üretebilir.
- Malzemesi sebebiyle hafiftir.
- Maliyeti düşüktür.
- Pnömatik pistonla göre başlangıç kuvveti yüksektir.
- Ara pozisyon kontrolü yapılması kolaydır.
- Tek değişkenli kontrol yapılabilir.
- Tepki süresi geleneksel aktüatörlere kıyasla daha kısadır.
- Aşınma yapmaz.
- Yağlama gerektirmez.
- Sönümleme gerektirmez.
- Kirlili ve ıslak ortamlarda çalışabilir.
- Sürtünmesiz ve sessiz çalışır.
- Hasar dayanımı ve ömrü yüksektir.

Tüm bu avantajları oluşturan esnek ve yumuşak doku, aynı zamanda bazı dezavantajlar da doğurmaktadır. Başlıca dezavantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Strok boyu, başlangıç boyunun %25'i kadardır.
- Belirli strok boyu dışında kuvvet değeri vermez.

- Çift etkili çalışmaz.
- Gereğinden fazla basınç altında deforme olup kaçak yapabilir.
- Delici, kesici, yakıcı aletlere karşı hassastır.
- Kullanımı sırasında histerezis etkisi görülür.

2.1.3. PYK kullanım alanları

McKibben adıyla 1950'lerde ortaya çıkan yapay kaslar oldukça eski bir teknoloji olmasına rağmen popülerliğini günümüz şartlarında kazanmaya başlamıştır. Her ne kadar sahip oldukları dezavantajlar sebebiyle daha az tercih edilseler de yapılan araştırma-geliştirme çalışmalarıyla çeşitliliği artan PYK'ler birçok noktada kullanılmaya başlanmıştır.

Gelecekte, PYK'lerin daha yüksek verimlilik ve uzun ömür sağlayacak şekilde optimize edilmesi, yeni nesil robotik ve medikal sistemler için önemli bir araştırma alanı olmaya devam edecektir.

2.2. EPYK İçin Malzeme Seçimi

PYK'ler genellikle basınçlı hava ve sıvılarla kontrol edildiklerinden işletme şartlarında yüzeylerinin yüksek derecede yer değiştirmesi gerekir. Aynı şekilde işletme şartları ortadan kaldırıldığında, kasın eski hale gelmesi beklenir. Bu sebeple pnömatik yapay kaslarda kullanılacak olan malzemelerin esnek olması beklenmektedir.

2.2.1. Esnek malzeme çeşitleri

Geleneksel rijit kavrayıcıların aksine pnömatik yapay kavrayıcılar, biyomimetik tasarımları sayesinde hassas nesneleri zarar vermeden kavrayabilme yeteneğine sahip olan esnek robotik sistemlerdir. Bu sistemleri rijit kavrayıcılardan ayıran temel bileşenlerinden biri, kullanılan esnek malzemelerdir. Son yıllarda yumuşak robotik alanındaki gelişmeler, esnek malzemelerin pnömatik yapay kaslar veya yumuşak parmaklar gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmasına olanak tanımıştır. Bu malzemelerin temel özellikleri arasında yüksek esnekliğe sahip olmaları ve çevresel koşullara dayanıklı olma yetenekleri bulunmaktadır. Kullanılan malzeme türleri; silikon elastomerler, poliüretanlar ve termoplastikler olarak sıralanabilir. Temel olarak elastomerler, yüksek esneklik ve biyoyumluluk özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Poliüretanlar, dayanıklılığı ve esnekliği ile bilinirken, termoplastikler ise

işlenebilirlik ve mekanik özellikleri açısından avantaj sunmaktadır. Yumuşak robotik alanında yaygın olarak kullanılan bu malzemeler, pnömatik yapay kavrayıcıların farklı uygulama ve gereksinimlere uyum sağlamasına olanak tanır.

2.2.1.1. Silikon elastomer malzemeler

Silikon esaslı elastomerler çeşitli avantajlara sahiptir. Düşük sertlikleri ve yüksek esneklikleri nedeniyle pnömatik kavrayıcılarda en yaygın kullanılan malzemeler arasındadır. Biyouyumlu olduklarından biyoloji, tıp, medikal ve gıda ile ilgili çalışmalarda kullanılabilmektedirler. Yüksek sıcaklıklara ve kimyasallara karşı dayanıklı olmaları ile bilinmektedirler. Ayrıca kolay işlenebilmektedirler. Sertlikleri Shore 00 ile Shore 50 arasında olabilir. Bu avantajların yanı sıra düşük mekanik özellikleri (yırtılma direçleri genellikle poliüretan malzemelerden daha küçüktür) ve düşük hızda geri yaylanmaları (deformasyon sonrası eski haline gelmesi diğer malzemelere göre daha uzun sürer) gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Protez ve ortezler, yapay kaslar, robotik sistemler, hassas nesne kavrama uygulamaları, gıda paketlenme hatları, esnek devreler, mikro kanallı pnömatik sistemler gibi kullanım alanları örnek olarak gösterilebilir. Dragon Skin 10-30 A (Smooth-On), EcoFlex 00-10, 00-30, 00-50 (Smooth-On), Sylgard 184 (Dow Corning), Elastosil M4601 28 A (Wacker) ve Smooth-Sil 36-60 A gibi malzemeler, piyasada sıkça tercih edilen silikon malzemelere örnek olarak gösterilebilir.

2.2.1.2. Poliüretan malzemeler

Poliüretan bazlı elastomerler, silikonlara kıyasla daha yüksek mekanik dayanıma ve kimyasal dirence sahiptir. Yüksek yırtılma mukavemetleri ve yüksek aşınma dayanımları en önemli tercih sebepleridir. Sertlikleri Shore A 20 ile Shore A 90 arasındadır. Esnedikten sonra daha hızlı şekilde eski hallerine dönerler. Fakat karışım oranları oldukça hassastır. Üretimi sırasında vakum ortamı oluşturulması gerekebilir. Bu sebeple zor işlenen bir malzeme olarak kabul edilmektedir. Aşınmaya karşı direnç gerektiren endüstriyel uygulamalar, darbeli ortamda çalışan robotik uygulamalar, yüksek mukavemet ihtiyacı olan elastomerik bileşenler gibi farklı uygulama alanları bulunmaktadır. VytaFlex 20, 40, 60 (Smooth-On) ve PMC-780 (Smooth-On) gibi malzemeler, piyasada sıkça tercih edilen poliüretan malzemelere örnek olarak gösterilebilir.

2.2.1.3. Termoplastik malzemeler

TPE ve TPU esaslı malzemeler, enjeksiyon kalıplama ve 3D baskı gibi tekniklere uygun olmaları nedeniyle öne çıkmaktadır. Bu tür malzemeler yeniden şekillendirilerek tekrar kullanılabilirler. Diğer malzeme türlerine göre daha sert yapıda parçalar oluşturulabilir. Sertlik aralığı oldukça geniştir. Sertliği Shore A 10'dan Shore D 60'a kadar değişebilir. Yağlara ve çözücü kimyasallara dayanıklı türleri vardır. Enjeksiyon kalıplama ve 3D baskıya uygundur. Yüksek geri yaylanma özelliğine sahiptir. Hafif ve tekrar şekillendirilme ihtimali olan robotik kavrayıcılar, dayanıklı ve sert mekanik parçalar, 3D baskı ile prototipleme gerektiren uygulamalar gibi kullanım alanları vardır. Medalist TPE (Teknor Apex), Hytrel TPC-ET (DuPont) ve Pellethane TPU (Lubrizol) gibi malzemeler, piyasada sıkça tercih edilen termoplastik malzemelere örnek olarak gösterilebilir.

2.2.2. Kullanılacak malzemenin belirlenmesi

Pnömatik kavrayıcıların performansı, kullanılan malzemelerin mekanik özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Silikon elastomerler, hassas ve biyouyumlu uygulamalar için tercih edilirken, poliüretanlar daha dayanıklı ve uzun ömürlü uygulamalar için uygundur. Termoplastik elastomerler ise üretim kolaylığı ve yeniden işlenebilirlikleri sayesinde avantaj sağlamaktadır. Bu malzemelerin doğru seçimi, kavrayıcıların verimliliğini arttırmak için kritik önem taşımaktadır. Bir pnömatik kavrayıcı tasarımında malzeme seçerken kullanım alanının yanı sıra sertlik, elastik modül, kopma uzaması gibi mekanik özelliklerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Hassas kavrama gerektiren uygulamalar için yumuşak bir yapı oluşturulmak isteniyorsa düşük sertlik değerine sahip bir malzeme seçilmelidir. Deformasyona karşı direnç gösterilmesi beklenen tasarımlarda yüksek elastik modüle sahip bir malzeme seçilmelidir. Esnekliği sayesinde uygulama altında daha fazla uzama beklenen durumlarda yüksek kopma uzamasına sahip bir malzeme seçilmelidir. Aşırı zorlanmalara karşı dayanım beklenen uygulamalarda yüksek yırtılma direncine sahip bir malzeme seçilmelidir. Özetle yüksek esneklik ve biyouyumluluk gerekiyorsa silikon elastomer, daha güçlü ve aşınmaya dayanıklı bir yapı gerekiyorsa poliüretan, hızlı prototip kalıplama ve 3D baskıya uygun tekrar şekillendirilebilir bir uygulama gerekiyorsa termoplastik malzeme kullanılmalıdır. Malzemelerin temel özellikleri; Smooth-On, BASF Elastollan, DuPont Hytrel, Teknor Apex gibi elastomer üreticilerinden alınmış teknik dökümanlar kullanılarak Tablo 2.1'de paylaşılmıştır.

Tablo 2.1. Malzeme türlerinin özellikleri.

	Silikon	Poliüretan	Termoplastik
Esneklik	Yüksek	Orta	Orta
Biyouyumluluk	Yüksek	Orta	Orta
Mekanik Dayanım	Orta	Yüksek	Yüksek
Yırtılma Direnci	Orta	Yüksek	Yüksek
Kimyasal Dayanım	Yüksek	Orta	Yüksek
Geri Yaylanma	Orta	Orta	Yüksek
İşlenebilirlik	Kolay	Zor	Kolay (3D Baskı)

Bu çalışmada tasarlanacak olan pnömatik kavrayıcı masa tipi bir kavrayıcıdır. Endüstriyel amaçla kullanılması hedeflenmektedir. Dolayısıyla doğrudan ihtiyaç duyulan biyouyumluluk şartı yoktur. Fakat kullanım alanı geniş olduğundan gıda paketlenme endüstrisinde de medikal endüstrisinde de tıp endüstrisinde de kullanım sağlanabilir. Standart bir üretim hattında mesai saati boyunca kullanılacağı düşünülürse mekanik dayanımının yüksek olması ve aşınmaması beklenmektedir. Paketleme veya taşıma gibi bir işlem yapacağından kimyasal dayanımının olmasına ihtiyaç yoktur. Tüm bu parametreler göz önüne alındığında, pnömatik kavrayıcı için üretilecek olan pnömatik parmakların poliüretan elastomer veya silikon elastomer malzeme grubundan seçilmesi uygun görülmektedir. Bu çalışmada biyouyumluluk temel ilkesi göz önüne alınarak silikon elastomer malzeme grubundan bir malzeme seçilecektir.

Seçilen malzeme kendi içerisinde farklı sertlik değerlerine sahiptir. Bu durum malzemenin her sertlik değeri için farklı uzama miktarına, kopma dayanımına, yırtılma direncine vs. sahip olmasını sağlar. Esnek malzemeler için sertlik değeri Shore olarak belirlenir. ASTM D2240 ve TS EN ISO 868 standartlarına göre 12 adet Shore sertlik grubu bulunmaktadır. Bunlar; A, B, C, D, DO, E, M, O, OO, OOO, OOO-S, ve R olarak sayılabilir. Shore A kavramı genellikle orta sertlikteki elastomerler ve kauçuk benzeri malzemelerde kullanılır. Binek otomobil lastikleri, contalar, sızdırmazlık

elemanları gibi kullanım alanları mevcuttur. Shore B grubu, Shore A'ya benzeyen fakat biraz daha sert malzemeleri kapsayan bir ölçeğe sahiptir. Orta sertlikteki termoplastik elastomerler, darbeye dayanıklı yumuşak plastikler ve elastomerler gibi kullanım alanlarına sahiptir fakat Shore A kadar yaygın kullanımı yoktur. Shore A ve B'den sert olan Shore C grubu, ayakkabı tabanları, sert süngerler ve köpüklerde kullanılmaktadır. Shore D, sert plastikler ve bazı yumuşak metaller için kullanılır. PVC borularda, masa ve mobilya yüzey kaplamalarında kullanılmaktadır. Shore DO, Shore D'ye benzer fakat farklı malzeme bileşimleri için özelleştirilmiştir. Shore D'nin yeterli olmadığı bazı sert polimerler için geliştirilmiştir. Sert mühendislik plastikleri, kauçuk kaplamalar gibi kullanım alanları vardır. Shore E grubu orta sertlikteki plastikler için kullanılır. Shore A ve Shore D arasında bir kullanım gerektirdiğinde tercih edilir. Yüksek yoğunluklu polietilen, pekiştirilmiş kompozit malzemeler gibi kullanım alanları vardır. Shore M, ince malzemelerin sertlikleri için kullanılır. İnce plastik ve elastomer filmler için uygundur. Lateks eldivenler, ambalaj filmleri gibi kullanım alanlarına sahiptir. Shore O, Shore A ve D arasında kullanılan bir başka gruptur. Alternatif bir ölçüm standardı sunar. Yumuşak mühendislik plastikleri, otomotiv iç aksamaları gibi kullanım alanları vardır. Shore OO çok yumuşak malzemeler için geliştirilmiş bir sertlik ölçeğidir. Jel benzeri veya çok düşük sertlikteki malzemeler için kullanılır. Jel tabanlıklar, yumuşak sakızlar, titreşim izolasyon pulları ve silikon bazlı protez malzemeler gibi kullanım alanları mevcuttur. Shore OOO ise Shore OO'dan bile daha yumuşak malzemelerde kullanılır. Son derece yumuşak jelimsi malzemelerde kullanılır. Medikal silikon jeller, yumuşak köpük dolgular gibi kullanımları görülmektedir. Shore OOO-S, Shore OOO'dan daha hassas ölçümler yapabilmek için geliştirilmiştir. Çok düşük sertlik değerine sahip malzemeleri gruplamak için oluşturulmuştur ve Shore OOO'nun genişletilmiş versiyonudur. Süper yumuşak silikon malzemeler ve medikal pedler gibi ürünlerde kullanılmaktadır. Shore R ise Shore D ile benzer ancak daha geniş kapsamlı bir değerlendirme sunan bir gruptur. Sert polimer ve bazı metaller için daha hassas ölçümler yapmayı mümkün kılar. Bazı mühendislik malzemelerinde kullanılmaktadır. Tüm bu Shore ölçekleri genellikle 0 ile 100 arasında bir sertlik değerine sahip olabilirler. Endüstriyel alanda genellikle Shore A, D ve OO grupları kullanılmaktadır ve bu gruplar genellikle 10 ile 90 arasında bir sertlik değeri almaktadır. Kullanılan bazı Shore gruplarının ASTM D2240 standardına göre sertlik derecelerini özetleyen Tablo 2.2 oluşturulmuş ve aşağıda verilmiştir.

Tablo 2.2. Shore gruplarının sertlik değerleri.

Sertlik Derecesi	Shore 00	Shore A	Shore B	Shore C	Shore D
Çok Yumuşak	0-30	-	-	-	-
Yumuşak	40-60	0-10	-	-	-
Az Yumuşak	70-90	20-30	0-10	-	-
Az Sert	-	40-50	20-30	0-10	-
Sert	-	60-90	40-70	20-50	0-30
Çok Sert	-	-	80-90	60-90	40-70
Maksimum Sertlik	-	-	-	-	80-100

Esnek robotik kavrayıcı için kullanılacak olan yumuşak parmakların silikon elastomer malzeme grubundan seçilmesi kararlaştırılmıştır. Bu kapsamda yurtiçi piyasasında kolaylıkla bulunabilen RTV-2 kalıp silikonu malzemesi seçilmiştir. Bu malzeme oda sıcaklığında kürlenerek (Room Temperature Vulcanizing - RTV) iki bileşenli silikon elastomerdır. Biri katalizör olmak üzere iki farklı hammadde karıştırıldıktan sonra oda sıcaklığında kürleşerek esnek bir silikon kauçuk haline gelmektedir. RTV-2 malzemesi üretildikten sonra esnek ve yumuşak kauçuksu yapıya sahip olmaktadır. Esneklik ve yumuşaklığının yanı sıra yüksek kopma ve yırtılma direncine sahiptir. Yüksek sıcaklıklara ve çeşitli kimyasallara karşı dirençlidir. Düşük viskozitesi sayesinde hassas döküm esnasında ulaşılması zor noktalara akabilir. Genellikle kalıp ayırıcısı kullanmadan kolayca kalıptan çıkabilir. Ayrıca kürleşme sırasında hava kabarcıklarını kolay atması, düşük çekme oranına sahip olması ve hızlı kürleşmesi bu malzemeyi popüler kılan özellikler arasındadır. Seçilen malzemeler 20 Shore RTV-2 Kalıp Silikonu (AKSİL-G20 - Aksil Aydın Kompozit), 20 Shore RTV-2 Kalıp Silikonu (VRM-520 - Verpol Vernik Reçine Marketi), 20 Shore Platinium RTV-2 Kalıp Silikonu (VRM-620 - Verpol Vernik Reçine Marketi), 40 Shore RTV-2 Kalıp Silikonu (AKSİL-G40 - Aksil Aydın Kompozit) ve 40 Shore RTV-2 Kalıp Silikonu (VRM-540 - Verpol Vernik Reçine Marketi) olarak belirlenmiş ve satın alınmıştır. Tedarikçi firmalardan talep edilen teknik dokümanlar incelenerek farklı markaya ve sertliğe sahip malzeme türlerinin temel özelliklerini içeren Tablo 2.3, Tablo 2.4, Tablo 2.5, Tablo 2.6 ve Tablo 2.7 oluşturulmuştur.

Tablo 2.3. 20 Shore RTV-2 Kalıp Silikonu (VRM-520) özellikleri.

Özellik	Muayene Birimi	Değerler
Sertlik	Shore A	20±2
Karışım Oranı	A:B	100:2
Renk	-	Beyaz
Çalışma Süresi	25 °C	30-40 Dakika
Kürlenme Süresi	25 °C	3-4 Saat
Viskozite (η)	mPa.s	15500±1000
Yırtılma Mukavemeti (σ_y)	kN/m	$\geq 21,6$
Çekme Mukavemeti (σ_c)	MPa	$\geq 3,3$
Yüzde Uzama (ϵ)	%	≥ 500

Tablo 2.4. 20 Shore Platinum RTV-2 Kalıp Silikonu (VRM-620) özellikleri.

Özellik	Muayene Birimi	Değerler
Sertlik	Shore A	20±2
Karışım Oranı	A:B	1:1 (veya 10:1)
Renk	-	Şeffaf
Çalışma Süresi	25 °C	30-40 Dakika
Kürlenme Süresi	25 °C	3-4 Saat
Viskozite (η)	mPa.s	3000±1000
Yırtılma Mukavemeti (σ_y)	kN/m	$\geq 24,5$
Çekme Mukavemeti (σ_c)	MPa	≥ 5
Yüzde Uzama (ϵ)	%	≥ 710

Tablo 2.5. 40 Shore RTV-2 Kalıp Silikonu (VRM-540) özellikleri.

Özellik	Muayene Birimi	Değerler
Sertlik	Shore A	40
Karışım Oranı	A:B	100:2
Renk	-	Beyaz
Çalışma Süresi	25 °C	30-40 Dakika
Kürlenme Süresi	25 °C	3-4 Saat
Viskozite (η)	mPa.s	18000±1000
Yırtılma Mukavemeti (σ_y)	kN/m	$\geq 19,6$
Çekme Mukavemeti (σ_c)	MPa	$\geq 3,7$
Yüzde Uzama (ϵ)	%	≥ 250

Tablo 2.6. 20 Shore RTV-2 Kalıp Silikonu (AKSİL-G20) özellikleri.

Özellik	Muayene Birimi	Değerler
Sertlik	Shore A	20±1
Karışım Oranı	A:B	1:1
Renk	-	Şeffaf
Çalışma Süresi	23 °C	33 Dakika
Kürlenme Süresi	23 °C	2 Saat 10 Dakika
Viskozite (η)	mPa.s	2175
Yırtılma Mukavemeti (σ_y)	kN/m	$> 17,2$
Çekme Mukavemeti (σ_c)	MPa	$> 4,5$
Yüzde Uzama (ϵ)	%	> 875

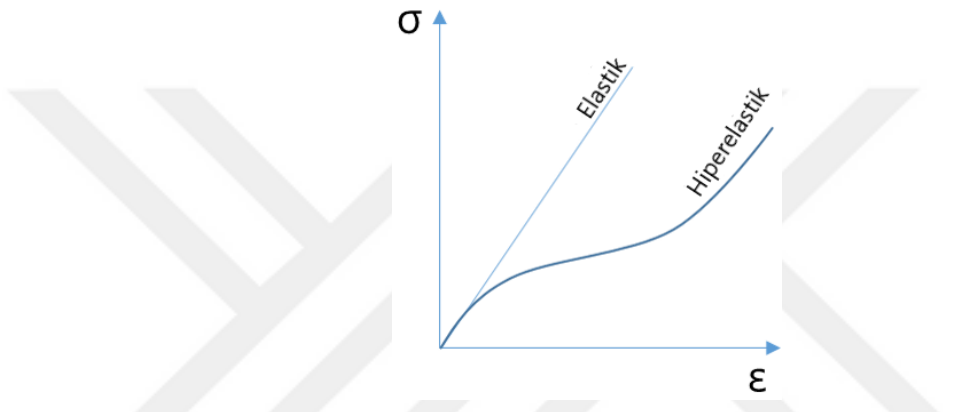
Tablo 2.7. 40 Shore RTV-2 Kalıp Silikonu (AKSİL-G40) özellikleri.

Özellik	Muayene Birimi	Değerler
Sertlik	Shore A	40±1
Karışım Oranı	A:B	1:1
Renk	-	Şeffaf
Çalışma Süresi	21 °C	35 Dakika
Kürleme Süresi	21 °C	2 Saat 15 Dakika
Viskozite (η)	mPa.s	9750
Yırtılma Mukavemeti (σ_y)	kN/m	13,3
Çekme Mukavemeti (σ_c)	MPa	6,3
Yüzde Uzama (ϵ)	%	675

2.2.2.1. Malzeme Testleri

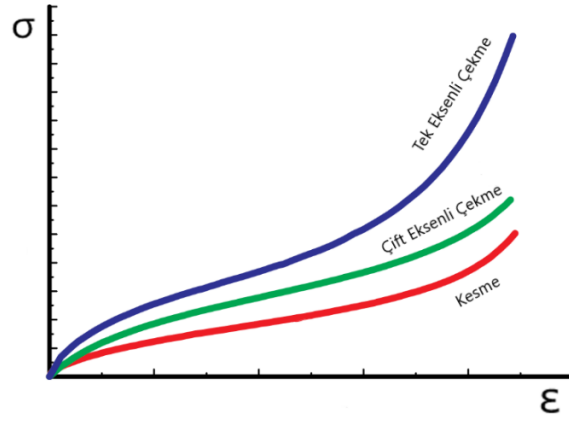
Seçilen malzemelerin mekanik özelliklerini bilmek veya belirlemek, tasarım ve analiz süreçlerinde oldukça kritik bir öneme sahiptir. Seçilen malzemenin dayanıklılığı, sertliği, esnekliği gibi farklı mekanik özellikleri, bu malzemenin hangi amaçla kullanılacağını gösteren en temel unsurdur. Bu temel ilkenin gereksinimlerini sağlamak adına her malzeme grubu için çeşitli mekanik testler geliştirilmiş ve standartlaştırılmıştır. Çekme, basma, burulma, yorulma gibi test yöntemleri, malzemenin doğal şartlardaki davranışını belirlememize yardımcı olarak güvenli ve verimli ürünler tasarlanmasına olanak sağlamaktadır. Genellikle bu testlerden elde edilen veriler gerilme-gerinim grafiği olarak sunulmaktadır. Basit olarak gerilme kavramı birim alana etkiyen kuvvet olarak açıklanırken, gerinim ise bu kuvvet karşılığında malzemede meydana gelen birim şekil değiştirmedir. Genellikle birçok metal %0,2 ile %0,5 arasındaki bir gerinme değerinde plastik deformasyona yani kalıcı şekil değişimine uğrarken, %30 ile %100 arasındaki gerinme değerlerinde bile elastik deformasyon bölgesinde yani kuvvet etkisi ortadan kalkınca eski haline dönebileceği bölgede kalabilen malzemeler de vardır. Malzemelerin bu davranışı hiperelastisite

olarak bilinir ve özel hiperelastik malzeme yasaları kullanılarak modellenir. Şekil 2.13'te görüldüğü gibi hiperelastik malzemeler, elastik malzemelerden farklı olarak yüksek şekil değişimlerinde doğrusal olmayan davranış sergilerler ve Hooke Yasasına uymazlar. Öyle ki elastik davranış sergiledikleri bir bölgeleri neredeyse hiç yoktur. Üzerlerine uygulanan yükü kendi içlerinde geri kazanılmak üzere depolarlar ve şekil değişimine sebep olan bu yük ortadan kaldırıldığında eski hallerine geri dönerler. Kauçuklar, elastomerler, silikonlar, yumuşak dokular, köpükler, lastikler, biyolojik dokular gibi birçok yumuşak malzeme bu malzeme sınıfına girmektedir. Esnek parmak üretimi için seçilen silikon elastomerler de hiperelastik malzeme olarak bilinmektedir.



Şekil 2.13. Elastik malzemeler ve hiperelastik malzemeler için gerilme-gerinim grafiği karşılaştırması.

Şekil 2.14'te görüldüğü üzere hiperelastik malzemeler yükleme durumlarına göre farklı davranışlar göstermektedir ve bu malzemelerin mekanik özelliklerini metallerde olduğu gibi literatürden bulmak kolay değildir. Çünkü hiperelastik malzemelerin mekanik özellikleri kürlenme süresine, karışım oranına, homojen oluşuna, çevre koşullarına vb. gibi kontrol edilmesi görece zor durumlara bağlı olarak değişebilmektedir. Bu sebeple deneyler ve bilgisayar destekli analizlerden önce malzemelerin gerilme-gerinim verilerinin elde edilmesi gerekmektedir. Mekanik özellikleri belirlemek için birçok test yöntemi vardır ve bunlardan üç tanesi temel test olarak sayılabilir. Malzeme modeli oluştururken tüm test sonuçlarına ihtiyaç yoktur fakat ne kadar çok test sonucu elde edilirse gerçek duruma o kadar yakın olan bir mekanik davranış belirlenmiş olur.



Şekil 2.14. Hiperelastik malzeme eğrisi.

Mekanik özellik belirlenirken kullanılan testler aşağıdaki gibi sıralanmaktadır:

- Tek eksenli çekme testi: Şekil 2.15’te gösterilen test, diğer testlere nazaran uygulaması daha kolay olduğundan en popüler ve en temel test yöntemidir. Belirli standartlar çerçevesinde homojen bir deformasyon oluşturmak için dambıl şeklinde hazırlanmış numune ürün iki tutucu çene arasına sabitlenir. Tutucu çenelerden biri sabit dururken diğeri ise gerilim oluşturmak amacıyla aksel olarak sabit çeneden uzaklaştırılır. Uzaklaşma işlemi boyunca tepki kuvveti bir yük hücresi ile ölçülür. Test sonucunda malzemenin bir eksen boyunca gerilme davranışı incelenerek gerilme-gerinim karakteristiği belirlenir ve doğrusal olmayan elastik davranışı gözlemlenir.



Şekil 2.15. Tek eksenli çekme testi.

- Çift eksenli çekme testi: Tek eksenli çekme testine göre daha kompleks olan bu yöntem, iki eksen boyunca gerilme tepkilerini ölçer. Şekil 2.16’da görüldüğü gibi tek eksenli çekmeye nazaran, malzeme üzerinde farklı yönlerde gerilmeler oluşur ve bu sayede anizotropik özellikler ile malzemenin karmaşık davranışları daha detaylı

incelenmiş olur. Bu test yöntemi hacimsel sıkıştırma testinin özelleştirilmiş versiyonudur. Hacimsel sıkıştırma testinde sıkıştırılabilirlik bulunurken, tamamen veya neredeyse sıkıştırılmaz numuneler için bu test yöntemi kullanılır. Malzeme iki yönde gerildiği için, sıkıştırılmaz doğası nedeniyle, üçüncü yönde de sıkıştırmaya maruz kalır.



Şekil 2.16. Çift eksenli çekme testi.

- Düzlemsel kesme testi: Şekil 2.17’de görülen cihaz ile, ilgili standartlara göre hazırlanan deney numunesinin kesme gerilmesi altındaki davranışları incelenir. Numunenin iki ucunun birbirine paralel konumlanmış tutucu çenelere bağlanarak, bir çenenin sabit dururken bir çenenin yanal yönde hareket ettirilmesi ile yapılır. Numunenin elastik olmayan deformasyon davranışı ve kesme modülü belirlenir. Numune ve tutucu çene arasında kayma olmamalıdır. Fakat pratikte bu durum pek kolay değildir. Bu sebeple az kullanılan bir test yöntemidir.



Şekil 2.17. Düzlemsel kesme testi.

- Saf kesme testi: Düzlemsel kesme testinin şartlarının sağlanmasının zor olması sebebiyle kayma davranışını gözlemlemek için Şekil 2.18’de gösterilen saf kesme testi yapılır. Düzlemsel kesme testinde numune dikdörtgen şeklini kaybederek eşkenar dörtgene dönüşürken saf kesmede ise kenarların paralelliği bozulmaz. Ancak farklı boyutlara sahip olur.



Şekil 2.18. Saf kesme testi.

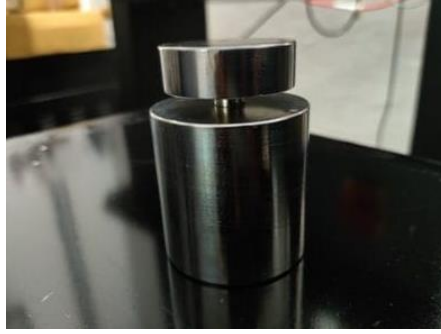
- Tek eksenli basma testi: Şekil 2.19’da gösterilen cihaz ile bu test özelinde malzemenin farklı sıkıştırma oranlarındaki davranışları gözlemlenir. Sıkıştırma elastik özellikleri ve sıkıştırma modülü hakkında bilgi veren test yöntemidir. Bu test sayesinde malzemenin uygulama esnasında maruz kaldığı koşullar simüle edilir.



Şekil 2.19. Tek eksenli basma testi.

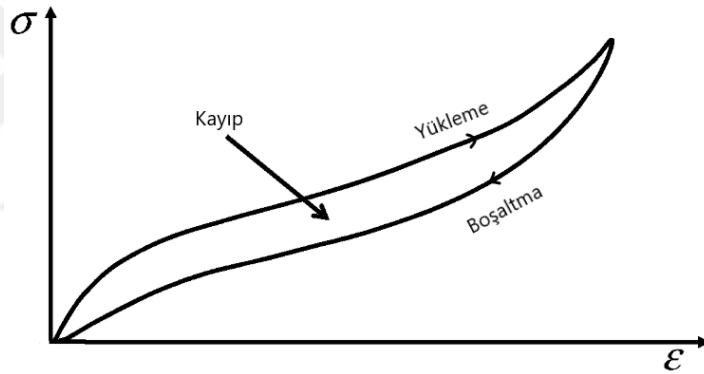
- Hacimsel sıkıştırma testi: Şekil 2.20’de görülen sistem, malzemenin sıkıştırılabilirliğini gözlemleyen test sistemidir. Silindir bir dış yuvanın içerisine silindirik bir numune yerleştirilerek numune sıkıştırılır. Yanal hareketler kısıtlandığı ve hiperelastik malzemelerin sıkışma oranları az olduğu için deney sonucunda elde edilen gerçek yer değiştirme miktarları çok küçüktür. Bu yöntemde plakalar ve numune arasında sürtünme varsa homojen deformasyon sağlanamaz. Testten önce

numune ve plakaların yağlanması önerilir. Bu durum numunenin ensenden kaymasına da sebep olabileceği için kontrolü zor bir yöntemdir.



Şekil 2.20. Hacimsel sıkıştırma testi.

- Histerezis testi: Deney numunesinin, Şekil 2.21’de görülen enerji depolama ve boşaltma sırasında kaybedeceği enerjiyi elde etmek için kullanılır. Bu deney sayesinde çevrimsel yük altındaki malzemenin dayanıklılığı ve enerji Emilimi incelenir.

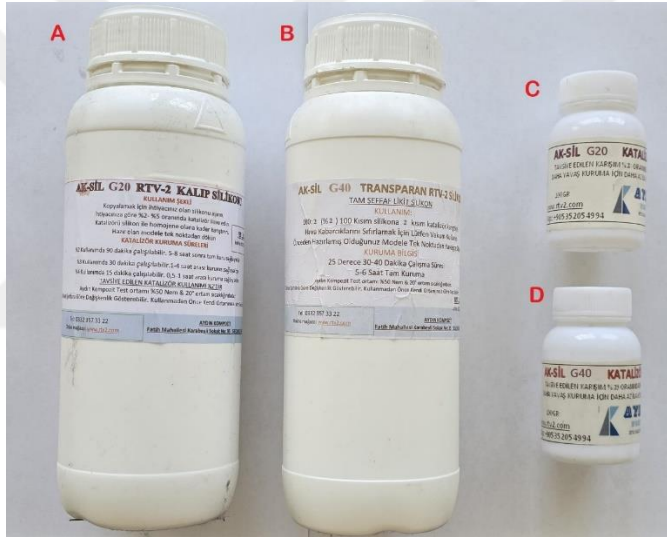


Şekil 2.21. Histerezis eğrisi.

Pnömatik esnek parmak üretimine geçmeden önce seçilen malzemelerin tümü için geçerliliği en yüksek olan tek yönlü aksel çekme testi yapılması kararlaştırılmıştır. İlgili testler “Lastikler ve termoplastikler - Çekme gerilmesi-uzama özelliklerinin tayini” başlıklı TS ISO 37 standardına göre yapılmıştır. İlgili standartta bahsedilen deney numunesinin hazırlanması için her bir malzemeden belirli kalınlıkta numuneler üretilmesi gerekmektedir. Numune üretimi için silikonun döküleceği kalıplar 3D yazıcı ile PLA malzeme kullanılarak üretilmiştir. Kalıpların taban kısımları yoktur. Çekme testi sırasında gerilme yönlerini manipüle etmemesi için daha düz yüzeyler üretilmesi amaçlandığından alt taban olarak cam kullanılmıştır. Bu kalıplar sayesinde 2,5 mm kalınlığında, 100 mm kenar uzunluklarına sahip ve yüzeyleri çentiksiz bir silikon düzlem üretilmiştir. Üretim aşamaları firmanın tavsiye ettiği şekilde

hazırlanmış ve uygulanmıştır. Şekil 2.22 ve Şekil 2.23'teki ürünler için üretici firmaların tavsiye ettikleri kullanım şekli aşağıdaki gibidir:

- **AKSİL RTV-2 Kalıp Silikonları:** Ham silikon miktarının %2 ile %4'ü kadar katalizör kullanılmalıdır. %2'lik katalizör kullanımında karışım donmadan 90 dakika boyunca çalışabilir. 5 ile 8 saat sonra tam kuruma sağlanır. %3'lük katalizör kullanımında karışım donmadan 30 dakika boyunca çalışabilir. 1 ile 4 saat sonra tam kuruma sağlanır. %4'lük katalizör kullanımında karışım donmadan 15 dakika çalışabilir. 0,5 ile 1 saat sonra tam kuruma sağlanır. Tavsiye edilen katalizör oranı %2'dir. Ham silikona katalizör eklendikten sonra karışım homojen olana dek karıştırılır ve ilgili kalıba tek noktadan dökülür. Ortam şartlarının %50 neme ve 20 °C sıcaklığa sahip olması önerilir.



Şekil 2.22. Aksil kalıp silikonları: A) AKSİL-G20, B) AKSİL-G40, C) AKSİL-G20 Katalizör, D) AKSİL-G40 Katalizörü.

- **VRM RTV-2 Kalıp Silikonları:** Kullanımdan önce ham silikon karıştırılmalıdır. Ham silikonun %2'si kadar katalizör kullanılmalıdır. Platinum modeller için ise 1:1 karıştırma oranı önerilir. Karışım temiz bir kaptan, az miktarda (ortalama 100 gram) ve homojen şekilde karıştırılarak yapılmalıdır. Fazla karıştırma yapılması veya sıcaklığın 35 °C'yi geçmesi istenmeyen bir durumdur. Karışım sonrası sıkışmış havanın atılması için vakum önerilir. Vakum altında 1-2 dakika beklenmelidir. Vakum işleminde karışımın hacmi 3-5 kat artmaktadır, kap buna göre seçilmelidir. Uzun süreli vakum uygulaması karışımındaki uçucu bileşenlerin kaybolmasına sebep olur ve bu istenmeyen bir durumdur. Vakum işleminden sonra karışım ilgili kalıba dökülür ve oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılır. Gözenekli kalıplarda numunenin kolay ayrılması

için kalıp yüzeyine vazelin, sabun, kalıp ayırıcı sprey gibi maddeler uygulanabilir. Ürünün açılmamış raf ömrü 1 yıldır ve maksimum 32°C sıcaklıkta saklanmalıdır.



Şekil 2.23. VRM kalıp silikonları: A) VRM-520 ve VRM-540 Katalizörü, B) VRM-520, C) VRM-620, D) VRM-620 Katalizörü, E) VRM-540.

Hammaddelerin temin edilmesinden sonra üretim aşamasına geçilmiştir. Kullanılacak olan ham silikonların, katalizör ile birleştirilmeden önce çalkalanarak homojen olmaları sağlanmıştır. Üretilcek numune hacminin en az dört katı kadar büyük hacme sahip temiz bir karıştırma kabı seçilmiştir. Kap, Desis H7C-3 marka 3 kg kapasitesi ve 0,1 g hassasiyetli hassas terazinin üzerine konularak darası alınmıştır. Boş kaba 100 gram ham silikon boşaltılmıştır. Ham silikon miktarının %2'sine karşılık gelen 2 gram katalizör kaba eklenmiştir. İşlem aşamaları Şekil 2.24'te verilmiştir.



Şekil 2.24. Karışım oranının ayarlanması: A) Darası alınmış kap, B) Ham silikon, C) Ham silikon ve katalizör karışımı.

Ardından homojenlik sağlanana kadar yavaş bir şekilde karışım karıştırılmıştır. Karışımın, belirli noktalarda kürlenmeye başlamaması için, fazla karıştırılmamasına özen gösterilmiştir. Karışım, Şekil 2.25 A'da gösterilen Aydın Kompozit marka 5 litrelik vakum tankına konularak atmosfere kapalı hale getirilmiş ve Şekil 2.25 B'de gösterilen 20 m³/h debiye, 1 HP güce sahip Value VE2100N model vakum pompası ile vakumlanmıştır.



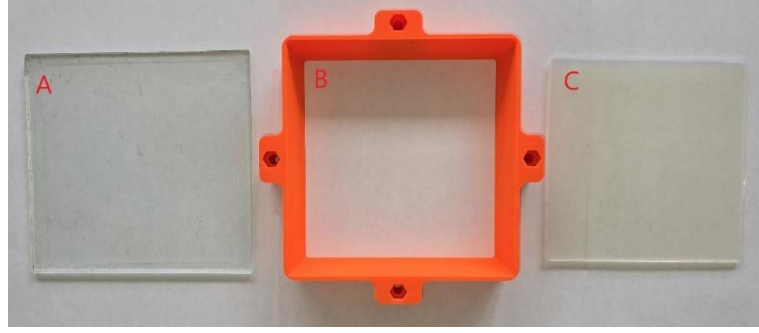
Şekil 2.25. Vakum seti: A) Vakum tankı, B) Vakum pompası.

Vakum pompası 2-3 dakika kadar çalıştırılarak vakum tankında -1 bar değerinde negatif basınç oluşturmuş ve karışımdaki hava kabarcıkları uzaklaştırılmıştır. Karışımdaki kimyasal gazların uçmaması için vakum işlemi uzun tutulmamıştır. Döküm yapılacak olan 100x100x2,5 milimetre ölçülerindeki kalıpların silikon ile temas edeceği yüzeylere Şekil 2.26’da gösterilen Beta Silikon Yapışma Önleyici sprej sıkılmıştır.



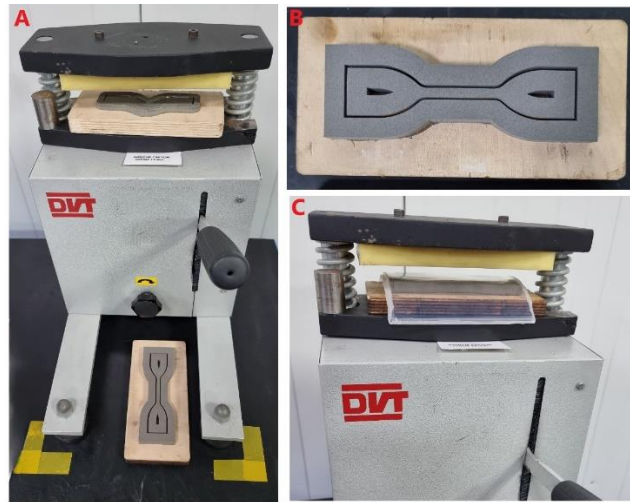
Şekil 2.26. Kalıp ayırıcı sprej.

Hazırlanan karışım, kalıplara tek bir noktadan ve 10-15 santimetre yüksekten yavaşça dökülmüştür. Döküm işlemi sonrası oluşacak numune oda sıcaklığında 24 saat kurlanmaya bırakılmıştır. Kurlanma işleminden sonra numune ürünler kalıptan çıkartılmıştır. Kalıplama için kullanılan parçalar Şekil 2.27 A ve Şekil 2.27 B’de, kalıptan çıkan ürün ise Şekil 2.27 C’de gösterilmiştir.

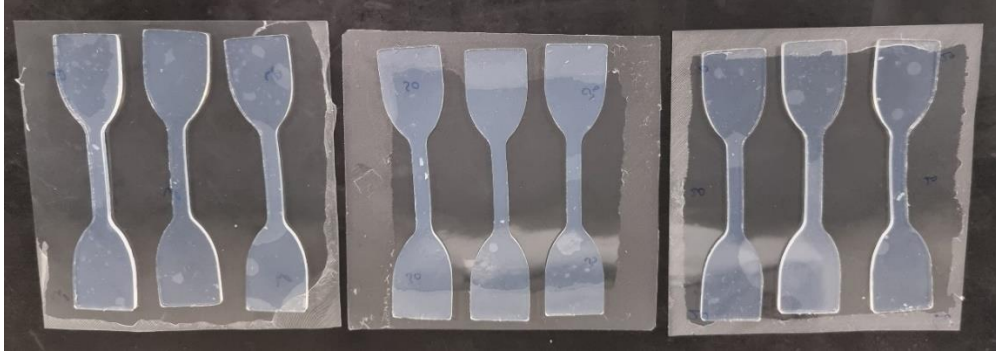


Şekil 2.27. Silikon tabakaların kalıplanması: A) Cam alt taban, B) Plastik kalıp, C) Kalıptan çıkan silikon tabaka numune.

TS ISO 37 standardında Tip 1, Tip 1A, Tip 2, Tip 3 ve Tip 4 olmak üzere toplam beş çeşit test numunesi tipi bulunmaktadır. Tip 1, Tip 1A ve Tip 2 genel amaçlı kullanımlar için uygundur. Tip 3 ve tip 4, diğer tiplerin küçültülmüş versiyonlarıdır ve yeterli hammadde bulunmadığı durumlarda veya kablo kaplamaları, boru sızdırmazlık contaları gibi özel testler gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadırlar. Test numunelerinin bağlanacağı cihazın boyutları testin doğruluğu açısından önemlidir. Numune tutucu çenelerin yapısı ve çeneler arası maksimum mesafe gibi değişkenler numune seçiminde önemli olan faktörler arasında sayılabilir. Çekme testi cihazına uygun görülen numune modelinin Tip 1 olacağına karar verilmiştir. Şekil 2.28’de görüldüğü gibi numune kalıplarından tabaka şeklinde çıkartılan silikonlar ile, TS ISO 37 standardına uygun olarak üretilmiş olan ve numune kesme kalıbı entegre edilmiş Devotrans DVT NP K Numune Kesme Presi cihazı kullanılarak Şekil 2.29’da gösterilen dambıl (dumb-bell) şekline benzer çekme testi parçaları üretilmiştir.



Şekil 2.28. Çekme testi numunesi hazırlama ekipmanları: A) Kesme cihazı, B) Kesme kalıbı, C) Kesme işlemi.



Şekil 2.29. Çekme testine hazır numuneler.

Her bir hammadde türünden dörder adet numune test edilmeye uygun hale getirilmiştir. Oluşturulan numunelerin standarda uygunluğunun kontrol edilmesi için Şekil 2.30’da gösterilen Metrios HD model profil projeksiyon ölçüm cihazı ile boyut kontrolleri yapılmıştır.



Şekil 2.30. Metrios HD profil projeksiyon ölçüm cihazı.

Test numunesi kalınlık kontrolü içinse Şekil 2.31’de gösterilen Asimeto 0-10 mm arası açıklığa sahip ve 0,01 mm hassasiyet sağlayarak ölçüm yapabilen dijital kalınlık komparatörü kullanılmıştır.



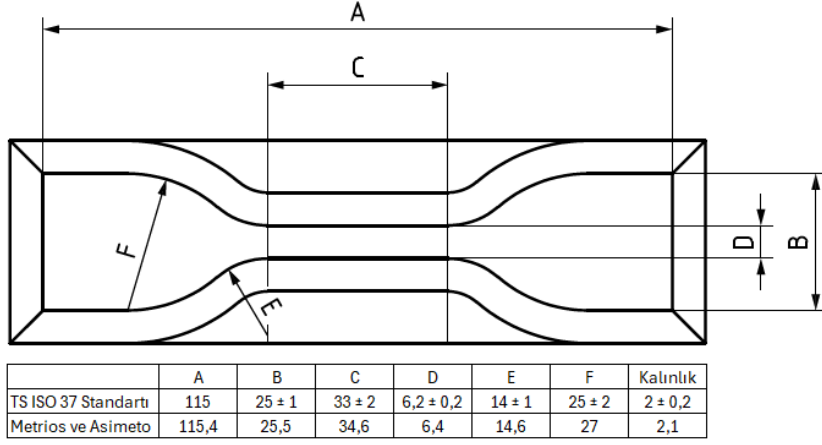
Şekil 2.31. Asimeto kalınlık komparatörü.

Yapılan dış boyut kontrollerinden sonra Şekil 2.32’de gösterilen elastomerler ve plastiklerin sertliklerini ölçebilen Devotrans DVT SHT A Tablalı Sertlik Ölçme Cihazı ile Shore değerleri teyit edilmiştir.



Şekil 2.32. Devotrans tablalı shoremetre.

Yapılan ölçümler sonucunda çekme testi için hazırlanan numune parçalarda problem görülmemiştir. Standartta paylaşılan ölçüler ile numunelerin ölçümleri Şekil 2.33’te karşılaştırılmıştır.



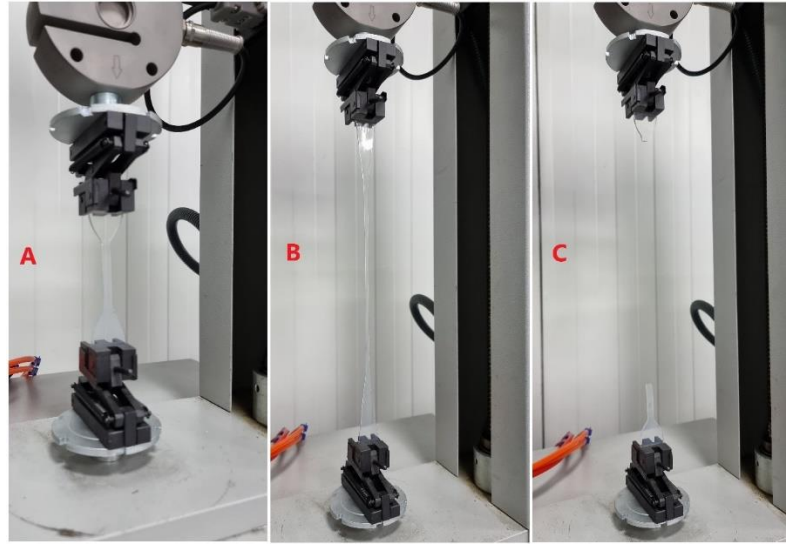
Şekil 2.33. Standart ölçülerin numune ölçüleri ile karşılaştırılması.

Testlerde kullanılacak olan Devotrans DVT UCK E NN 10 kN çekme-basma test cihazı çeneler hariç 780 mm çekme boyu sağlamaktadır ve 10 mm/dk ile 500 mm/dk arasında seçilebilen çekme hızına sahiptir. Test cihazı Şekil 3.34'te paylaşılmıştır.



Şekil 2.34. Devotrans çekme testi cihazı.

Çekme cihazının çekme işlemine başlamadan önceki çene açıklığı 75 mm olarak ayarlanmıştır. 75 mm çene açıklığında, çekme işlemi başlamadan önce çenelere sabitlenmiş numuneler boşluğu alınmış ve yüksüz pozisyona gelmiş olmaktadır. Çekme testinin aşamalarını gösteren görsel Şekil 2.35'te paylaşılmıştır.

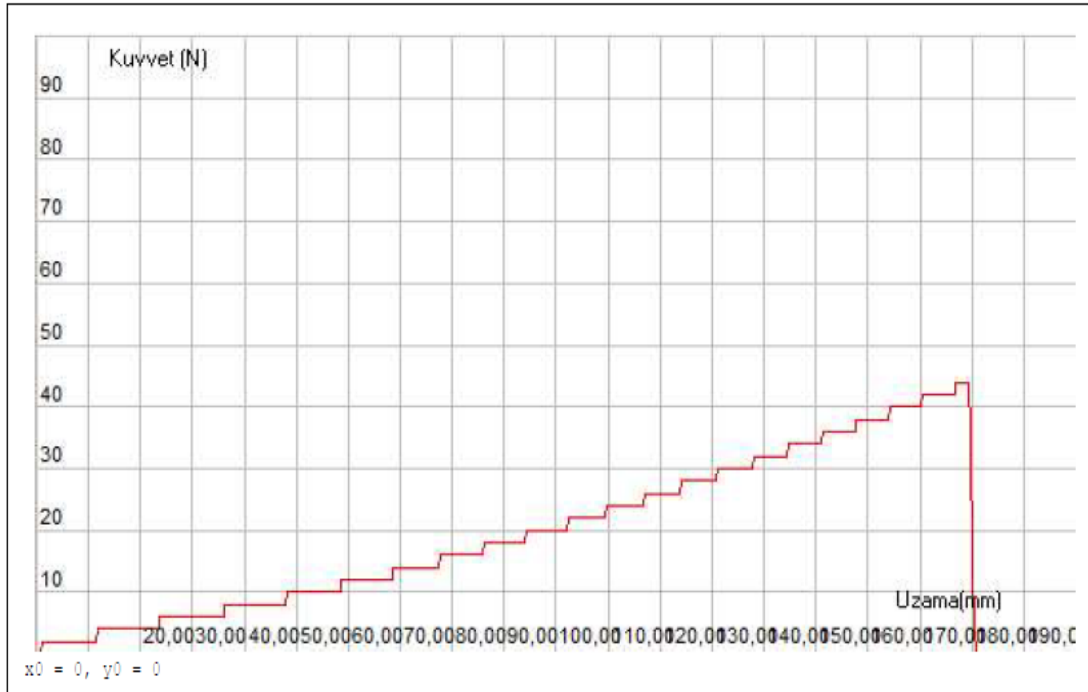


Şekil 2.35. Çekme testi aşamaları: A) Çekme öncesi, B) Çekme sırası, C) Çekme sonrası.

Her bir numune iki ucundan çekme cihazının çenelerine sabitlendikten sonra çekme işlemi 500 mm/dk hızda yapılmıştır. Tüm çekme testleri 23 ± 2 °C oda sıcaklığında yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler arasında maksimum kuvvet, maksimum kuvvette uzama miktarı, maksimum gerilme miktarı, kopma kuvvet kopma anındaki uzama miktarı ve yüzde kopma uzaması bulunmaktadır. Bu veriler, çekme cihazının test boyunca belirli aralıklarla okuduğu veriler ile oluşturduğu ve Şekil 2.36'da gösterilen kuvvet-uzama grafiği sayesinde elde edilmektedir.

PARÇA ŞABLONLARI	
Müşteri Adı	
Tarih	06.06.2024
Test Tipi	Çekme / Kopma Testi
Ürün Adı	40 Shore VRM-540
Malzeme	Silikon
Test Hızı	500 mm/dk
Kesit Alanı	13,44 mm ²
Boy (Lo)	75 mm
Başlık 1	Deney Numunesi 1
Başlık 2	
Başlık 3	

DEVOTRANS DVT-KT KOLAY TEST PROGRAMI www.devotrans.com	
MODEL	DVT
MAX.KAPASİTE	100 N
SERİ NO	1



Max Kuvvet Fmax (N)	Max Kuvvette Uzama Δl - (mm)	Max Gerilme σ_{ZB} (N/mm ²)	Kopma Kuvveti (N)	Kopma Anında Uzama Δl - (mm)	Kopma Uzaması σ_s - (%)
44	176,95	3	44	179,56	239,4

Şekil 2.36. Çekme testi cihazından elde edilen örnek bir kuvvet-uzama grafiği.

Her bir ürün tipine uygulanan dörder çekme testi, kendi içlerinde incelenerek kopma kuvveti, kopma anında uzama ve kopma uzaması değerlerinin ortalamaları alınmıştır. Kendi içlerinde ortalamaları alınan değerler, diğer malzeme türlerinin ortalamalarıyla karşılaştırılarak ortalama kopma kuvveti (F_{kort}), ortalama uzama miktarı (ΔL_{kort}) ve ortalama kopma uzaması (ϵ_{kort}) değerleri Tablo 2.8’de listelenmiştir.

Tablo 2.8. Farklı malzemeler için ortalama kopma kuvveti, ortalama uzama miktarı ve ortalama kopma uzaması değerleri.

	$F_{k\text{ort}}$ (N)	$\Delta L_{k\text{ort}}$ (mm)	$\epsilon_{k\text{ort}}$ (%)
20 Shore VRM-520	42,50	325,24	433,65
20 Shore VRM-620	46,50	191,00	254,68
20 Shore Aksil-G20	24,50	205,50	274,00
40 Shore VRM-540	41,00	164,38	219,18
40 Shore Aksil-G40	46,50	113,52	151,38

Karşılaştırmalar sonucunda 20 Shore RTV-2 Kalıp Silikonu (VRM-520) malzemesinin seçilmesine karar verilmiştir. Bu malzemenin öne çıkmasını sağlayan durum ise malzemenin neredeyse 40 Shore malzemeler kadar kopma kuvvetine sahip olması, aynı zamanda 40 Shore ve diğer 20 Shore malzemelerden daha fazla kopmadan uzayabilmesidir. Bu iki durum seçilen malzemenin hem daha dayanıklı hem de daha esnek olduğunu göstermektedir. 20 Shore RTV-2 Kalıp Silikonu (VRM-520) malzemesinden üretilmiş dört adet numune için çekme cihazı tarafından oluşturulmuş kuvvet-uzama grafiği, Plot Digitizer programı kullanılarak Tablo 2.9’da verilen kuvvet ($F_{\text{ç}}$) ve bu kuvvete karşılık gelen uzama ($\Delta L_{\text{ç}}$) miktarı tablolarına dönüştürülmüştür. Plot Digitizer programı, görsel halde sunulan grafikleri girdi olarak kullanarak görsel grafiğin üzerine atanan noktalar ile sayısal çıktı elde etmeye yarayan bir programdır.

Tablo 2.9. VRM-520 malzemesinden üretilmiş numunelerin kuvvet ve uzama değerleri.

1. Numune		2. Numune		3. Numune		4. Numune	
$F_{\text{ç}}$ (N)	$\Delta L_{\text{ç}}$ (mm)	$F_{\text{ç}}$ (N)	$\Delta L_{\text{ç}}$ (mm)	$F_{\text{ç}}$ (N)	$\Delta L_{\text{ç}}$ (mm)	$F_{\text{ç}}$ (N)	$\Delta L_{\text{ç}}$ (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,58	17,42	1,49	18,83	1,62	19,13	1,53	21,51
3,53	50,04	3,53	50,67	3,89	52,01	3,66	53,59
5,67	75,32	5,57	76,69	5,83	79,08	5,66	79,62
7,53	95,82	7,43	97,92	7,69	100,18	7,65	100,70

Tablo 2.9. (Devamı) VRM-520 malzemesinden üretilmiş numunelerin kuvvet ve uzama değerleri.

1. Numune		2. Numune		3. Numune		4. Numune	
F _ç (N)	ΔL _ç (mm)	F _ç (N)	ΔL _ç (mm)	F _ç (N)	ΔL _ç (mm)	F _ç (N)	ΔL _ç (mm)
9,66	113,75	9,65	115,03	9,95	117,60	9,83	120,59
11,80	130,66	11,50	131,47	11,90	134,00	11,73	136,55
13,65	146,03	13,35	146,87	13,80	149,71	13,68	151,48
15,88	159,52	15,76	160,22	16,02	163,63	15,91	165,31
17,83	172,16	17,43	173,23	17,96	176,79	17,86	179,30
19,77	174,79	19,46	185,55	19,86	189,43	19,76	192,10
22,00	197,09	21,68	197,88	22,13	201,30	21,99	204,90
23,95	209,05	23,53	209,51	24,07	213,68	23,89	217,28
25,71	219,98	25,38	221,50	25,97	225,72	25,83	229,65
28,12	230,90	27,60	232,45	28,19	237,08	28,06	240,83
30,07	242,18	29,64	244,77	30,09	249,04	30,01	253,21
31,83	253,28	31,49	255,73	32,04	260,48	31,91	264,90
34,24	264,72	33,71	265,99	34,21	271,84	34,14	277,02
36,00	274,79	35,56	277,63	36,16	283,97	35,99	289,14
37,95	286,41	37,41	288,24	38,06	295,84	37,99	301,68
40,18	297,68	39,81	300,91	40,32	308,56	40,21	313,89
42,12	309,63	41,66	311,86	42,04	315,14	42,02	320,80
44,07	324,25	42,03	319,01	42,08	327,51	42,07	330,20
34,63	324,33	36,13	319,02	38,06	327,69	38,59	330,23
26,85	324,34	24,51	319,04	22,78	328,21	19,76	330,27
13,33	325,03	13,63	319,05	12,57	328,35	4,31	330,78
0,00	325,52	0,00	319,15	0,00	328,55	0,00	331,30

Sayısal değerlere dönüştürülmüş veriler ile oluşturulan dört tablonun ortalaması alınıp 20 Shore RTV-2 Kalıp Silikonu (VRM-520) malzemesine ait ortalama değerler tablosu oluşturulmuştur. Tablo 2.10’da verilen ortalama kuvvet ($F_{\text{çort}}$), ortalama uzama ($\Delta L_{\text{çort}}$), ortalama gerilme ($\sigma_{\text{çort}}$) ve ortalama gerinim ($\varepsilon_{\text{çort}}$) değerleri, bilgisayar destekli analiz uygulamalarında kullanılmak üzere malzeme özelliklerinin tanımlanmasına olanak sağlayabilecektir. Çekme testi öncesi numune ölçüm çalışmasında elde edilen geometrik boyutlar ve ilgili standartlar baz alındığından, hesaplamalarda kullanılan kesit alanı $A_{\text{ç}}=13,44 \text{ mm}^2$ ve ilk boy $L_{\text{ç}}=75 \text{ mm}$ olarak alınmıştır.

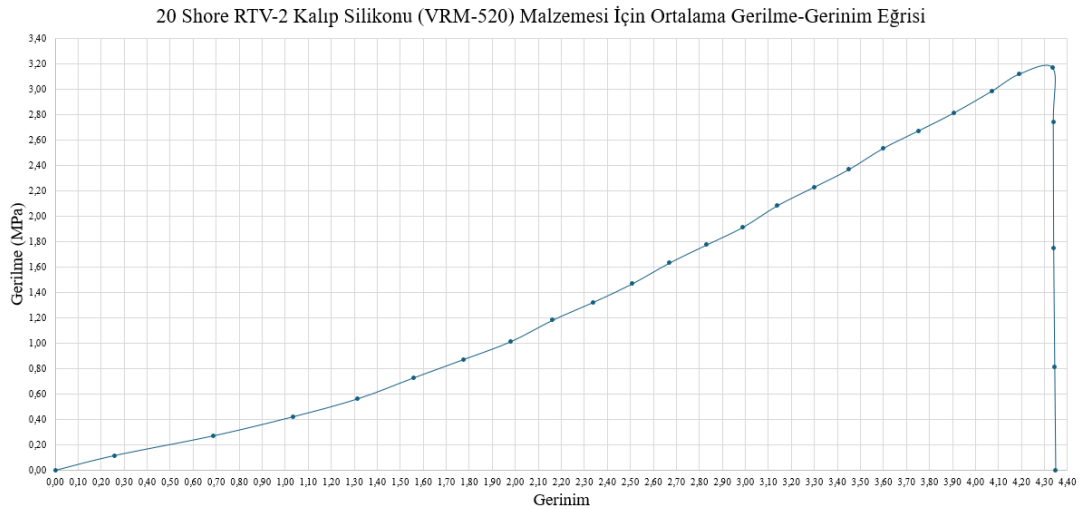
Tablo 2.10. VRM-520 malzemesinden üretilmiş numunelerin ortalama kuvvet, ortalama uzama, ortalama gerilme ve ortalama gerinim değerleri.

$F_{\text{çort}}$ (N)	$\Delta L_{\text{çort}}$ (mm)	$\sigma_{\text{çort}}$ (MPa)	$\varepsilon_{\text{çort}}$
0,00	0,00	0,00	0,00
1,55	19,22	0,12	0,26
3,65	51,58	0,27	0,69
5,68	77,68	0,42	1,04
7,57	98,65	0,56	1,32
9,77	116,74	0,73	1,56
11,73	133,17	0,87	1,78
13,62	148,52	1,01	1,98
15,89	162,17	1,18	2,16
17,77	175,37	1,32	2,34
19,71	187,97	1,47	2,51
21,95	200,29	1,63	2,67
23,86	212,38	1,78	2,83

Tablo 2.10. (Devamı) VRM-520 malzemesinden üretilmiş numunelerin ortalama kuvvet, ortalama uzama, ortalama gerilme ve ortalama gerinim değerleri.

$F_{\text{çort}}$ (N)	$\Delta L_{\text{çort}}$ (mm)	$\sigma_{\text{çort}}$ (MPa)	$\epsilon_{\text{çort}}$
25,72	224,21	1,91	2,99
27,99	235,32	2,08	3,14
29,95	247,30	2,23	3,30
31,82	258,60	2,37	3,45
34,08	269,89	2,54	3,60
35,93	281,38	2,67	3,75
37,85	293,04	2,82	3,91
40,13	305,26	2,99	4,07
41,96	314,36	3,12	4,19
42,56	325,24	3,17	4,34
36,85	325,32	2,74	4,34
23,47	325,46	1,75	4,34
10,96	325,81	0,82	4,34
0,00	326,13	0,00	4,35

Tablo 2.10’da paylaşılan ortalama değerler ile çizdirilen gerilme-gerinim grafiği ise Şekil 2.37’de verilmiştir.



Şekil 2.37. VRM-520 malzemesi için ortalama gerilme (MPa)-gerinim grafiği.

2.3. Silikon Parmak Üretimi

Esnek robotik kavrayıcılarda kullanılmak üzere üretilen yapay parmaklar farklı yapılar, farklı malzemeler ve üretim yöntemleri kullanılarak üretilebilmektedir. Örneğin Hao ve ark. (2016), 3D yazıcı kullanarak PLA malzemeden ürettikleri plastik kalıplara Dragon Skin 30 elastomer malzeme dökerek üretim yapmışlardır. Kürlenmemiş silikon malzeme kalıplara döküldükten sonra hava kabarcıklarından arındırılmak amacıyla 30 dakika boyunca vakumlu bir fırında bekletilmiştir. Ardından kürlenmenin başlaması için 2 saat boyunca 60 °C sıcaklıkta bekletilmiştir. Son olarak parçalar kalıplarından çıkartılmış, alt ve üst gövdelerin yapışma yüzeylerine ince bir silikon kauçuk tabakası sürülerek birbirlerine yapıştırılmıştır. Sandoval ve ark. (2022) ise uzayamaz tabanlı bir silikon parmak üretmişlerdir. Silikonların döküleceği kalıplar için Object 350 Connex3 marka reçineli 3D yazıcı kullanarak VeroClear marka sert reçine malzemeden kalıp üretmişlerdir. Baskı sonrası reçine kalıplar, tamamen kürlenmeleri için 40 °C sıcaklıkta 4 saat bekletilmiştir. Kalıplar; alt gövde kalıbı, üst gövde kalıbı ve uzama engelleyici yüzey kalıbı olmak üzere toplam 3 parçadan oluşmaktadır. Üst gövde kalıbına kürlenmemiş Dragon Skin 20 malzemesi dökülmüştür. 5 dakika boyunca hava kabarcıkları alınmıştır. Ardından alt gövde ile üst gövde birleştirilmiş ve 4 saat boyunca kürlenmeye bırakılmıştır. Uzama engelleyici katman içinse kalıba kürlenmemiş Dragon Skin 30 dökülmüş ve 2 dakika boyunca hava kabarcıklarının uzaklaşması beklenmiştir. Ardından akışkan silikonun üzerine kâğıt şeridi yerleştirilmiştir. Kürlenme işleminden sonra silikonlar kalıplardan çıkartılarak Sil-Poxy silikon yapıştırıcısı ile birbirlerine yapıştırılmıştır. Oluşturulan

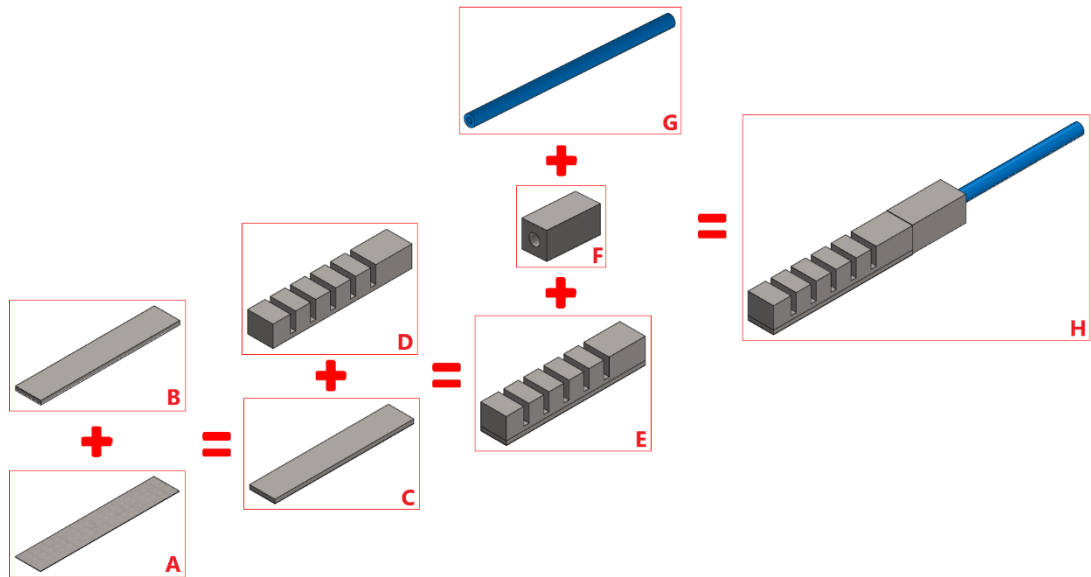
parmağın tutucu yüzeyine Ecoflex 00-20 malzemeden ek bir katman yapılmıştır. Bu katmanda tutuculuğu artırmak amacıyla kullanılacak altıgen yapılar oluşturmak için kalıp, akrilik malzemenin PLS6MW model bir lazer cihazı ile işlenmesiyle üretilmiştir. Bu kalıba kürlenmemiş Ecoflex 00-20 malzeme dökülmüş, ardından 5 dakika boyunca hava kabarcıklarının yok olması beklenmiştir. Ardından 6 saat boyunca kürlenmiştir. Oluşturulan sürtünme dokusu, silikon yapıştırıcı kullanarak uzama engelleyici katmana yapıştırılmıştır. Mawah ve Park (2023) yaptıkları çalışmada tutuculuğu artırmak amacıyla tendon destekli bir kavrayıcı parmak geliştirmiştir. Parmak yapısı iç silikon katmanı, dış silikon katmanı ve tendonlardan oluşmaktadır. İç silikon katmanının üretimi için gerekli olan alt gövde kalıbı, üst gövde kalıbı ve hava kanalı kalıbı olmak üzere üç farklı kalıp 3D yazıcı kullanarak PLA malzemeden üretilmiştir. %50 katalizör ve %50 Ecoflex 00-50 silikon malzeme karıştırılarak hava kabarcıklarını uzaklaştırmak için vakum odasında bekletilmiştir. Ardından akışkan haldeki silikon karışım, alt gövde kalıbına ve üst gövde kalıbına dökülmüştür. Üst gövde kalıbının üst kısmına hava kanalı kalıbı yerleştirilmiştir. Dökümden sonra 40 dakika doğal olarak kürlenen silikon kalıplardan çıkartılmıştır. Oluşan alt gövde ve üst gövde, silikon karışımı kullanılarak birbirlerine yapıştırılmıştır. Dış silikon katmanının üretimi için iki parçadan oluşan 3D yazıcıda üretilmiş PLA malzemeli kalıplar kullanılmıştır. Daha önce oluşturulan iç silikon katmanının üzerinde tendonlar ve fiber malzemeden üretilmiş uzayamaz katman yerleştirilmiştir. Tüm bu yapılar dış silikon katman kalıbının içerisine konulduktan sonra daha önce anlatıldığı şekilde akışkan silikon kalıba dökülmüş ve kürlenmiştir.

Bu çalışmada ise 3D yazıcı ile üretilmiş plastik kalıplara kürlenmemiş sıvı silikon döküm yöntemi ile üretim yapılmıştır. Sıvı silikon olarak kullanılan 20 Shore RTV-2 Kalıp Silikonu (VRM-520) malzemesinin kullanım talimatı 2.2.2.1. bölümde verilmiştir. Bahsedilen talimata uygun şekilde üretilen silikon parmakların üretim aşamaları bu bölümde paylaşılmıştır.

2.3.1. Silikon parmak tasarımı

Pnömatik kas temelli yapay parmaklar yapıları gereği hassas işlerde kullanılabilmektedir. Parmakların gerekli hassasiyeti sağlayabilmeleri için yumuşak yapıda olmaları, bozucu bir etmen karşısında kendi formlarını bozarak temas edecekleri nesneye zarar vermemeleri, aynı zamanda kolay kontrol edilebilir olmaları gerekmektedir. Tüm bu şartların sağlanması için parmak hammaddesinin silikon

olması en doğru seçenek olarak görülmektedir. Silikon malzemeler kolay bulunabilir, esnek, kopmaya karşı dayanıklı, yumuşak, ucuz ve istenilen şekle sokulabilen malzemelerdir. Üretimin silikondan yapılacağı olmasından dolayı tek parça halinde üretim yapılması kolay değildir. Parmağın iç yüzeyi fazla girintili çıkıntılı olduğu için kalıptan tek parça halinde çıkamayıp, bu durumu aşmak için tek kullanımlık kalıplar üretilmektedir. Bazı kalıp hammaddeleri suda veya farklı çözücü sıvılarda çözünerek parçadan ayrılmış olur. Fakat bu durum maliyetli ve fazla zaman alacak bir işlemdir. Farklı bir yöntem olarak kalıplar parmakların sertliğine göre daha sert bir silikondan üretilir. Fakat bu durum ince cidarlara sahip parmaklarda pek işe yarar bir yöntem değildir. İki silikon birbirinden ayrılırken parmakta kopma yaşanabilmektedir. Bir diğer seçenek ise Şekil 2.38’de gösterildiği gibi parmağı, kalıptan çıkabilecek şekilde parçalara bölmektir. Bu durum ekstra maliyet getirmeyeceği ve üretim hızını artıracığı için en yaygın uygulama biçimidir. Yapılacak olan çalışmada parmaklar bölünmüş halde üretildikten sonra birleştirilecektir.



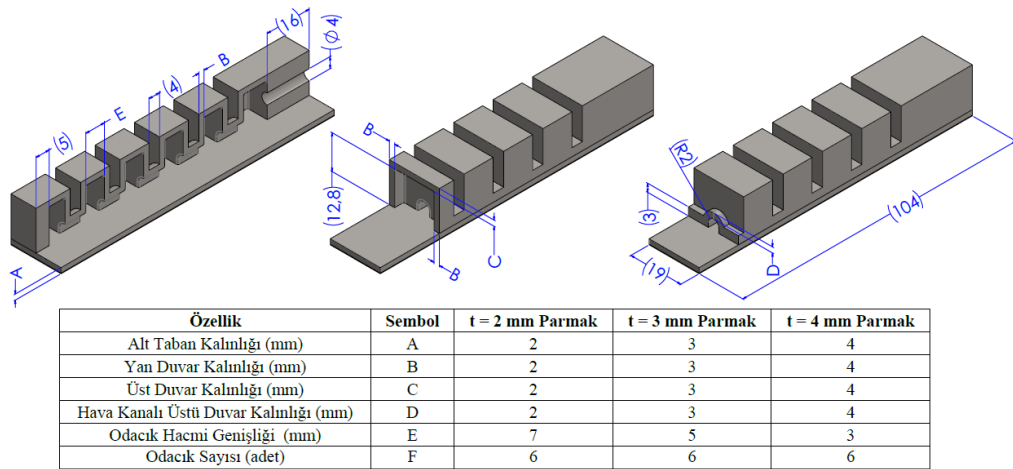
Şekil 2.38. Parmağın üretim aşamaları.

Silikon temelli esnek parmaklar için farklı tasarımlar söz konusudur. Örneğin Jain ve ark. (2023) yaptıkları çalışmada 3 adet eğilen pnömatik yapay parmağa ek olarak parmağın nesneye temas eden yüzeyine paralel olan arka yüzeyine, basınçsız durumda kıvrılmış bir yaprak gibi duran fakat basınç altında yana doğru açılarak kepçe gibi davranan bir yapı geliştirmişlerdir. Parmak ve yaprağımsı tutucu ayrı ayrı tahrik edilmektedir. Minik toplar, misketler, tutulması zor sayıca çok malzemeler bu yaprağımsı yapı ile kavranmaktadır. Parmakla yapılan kavramanın daha kolay

yapılabilmesi ve ince nesneleri kavrayabilmesi için parmakların ucuna 3D yazıcı ile üretilmiş tırnak imalatı yapılmıştır. Zhang ve ark. (2023) yaptıkları çalışmada standart bir dikdörtgen kesitli parmak ile odacıkların balıksırtı desenine benzer bir yerleşim ile konumlandırıldığı parmağı karşılaştırmıştır. Standart parmak daha yüksek eğilme performansı ve parmak ucu kuvveti sağlarken, balıksırtı parmağın ise hem boyuna hem enine hareket ettiği için daha yüksek kavrama kabiliyeti ve stabilitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Lyne ve ark. (2013) yaptıkları çalışmada odacıkların dış duvarları arasındaki mesafenin artması durumunda eğilme performansının ve parmak ucunda oluşan kuvvetin arttığını gözlemlemiştir. Mosadegh ve ark. (2014) yaptıkları çalışmada odacıklar iç hacimlerini küçülterek odacık sayısını artırmış ve eğilme performansı ile parmak ucu kuvvetinin arttığını gözlemlemiştir. Elsayed ve ark. (2014) yapmış oldukları çalışmada radyal kesite sahip parmakların basınç altında daha az radyal genişlemeye olanak sağlaması sebebiyle eğilme performansının ve eksenel uzamanın arttığını ortaya koymuştur. Her ne kadar birbirinden farklı tasarımlar ortaya koyulmuş olsa da temelde sıralı halde dizilmiş odacıkları bulunan parmaklar daha sık karşımıza çıkmaktadır. Söz konusu esnek pnömatik yapay parmağın tasarımını yaparken birçok değişkene dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu değişkenler; alt taban kalınlığı, alt taban kalınlığı hariç toplam kesit yüksekliği, toplam kesit genişliği, hava kanalı yarıçapı, yan duvar kalınlığı, üst duvar kalınlığı, hava kanalı üzerinde kalan duvar kalınlığı, odacıklar arası mesafe, odacık genişliği ve odacık sayısı olarak sayılabilir.

20 Shore RTV-2 Kalıp Silikonu (VRM-520) malzemesinden üretilcek olan silikon parmakların 3 farklı tipte üretilmesine karar verilmiştir. Bu tiplerin değişken özelliği parmakların duvar kalınlıkları olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada söz edilen duvar kalınlığı terimi parmak içi hacmi ile atmosfer arasında kalan minimum silikon duvar kalınlığını ifade ederken; alt taban kalınlığı, yan duvar kalınlığı, üst duvar kalınlığı ve hava kanalı üzerinde kalan duvar kalınlığı terimlerini kapsamaktadır. Diğer değişkenler tüm parmak çeşitleri için sabit tutulmuştur. Parmakların en ve boyları eşit olacağından duvar kalınlığına bağlı olarak iç hacimleri de değişmektedir. Duvar kalınlığı olarak 2 mm, 3 mm ve 4 mm duvar kalınlıkları seçilmiştir. 2 mm duvar kalınlığından daha küçük değerlerde hem kalıptan çıkarken ürüne zarar verme potansiyelinin yüksek olması hem de basınç dayanımının az olacağının öngörülmesi sebebiyle tercih edilmemiştir. Ayrıca temas edeceği bazı nesnelerin temas noktalarının

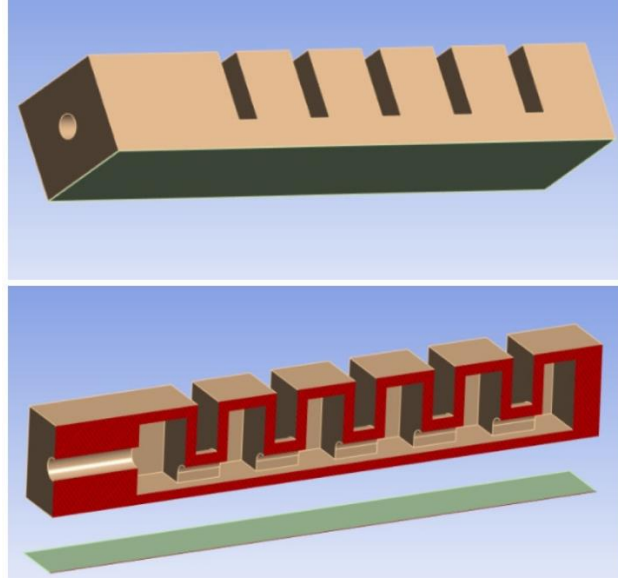
ince duvarlara zarar verebileceği düşünülmüştür. 4 mm duvar kalınlığından daha büyük değerlerde hem odacık hacminin oldukça azalması hem de karakter olarak yapının geleneksel sert kavrayıcılara yaklaşması sebebiyle tercih edilmemiştir. Konnektör bağlantısı yapılmamış silikon parmaklar, silikon üst gövde, silikon alt taban ve alt tabana gömülü cam elyaf şeridi olmak üzere toplam üç parçadan oluşmaktadır. Üst gövdenin odacıklarına ait yan duvarlar, basınç altında şişerek birbirlerinden uzaklaşma eğilimi göstermektedir. Basınçlı havanın tüm odacıklara ulaşması için parmak boyunca bir hava kanalı mevcuttur. Ayrıca üst gövdenin başında, basınçlı havanın parmağın içerisine girişini ve çıkışını sağlamak üzere bir delik bulunmaktadır. Nesnelere temas edecek olan ilk nokta parmağın ucu olduğundan, en uçtaki odacık tüm parmak çeşitlerinde sabit tutulmuş ve parmak ucu duvar kalınlığı diğer duvarlara göre kalın tutulmuştur. Böylece nesnelere temas halinde parmağa zarar verilmesinin önüne geçilmiştir. Alt taban parçasının temel amacı parmak içerisinde kapalı bir alan oluşturmaktır. Buna ek olarak basınç altında uzama eğilimi gösteren üst gövde parçasının uzamasını engelleyerek tüm basınç kuvvetini eğilme hareketine aktarmaktadır. Uzamayı engelleyecek unsur olarak alt tabanın içerisine gömülmüş olan cam elyaf şeridi seçilmiştir. Cam elyaflar kompozit malzeme üretiminde sıkça kullanılmakta olup, ucuz olmaları, yanmamaları, kopmaya ve yırtılmaya karşı dirençli olmaları ve eğilip bükülebildiklerinden kolay şekil verilebilmeleri sebebiyle tercih edilmektedirler. Alt taban parçasının eni ve boyu, üst gövde parçasının eni ve boyu ile eşit tasarlanmıştır. Alt taban parçasının kalınlığı ise üst gövde duvar kalınlığı ile eşit tutulmuştur. Parmakların tasarımı ve ölçüleri Şekil 2.39’da gösterilmiştir. Parantez içerisinde verilen değerler, tüm parmak tipleri için değişmez ölçülerdir.



Şekil 2.39. Üretimi tamamlanmış parmakların ölçüleri.

2.3.2. Sonlu elemanlar analizi

Tasarlanan parmakların üretiminden önce performanslarının incelenmesi ve değişken olarak belirlenen duvar kalınlığı parametresinin parmak davranışlarını nasıl etkilediğini görmek amacıyla sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Analizler, mühendislik alanında sıkça kullanılan bir simülasyon programı olan ve 2D veya 3D tasarımlar yapıldıktan sonra ürünler üretilmeden sanal ortamda simüle edilmesine olanak sağlayan Ansys programı ile yapılmıştır. Böylelikle parmaklarda oluşabilecek istenmeyen durumların, herhangi bir üretim ve zamanlama maliyeti oluşmaksızın, önüne geçilebilir olmasına ve gerekli görüldüğü halde tasarım değişikliği ile problemlerin iyileştirilmesine olanak sağlanmıştır. Analizler Ansys Workbench içerisinde bulunan Static Structural modülünde çözdürülmüştür. Parmakların silikon gövdeleri için daha önce Tablo 2.10'da verilen VRM-520 malzemesinin ortalama gerilme ve ortalama gerinim değerleri malzeme özelliği olarak tanımlanmıştır. Silikon malzemenin yoğunluk değeri tedarikçi firmadan temin edilmiş ve 1150 kg/m^3 olarak tanımlanmıştır. Malzeme mekanik davranışının modellenmesi için hiperelastik malzeme modeli olan Yeoh 2. derece malzeme modeli kullanılmıştır. Bu model yalnızca tek eksenli gerilme verilerini kullanarak sonuca ulaşmayı sağlar. Böylece malzemeyi tanımlamak için gerekli olan deney sayısı tek bir deneye indirgenmiş olur (Yeoh, 1993). Uzayamazlık sağlayan cam elyafın malzeme tanımlanması için Ansys malzeme kütüphanesinde hazır olarak bulunan E-glass malzeme kullanılmıştır. E-glass malzemenin yoğunluğu 2600 kg/m^3 ve young modülü 73 GPa olarak tanımlanmıştır. Analizde kullanılacak olan katı model, Solidworks programında 2 parça halinde oluşturulmuştur. Alt taban toplam kalınlığından cam elyafın kalınlığı olan 0,15 mm çıkartılmış ve alt taban, üst gövdeyle tek parça silikon haline getirilmiştir. Oluşturulan gövdenin alt yüzeyine cam elyafı temsil eden 0,15 mm bir katman daha oluşturulmuştur. Birbirine yapışık olarak konumlanmış 2 parça parasolid formatında kaydedilerek Ansys'e aktarılmıştır. Bu işlem 2, 3 ve 4 mm duvar kalınlığına sahip parmaklar için yapılmıştır. Oluşturulan geometrilerin örnek bir görüntüsü Şekil 2.40'ta paylaşılmıştır.



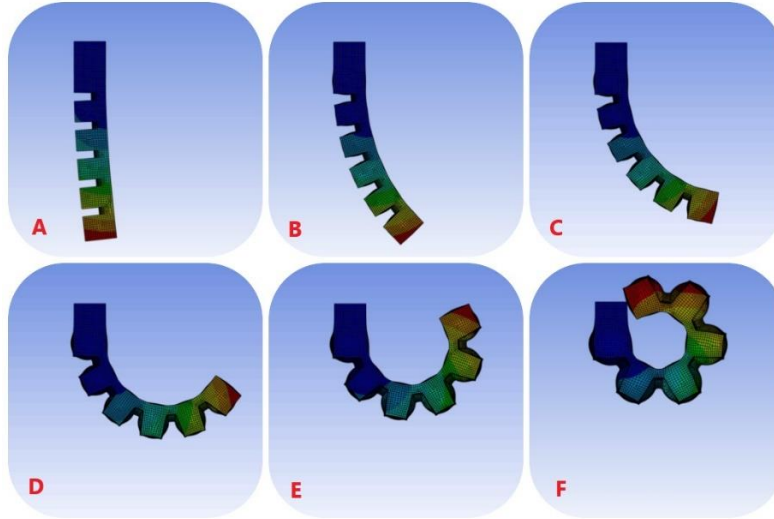
Şekil 2.40. Sonlu elemanlar analizinde kullanılacak geometri.

Ansys Mechanical içerisinde parmakların gerçeğe en yakın şekilde hareket edebilmesi için bazı kontaklar kullanılmıştır. Basınç uygulandığı durumda birbirine bakan odacık dış duvarlarının birbirlerine temas etmeleri halinde birbiri içlerine geçmemesi, aynı zamanda temastan doğacak etkileri birbirlerine aktarmaları için odacık dış duvar yüzeyleri arasında Frictionless kontak tanımlanmıştır. Maksimum eğilme açısı durumunda parmak ucunun, alt gövdenin içerisine geçmesini engellemek ve temas etkilerinin aktarılmasını sağlamak için parmak ucu yüzeyi ile alt taban yüzeyi arasında Frictionless kontak uygulanmıştır. Basınç uygulandığı sırada alt taban cam elyaf yüzeyinin silikon gövde yüzeyinden ayrılmamasını sağlamak ve aynı zamanda parmağın uzamasını engellemek amacıyla üst gövdenin alt yüzeyi ile alt gövdenin üst yüzeyi arasında Bonded kontak uygulanmıştır. Kullanılan cam elyaf 2 yönde de uzayamaz olduğundan alt gövde yan yüzeyleri ile üst gövde yan yüzeyleri arasında Bonded kontak uygulanmıştır. Böylece üst gövdenin alt yüzeyi her yönden uzayamaz olarak tanımlanmış olmuştur.

Hiperelastik malzeme analizi yapıldığından yapılan tüm analizlerde Nonlinear Mesh kullanılmıştır. Element geçişlerini yumuşatmak için Capture Curvature ve Capture Proximity seçenekleri aktif hale getirilmiştir. Tüm geometrilerde MultiZone metodu ile Hexahedron elementler kullanılmıştır. Geçiş bölgelerinde Hexahedron element uygulanamadığı durumlarda Tetrahedron veya Pyramid elementler kullanılmıştır. Mesh element boyutu 1 mm olarak belirlenmiştir. Alt parçaya Sizing metodu ile 0,5 mm element boyutu tanımlanmıştır. Mesh uygulamasının ardından 2 mm duvar

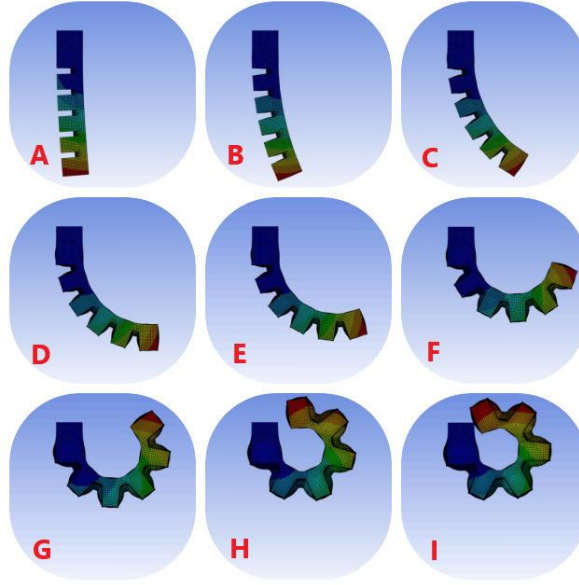
kalınlığına sahip parmak 187416 elementten ve 306096 bağlantı noktasından, 3 mm duvar kalınlığına sahip parmak 178087 elementten ve 287483 bağlantı noktasından, 4 mm duvar kalınlığına sahip parmak ise 188576 elementten ve 301628 bağlantı noktasından oluşmaktadır. Oluşturulan tüm meshlerin kalitesinin geçerli olması adına ideal eleman ile mevcut eleman arasındaki çarpıklığı ifade eden Skewness değeri 1'e yakın, elemanların en büyük kenarı ile en küçük kenarı arasındaki oranını ifade eden Aspect Ratio değeri 10'dan küçük ve hacmin alana oranı temeline dayanan Element Quality değeri 1'e yakın tutulmuştur.

Hiperelastik malzeme analizi yapıldığından büyük yer değiştirmelere izin veren Large Deflection özelliği aktif hale getirilmiştir. Parmak, hava giriş deliğinin bulunduğu yüzeyden Fix Support ile sabitlenmiştir. Ardından sabitlenmiş yüzeye dik ve parmak ucuna doğru olacak şekilde $9,8 \text{ m/s}^2$ değerinde yer çekimi ivmesi tanımlanmıştır. Parmağın içinde kalan tüm yüzeyler, basınç uygulanmak üzere seçilmiştir. Basınç değeri 0 bar'dan başlayarak, parmak ucunun parmak alt yüzeyine temas ettiği basınç değerine kadar 0,1 bar'lık artışlarla artırılmıştır. Tüm analizler her bir duvar kalınlığına sahip parmak için tekrarlanmış ve toplam deformasyon karakteristikleri incelenmiştir. 2 mm duvar kalınlığına sahip parmak ile yapılan analizler sonucunda elde edilen eğilme tepkileri Şekil 2.41'de gösterilmiştir.



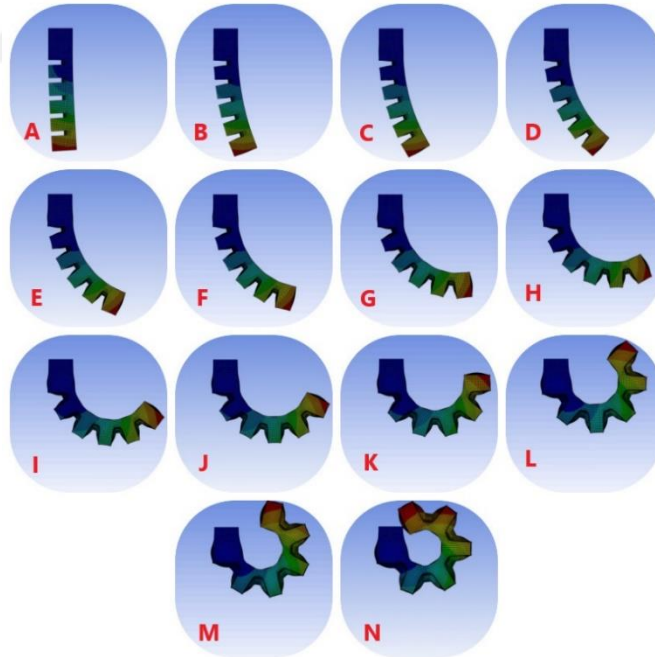
Şekil 2.41. $t = 2 \text{ mm}$ duvar kalınlığına sahip parmağın eğilme performansı analiz sonuçları: A) 0 bar, B) 0,1 bar, C) 0,2 bar, D) 0,3 bar, E) 0,4 bar, F) 0,5 bar.

3 mm duvar kalınlığına sahip parmak ile yapılan analizler sonucunda elde edilen eğilme tepkileri Şekil 2.42'de gösterilmiştir.



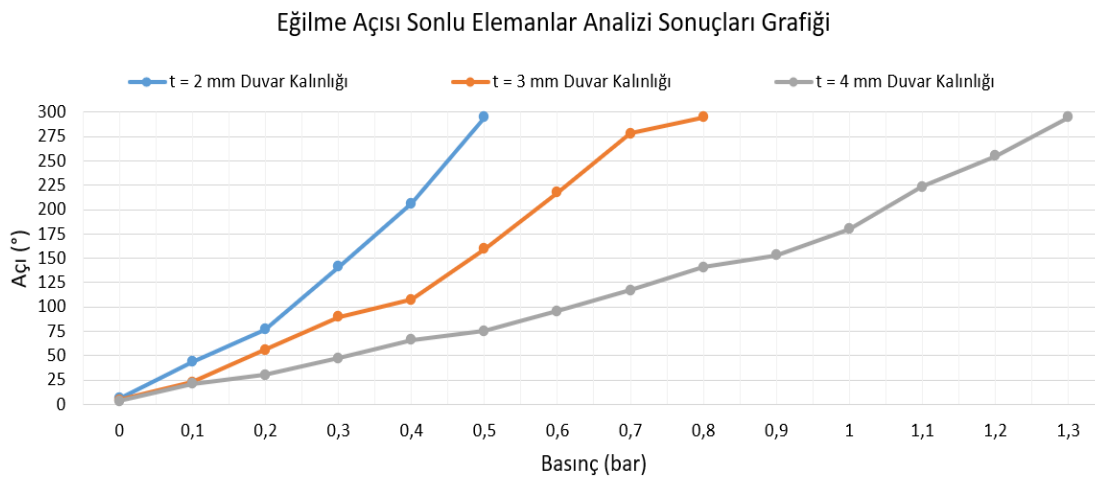
Şekil 2.42. $t = 3$ mm duvar kalınlığına sahip parmağın eğilme performansı analiz sonuçları: A) 0 bar, B) 0,1 bar, C) 0,2 bar, D) 0,3 bar, E) 0,4 bar, F) 0,5 bar, G) 0,6 bar, H) 0,7 bar, I) 0,8 bar.

4 mm duvar kalınlığına sahip parmak ile yapılan analizler sonucunda elde edilen eğilme tepkileri Şekil 2.43'te gösterilmiştir.



Şekil 2.43. $t = 4$ mm duvar kalınlığına sahip parmağın eğilme performansı analiz sonuçları: A) 0 bar, B) 0,1 bar, C) 0,2 bar, D) 0,3 bar, E) 0,4 bar, F) 0,5 bar, G) 0,6 bar, H) 0,7 bar, I) 0,8 bar, J) 0,9 bar, K) 1,0 bar, L) 1,1 bar, M) 1,2 bar, N) 1,3 bar.

Sonlu elemanlar analizleri ile elde edilen eğilme açıları, parmak ucu yüzeyinin zemin düzlemi ile yaptığı açığı ifade etmektedir. Analiz sonuçlarına göre 2 mm duvar kalınlıklı parmak 0,5 bar basınçta maksimum eğilme açısı değeri olan 295° açığa ulaşmaktadır. 3 mm duvar kalınlıklı parmak 0,8 bar basınçta maksimum eğilme açısı değeri olan 295° açığa ulaşmaktadır. 4 mm duvar kalınlıklı parmak ise 1,3 bar basınçta maksimum eğilme açısı değeri olan 295° açığa ulaşmaktadır. Basıncsız durum olan 0 bar basınç değerinde, yer çekiminin etkisi ile parmaklarda bir miktar eğilme açısı gözlemlenmektedir. Gözlemlenen eğilme açıları 2 mm duvar kalınlığına sahip parmakta 6°, 3 mm duvar kalınlığına sahip parmakta 4,4° ve 4 mm duvar kalınlığına sahip parmakta 3,3° olarak belirlenmiştir. Basıncsız durumda eğilme açısının 0°'den farklı olmasının sebebi parmakların geometrik şekilleri ile açıklanabilir. Parmaklar sahip oldukları tasarımları sebebiyle tek yöne eğilme hareketi sergilemeye meyillidirler. Tek yöne eğilme isteği durumu bir miktar eğilme açısı oluştursa da bu durumu açıklayan tek sebep olarak sayılamaz. Temel olarak cam elyaf takviyesi sayesinde uzayamaz hale gelen alt taban, parmağın yerçekimi etkisine doğru hareket etmesini engellemek ister. Silikon gövdenin odacıkları yerçekimine doğru uzamak isterken, cam elyaf takviyeli alt taban uzamadığından parmak içe kıvrılma eğilimi gösterir. Bu durum bir miktar eğilme açısı oluşmasına sebep olur. Bahsedilen iki etken bir araya geldiğinde, sistem basıncsız durumdayken parmak ucu yüzeyi zemine paralel konumlanamaz. Yapılan analizler ile elde edilen sonuçları özetleyen grafik Şekil 2.44'te verilmiştir.



Şekil 2.44. Eğilme açısı sonlu elemanlar analizi sonuçları grafiği.

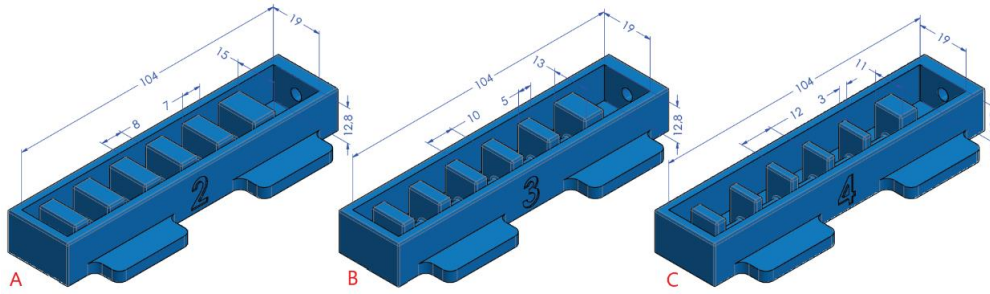
Oluşturulan grafiğin sayısal değerlere dönüştürülmüş hali ise Tablo 2.11’de verilmiştir. Değerler incelendiğinde duvar kalınlığının artmasının, eğilme performansını doğrudan etkilediği gözlemlenmiştir. Duvar kalınlığının artması durumunda eğilme açısında azalma görülmüştür. Kalınlık artışı aynı zamanda sisteme uygulanabilir basınç değerlerini de artırmıştır. Bu durum, her ne kadar eğilme performansında düşüş olarak görülse de ara pozisyon kontrolü açısından bir avantaj olarak sayılabilir.

Tablo 2.11. Eğilme açısı sonlu elemanlar analizi sonuçları.

t = 2 mm		t = 3 mm		t = 4 mm	
P (bar)	θ (°)	P (bar)	θ (°)	P (bar)	θ (°)
0	6	0	4,4	0	3,3
0,1	43,6	0,1	22,9	0,1	21,3
0,2	77,2	0,2	55,8	0,2	30,2
0,3	141,5	0,3	90	0,3	47,4
0,4	206,5	0,4	107,3	0,4	66,1
0,5	295	0,5	159,5	0,5	75,3
-	-	0,6	217,6	0,6	95,6
-	-	0,7	278,4	0,7	117,3
-	-	0,8	295	0,8	140,7
-	-	-	-	0,9	153,1
-	-	-	-	1	179,9
-	-	-	-	1,1	223,4
-	-	-	-	1,2	255,2
-	-	-	-	1,3	295

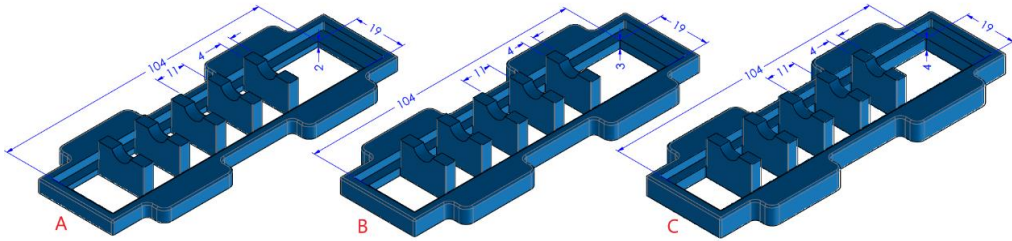
2.3.3. Kalıpların üretilmesi

Üç farklı duvar kalınlığına sahip olacak şekilde tasarlanan silikon parmakların üretilmesi için kalıp üretimine ihtiyaç duyulmuştur. Üretimde kullanılacak kalıplar, 3D tasarım yapmaya olanak sağlayan SolidWorks programı ile tasarlanmıştır. Kalıplar üç parçadan oluşmaktadır. Bir adet M5x25 cıvata ile kullanılması gereken ve Şekil 2.45'te gösterilen 1. parça, silikon parmağın dış yüzeyini ve odacıkların dış şeklini oluşturmaktadır.



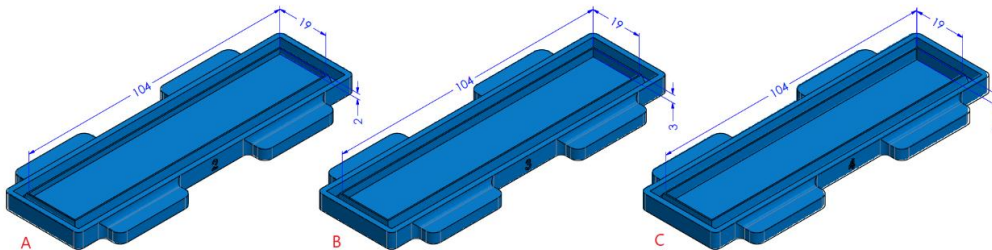
Şekil 2.45. Dış yüzey kalıplarının 3D tasarımı ve ölçüleri: A) 2 mm duvar kalınlıklı kalıp, B) 3 mm duvar kalınlıklı kalıp, C) 4 mm duvar kalınlıklı kalıp.

Şekil 2.46'da gösterilen 2. parça, silikon parmağın iç odacıklarını oluşturmaktadır.



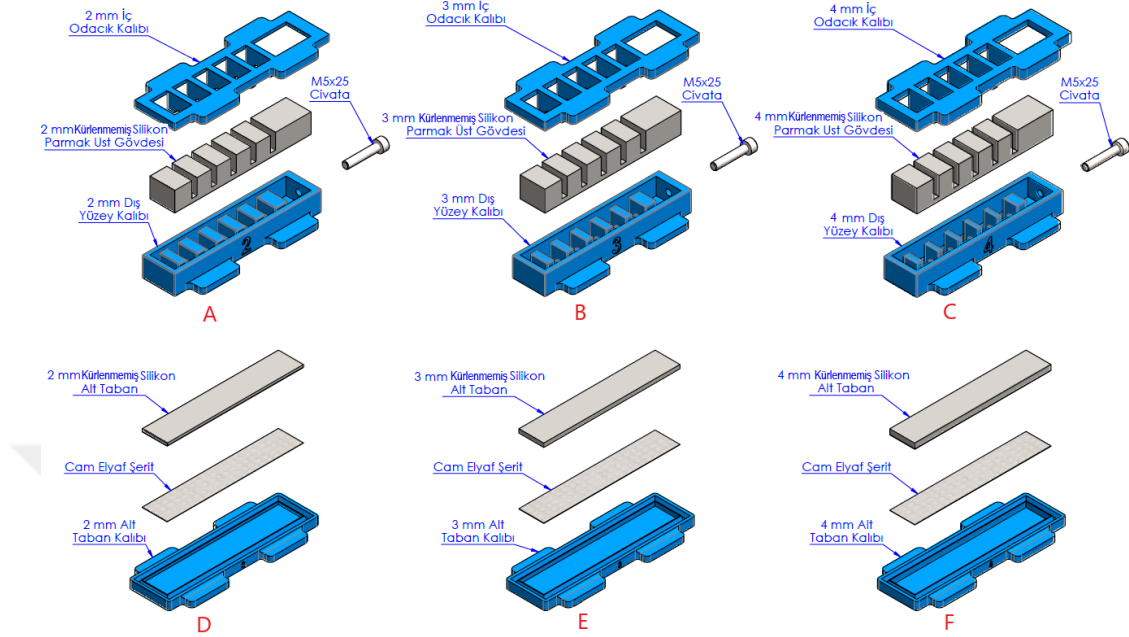
Şekil 2.46. İç odacık kalıplarının 3D tasarımı ve ölçüleri: A) 2 mm duvar kalınlıklı kalıp, B) 3 mm duvar kalınlıklı kalıp, C) 4 mm duvar kalınlıklı kalıp.

Şekil 2.47'de görülen 3. parça ise silikon parmağın uzayamaz alt kapağını oluşturmaktadır.



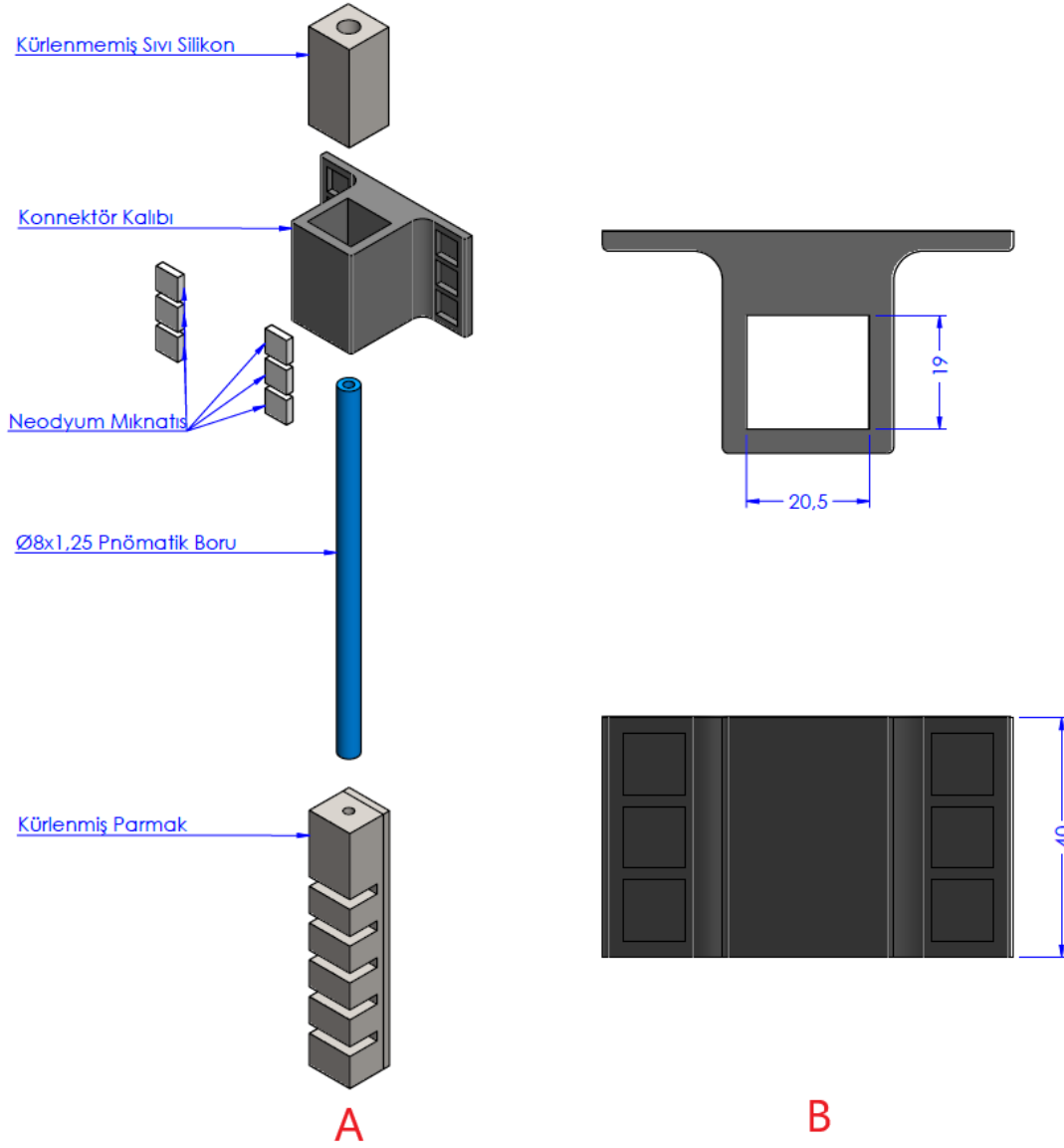
Şekil 2.47. Alt parça kalıpların 3D tasarımı ve ölçüleri: A) 2 mm duvar kalınlıklı kalıp, B) 3 mm duvar kalınlıklı kalıp, C) 4 mm duvar kalınlıklı kalıp.

Kalıplar tasarlandıktan sonra sanal olarak montajlanarak uygunlukları kontrol edilmiştir. Montaj tasarımı Şekil 2.48’de gösterilmiştir.



Şekil 2.48. Kalıpların montajlanması: A) 2 mm duvar kalınlıklı üst gövdenin kalıplanması, B) 3 mm duvar kalınlıklı üst gövdenin kalıplanması, C) 4 mm duvar kalınlıklı üst gövdenin kalıplanması, D) 2 mm duvar kalınlıklı alt tabanın kalıplanması, E) 3 mm duvar kalınlıklı alt tabanın kalıplanması, F) 4 mm duvar kalınlıklı alt tabanın kalıplanması.

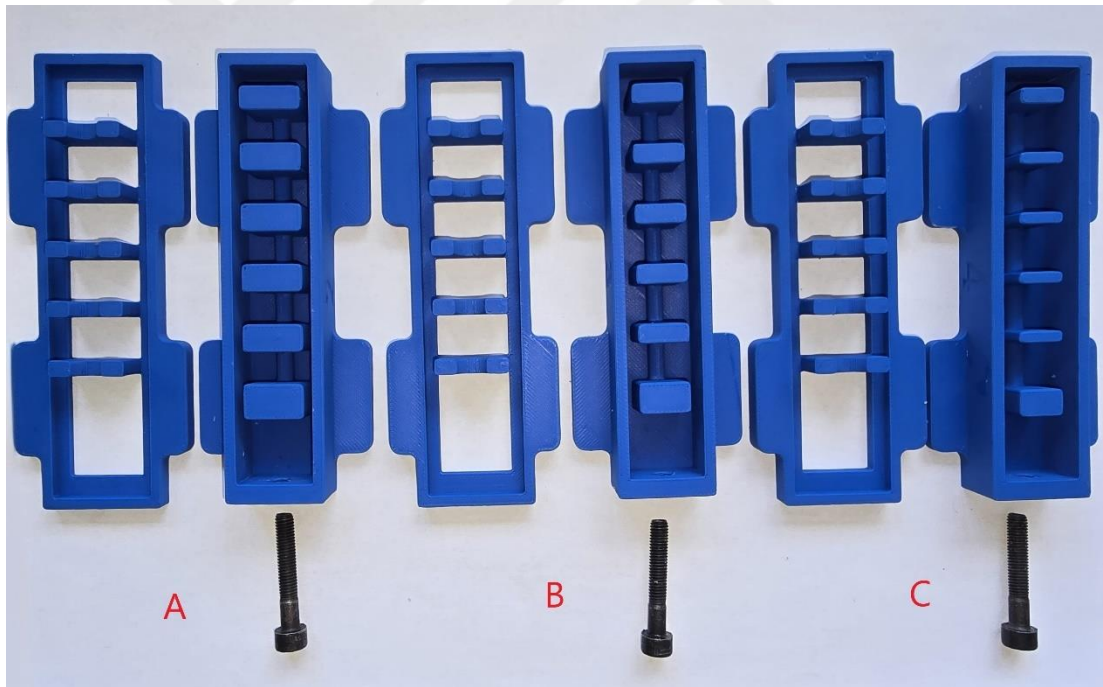
Silikon parmaklara hava girişini ve çıkışını sağlayacak düzeneği üretmek için Şekil 2.49’da gösterilen konnektör bağlantısı kalıplarına ihtiyaç vardır. Parmaklara hava girişi-çıkışı sağlamak amacıyla Ø8x1,25 pnömatik boru kullanılmıştır. Boru, parmakların M5x25 Cıvata ile oluşturulan deliğine sokulduktan sonra sabitlenmesi için tekrar sıvı silikon dökümü yapılmıştır. Konnektör bağlantısı kalıbı dik durması için metal bir yüzeye mıknatıslar yardımıyla sabitlenmektedir.



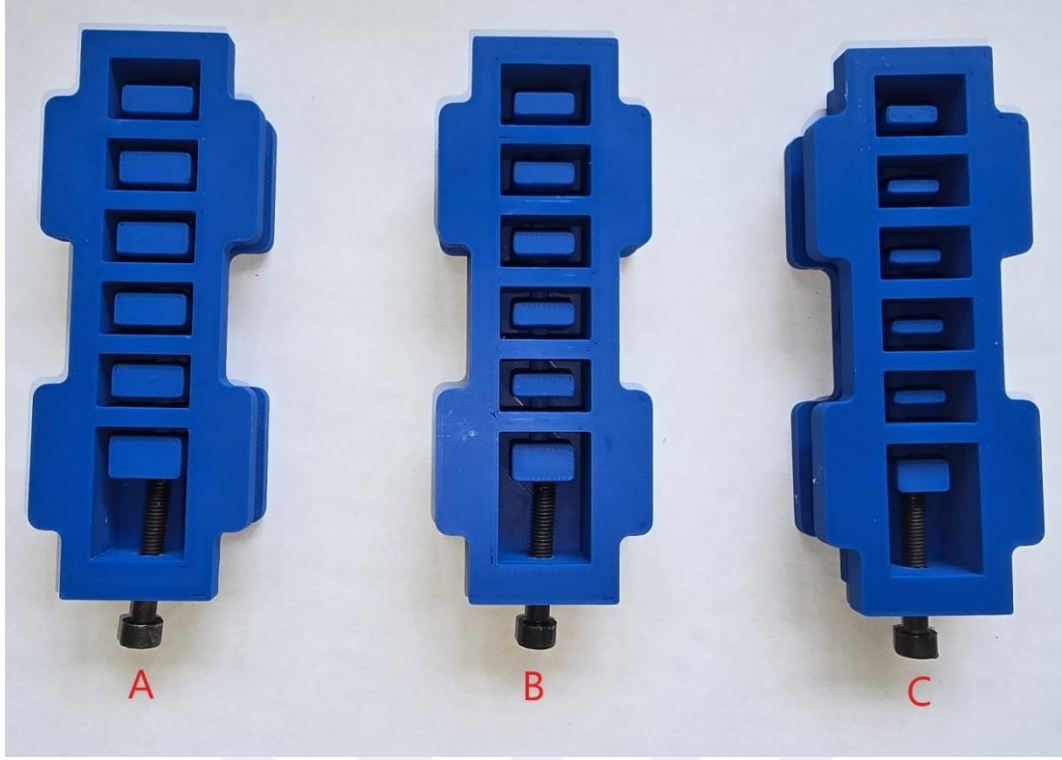
Şekil 2.49. Konnektör bağlantısı kalıbı tasarımı: A) Konnektörün kalıplanması, B) Konnektör kalıbının tasarımı ve ölçüleri.

Kalıpların, son zamanlarda sıkça tercih edilen eklemeli imalat yöntemlerinden biri olan, 3D yazıcı ile üretilmesine karar verilmiştir. Ekonomik oluşu, hızlı prototipleme özelliği, hatalara kolay müdahale edilebilmesi, ulaşılabilir oluşu ve diğer metotlara göre risksiz oluşu gibi avantajlar, bu yöntemin tercih edilmesine sebep olan başlıca etmenler arasında sayılabilir. Kalıp parçaları Bambu Lab X1C marka 3D yazıcı ve Uzaras marka 1,75 mm kalınlığa sahip PLA Plus filament kullanılarak üretilmiştir. SolidWorks programında tasarlanan katı modeller, STL formatında kaydedilerek Bambu Lab Studio programına aktarılmıştır. Bambu Lab Studio programı, Bambu Lab marka 3D yazıcılar için özel olarak geliştirilmiş dilimleme (slicer) aracıdır. Bu program sayesinde 3D yazıcının algılayabildiği, katı modele özel G kodları

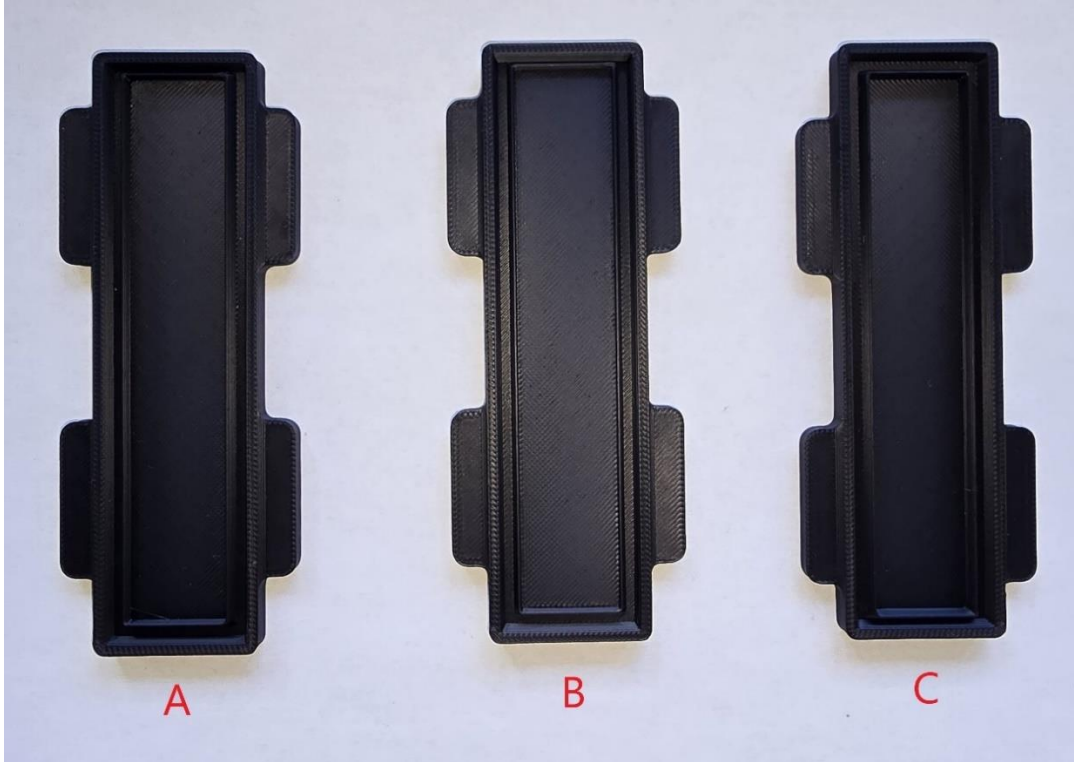
oluşturulur. Ayrıca baskı boyunca yazıcıyı uzaktan kontrol etmeye olanak tanır. Bambu Lab Studio programında, baskıya özel olarak ayarlanabilen bazı temel parametreler bulunmaktadır. Katman kalınlığı, her bir katmanın kalınlığını belirler ve bu değer arttıkça baskı kalitesi azalmakta fakat baskı hızı artmaktadır. Doluluk oranı, modelin iç yapısındaki baskı sıklığını belirler ve bu değer arttıkça parça daha mukavim olmakta fakat baskı süresi ile malzeme tüketimi artırmaktadır. Baskı hızı, parçanın üretileceği süreyi belirler ve bu değer arttıkça baskı süresi azalmakta fakat parçanın yüzey kalitesi bozulmaktadır. Destek yapıları, parçanın tabla ile temas etmeyen veya havada kalan bölgelerini destekleyen yapılardır. Gerekli olduğu durumlarda eklenmezse modelin ilgili bölgeleri çöküp bozulmakta fakat gereğinden fazla eklenirse baskı sonrası temizleme süreci zorlaşmakta ve malzeme israfı oluşmaktadır. Kalıpların mukavemetli ve pürüzsüz yüzeylere sahip olması amaçlandığından %100 doluluk oranı, standart baskı hızı, 0,2 mm standart katman kalınlığı kullanılmıştır. Baskı ile elde edilen kalıplar Şekil 2.50, Şekil 2.51, Şekil 2.52 ve Şekil 2.53'te gösterilmiştir.



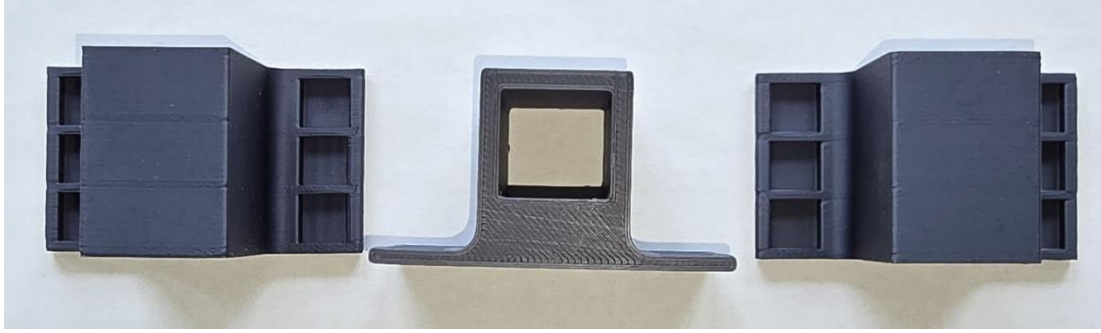
Şekil 2.50. Baskı sonrası üst gövde kalıpları: A) 2 mm duvar kalınlıklı üst gövdenin kalıpları, B) 3 mm duvar kalınlıklı üst gövdenin kalıpları, C) 4 mm duvar kalınlıklı üst gövdenin kalıpları.



Şekil 2.51. Baskı sonrası üst gövde kalıplarının montajlanması: A) 2 mm duvar kalınlıklı üst gövdenin kalıpları, B) 3 mm duvar kalınlıklı üst gövdenin kalıpları, C) 4 mm duvar kalınlıklı üst gövdenin kalıpları.



Şekil 2.52. Baskı sonrası alt taban kalıpları: A) 2 mm duvar kalınlıklı alt taban kalıbı, B) 3 mm duvar kalınlıklı alt taban kalıbı, C) 4 mm duvar kalınlıklı alt taban kalıbı.

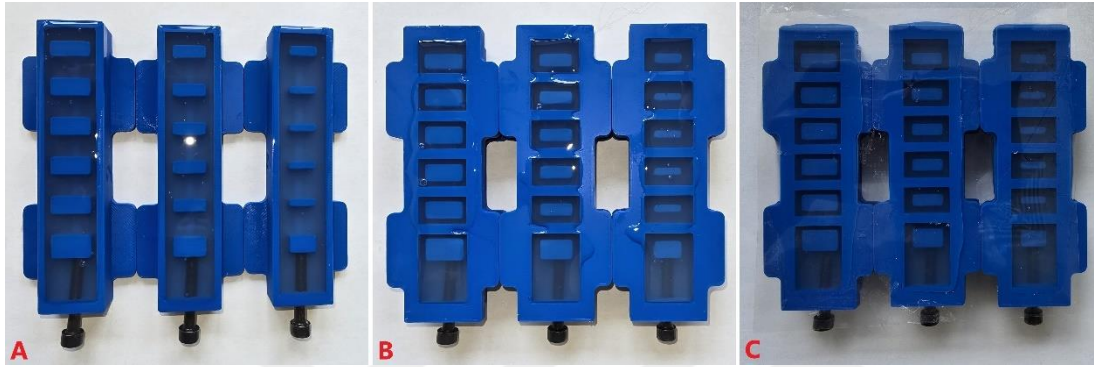


Şekil 2.53. Baskı sonrası konnektör kalıpları.

2.3.4. Silikon parmakların üretilmesi

3 farklı duvar kalınlığına sahip parmaklar, 20 Shore RTV-2 Kalıp Silikonu (VRM-520) malzemesinden 2.2.2.1. bölümde paylaşılan üretim metoduna uygun olarak üretilmiştir. Temiz bir karıştırma kabı seçilerek hassas teraziye yerleştirilmiş ve terazinin darası alınmıştır. Kürlenmemiş 20 Shore sıvı silikon hammaddesi kullanım öncesi çalkalanarak karıştırılmıştır. Karıştırılan kürlenmemiş silikon hammadde, yeterli miktarda karıştırma kabına dökülmüştür. Karıştırma kabına, kürlenmemiş silikon hammadde kütlesinin %2'si kadar katalizör eklenmiştir. Karıştırma kabına eklenen iki hammadde homojen olana dek karıştırılmıştır. Fazla karıştırma durumunda belirli noktalarda kürlenme başlayacağından karıştırma işlemi yavaş ve gereği kadar yapılmıştır. Karışımın içerisindeki hava kabarcıklarını uzaklaştırmak ve daha pürüzsüz bir sıvı silikon elde etmek için vakum tankı kullanılmıştır. Vakum tankı -1 bar negatif basınca ulaştıktan sonra 2-3 dakika vakum uygulanmıştır. Karışımındaki kimyasal gazların karışımından uzaklaşmasını en aza indirmek amacıyla vakum süresi kısa tutulmuştur. Döküm yapılacak olan kalıplar toz, silikon, plastik gibi bozucu etmenlerden arındırılmak amacıyla önceden temizlenmiştir. Döküm yapılacak olan tüm kalıpların silikon ile temas edecek yüzeylerine kalıp ayırıcı sprej sıkılmıştır. Bu işlem kürlenmenin ardından parçaların kendilerine ve kalıba zarar vermeden kalıptan ayrılmasını sağlamaktadır. Sıvı silikon karışımı tüm kalıplara tek bir noktadan ve 15 cm yükseklikten yavaş yavaş dökülmüştür. Bu uygulama döküm sırasında hava kabarcığı oluşmaması ve homojen bir yayılma olması amacıyla yapılmaktadır. Döküm işlemi ilk olarak dış yüzey kalıplarına yapılmıştır. Dış yüzey kalıplarına M5x25 cıvatalar monte edildikten sonra kalıpların iç hacimleri tamamen sıvı silikon ile doldurulmuştur. Ardından iç odacık kalıpları, dış yüzey kalıplarına yerleştirilmiştir. Yerleştirme işlemi sonrası eksik kalan bölgeler sıvı silikon takviyesi ile doldurulmuştur. Doldurma işlemi iç odacık kalıplarının üst yüzeylerine sıvı silikon

taşana kadar yapılmıştır. Döküm işleminin ardından oluşan hava kabarcıklarının yüzeye çıkması için 5 dakika beklenmiştir. Kürlenme işlemi başlamış olduğundan daha fazla beklenmemesi tavsiye edilmektedir. Yüzeye ulaşan hava kabarcıklarını ile fazla silikonu uzaklaştırmak ve daha düz bir üst yüzey oluşturmak için üst yüzeye asetat kâğıdı serilmiş ve fazla silikon sıyrılmıştır. Sıyırma işlemi sonrasında kürlenme boyunca kalıpta açılma olmaması için asetat kâğıdının üzerine ağırlık konularak 24 saat boyunca kürlenmeye bırakılmıştır. İlgili aşamalar Şekil 2.54'te gösterilmiştir.



Şekil 2.54. Üst gövde üretimi: A) Dış yüzey kalıbına sıvı silikon dökülmesi, B) İç odacık kalıbının dış yüzey kalıbına yerleştirilmesi ve sıvı silikon dökülmesi, C) Kalıpların üzerine asetat kâğıdı serilmesi.

Uzayamaz alt tabanın üretilmesi için alt taban kalıpları kullanılmıştır. Uzayamazlığın sağlanabilmesi için Şekil 2.55'te gösterilen 20 mm genişliğe, 0,2 mm kalınlığa ve 225 g/m² örgü sıklığına sahip cam elyaf kumaş bant (Kompozitshop) kullanılmıştır. Cam elyaf kumaş bantlar, standart cam elyaf kumaşlarının istenilen genişlikte dokunmuş formudur. Bu tür bantların kenar kısımları dikişli olduğundan, kumaşları şerit halinde kesme durumunda liflerde dağılma sorunu yaşanmamaktadır. Kütle yoğunluğu ise 1 metrekarelik bir kumaşın ne kadar malzeme içerdiğini kütle cinsinden ifade etmektedir. Kütle yoğunluğu arttıkça kumaş daha sert ve kalın hale gelmektedir. Kumaşlar genellikle 50 g/m² ile 1000 g/m² kütle yoğunluğu arasında değerler almaktadır. 50 g/m² ile 200 g/m² arasındaki kumaşlar yüzey kaplama ve kalıp modeli çıkartma amacıyla kullanılan ince malzemelerdir. 200 g/m² ile 400 g/m² arasındaki kumaşlar hem esnek hem de orta seviye yükleri taşıyabilen kumaşlardır. 400 g/m² ve üzerindeki kumaşlar ise daha ağır yük altında çalışacak kalın kumaşlardır. Uzayamaz tabanın rahatlıkla bükülebilir olması, yük altında kopmaması ve sıvı silikonun kumaş boşluklarına girerek kumaşla bütünlük sağlaması amaçlandığından, bu kriterleri sağlayan 225 g/m² kütle yoğunluğuna sahip bir örgü seçilmiştir.



Şekil 2.55. Cam elyaf şeridi.

Alt taban kalıplarının yüzeylerine ince bir sıvı silikon tabakası dökülmüştür. Kalıp boyuna uygun olarak kesilen cam elyaf şeritleri kalıpların alt tabanına yerleştirilmiştir. İnce bir tabaka şeklinde dökülen sıvı silikon ile cam elyaf şeritlerin birbirlerine tam temas etmeleri sağlanmıştır. Ardından kalıplar dolana dek sıvı silikon ilave edilmiştir. Döküm işleminden sonra 5 dakika beklenerek hava kabarcıklarının yüzeye ulaşması sağlanmıştır. Asetat kâğıdı ile fazla silikon sıyrılarak hava kabarcıkları uzaklaştırılmış ve düz bir yüzey elde edilmesi sağlanmıştır. Kalıplar bu şekilde 24 saat boyunca kürlenmeye bırakılmıştır. İlgili aşamalar Şekil 2.56’da gösterilmiştir.



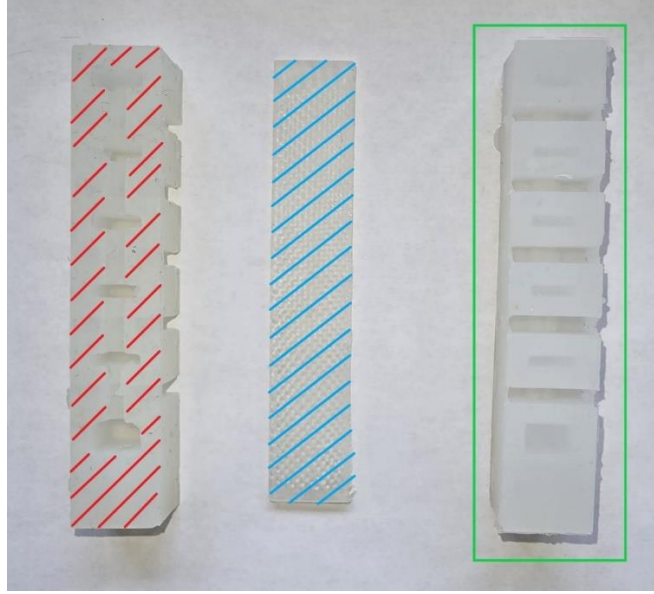
Şekil 2.56. Alt taban üretimi: A) Alt taban kalıbına cam elyaf şeridi yerleştirilmesi, B) Alt taban kalıbına sıvı silikon dökülmesi, C) Kalıpların üzerine asetat kâğıdı serilmesi.

Şekil 2.57’de görüldüğü gibi kürlenme işlemi tamamlandığında 2mm, 3mm ve 4mm odacık duvar kalınlığına sahip 3 farklı tipteki silikon parmak üst gövdesi ile 2mm, 3mm ve 4mm kalınlığa sahip 3 farklı tipteki alt taban kalıplardan çıkartılmıştır.



Şekil 2.57. Kalıptan ayırma işlemi: A) Kalıplarda kürlenmiş parçalar, B) Kalıplardan çıkartılmış parçalar.

Kalınlıkları aynı olan üst gövde ve alt taban parçaları eşleştirilmiştir. Şekil 2.58’de mavi taralı alan ile gösterilen alt taban parçalarının kalıba temas eden alt yüzeylerine sıvı silikon karışımı ince bir katman halinde sürülmüştür. Üzerlerine Şekil 2.58’de gösterilen üst gövde parçalarının kırmızı taralı yüzeyi yerleştirilmiştir. Birleştirilmiş iki parçanın Şekil 2.58’de yeşil olarak gösterilen yan yüzeylerinde oluşan birleşme noktalarına sıvı silikon karışımı ince bir katman halinde sürülmüştür. Birleştirilen parçalar bu şekilde 24 saat boyunca kürlenmeye bırakılmıştır.



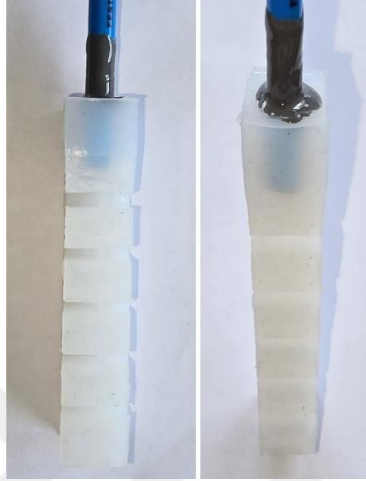
Şekil 2.58. Birleştirme işlemi.

Birleşme işleminden sonra hava giriş-çıkış deliği harici atmosfere kapalı bir iç hacme sahip olan 2 mm, 3 mm ve 4 mm duvar kalınlıklı silikon parmaklara konnektör bağlantısı eklenmiştir. Konnektör bağlantısı, parmakları esnek robotik kavrayıcıya monte edebilmek ve parmakları pnömatik olarak kontrolünü sağlayacak hava giriş-çıkış hortumunu parmaklara entegre etmek amaçlı kullanılmaktadır. Ø8x1,25 pnömatik hava hortumunun uç kısmının dış yüzeyine (deliği kapatmayacak, 15 mm yüksekliğe sahip, tüm yüzeyi kaplayacak şekilde) Şekil 2.59'da gösterilen epoksi yapıştırıcı (JalasanJ İkiz Tüp) karışımı sürülmüştür.



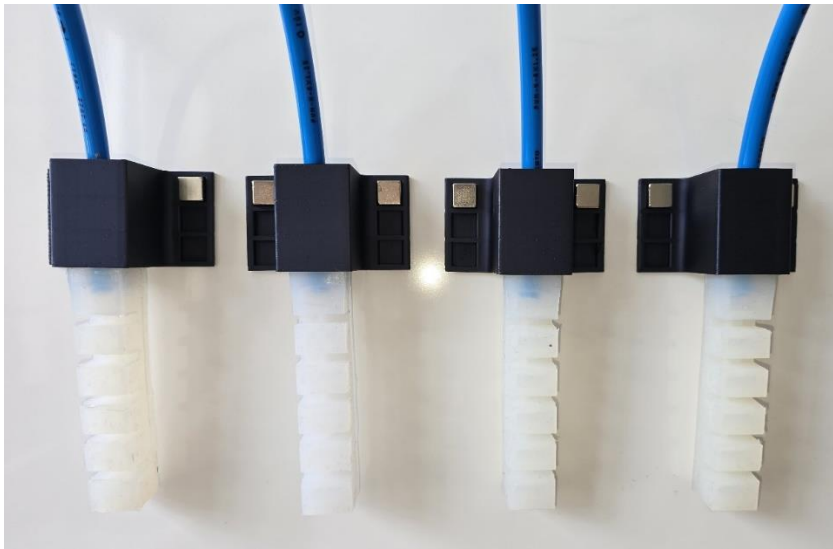
Şekil 2.59. JalasanJ İkiz Tüp epoksi yapıştırıcı.

Epoksi yapıştırıcı kutusundan çıkan iki malzeme eşit miktarda karıştırıldıktan kısa süre sonra donarak sertleşmektedir. Epoksi yapıştırıcı, plastik hortuma tutunarak silikon parmak ve konnektör silikonu arasında bir yüzey oluşturmaktadır. Bu yüzey, hortumun yerinden çıkmasını engellemektedir. Şekil 2.60'ta epoksinin uygulanış biçimi görülmektedir.



Şekil 2.60. Epoksi uygulaması.

Konnektör kalıbının sıvı silikon ile temas edecek yüzeylerine kalıp ayırıcı sprej uygulanmıştır. Epoksi ile güçlendirilmiş hava hortumu takılı silikon parmaklar konnektör kalıbına sıkıştırılmıştır. Şekil 2.61'de gözüktüğü üzere kalıbın mıknatıs yuvalarına 6 adet neodyum mıknatıs takılarak düz bir metal yüzeye sabitlenmiştir. Hazırlanan sıvı silikon karışımı kalıp taşma seviyesine gelinceye dek doldurulmuştur.



Şekil 2.61. Konnektör kalıplama işlemi.

Bu şekilde 24 saat kürlenmeye bırakılmış, ardından şekil 2.62’de görüldüğü gibi kalıptan çıkartılmıştır. Yumuşak silikon parmaklar; geometrik boyut kontrolü, yüzeysel hasar kontrolü, sızdırmazlık kontrolü gibi kalite kontrol işlemlerinin ardından kullanıma hazır hale gelmiştir.



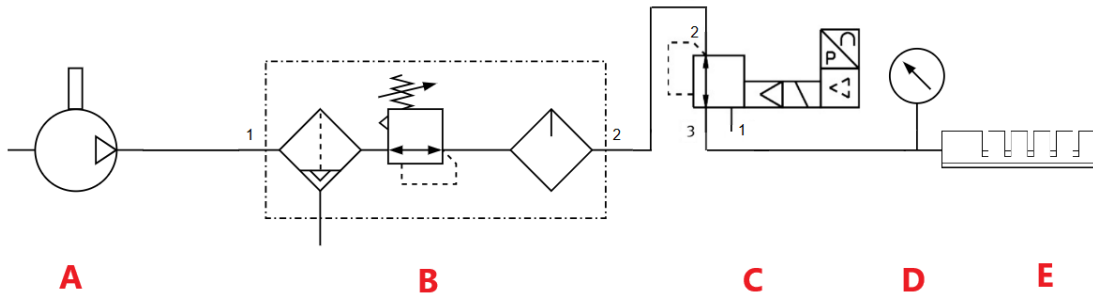
şekil 2.62. Konnektör kalıbından çıkan parçalar.

2.4. Silikon Parmakların Performanslarının Belirlenmesi

Üretilen parmakların işlevselliğini kontrol etmek amacıyla birtakım testlere tabi tutulması hedeflenmiştir. Pnömatik parmakların hangi basınç değerinde patlayacağını belirlemek en önemli etmendir. Yapılacak patlatma testleri sonucunda diğer testlerde uygulanması gereken maksimum basınç değer belirlenmiş olacaktır. Parmakların eğilebilme kabiliyetlerini ölçmek ve kıyaslamak amacıyla, önünde herhangi bir engel bulunmamak koşuluyla, parmaklara farklı değerlerde basınç vererek davranışları gözlemlenecektir. Ardından parmakların önüne sabit bir kuvvet ölçer cihazı yerleştirilerek farklı basınçlarda ürettikleri kuvvetler gözlemlenerek kıyaslanacaktır. Deneylerden elde edilen veriler sonucunda en verimli odacık duvar kalınlığına sahip silikon parmak seçilerek esnek robotik kavrayıcıda kullanılacaktır.

2.4.1. Deney düzeneği tanıtımı

Farklı tip yapay kaslar için deney düzeneği çalışmalarına rastlanmaktadır. Örneğin Şimşir ve ark. (2024) yaptıkları çalışmada KPYK'ler için kuvvet ve kasılma oranı ölçen bir düzenek tasarlamışlardır. Bu çalışmada ise EPYK'ler için eğilme açısı ve parmak ucu kuvveti ölçebilen bir deney düzeneği tasarlanacaktır. Silikon parmaklar, Şekil 2.63'te gösterilen şema ile basınçlandırılmış hava kullanılarak hareket ettirilecektir. Havanın parmaklara ulaşması için maksimum 13 bar basınç üretebilen, 500 L hacme ve 1,8 m³/dk hacimsel debiye sahip Tamsan TVK-1900TK marka kompresörden gelen 8 bar basınçlı hava, Jelpc 1/2" OU-Midi marka ikili şartlandırıcıya girmektedir. Maksimum 16 bar kapasiteli şartlandırıcı, kompresörden gelen değişken hava akışını 6 bar basınçta dengede tutmaktadır. 40 µm filtresi sayesinde havanın içerisindeki suyu ve partikülleri temizlemektedir. Ayrıca ISO VG 32 sınıfı yağ ile kuru havayı yağlayarak şartlandırıcıdan sonraki ekipmanların daha verimli çalışmasını sağlamaktadır. Şartlandırıcı ile 6 bar basınçta sabitlenen hava, 0,1 bar ile 10 bar arası basınç kontrolü sağlayabilen Festo VPPM-6L-L-1-G18-0L10H-V1P-S1 marka dijital 3 yollu oransal regülatöre girmektedir. Oransal regülatör ile istenilen çıkış basıncı elektrik akımı vasıtasıyla ayarlanmaktadır. Oransal regülatöre verilen akım ile, bu akıma karşılık gelen basınç değeri çıkış hattından tahliye edilmektedir. İstenilen çıkış değeri ayarlanarak oransal regülatörden ayrılan hava, 10 bar kapasiteye sahip Festo SPAW-P10R-G14F-2PV-M12 marka dijital basınç sensörüne girmektedir. Basınç sensörü sayesinde hat üzerindeki gerçek basınç okunarak teyit edilmektedir. Basınç sensöründen çıkan basınçlı hava silikon parmağa ulaşmaktadır. Şartlandırıcı ile silikon parmak arasındaki basınçlı hava taşınımı, 10 bar basınca dayanıklı Festo marka Ø8x1,25 pnömatik boru ile yapılmaktadır. Kompresör ile şartlandırıcı arasındaki basınçlı hava taşınımı ise 1" metal boru ile sağlanmaktadır.



Şekil 2.63. Deney düzeneği pnömatik akış şeması: A) Kompresör, B) Şartlandırıcı, C) Oransal regülatör, D) Basınç sensörü, E) Silikon parmak.

Dijital cihazlara elektrik sağlaması adına 5 V ve 3 A sabit çıkış değeri sağlayan Good Will GPC-3060D marka DC güç kaynağı kullanılmıştır. Güç kaynağı, dijital oransal regülatöre ve dijital basınç sensörüne güç sağlamaktadır. Dijital oransal regülatörü kontrol edebilmek için National Instruments USB-6341 marka veri kaydedici kullanılmış ve oransal regülatöre bağlanmıştır. Veri kaydedici sayesinde oransal regülatör, bilgisayar yardımıyla seçilen basınç değerini sisteme iletmektedir. Ayrıca bilgisayar vasıtasıyla veri seçebilmek ve parmakları kontrol edebilmek için Şekil 2.64'te gösterilen test arayüzü oluşturulmuştur.

A) PNÖMATİK YAPAY KAS LABORATUVARI

BASINÇ_SEÇ: 0.2 BAR

BASINÇ VER

TEST DURUMU: START STOP

8.11.2024 - 12:37:22

KAS TİPİ:

DOSYA ADI:

KAYIT KLASORU:

KAYDET

B) PNÖMATİK YAPAY KAS LABORATUVARI

BASINÇ_SEÇ: 0.2 BAR

BASINÇ VER

TEST DURUMU: START STOP

KAYDET

0.1 BAR

0.2 BAR

0.3 BAR

0.4 BAR

0.5 BAR

0.6 BAR

0.7 BAR

0.8 BAR

0.9 BAR

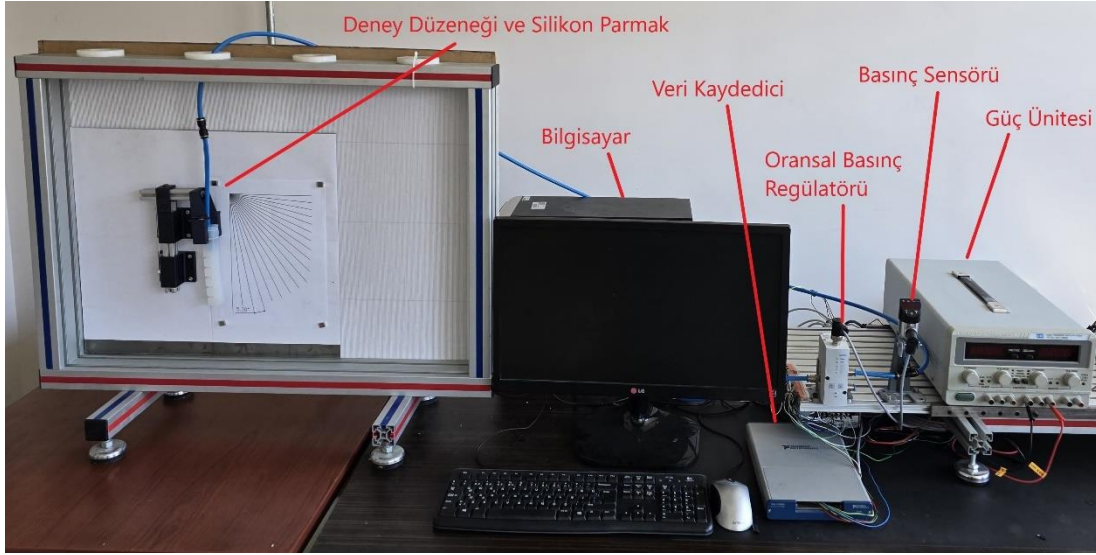
1.0 BAR

1.1 BAR

1.2 BAR

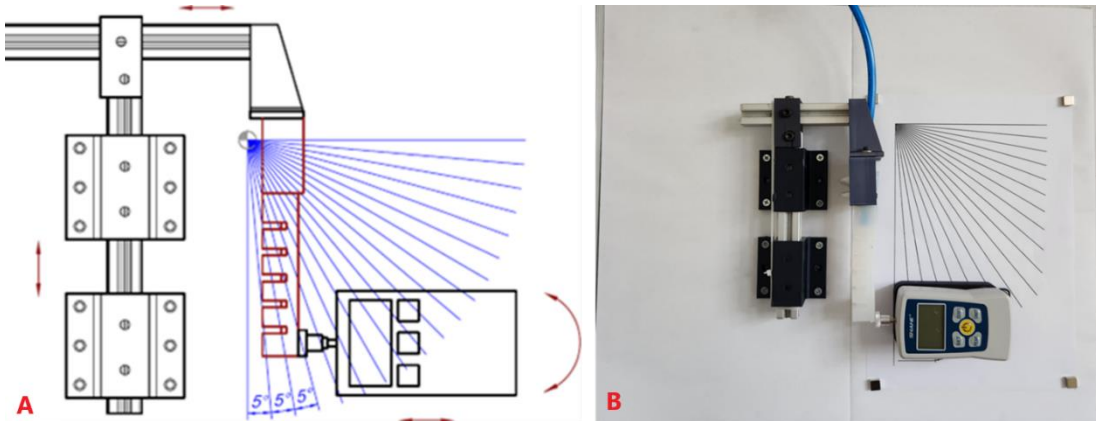
Şekil 2.64. Test arayüzü: A) Arayüzün ekranı, B) Basınç seçme menüsü.

Deney setinin arayüzünü geliştirmek amacıyla DASYLab adındaki veri toplama yazılımı kullanılmıştır. DASYLab, zorlayıcı uygulamaları kodlamaya ihtiyaç duymadan hızlı ve pratik bir şekilde oluşturmak için çeşitli araçlar ve fonksiyonlar sunmaktadır. Bu yazılım sayesinde kullanıcıların ihtiyaçlarına uygun grafik arayüzler tasarlanabilmektedir. Program, istenen arayüzleri oluşturmak için anlık analiz, kontrol ve grafiksel araçları kullanmaktadır. Arayüzün oluşturulması ile Şekil 2.65'te gösterilen deney düzeneği kullanıma hazır hale gelmiştir.



Şekil 2.65. Deney düzeneği.

Eğilen pnömatrik yapay kas parmağı sabitlemek için Şekil 2.66’da gösterilen tutucu standı tasarlanmıştır. Tutucu plastikler 3D yazıcı kullanarak PLA malzemedan üretilmiştir. Gövde için 20x20 alüminyum sigma profil kullanılmıştır. Düzenek arka plan tahtasına vidalanarak sabitlenmiştir. Bu düzenek sayesinde yapay parmak, serbest haldeyken zemine dik bir şekilde konumlanabilmektedir. Kuvvet ölçümleri için 500 N maksimum kapasiteli ve 0,01 N hassasiyete sahip Shane AMF-20 marka dijital kuvvet ölçer kullanılmıştır. Dijital kuvvet ölçerin arka yüzeyine 3D yazıcı kullanılarak PLA malzemedan üretilmiş tutucu takılmış, bu tutucuya neodyum mıknatıs eklenerek standda tutunması sağlanmıştır. Arka plana 5° açılı referans kâğıdı yapıştırılmıştır. Bu sayede parmakların hareketleri daha net algılanabilecektir.



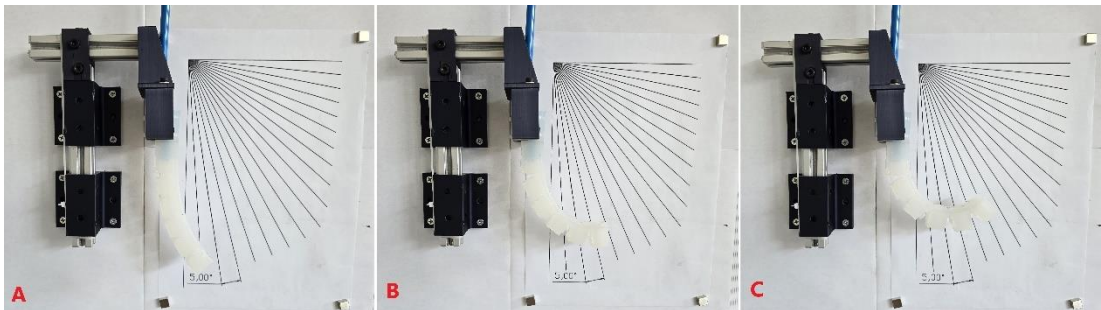
Şekil 2.66. Parmak sabitleme fikstürü: A) Fikstürün tasarımı, B) Fikstürün üretilmesi (İbiş ve ark., 2024).

2.4.2. Basınç dayanım testi

Pnömatik yapay parmakların işlevselliğini kaybetmeden çalışabildiği şartları belirlemek önem teşkil etmektedir. Parmaklar basınçlı hava ile tahrik edildiğinden olası bir kalıcı deformasyon durumunda hava sürekli olarak atmosfere tahliye olacaktır. Bu durum işletme maliyetlerinin artmasına ve parmakların fonksiyonelliklerini kaybetmelerine sebebiyet verecektir. Olası hataların önüne geçmek adına pnömatik yapay parmaklara patlatma testi yapılmıştır. 2 mm, 3 mm ve 4 mm duvar kalınlığına sahip yapay parmaklara kademeli olarak basınç verilmiştir. 0 bar basınç ile başlayan testler 0,1 bar aralıklarla artırılarak parmaklar patlayıncaya dek devam etmiştir. Her bir parmak çeşidinden 3 adet numune teste tabii tutulmuştur. Yapılan patlatma testleri sonucunda 2 mm duvar kalınlığına sahip parmak 1,1 bar basınçta, 3 mm duvar kalınlığına sahip parmak 1,3 bar basınçta, 4 mm duvar kalınlığına sahip parmak ise 1,4 bar basınçta patlamıştır. Yapılan deney ile duvar kalınlığının dayanıma doğrudan etki ettiği görülmektedir. Duvar kalınlığının artması basınç dayanımını artırmaktadır.

2.4.3. Eğilme açısı deneyi

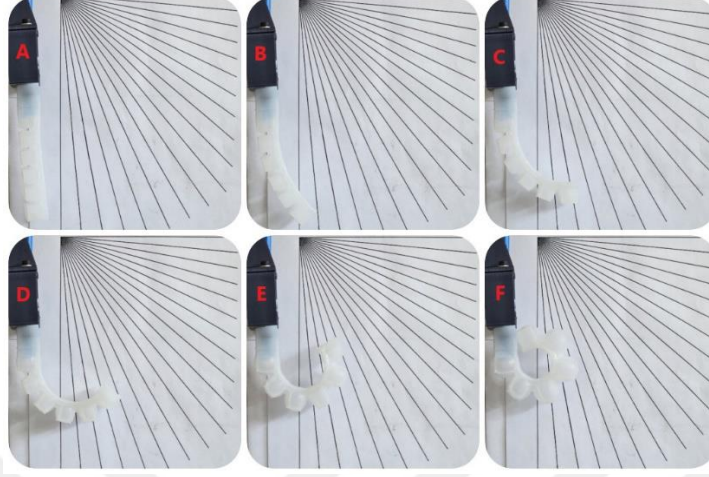
Eğilen pnömatik yapay parmakların basınç altında davranışlarını gözlemlemek adına eğilme performansının incelenmesi kararlaştırılmıştır. Eğilme performansının ölçülebilmesi için 2 mm, 3 mm ve 4 mm duvar kalınlığına sahip yapay parmaklar, önlerinde engel bulunmayacak şekilde test sistemine bağlanmıştır. Yapay parmaklara kademeli olarak basınç verilmiştir. Yapılan ölçümler, parmak ucu yüzeyinin zemin düzlemi ile yaptığı açıyı ifade etmektedir. Şekil 2.67’de örnek eğilme davranışı gösterilmiştir.



Şekil 2.67. Farklı eğilme açılarında parmak konumları.

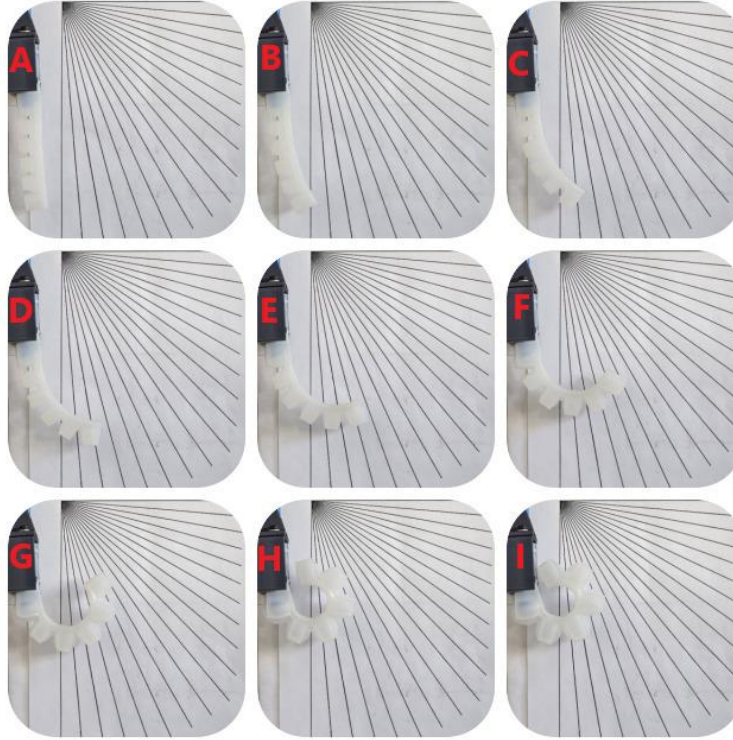
0 bar basınç ile başlayan testler, 0,1 bar aralıklarla artırılarak parmakların dayanabileceği maksimum basınç değerinden 0,1 bar daha düşük değere kadar veya

maksimum eğilme açısı olan 295° 'ye ulaşılan kadar yapılmıştır. 2 mm duvar kalınlığına sahip parmak ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen eğilme tepkileri Şekil 2.68'de gösterilmiştir.



Şekil 2.68. $t = 2$ mm duvar kalınlığına sahip parmağın eğilme performansı deney sonuçları: A) 0 bar, B) 0,1 bar, C) 0,2 bar, D) 0,3 bar, E) 0,4 bar, F) 0,5 bar.

3 mm duvar kalınlığına sahip parmak ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen eğilme tepkileri Şekil 2.69'da gösterilmiştir.



Şekil 2.69. $t = 3$ mm duvar kalınlığına sahip parmağın eğilme performansı deney sonuçları: A) 0 bar, B) 0,1 bar, C) 0,2 bar, D) 0,3 bar, E) 0,4 bar, F) 0,5 bar, G) 0,6 bar, H) 0,7 bar, I) 0,8 bar.

4 mm duvar kalınlığına sahip parmak ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen eğilme tepkileri Şekil 2.70’te gösterilmiştir.



Şekil 2.70. $t = 4$ mm duvar kalınlığına sahip parmağın eğilme performansı deney sonuçları: A) 0 bar, B) 0,1 bar, C) 0,2 bar, D) 0,3 bar, E) 0,4 bar, F) 0,5 bar, G) 0,6 bar, H) 0,7 bar, I) 0,8 bar, J) 0,9 bar, K) 1,0 bar, L) 1,1 bar, M) 1,2 bar, N) 1,3 bar.

2 mm duvar kalınlığına sahip parmak 0,5 bar basınçta 295° dönme açısına ulaşmıştır. 3 mm duvar kalınlığına sahip parmak 0,8 bar basınçta 295° dönme açısına ulaşmışken, 4 mm duvar kalınlığına sahip parmak ise 1,3 bar basınçta 295° dönme açısına ulaşmıştır. Basınçsız durum olan 0 bar basınç değerinde, yer çekiminin etkisi ile parmaklarda bir miktar eğilme açısı gözlemlenmektedir. Gözlemlenen eğilme açıları 2 mm duvar kalınlığına sahip parmakta 6° , 3 mm duvar kalınlığına sahip parmakta $4,4^\circ$ ve 4 mm duvar kalınlığına sahip parmakta $3,3^\circ$ olarak belirlenmiştir. Elde edilen veriler sonucunda duvar kalınlığının artması durumunda dönme açısının azaldığı

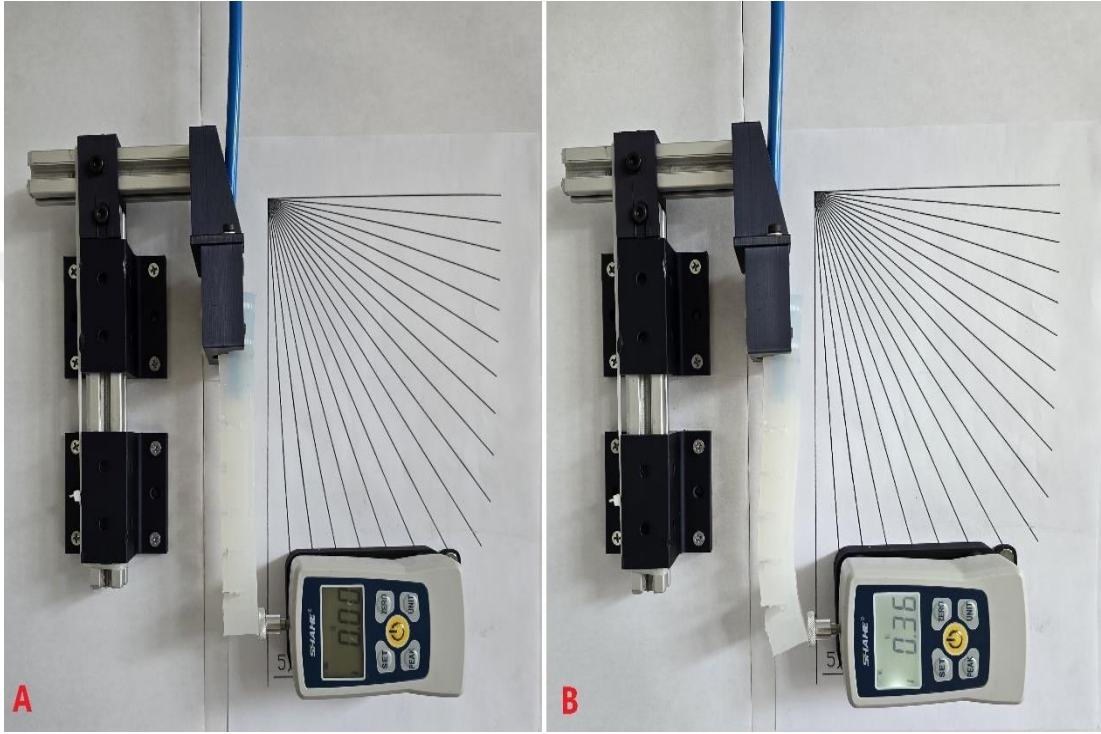
gözlemlenmiştir. Duvar kalınlığındaki artış aynı zamanda parmaklara uygulanabilir basınç değerleri seçeneklerini de artırmıştır. Bu durum, her ne kadar eğilme performansında düşüş olarak görülse de ara pozisyon kontrolü açısından bir avantaj olarak sayılabilir. Parmaklara uygulanan basınçlara (P) karşılık elde edilen eğilme açısı (θ) değerleri Tablo 2.12’de verilmiştir. Sonuçların sonlu elemanlar analizleri ile elde edilen değerlere oldukça yakın olduğu gözlemlenmektedir.

Tablo 2.12. Eğilme açısı deneyi sonuçları.

t = 2 mm		t = 3 mm		t = 4 mm	
P (bar)	θ (°)	P (bar)	θ (°)	P (bar)	θ (°)
0	6	0	4,4	0	3,3
0,1	42,2	0,1	27,1	0,1	19,7
0,2	90	0,2	55,3	0,2	32,5
0,3	140,7	0,3	83,6	0,3	47,3
0,4	213,1	0,4	113	0,4	61,9
0,5	295	0,5	150,7	0,5	79,3
-	-	0,6	211,8	0,6	96
-	-	0,7	279,4	0,7	114,9
-	-	0,8	295	0,8	135,4
-	-	-	-	0,9	158,4
-	-	-	-	1	183,8
-	-	-	-	1,1	218,3
-	-	-	-	1,2	256,6
-	-	-	-	1,3	295

2.4.4. Parmak ucu kuvveti deneyi

Silikon parmakların nesneye tutunma gücünü belirleyen faktörlerden birisi de parmak ucu kuvvetidir. Parmak ucu kuvvetinin ölçülebilmesi için dijital kuvvet ölçer, serbest haldeki silikon parmağın uç noktasına konumlandırılmış ve okunan kuvvet değeri sıfırlanmıştır. Başlangıç pozisyonundaki parmak Şekil 2.71 A’da verilmişken, Basınç uygulanmış parmak ise Şekil 2.71 B’de verilmiştir.



Şekil 2.71. Kuvvet ölçümü: A) Serbest hal, B) Basınçlandırılmış hal.

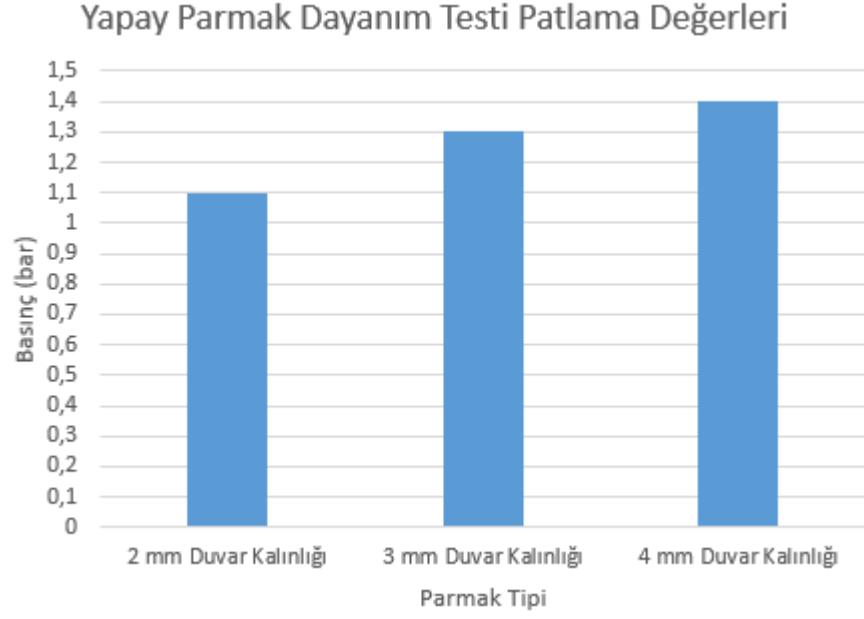
Kuvvet değerlerinin ölçülebilmesi için 2 mm, 3 mm ve 4 mm duvar kalınlığına sahip yapay parmaklara kademeli olarak basınç verilmiş ve elde edilen kuvvet verileri kaydedilmiştir. 0 bar basınç ile başlayan testler, 0,1 bar aralıklarla artırılarak parmakların patlamadan dayanabileceği maksimum basınç değerinden 0,1 bar daha düşük basınç değerine kadar yapılmıştır. 2 mm duvar kalınlığına sahip parmak 1 bar basınçta 4,08 N kuvvet üretmiştir. 3 mm duvar kalınlığına sahip parmak 1,2 bar basınçta 3,31 N kuvvet üretirken, 4 mm duvar kalınlığına sahip parmak ise 1,3 bar basınçta 1,27 N kuvvet üretmiştir. Elde edilen veriler sonucunda duvar kalınlığının artması durumunda elde edilen kuvvet değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Her bir parmak tipine uygulanan farklı basınçlarda (P) karşılık elde edilmiş parmak ucu kuvveti (F) değerleri kaydedilerek Tablo 2.13’te listelenmiştir.

Tablo 2.13. Parmak ucu kuvveti deneyi sonuçları.

t = 2 mm		t = 3 mm		t = 4 mm	
P (bar)	F (N)	P (bar)	F (N)	P (bar)	F (N)
0	0	0	0	0	0
0,1	0	0,1	0	0,1	0
0,2	0,15	0,2	0,12	0,2	0,1
0,3	0,24	0,3	0,18	0,3	0,14
0,4	0,41	0,4	0,26	0,4	0,19
0,5	0,65	0,5	0,36	0,5	0,25
0,6	0,99	0,6	0,5	0,6	0,32
0,7	1,61	0,7	0,72	0,7	0,39
0,8	2,52	0,8	1,02	0,8	0,48
0,9	3,25	0,9	1,58	0,9	0,58
1	4,08	1	2,26	1	0,75
-	-	1,1	2,85	1,1	0,93
-	-	1,2	3,31	1,2	1,2
-	-	-	-	1,3	1,27

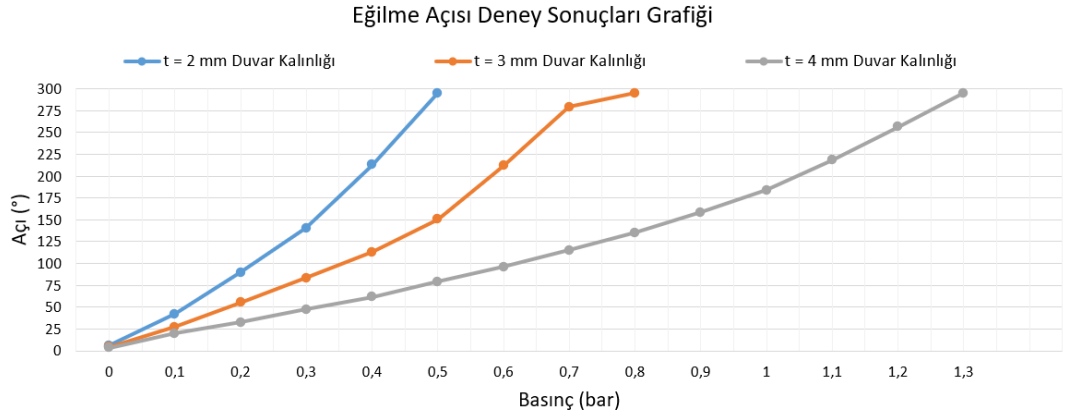
2.4.5. İdeal duvar kalınlığına sahip parmağın seçimi

Şekil 2.72’de de görüldüğü gibi yapılan testler sonucunda dayanım bakımından en uygun yapının 4 mm duvar kalınlığına sahip parmak olduğu anlaşılmışken en az uygun yapının ise 2 mm duvar kalınlığına sahip parmak olduğu anlaşılmıştır.



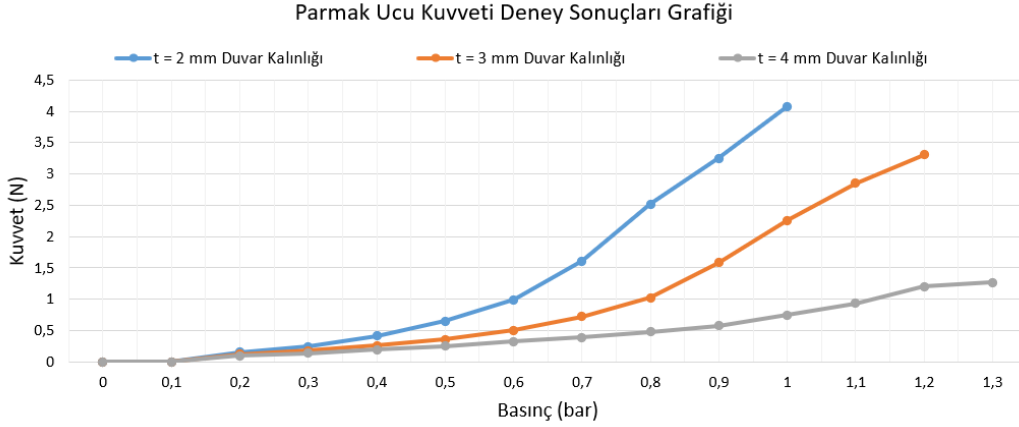
Şekil 2.72. Patlama testi sonuçları grafiği.

Şekil 2.73'te görüldüğü gibi eğilme performansı bakımından en uygun yapı 2 mm duvar kalınlığına sahip parmakken en az uygun yapı ise 4 mm duvar kalınlığına sahip parmaaktır.



Şekil 2.73. Eğilme açısı testi sonuçları grafiği.

Şekil 2.74'te görüldüğü gibi kuvvet üretimi bakımından en uygun yapı 2 mm duvar kalınlığına sahip parmakken en az uygun yapı ise 4 mm duvar kalınlığına sahip parmaaktır.



Şekil 2.74. Parmak ucu kuvveti testi sonuçları grafiği.

Tüm bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda hem dayanım bakımından ideal olan hem eğilme performansı bakımından ideal olan hem de ürettiği kuvvet bakımından ideal olan 3 mm duvar kalınlığına sahip parmak, esnek robotik kavrayıcıda kullanılmak için seçilmiştir. Böylece sistem dayanım, esneklik ve güç konusunda zayıf kalmamış olacaktır. Parmak performanslarının özeti Tablo 2.14'te verilmiştir.

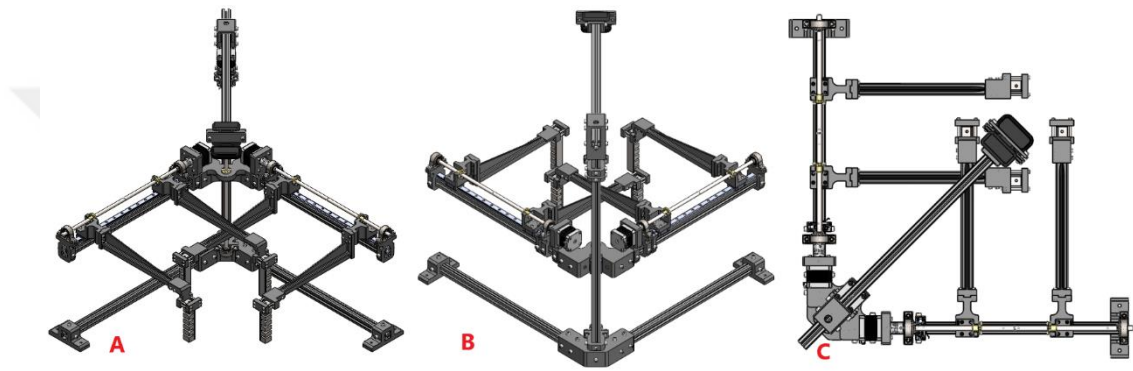
Tablo 2.14. Farklı duvar kalınlıklarına sahip parmakların performans özet tablosu.

	En İyi	Orta	En Zayıf
Basınç Dayanımı	t = 4 mm	t = 3 mm	t = 2 mm
Eğilme Performansı	t = 2 mm.	t = 3 mm	t = 4 mm
Kuvvet Üretimi	t = 2 mm	t = 3 mm	t = 4 mm

2.5. Esnek Robotik Kavrayıcı Tasarımı ve Üretimi

Yapıları gereği silikon parmaklar tek başlarına bir anlam ifade etmemektedir. Bu sebeple parmakları harekete geçirerek işlevsellik kazandıracak bir yapıya ihtiyaç vardır. Temel olarak bu yapı, kontrol elemanı olarak kullanılan ve basınçlandırma elemanlarından gelen önceden ayarlanmış karakteristiğe sahip basınçlı havayı parmaklara aktarmakta kullanılmıştır. Oluşturulan yapı tamamen rijit veya hareket edebilme yeteneğine sahip olarak tasarlanabilir. Fakat tasarım rijit olarak kurgulanırsa silikon parmakların kavrayıcıya bağlanan kısımları sabit kalacaktır. Bu durum parmaklar arası mesafenin sabit kalmasına sebep olacak ve dolayısıyla manipüle edilecek nesnelerin dış boyutlarının belirli bir aralıkta olmasını zorunlu kılacaktır.

Manipüle edilecek nesneler farklı geometrilere sahip olacağından parmakların sabit açıklıkta olması kavrama yeteneğini olumsuz etkileyecektir. Olumsuzluğun önüne geçmek adına manipüle edilecek her bir nesne için özel olarak üretilmiş ve sabit parmak açıklığına sahip kavrayıcı gövdeleri kullanılmalıdır. Farklı kavrayıcı gövdelerinin üretilip kullanılması gerek depolama gerek maliyet gerekse kavrayıcı gövdesi değişimi için harcanan süre ile iş gücü kaybı gibi ekstra giderlere sebebiyet verecektir. Tüm bu giderler göz önüne alındığında kavrayıcının değişken kavrama aralığına sahip olması gerektiği anlaşılmaktadır. Kavrayıcının 3D tasarımı Şekil 2.75’te verilmiştir.

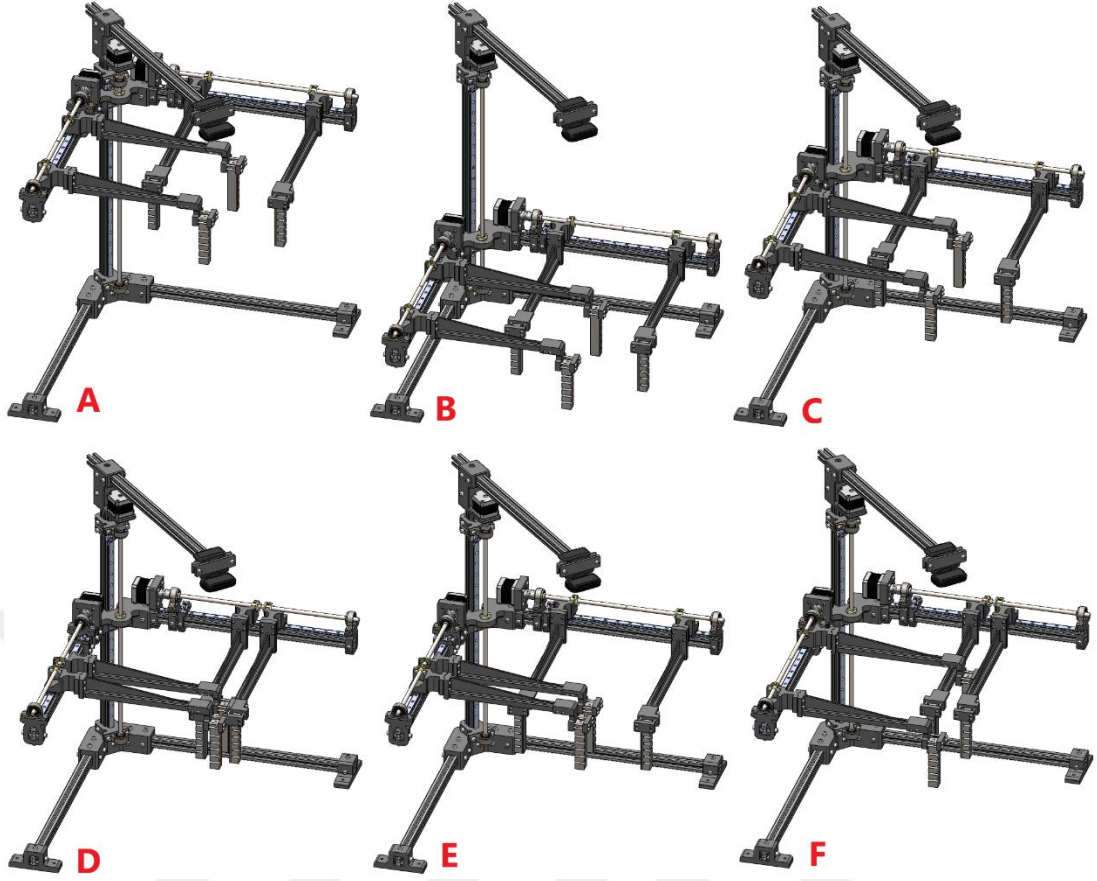


Şekil 2.75. Kavrayıcının 3D tasarımı: A) Önden görünüş, B) Arkadan görünüş, C) Üstten görünüş.

2.5.1. Hareket kısıtlamaları ve sınır şartları

Üretilecek kavrayıcının farklı şekil ve boyutlardaki nesneleri kolayca kavrayabilmesi temel hedef olarak belirlenmiştir. Bu sebeple 50 mm ile 200 mm arasında yatay açıklığa sahip olan, zeminden 330 mm yüksekliğe kadar dikey açıklığa sahip olan, 4 adet pnömatik parmağı, birbirine bakan parmaklar simetrik hareket edecek şekilde, kontrol edebilen bir kavrayıcı tasarlanacaktır. Kavrayıcının parmakları tek bir noktaya doğru hareket edecektir. Kavrayıcının iskeleti olarak ucuz ve kolay montajlanabilir oluşundan dolayı 20x20 alüminyum sigma profil tercih edilmiştir. Harekete geçirici eleman olarak çalışma hassasiyeti ve rotor konumu ile devir hızının kolay kontrol edilmesi sebebiyle step motor seçilmiştir. Motorlardaki dairesel hareketi bir sonraki eleman olan vidalı mile iletmek için eksen kaçıklığını önemsiz hale getiren esnek kaplin kullanılmıştır. Esnek kaplinin diğer ucuna ise hareketi parmaklara iletecek olan T8 vidalı mil ve somun kullanılmıştır. Dikey hareket iletiminde sol helis, M8x8 vidalı mil kullanılırken, yatay hareket iletiminde yarısı sağ yarısı sol helis, M8x2 vidalı mil kullanılmıştır. Aynı mil üzerinde iki farklı helis yönü olmasının sebebi, tek bir motor

ile parmakları simetrik olarak birbirine yaklaştırmaktır. Vidalı milin her iki ucu, yine eksen kaçıklığını önemsiz hale getirmek amacıyla, oynak rulman ile yataklanmıştır. Motorun radyal hareketini vidalı mil ile doğrusal harekete çevirirken daha rijit bir yapı elde etmek adına lineer ray ve lineer kızak sistemi kullanılmıştır. Her bir parmağın yatay hareketi için azami hız 10 mm/s olarak belirlendiğinden, aynı mil üzerinde iki adet parmak olduğu ve bu parmaklar birbirlerine doğru hareket ettiği için kavrama hızı 20 mm/s olmaktadır. Yatay hareket iletimi sağlayan vidalı millerin hatvesi 2 mm olduğundan step motorlar 1 tur döndüğüne tek bir parmak 2 mm ilerlerken aynı mil üzerindeki parmaklar birbirlerine 4 mm yaklaşmakta veya uzaklaşmaktadır. Yatay hareketi sağlayan step motor 37,5 tur döndüğünde parmaklar 150 mm hareket etmiş olmaktadır. Dikey hareket içinse azami hız 10 mm/s olarak belirlenmiştir. Dikey hareketi sağlayan vidalı milin hatvesi 8 mm olduğundan step motor 1 tur döndüğünde parmaklar dikey olarak 8 mm hareket etmektedir. Dikine hareketi sağlayan step motor 41,25 tur döndüğünde parmaklar 330 mm dikey hareketi tamamlamaktadır. Kavrayıcının tepesine 4 parmağın birleştiği noktayı doğrudan gören bir kamera yerleştirilmiştir. Bu kamera orta noktaya konulan nesnenin dış boyutlarını algılayarak step motorları, parmakları kavrama öncesi pozisyona getirmeleri için yönlendirmektedir. Ayrıca geri kalan tüm birleştirme elemanları 3D yazıcı kullanılarak PLA malzemeden üretilmiştir. Esnek robotik kavrayıcının hareket kabiliyeti Şekil 2.76'da gösterilmiştir.



Şekil 2.76. Esnek robotik kavrayıcının hareket kısıtlamaları: A) En yüksek konum, B) en alçak konum, C) Maksimum kol açıklığı, D) Minimum kol açıklığı, E) Farklı kol pozisyonları, F) Farklı kol pozisyonları.

2.5.2. Motor elemanı seçimi

Pnömatik parmakları harekete geçirici eleman olarak temelde AC ve DC olarak sınıflandırılan motor çeşitlerinde, step motorlar, servo motorlar, fırçalı ve fırçasız DC motorlar, senkron ve asenkron AC motorlar, lineer aktüatörler gibi alt grup seçenekler mevcuttur. Tüm bu motor grupları kendi içlerinde avantaj ve dezavantajlara sahiptir. DC motorlar basit şekilde hız kontrolüne olanak sağlayan ve sürekli aynı yöne dönüş yapan görece ucuz ve uzun ömürlü motorlardır. AC motorlar yüksek güç ve dayanıklılığa sahip tek yönlü dönen, güvenilir, yaygın ve ucuz endüstriyel motorlardır. Lineer aktüatörler daha çok doğrusal hareket gerektiren durumlarda kullanılan doğrudan lineer hareket üreten motorlardır. Örneğin alt gruplardan olan servo motorlar, yüksek hıza ve torka sahip, dönüş yönü dinamik olarak değişebilen ve hassas şekilde kontrol edilebilen ve geri besleme sensörüne sahip kapalı çevrim kontrollü motorlardır. Step motorlar ise her bir adımı belirli bir açısal dönüş karşılık gelen hareket üreterek geri besleme sensörüne gerek kalmadan belirlenen konuma hassas şekilde ulaşabilir. Diğer motorlara kıyasla düşük hızlarda daha verimlidir. Bu sebeple

güç veya hız artırıcı dişli sistemlere gerek kalmadan kullanılarak düşük hızlarda yüksek tork sağlar. Ani durma veya çalışmalarda hassasiyetini kaybetmeden çalışabilir. Bu durum motorun, her çalıştırmada aynı noktaya dönmesine olanak tanıyarak yüksek tekrarlanabilir olduğunu gösterir. Yapısı oldukça basittir. Fırçasız bir motor olduğundan bakım ihtiyacı azdır ve karbon fırça aşınması veya zorlanma durumunda kıvılcım oluşturma gibi problemlere rastlanmaz. Ayrıca açık çevrim kontrolüne olanak sağlar. Konum sensörü gerektirmeden kontrol edilebilir. Bu durum yapıyı basitleştirerek arıza oranını azaltır ve sistem maliyetini düşürür. Tüm bu özellikler göz önüne alındığında sistemde kullanılacak olan harekete geçirici elamanın step motor olarak seçilmesi kararlaştırılmıştır. Kavrayıcının tasarım temelleri 3D yazıcı tasarım temellerine dayanmaktadır. Bu sebeple kavrayıcıda kullanılacak olan step motor, vidalı mil, rulman, kaplin lineer ray ve lineer yatak gibi temel bileşenler ulaşılabilirlik, maliyet, kolay kurulum gibi etmenler de göz önünde bulundurularak seçilmiştir. Step motor modeli olarak birçok 3D yazıcıda kullanılan Nema 17HS4401 marka motor seçilmiştir. Nema 17HS4401 modeli 20 N.mm tetik torkuna ve 400 N.mm tutunma torkuna sahiptir. Tetik torku kavramı, motorun serbest haldeyken içerisindeki mıknatıslar sayesinde sağladığı torktur. Tutunma torku ise yük altındaki motorun sabit bir pozisyonda kalabilmesi için gereken minimum tork değeridir. Tutunma torku değeri genellikle motor nominal torkunun %10'u ile %20'si arasında bir değer almaktadır. Bu sebeple seçilen motorun nominal torku 2000-4000 N.mm arasındadır.

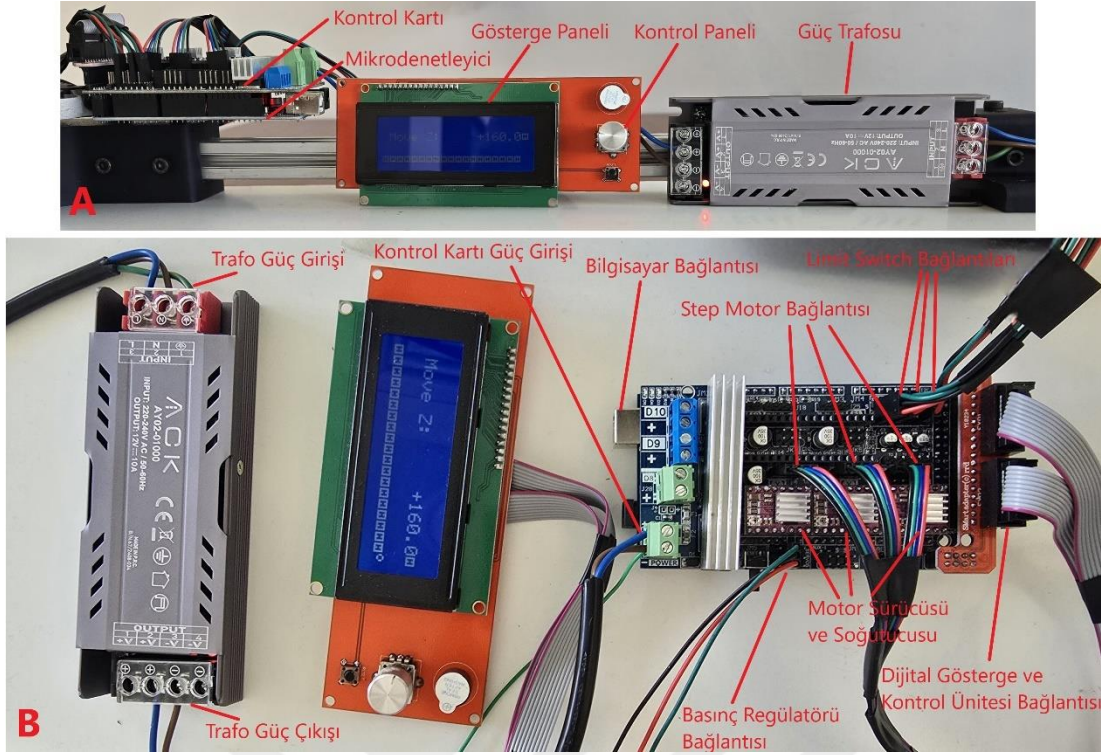
2.5.3. Yazılımsal kontrol ve hareketleri kodlama

Esnek robotik kavrayıcıyı istenilen şekilde hareket ettirecek sistemlere ve bu sistemleri uyaracak dijital kodlara ihtiyaç vardır. Parmakların konumunu değiştirecek olan step motorları, parmakların konumları ile hareket limitlerini belirleyecek olan mekanik limit switchleri, nesnelerin boyutlarını ölçerek parmakları yönlendirecek olan kamerayı ve parmaklara basınç verecek olan dijital basınç regülatörünü kontrol etmek amacıyla dijital kodlar oluşturulmuştur. Oluşturulan yazılımın temel amacı robotik kavrayıcıyı hem manuel olarak hem de otonom olarak kontrol edebilmektir.

Kurulan sistemin ana bileşenleri 1 adet güç trafosu, 1 adet mikrodenetleyici, 1 adet kontrol kartı, 3 adet motor sürücüsü, 3 adet motor sürücü soğutucusu, 1 adet dijital gösterge ekranı, 1 adet gösterge kontrol modülü ve dijital basınç regülatöründen oluşmaktadır. Ayrıca sisteme bağlanacak olan ve önceki bölümlerde bahsedilen 3 adet step motor ile 3 adet mekanik limit switch kullanılmıştır.

İlk etapta Kavrayıcının kontrolü manuel olarak harici dijital ekran yardımıyla yapılacaktır. Dijital ekrandan girilen komutların motorlara aktarılması için Arduino mikrodenetleyici ve mikrodenetleyicinin kullanım kapasitesini artırmak için üzerine montajlanan Ramps kontrol kartı kullanılmıştır. Ramps kontrol kartı, Marlin gibi açık kaynak kodlu programlama yazılımlarına uyum sağladığı için hazır komutlar ile hızlıca kodlanabilmektedir. Her ne kadar motor sürücüler, sensörler, LCD ekran gibi ilave aygıtlar mikrodenetleyicinin pinlerine bağlanarak harici bir kontrol kartı gerektirmeden kullanılabilir olsa da bu çalışma için mikrodenetleyicinin yeteri kadar çıkış pini olmadığından ilave bir kontrol kartı ile kullanılması gerekmektedir. Kontrol kartının bir diğer avantajı ise ilave aygıtları bağlayabilecek portların hazır olarak kart üzerinde gelmesidir. Böylece lehimleme ve kablolama işlemi yapılmamış olacaktır.

Arduino Mega 2560 R3 mikrodenetleyicinin üzerine yerleştirilen RepRap Ramps 1.4 kontrol kartının üzerine step motorların yönünü, hızını ve torkunu kontrol edebilmek için 3 adet DRV8825 step motor sürücüsü ve motor sürücülerinin aşırı ısınmasını engellemek için 3 adet alüminyum motor sürücü soğutucusu yerleştirilmiştir. Denetleyicinin ilgili bağlantı portlarına; parmakların hareketlerini sağlayacak 3 adet step motor, parmakların maksimum limitlerini belirleyerek temas halinde kontakların yönünü değiştiren elektrikselsel anahtar olan 3 adet mekanik limit switch, parmaklara istenilen basıncı veren dijital basınç regülatörü, parmakların konumunu dijital olarak harici bir ekranda görmemizi sağlayan ve bilgisayar olmadığı durumlarda manuel kontrol imkânı oluşturan RepRap 2004 LCD ekran ile kontrol modülü bağlanmıştır. Ayrıca kontrol kartına elektrik sağlamak adına 10 A, 120 W, 12 V ACK AY02-01000 marka güç trafosu kullanılmıştır. Trafo doğrudan kontrol kartına bağlanmıştır. Kontrol kartı ise gücü mikrodenetleyici ve gösterge ekranına aktarmıştır. Mikrodenetleyici bir veri kablosuyla bilgisayara bağlanarak kodlanmıştır. Marlin 1.9 yazılımı kullanılarak kodlanan kartlar sayesinde step motorların hızları, torkları, dönüş yönleri ayarlanmıştır. Limit switchlerin konumları belirlenerek sisteme entegre edilmiştir. Marlin programı ve Ramps kontrol kartı temel olarak 3D yazıcı alt yapısı kullanılmaktadır. Bu sebeple gösterge panelinin arayüzü 3D yazıcı arayüzleri ile aynıdır. Kullanılan ekipmanlar Şekil 2.77’de gösterilmiştir.

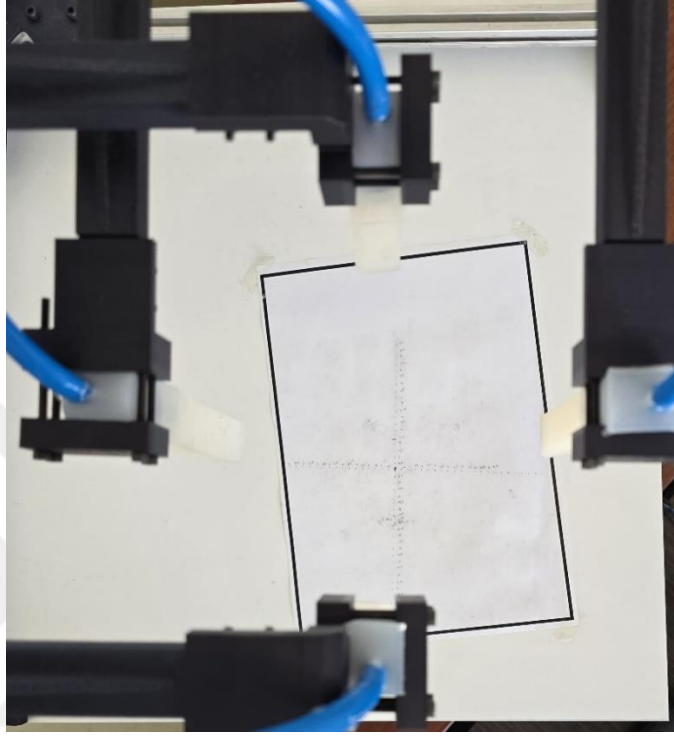


Şekil 2.77. Manuel kontrol ekipmanları.

Parçalar arasındaki ilişkileri oluşturabilmek, bilgisayardan komut alabilmek ve bu komutları kontrol kartına aktarabilmek için mikrodeneleyici bir veri kablosu yardımıyla bilgisayara bağlanmıştır. Daha önce manuel olarak harici dijital gösterge ile kontrol edilebilen robotik kavrayıcıyı bilgisayar ile kontrol etmek için bir kontrol arayüzüne ihtiyaç duyulmuştur. Kontrol arayüzü, dijital göstergenin kontrol panelini kullanmadan kavrayıcıyı manuel olarak bilgisayar üzerinden kontrol edebilmeyi sağlayacaktır. Kontrol arayüzü Python programlama dili kullanılarak oluşturulmuştur. Arayüzün oluşturulmasında Python programlama dilinin tercih edilmesinin temel sebepleri arasında, diğer yazılım dillerine göre geniş kütüphane ekosistemine sahip olması ve platformlar arası uyumluluk avantajı yer almaktadır. Daha önce Arduino platformunu kullanarak RepRap ailesi için açık kaynak kodlu hızlı prototipleme aracı olan Marlin programı ile kodlanan step motor hareketleri ve mekanik limit switch pozisyonları, Python programı ile tasarlanan arayüze aktarılmıştır. Python sayesinde arayüzden gönderilen komutlar, Marlin ile kodlanan ve sadece manuel olarak kontrole olanak tanıyan işlemleri aktif veya pasif hale getirmektedir.

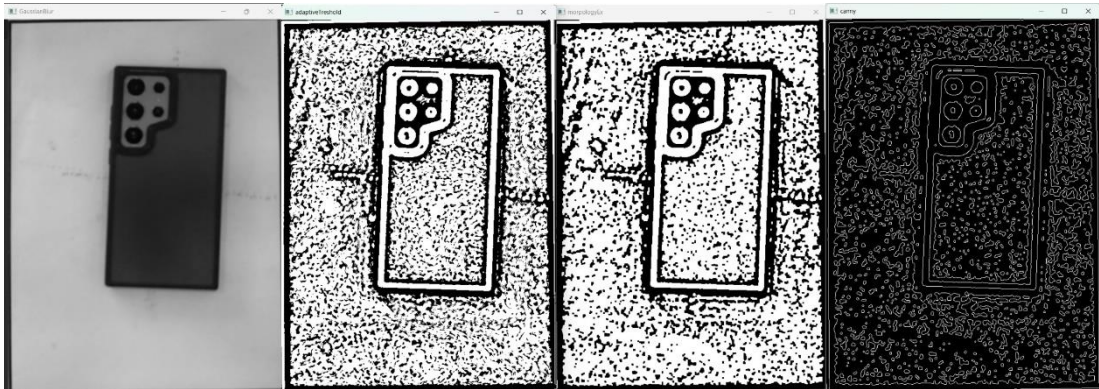
Manuel olarak kontrol edilebilen esnek robotik kavrayıcıya görüntü işleme sistemi entegre edilmiştir. Kameranin da sisteme entegre edilmesi ile kavrama işlemi tamamen otonom şekilde yapılabilecektir. Nesneleri ölçmek için parmakların kavrama

merkezini (parmakların hareket ettiği eksenlerin kesişim noktası) yukarıdan gören bir kamera yerleşimi yapılmış ve kamera bilgisayara bağlanmıştır. Kavrama merkezine, ölçüleri önceden belirlenmiş bir düzlem sabitlenmiş ve Şekil 2.78’de gösterilen bu düzlemin ölçüleri piksel dönüştürme katsayısı ile dijital ortama aktarılmıştır.



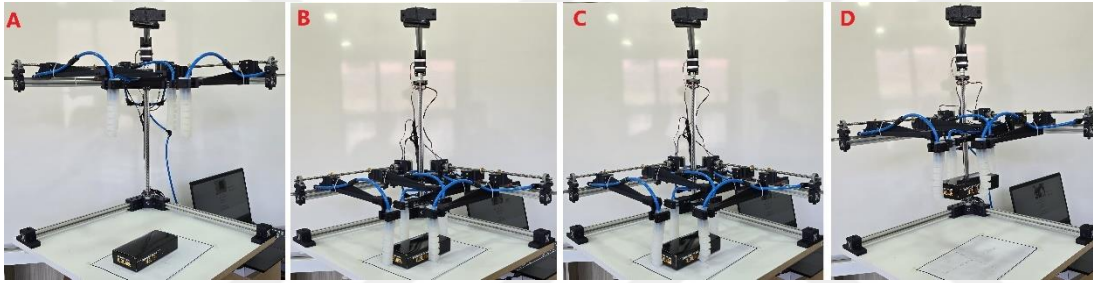
Şekil 2.78. Hedef düzlemi.

Düzlemin orta noktasına konulan nesnelerin ölçüleri, düzlemin ölçülerine göre oranlanarak hesaplanmıştır. Referans düzlem dikdörtgen olduğu için manipüle edilecek nesnelerin de dörtgen olması gerekmektedir. Geliştirilen yazılım ile orta noktaya konulan nesnelerin görselleri, Şekil 2.79’da gösterildiği gibi anlık olarak farklı filtrelemelerden geçerek kenar algılama işlemine tabii tutulmaktadır.



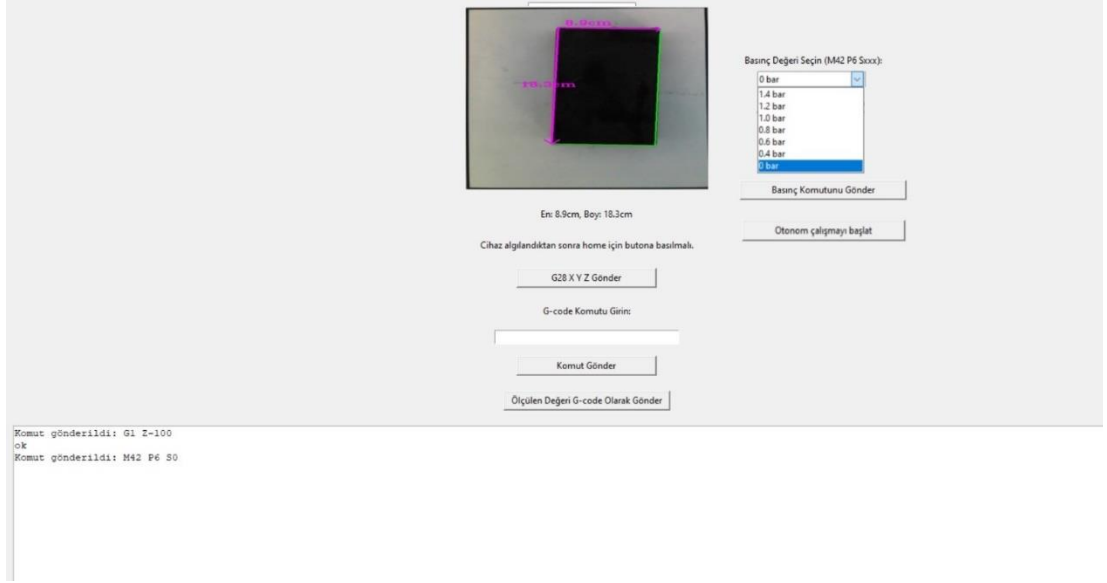
Şekil 2.79. Filtreleme ve kenar algılama algoritması.

Kenarları algılanan nesnelerin gerçek ölçüleri kontrol arayüzüne aktarılmaktadır. Şekil 2.81’de gösterilen kontrol arayüzü, otomatik kontrol ve manuel kontrol olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Otomatik kontrol tercih edildiği takdirde “Otonom çalışmayı başlat” butonu ile nesnenin ölçülen boyutlarına göre parmaklar ön kavrama pozisyonuna getirilmektedir. Ardından parmaklar zemine kadar inmektedir. Zemine ulaşan parmaklara 0,2 bar’lık artışlarla kademeli olarak 0,8 bar basınç verilmektedir. Basınçlandırma işlemi bittiğinde kavramayı tamamlamış parmaklar, nesne ile beraber yukarı kaldırılıp 3 s bekletilmektedir. Kavranan nesne tekrar zemine yerleştirilip basınç kademeli olarak azaltılarak 0 bar değerine ulaşmaktadır. Nesne ile teması kesilen parmaklar, ana konumlarına geri dönerek yeni ölçüme hazır hale gelmektedir. Kavrama adımlarını anlatan görseller Şekil 2.80’de verilmiştir.



Şekil 2.80. Temel kavrama adımları: A) Başlangıç pozisyonu, B) Ön kavrama pozisyonu, C) Basınçlandırma işlemi, D) Kaldırma işlemi.

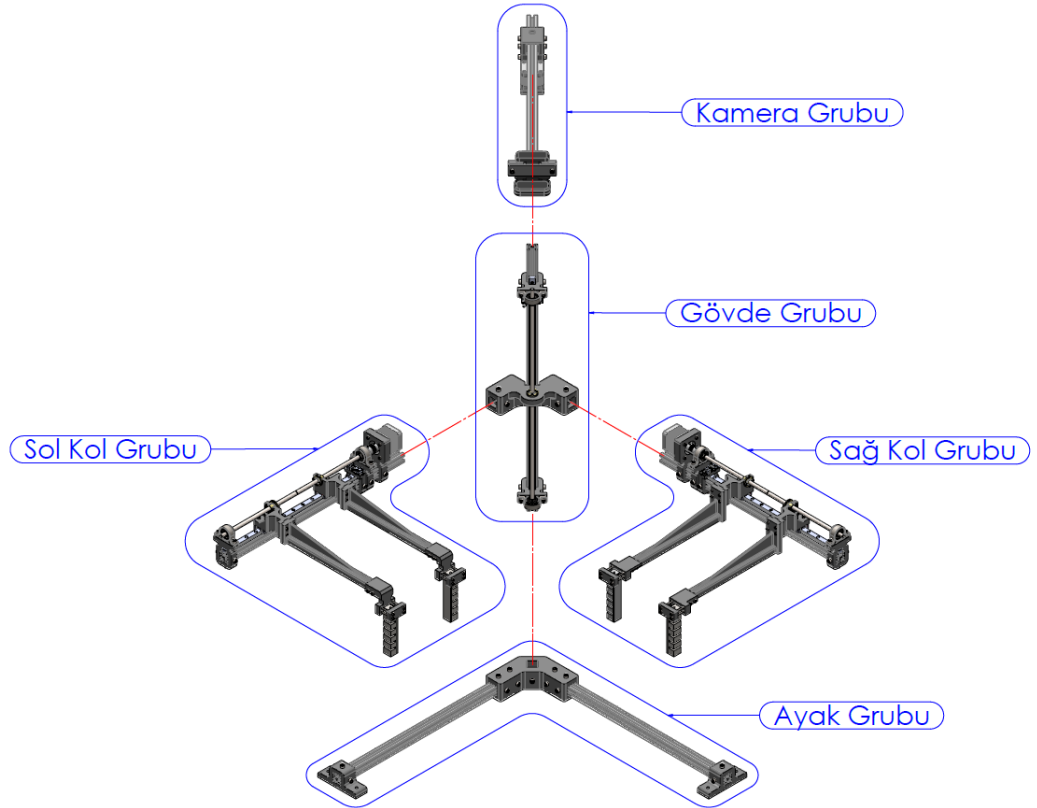
Manuel kontrol kullanılmak istendiğinde ise kamera tarafından ölçülen değerlere parmakları yollamak için “Ölçülen Değeri G-code Olarak Gönder” butonuna basılmalıdır. Parmaklar ölçülen konuma geldiğinde istenilen kavrama basıncı seçilerek “Basınç Komutunu Gönder” butonuna basılmalıdır. Kavrama işlemi tamamlandığında, parmakları ve nesneyi yukarı kaldırmak için “G-kode Komutu Girin” alanına istenilen yükseklik değeri girilerek “Komut Gönder” butonuna basılmalıdır. Nesne tekrar yere indirilmek istendiğinde ise yine yükseklik değeri girilerek komut yollanır. Nesne yere temas ettiğinde basınç değeri 0 bar seçilerek sisteme girilir ve nesne bırakılır. Ardından kavramaya hazır pozisyon için “G28 X Y Z Gönder” butonuna basılarak kavrayıcı bir sonraki kavrayama hazır hale getirilir ve başlangıç pozisyonuna döner. Oluşturulan kontrol mekanizması arayüzü sayesinde esnek robotik kavrayıcı hem bilgisayar yokken dijital gösterge paneli ile manuel kontrol edilebilmekte hem bilgisayar kontrol arayüzü ile manuel olarak kontrol edilebilmekte hem de bilgisayar kontrol arayüzü ile otomatik olarak kontrol edilebilmektedir. Kontrol sisteminin Python kodlarının çalışma mantığı EK A’da, kodlar ise EK B’de paylaşılmıştır.



Şekil 2.81. Kontrol arayüzü.

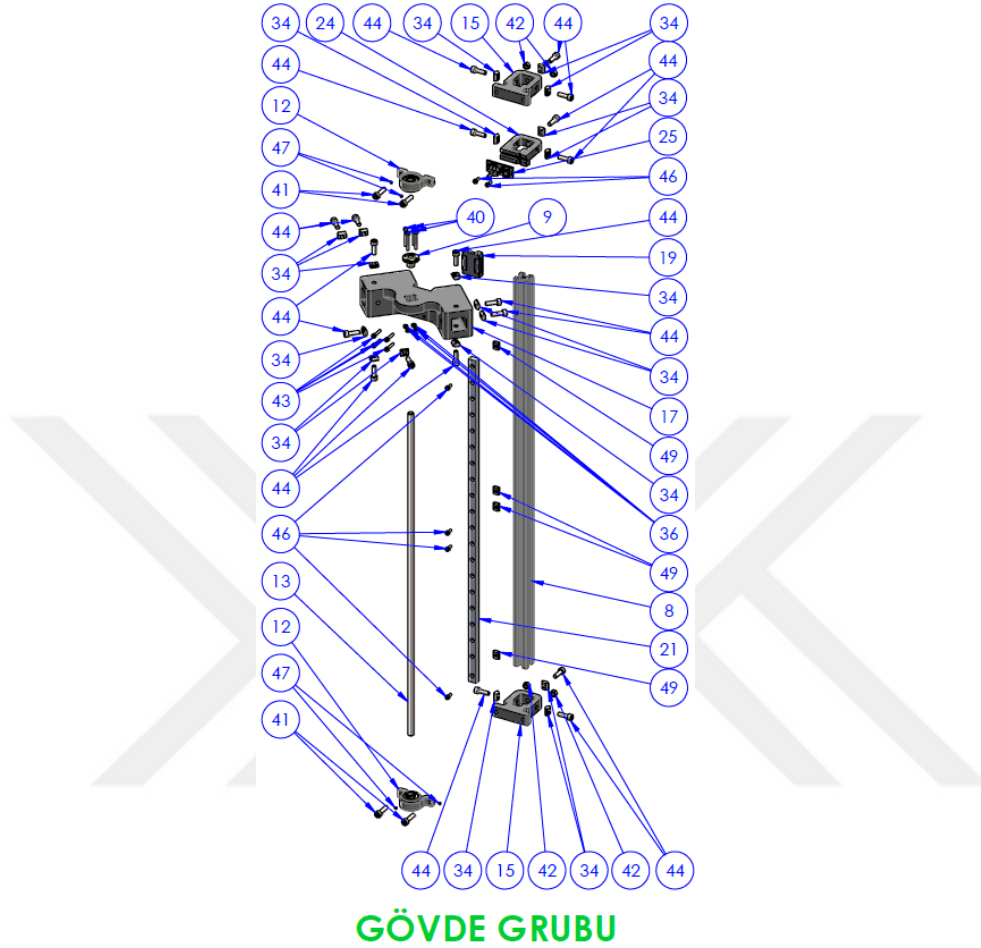
2.5.4. Mekanik parçaların malzeme listesi

Tasarlanan esnek robotik kavrayıcının parçalarının nerede kullanıldığını göstermek amacıyla parça numaralı malzeme listesi hazırlanmıştır. Karmaşıklığa yol açmaması adına kavrayıcı 5 gruba bölünerek Şekil 2.82’deki gibi numaralandırılmıştır.

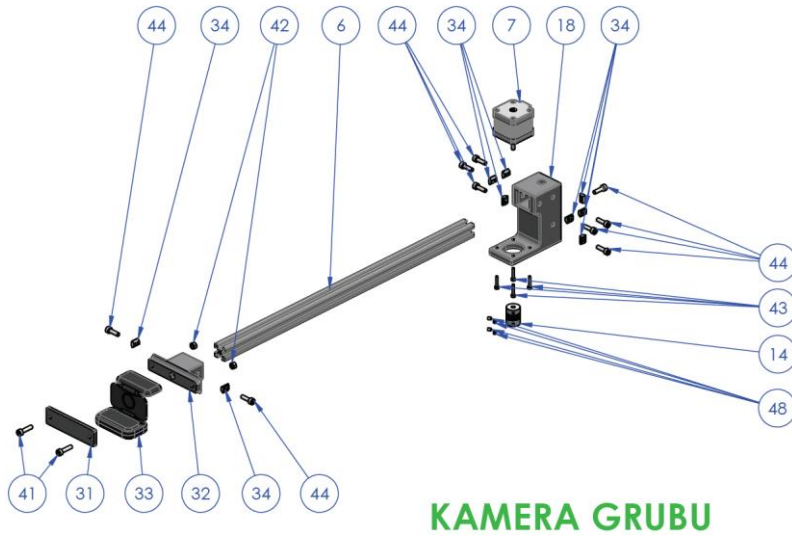


Şekil 2.82. Malzeme listesi numaralandırma grupları.

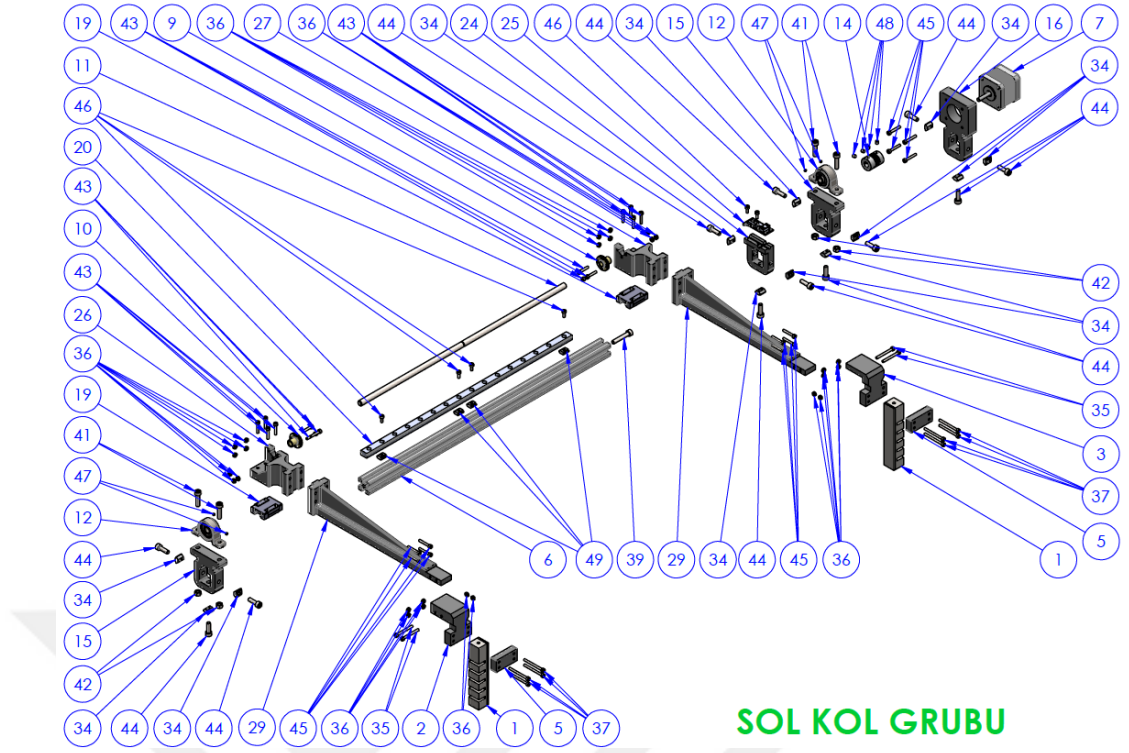
Pnömatik yapay kas tabanlı esnek robotik kavrayıcıyı oluşturan tüm parçalar patlatılmış görünüm oluşturularak numaralandırılmıştır. Numaralandırılmış parçalar Şekil 2.83, Şekil 2.84, Şekil 2.85, Şekil 2.86 ve Şekil 2.87’de belirtilmiştir.



Şekil 2.83. Kavrayıcı gövde grubu bom listi.

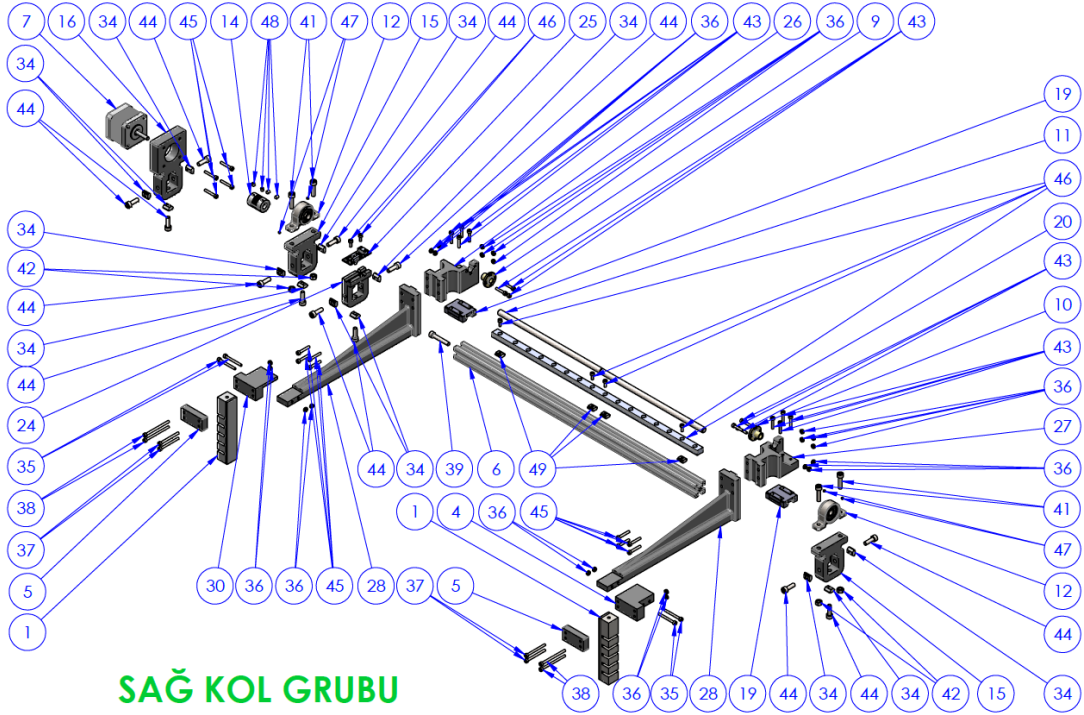


Şekil 2.84. Kavrayıcı kamera grubu bom listi.



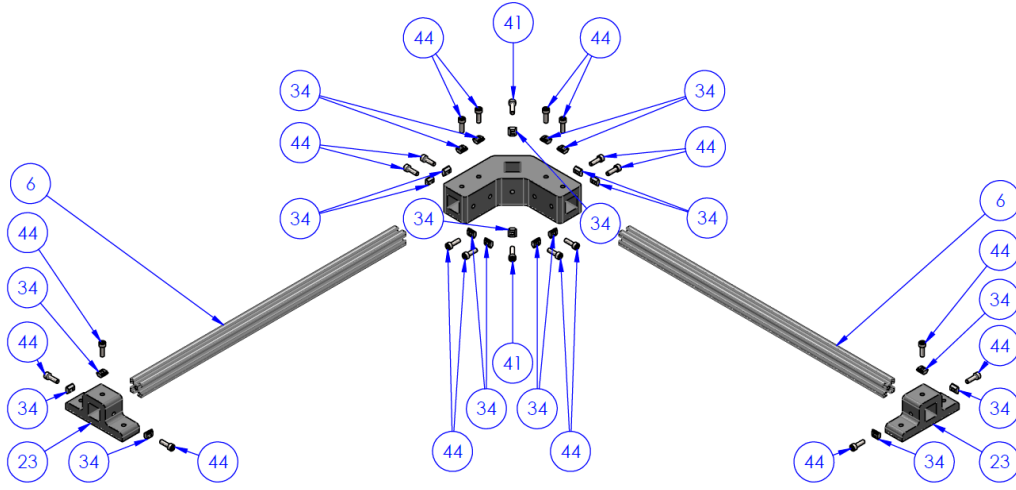
SOL KOL GRUBU

Şekil 2.85. Kavrıyıcı sol kol grubu bom listi.



SAĞ KOL GRUBU

Şekil 2.86. Kavrıyıcı sağ kol grubu bom listi.



AYAK GRUBU

Şekil 2.87. Kavrıyıcı ayak grubu bom listi.

Pnömatik yapay kas tabanlı esnek robotik kavrıyıcıyı oluşturan tüm parçalar, bu parçaların malzemeleri ve kullanım adetleri Tablo 2.15'te paylaşılmıştır. Tabloda verilen parça numaraları Şekil 2.82 ile ilişkilendirilmiştir.

Tablo 2.15. Malzeme listesi.

No	Parça Görseli	Parça Adı	Malzeme	Adet
1		Dikdörtgen Kesitli Parmak 3 mm	Silikon	4
2		Parmak Tutucu Kısa Uç Bağlantısı Sağ	PLA Plastik	1
3		Parmak Tutucu Kısa Uç Bağlantısı Sol	PLA Plastik	1
4		Parmak Tutucu Uzun Sol Helis Uç Bağlantısı	PLA Plastik	1
5		Parmak Tutucu Parmak Sıkıştırıcısı	PLA Plastik	4
6		20x20 Sigma Profil 470 mm	Alüminyum	5
7		Nema 17HS4401 Step Motor	-	3

Tablo 2.15. (Devamı) Malzeme listesi.

No	Parça Görseli	Parça Adı	Malzeme	Adet
8		20x20 Sigma Profil 600 mm	Alüminyum	1
9		Somun M8 Sağ Helis	Pirinç	3
10		Somun M8 Sol Helis	Pirinç	2
11		T8 Vidalı Mil Sağ-Sol Helis Yekpare 400 mm	Paslanmaz Çelik	2
12		KP08 Yataklı Rulman	-	6
13		T8 Vidalı Mil Sağ Helis 500 mm	Paslanmaz Çelik	1
14		Esnek Kaplin 5x8	Alüminyum	3
15		20x20 Sigma Profil Rulman Yatağı	PLA Plastik	6
16		20x20 Sigma Profil Step Motor Yatağı	PLA Plastik	2
17		20x20 Sigma Profil Kesişim Bağlantısı	PLA Plastik	1
18		20x20 Sigma Profil Kamera Yatağı	PLA Plastik	1
19		MGN12-C Kızak	-	5
20		MGN12 Ray 400 mm	Paslanmaz Çelik	2
21		MGN12 Ray 500 mm	Paslanmaz Çelik	1

Tablo 2.15. (Devamı) Malzeme listesi.

No	Parça Görseli	Parça Adı	Malzeme	Adet
22		20x20 Sigma Profil Ayak Bağlantısı	PLA Plastik	1
23		20x20 Sigma Profil Ayak	PLA Plastik	2
24		20x20 Sigma Profil Limit Switch Bağlantısı	PLA Plastik	3
25		Limit Switch	-	3
26		Kızak Bağlantısı Sağ	PLA Plastik	2
27		Kızak Bağlantısı Sol	PLA Plastik	2
28		Parmak Tutucu Uzun	PLA Plastik	2
29		Parmak Tutucu Kısa	PLA Plastik	2
30		Parmak Tutucu Uzun Sağ Helis Uç Bağlantısı	PLA Plastik	1
31		Kamera Sıkıştırıcısı	PLA Plastik	1
32		Kamera Tutucu	PLA Plastik	1
33		Logitech C525 Kamera	-	1
34		M5 T Somun Kanal 6	Standart	72
35		M3x30 Silindir Başlı İmbus Civata	Standart	8

Tablo 2.15. (Devamı) Malzeme listesi.

No	Parça Görseli	Parça Adı	Malzeme	Adet
36		M3 Somun	Standart	52
37		M3x35 Silindir Başlı İmbus Civata	Standart	12
38		M3x45 Silindir Başlı İmbus Civata	Standart	4
39		M5x20 Silindir Başlı İmbus Civata	Standart	2
40		M3x25 Silindir Başlı İmbus Civata	Standart	4
41		M5x20 Silindir Başlı İmbus Civata	Standart	16
42		M5 Somun	Standart	14
43		M3x16 Silindir Başlı İmbus Civata	Standart	36
44		M5x16 Silindir Başlı İmbus Civata	Standart	70
45		M3x20 Silindir Başlı İmbus Civata	Standart	24
46		M3x8 Silindir Başlı İmbus Civata	Standart	18
47		M3x2,5 Setskur	Standart	12
48		M4x6 Setskur	Standart	12
49		M3 T Somun Kanal 6	Standart	12

2.6. Esnek Robotik Kavrayıcı İşlevsellik Deneyleri

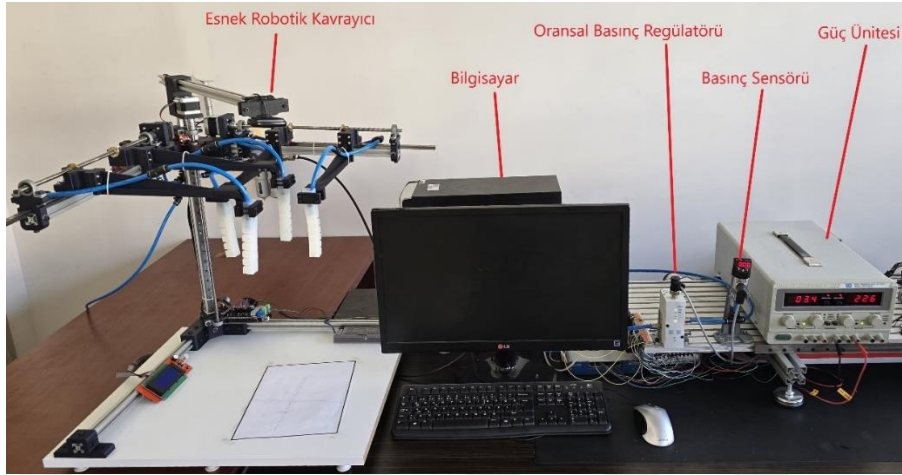
Esnek robotik kavrayıcının üretilmesinden sonra işlevselliğini ve çalışma performansını gözlemlemek adına bir deney seti kurulmuştur. Bu deney seti ile esnek robotik kavrayıcıya bağlanmış 4 adet parmağın beraber çalışma performansları incelenecektir. 0,2 bar, 0,4 bar, 0,6 bar ve 0,8 bar basınçta kavrayıcının potansiyeli ölçülmüştür.

2.6.1. Deney düzeneği tanıtımı

Bölüm 2.4.1.'de anlatıldığı gibi esnek robotik kavrayıcının üzerindeki parmaklar basınçlandırılmış hava kullanılarak hareket ettirilecektir. Havanın parmaklara ulaşması için Tamsan TVK-1900TK marka kompresörden gelen 8 bar basınçlı hava, Jelpc 1/2" OU-Midi marka ikili şartlandırıcıya girmektedir. Şartlandırıcı, kompresörden gelen değişken hava akışını 6 bar basınçta dengede tutarken aynı zamanda hava içerisindeki istenmeyen partikülleri filtrelemekte ve kuru havayı yağlamaktadır. Şartlandırıcı ile 6 bar basınçta sabitlenen hava, Festo VPPM-6L-L-1-G18-0L10H-V1P-S1 marka dijital 3 yollu oransal regülatöre girmektedir. Oransal regülatöre verilen akım ile, bu akıma karşılık gelen basınç değeri çıkış hattından tahliye edilmektedir. İstenilen çıkış değeri ayarlanarak oransal regülatörden ayrılan hava, Festo SPAW-P10R-G14F-2PV-M12 marka dijital basınç sensörüne girmektedir. Basınç sensörü sayesinde hat üzerindeki gerçek basınç okunarak teyit edilmektedir. Basınç sensöründen çıkan basınçlı hava silikon parmağa ulaşmaktadır. Şartlandırıcı ile silikon parmak arasındaki basınçlı hava taşınımı, Festo marka Ø8x1,25 pnömatik boru ile yapılmaktadır. Kompresör ile şartlandırıcı arasındaki basınçlı hava taşınımı ise 1" metal boru ile sağlanmaktadır.

Dijital cihazlara elektrik sağlaması adına Good Will GPC-3060D marka güç kaynağı kullanılmıştır. Güç kaynağı, dijital oransal regülatöre ve dijital basınç sensörüne güç sağlamaktadır. Dijital oransal regülatörü kontrol edebilmek için Arduino Mega 2560 R3 mikrodenetleyici ve mikro denetleyiciye doğrudan montajlanabilen RepRap Ramps 1.4 kontrol kartı kullanılmıştır. Kontrol kartı, mikrodenetleyiciye bağlandıktan sonra dijital basınç regülatörü, kontrol kartına bağlanmıştır. Kontrol kartı sayesinde oransal regülatör, bilgisayar yardımıyla seçilen basınç değerini sisteme iletmektedir. Burada mikrodenetleyici, kontrol kartını yönlendiren araç olarak kullanılmıştır. Sistem

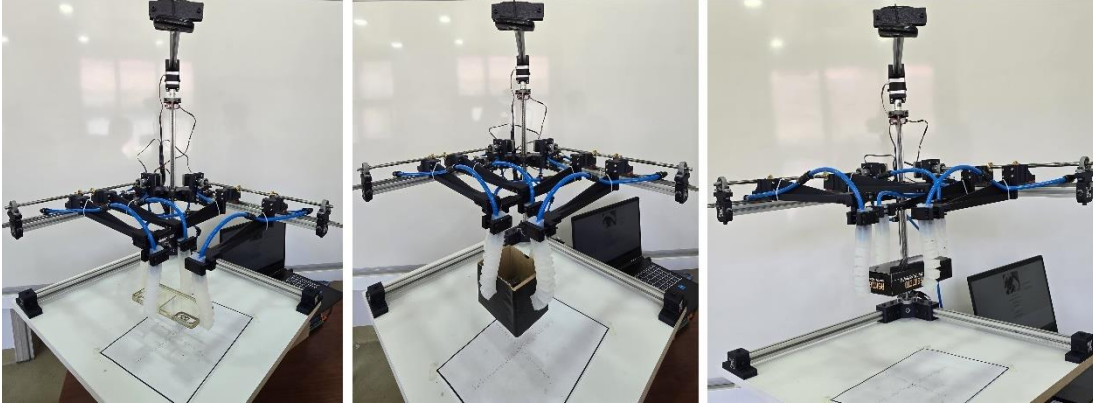
kurulduktan sonra Şekil 2.81’de gösterilen kontrol ekranı yardımıyla robotik kavrayıcı kontrol edilerek deneyler yapılmıştır. Deney seti Şekil 2.88’de gösterilmiştir.



Şekil 2.88. Kavrayıcı deney düzeneği.

2.6.2. Farklı cisimleri kavrama kabiliyetinin ölçülmesi

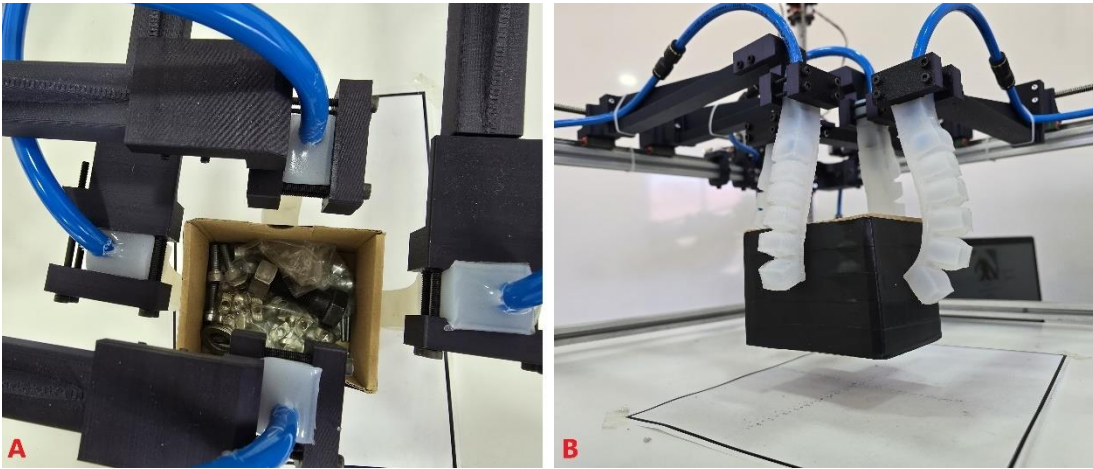
Esnek robotik kavrayıcının Şekil 2.89’da gösterildiği gibi farklı boyutlara sahip nesneleri kavrayıp kaldırabilmesi beklenmiştir. Bu sebeple birbirinden farklı en, boy ve yüksekliğe sahip nesneler manipüle edilmeye çalışılmıştır. Görüntü işleme ve ölçü algılama algoritması yalnızca kare ve dikdörtgen nesnelerin boyutlarını algılayabildiğinden, nesneler kameranın algılayabileceği şekilde seçilmiştir. Yapılan testler sonucunda genişliği en fazla 200 mm, en az 50 mm olan kare ve dikdörtgen nesneler kavranabilmiştir. Kavrama öncesi parmaklar zemine kadar indiğinden parmaklara basınç verildiğinde yere temas edebilmektedir. Bu sebeple kavranan nesnenin yüksekliğinin en az 12 mm olması gerektiği belirlenmiştir. Maksimum yükseklik konusunda ise 12 mm ile 330 mm arasında herhangi bir limit yoktur. Yüksekliği küçük olan nesnelerde eğilme açısı küçük olacağından 0,2 bar gibi düşük basınçlar kullanılması gerektiği anlaşılmıştır. Fakat aynı zamanda bu durum parmak ucu kuvvetinin de az olduğu anlamına gelecektir. Dolayısıyla yüksekliği 12 mm ile 15 mm arasındaki nesnelerin ağırlıklarının maksimum 50 g olması beklenmektedir. Aksi halde kavrama işlemi gerçekleşmemektedir. Bir diğer değinilmesi gereken konu ise kavranan nesnelerin yüzey malzemeleridir. Örneğin ham karton kutuların belirli ağırlıklarda manipüle edilmesinin, dışı parlak reklam kâğıdı kaplı kutulara göre daha zor manipüle edildiği gözlemlenmiştir. Cam, plastik, parlak yüzeyli karton gibi nesneleri daha kolay kavrarken, silikon malzemenin tutunma gücünün zayıf olacağı metal, ham karton gibi nesneleri daha zor kavramıştır.



Şekil 2.89. Farklı cisimlerin kavranması.

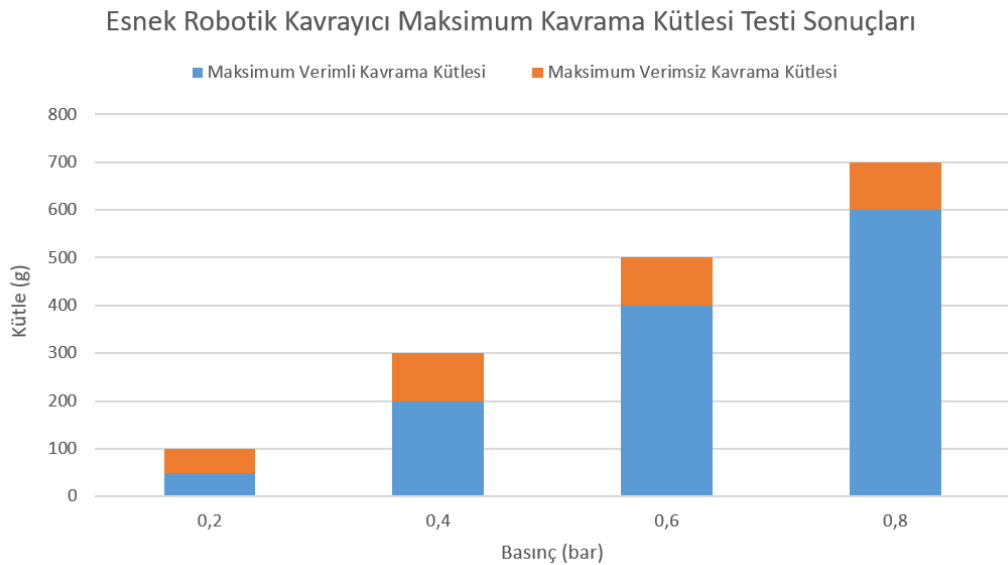
2.6.3. Farklı kütlerdeki cisimleri kaldırma kabiliyetinin ölçülmesi

Esnek robotik kavrayıcının parmakları farklı basınçlarda farklı tepkiler vermektedir. Verilen tepkileri ölçmek ve değerlendirmek, kavrayıcının çalışma aralığını belirlemek adına önemli bir adımdır. Bu sebeple 0,2 bar, 0,4 bar, 0,6 bar ve 0,8 bar basınç değerlerinde kavrayıcının verimli olarak kaldıracabileceği maksimum kütleler tespit edilmiştir. Kütle ölçümü 120 mm ene, 90 mm boya ve 100 mm yüksekliğe sahip cıvata dolu bir kutu ile yapılmıştır. Kutu, Şekil 2.90'da görülmektedir. Cıvata dolu kutu, zemin ile temasını kestikten sonra en az 10 s beklenmiştir. Kayma veya düşme olmadığı durumda kaldırma işlemi başarılı sayılmış ve Şekil 2.91'de mavi renk ile gösterilmiş olan verimli kavrama kütlesi olarak isimlendirilmiştir. Kavrama gerçekleştikten ve nesnenin zemin ile teması kesildikten sonra 10 s içerisinde nesnelerin parmaklardan kayması veya ayrılması durumu ise Şekil 2.91'de turuncu renk gösterilmiş olan verimsiz kavrama kütlesi olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 2.90. Cıvata dolu kutu: A) Üstten görünüm, B) Yandan görünüm.

Esnek robotik kavrayıcının 0,2 bar basınçta kaldırabildiği maksimum kütle değeri 50 g olarak tespit edilmiştir. 50 g ile 100 g arasındaki kütlelerde kutunun zemin ile teması kesilse de 10 s boyunca kavrama yapılamamış, kutu parmaklardan kaymıştır. 100 g ve üzeri kütlelerde kutunun zemin ile bağlantısı kesilememiş, parmaklar kavrama yapamamıştır. Kavrayıcının 0,4 bar basınçta kaldırabildiği maksimum kütle değeri 200 g olarak tespit edilmiştir. 200 g ile 300 g arasındaki kütlelerde kutunun zemin ile teması kesilse de 10 s boyunca kavrama yapılamamış, kutu parmaklardan kaymıştır. 300 g ve üzeri kütlelerde kutunun zemin ile bağlantısı kesilememiş, parmaklar kavrama yapamamıştır. Kavrayıcının 0,6 bar basınçta kaldırabildiği maksimum kütle değeri 400 g olarak tespit edilmiştir. 400 g ile 500 g arasındaki kütlelerde kutunun zemin ile teması kesilse de 10 s boyunca kavrama yapılamamış, kutu parmaklardan kaymıştır. 500 g ve üzeri kütlelerde kutunun zemin ile bağlantısı kesilememiş, parmaklar kavrama yapamamıştır. Kavrayıcının 0,8 bar basınçta kaldırabildiği maksimum kütle değeri 600 g olarak tespit edilmiştir. 600 g ile 700 g arasındaki kütlelerde kutunun zemin ile teması kesilse de 10 s boyunca kavrama yapılamamış, kutu parmaklardan kaymıştır. 700 g ve üzeri kütlelerde kutunun zemin ile bağlantısı kesilememiş, parmaklar kavrama yapsa da dikey hareketi sağlayan step motorun sağladığı tork değeri 700 g ve üzeri kütleleri kaldırmaya yetmemiştir. Yapılan testler sonucunda esnek robotik kavrayıcının 0,1 g ile 600 g arasında kütleye sahip nesneleri verimli olarak manipüle edebildiği tespit edilmiştir. Kaldırma kapasitesi grafiği Şekil 2.91’de gösterilmiştir.



Şekil 2.91. Manipüle edilebilen nesnelerin maksimum ağırlıkları grafiği.



3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüz robotik endüstrisinin oldukça geniş bir yelpazeye yayılması sebebiyle birçok otomasyon sisteminde hassas cisimlerin manipüle edilmesi ve değişken ortamlardaki farklı çalışma koşullarına uyum sağlama gereksinimi, geleneksel olarak kullanılan sert tutucuya sahip robotik kavrayıcıların yerini alabilecek yeni nesil kavrayıcıların tasarlanmasını zorunlu hale getirmiştir. Bu zorunluluğun temeli olan ve kavrama işleminin hassas olmasını sağlayan pnömatik yapay kaslar gerek esneklik gerek maliyet gerekse bakım gerektirmemesi sebebiyle literatürde dikkat çeken bir araştırma konusu olmuştur. Yapılan araştırmalarda genellikle yapay kasların kendisi üzerine odaklanılmıştır. Yapay parmakları kontrol edecek sistemler genellikle sabit, hareket edemeyen, etse bile hafif ağırlıklar kaldırabilen ve endüstriyel amaçla kullanılamayacak şekilde çalışılmıştır. Bu sebeple üretilen özelleştirilmiş yapay parmakları manipüle edecek sistemlerin tasarımı ve üretimi konusunda çalışılmaya değer noktalar tespit edilmiştir. Çevresel algılama yeteneklerine sahip olan, dinamik üretim hatlarında veya özelleştirilmiş imalatlarda kullanılabilen, otonom çalışarak süreçleri hızlandırabilen, çalışma alanını değiştirerek belirli boyutlarda nesnelerle çalışabilen ve en önemlisi geleneksel rijit kavrayıcıların yerini alabilecek pnömatik yapay kas tabanlı bir kavrayıcı üzerine çalışılmıştır. Uygulanan yöntemler ile insan ve makine etkileşiminin yoğun olduğu endüstriyel uygulamalarda önemli bir boşluğu doldurmak hedeflenmiştir.

Yapılan çalışma sonucunda; eğilen pnömatik yapay kas tabanlı, 4 adet parmağa sahip olan, kavrama aralığı x, y ve z ekseninde değiştirilebilen, 50 mm ile 200 mm aralığındaki eni ve boya sahip, 12 mm ile 330 mm aralığındaki yüksekliğe sahip, kütlesi 600 g ve daha az olan dikdörtgen ve kare prizma nesneleri kavrayabilen, görüntü işleme ile farklı nesnelere göre ön kavrama pozisyonuna konumlanabilen, otomatik ve manuel kontrollü esnek robotik kavrayıcı tasarlanmış ve üretilmiştir.

Esnek robotik kavrayıcıda kullanılacak olan parmaklar için malzeme seçimi yapılmıştır. Piyasada bulunabilirliği, maliyetsiz oluşu ve biyoyumlu oluşu sebebiyle 20 Shore VRM-520, 20 Shore VRM-620, 20 Shore Aksil-G20, 40 Shore VRM-540, 40 Shore Aksil-G40 olmak üzere 5 çeşit RTV-2 kalıp silikonu seçilmiştir. Seçilen

malzemeler tedarik edilerek, çekme testlerine tabii tutulmak amacıyla üretilen kalıplarda döküm işlemleri yapılmıştır. Elde edilen silikon plakalar, köpek kemiğine benzer çekme testi numunesi üretmek amacıyla kesme kalıbına sokulmuştur. Her bir malzeme grubundan üretilmiş 4'er adet numuneye çekme testi uygulanmıştır. Çekme testi ile her bir malzeme grubundan 4'er adet elde edilen kopma kuvveti ve uzama miktarı verilerinin, her malzeme grubu kendi içerisinde olacak şekilde ortalaması alınmıştır. Sonuçlar karşılaştırıldığında hem esnekliği hem de dayanıklılığı bakımından en ideal malzeme olan 20 Shore VRM-520 malzemesi, parmak üretimi için seçilmiştir. Seçilen malzeme için çekme testi ile elde edilen 4 farklı kuvvet-uzama grafiği, PilotDigitizer programı ile sayısal verilere dönüştürülmüştür. 4 numunenin sayısal verinin ortalaması alınmış ve tek bir tabloya dönüştürülmüştür. Oluşturulan tablo kullanılarak 20 Shore VRM-520 malzemesine ait gerilme-gerinim grafiği oluşturulmuştur. Bu grafik bilgisayar destekli simülasyonlarda kullanılmıştır.

Malzemenin belirlenmesinin ardından parmakların tasarımı, analizi ve üretimi aşamasına geçilmiştir. Parmak tasarımında birçok parametre olduğu için değişken olarak duvar kalınlıkları belirlenmiştir. 2 mm, 3 mm ve 4 mm olmak üzere 3 farklı tipte duvar kalınlığına sahip parmak üretilmesine karar verilmiştir. Parmakların toplam yükseklikleri dışındaki ölçüler sabit kalmaktadır. Bu sebeple duvar kalınlığı arttıkça malzeme tüketimi artmış, iç odacık hacmi azalmıştır. Ayrıca parmakların kolayca kalıptan ayrılabilmesi için üretim 4 aşamada, parçalar halinde gerçekleştirilmiştir. Parmağın tasarımı 1 adet üst gövde, 1 adet uzayamaz alt taban, 1 adet konnektör bağlantısından oluşmaktadır.

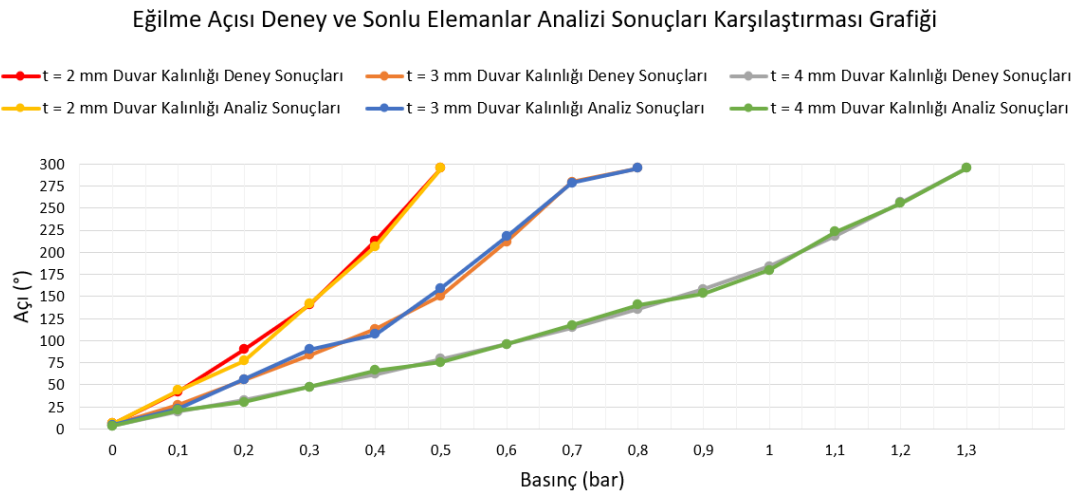
Tasarımları tamamlanan 3 çeşit parmağın eğilme performanslarını incelemek amacıyla bilgisayar destekli sonlu elemanlar analizleri yapılmıştır. Analizler yekpare silikon gövde ve gövdenin alt yüzeyine tamamıyla temas eden 0,15 mm kalınlığında cam elyaf geometri ile Ansys programında yapılmıştır. Daha önce çekme testleri ile belirlenen silikon malzemenin gerilme gerinim değerleri simülasyona tanımlanmıştır. Uzayamazlığın sağlanması için cam elyafın mekanik özellikleri simülasyona tanımlanmıştır. Silikon hammadde esnek olduğundan hiperelastik malzeme modellerinden, yalnızca tek eksenli çekme testine ihtiyaç duyan, Yeoh modeli ile analiz yapılmıştır. Geometrilere Nonlinear Mesh ataması yapılmıştır. Mesh elementleri Hexahedron olarak belirlenmiştir. Geçiş bölgelerinde gerekli olması halinde Tetrahedron ve Pyramid elementlere izin verilmiştir. Silikon gövde ve cam elyafın

birlikte hareket edebilmesi için gerekli sınır şartları sağlandıktan sonra parmaklar, hava giriş deliği yüzeyinden sabitlenmiştir. Giriş deliği yüzeyine dik ve parmak ucuna doğru olacak şekilde yer çekimi ivmesi tanımlanmıştır. Parmağın iç odacıklarına 0 bar basınçtan başlayarak, parmakların maksimum eğilme açısına ulaşmasını sağlayacak basınç değerine kadar 0,1 bar'lık artışlarla basınç verilmiştir. Tüm analizler 2 mm, 3 mm ve 4 mm duvar kalınlığına sahip parmaklar için yapılmıştır. Analizler sonucunda 2 mm duvar kalınlıklı parmak 0,5 bar basınçta maksimum eğilme açısı değeri olan 295°'ye ulaşmıştır. 3 mm duvar kalınlıklı parmak 0,8 bar basınçta 295° eğilme açısına ulaşmıştır. 4 mm duvar kalınlıklı parmak ise 1,3 mm basınçta 295° eğilme açısına ulaşmıştır. Duvar kalınlığı arttıkça eğilme açısının azaldığı görülmüştür.

Tasarlanan parmakların tüm parçaların üretilmesi adına 3D yazıcı kullanarak plastik kalıplar tasarlanmış ve üretilmiştir. Her bir duvar kalınlığı için ayrı ayrı olacak şekilde kalıplar, iç odacık kalıbı, dış yüzey kalıbı, alt taban kalıbı ve konnektör kalıbı olmak üzere 4 parçadan oluşmaktadır. Silikon hammadde ve katalizör karıştırılıp vakumlandıktan sonra kullanıma hazır hale gelmektedir. Sıvı silikon öncelikle dış yüzey kalıplarına dökülmüştür. Dış yüzey kalıplarının üzerine iç odacık kalıpları yerleştirilmiş ve boş kalan kısımlara sıvı silikon ilave edilmiştir. Üst gövde parçaları bu şekilde kürlenmeye bırakılmıştır. Ardından cam elyaf şerit, alt taban kalıplarına yerleştirildikten sonra kalıplara sıvı silikon dökülmüştür. Alt taban parçaları bu şekilde kürlenmeye bırakılmıştır. Kürlenmenin ardından üst gövde ve alt taban parçaları kalıplardan çıkartılmış ve sıvı silikon ile birbirlerine yapıştırılıp kürlenmeye bırakılmıştır. Birleşme işlemi tamamlandığında parmağın hava girişine epoksi yapıştırıcı uygulanarak pnömatik boru takılmış, konnektör kalıbı kullanarak üzerine sıvı silikon dökümü yapılmış ve kürlenmeye bırakılmıştır. Kürlenme tamamlandığında parmaklar kullanıma hazır hale gelmiştir.

En verimli duvar kalınlığına sahip parmağı seçmek için bir deney düzeneği oluşturularak parmakların basınç dayanımları, tutma kuvvetleri ve eğilme performansları incelenmiştir. Deney düzeneği bilgisayar aracılığıyla bir kontrol arayüzü ile kontrol edilmektedir. Parmak çeşitlerine 0,1 bar'lık kademeli artışlar ile basınç uygulanmıştır. 2 mm duvar kalınlığına sahip parmağın 1,1 bar basınçta, 3 mm duvar kalınlığına sahip parmağın 1,3 bar basınçta, 4 mm duvar kalınlığına sahip parmağın 1,4 bar basınçta patladığı gözlemlenmiştir. Duvar kalınlığının artması ile basınç dayanımının da arttığı belirlenmiştir. Basınç dayanımı bakımından en

performanslı parmak 4 mm duvar kalınlıklı parmakken, en az performanslı parmak ise 2 mm duvar kalınlıklı parmak olmuştur. Parmaklara 0,1 bar'lık kademeli artışlar ile parmakların patlama basınçlarından 0,1 bar düşük basınca veya maksimum eğilme açısı olan 295°'ye ulaşana kadar basınç verilerek eğilme performansları izlenmiştir. Eğilme açısı, parmak uç yüzeyinin yer ile yaptığı açı olarak belirlenmiş ve ölçümler yapılmıştır. 2 mm duvar kalınlığına sahip parmak 0,5 bar'da daha fazla dönemeyecek pozisyona gelerek maksimum dönme açısı olan 295° açısına ulaşmıştır. 3 mm duvar kalınlığına sahip parmak 0,8 bar'da maksimum dönme açısı olan 295° açısına ulaşmıştır. 4 mm duvar kalınlığına sahip parmak ise 1,3 bar'da maksimum dönme açısı olan 295° açısına ulaşmıştır. Veriler değerlendirildiğinde duvar kalınlığının artması ile eğilme açısının azaldığı belirlenmiştir. Eğilme açısı bakımından en performanslı parmak 2 mm duvar kalınlıklı parmakken, en az performanslı parmak ise 4 mm duvar kalınlıklı parmak olmuştur. Her ne kadar eğilme açısının azalması performans düşüşü olarak görülse de duvar kalınlığının artmasıyla parmakların ara pozisyon kontrol edilebilirliği artmıştır. 2 mm duvar kalınlıklı parmağı kontrol edecek 5 basınç değeri, 3 mm duvar kalınlıklı parmağı kontrol edecek 8 basınç değeri ve 4 mm duvar kalınlıklı parmağı kontrol edecek 13 basınç değeri bulunduğu görülmüştür. Ayrıca deneylerden önce yapılan sonlu elemanlar analizleri sonuçları ile deney sonuçları kıyaslandığında, analizlerin doğruluğunun kanıtlanmış olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan analizler ile yapılan deneyleri gösteren grafik Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Eğilme açısı deney verileri ile analiz verileri karşılaştırma grafiği.

Her bir basınç değeri ve parmak tipi için analiz-deney sapma oranı Tablo 3.1’de verilmiştir. Tablodaki değerlerin ortalaması alındığında elde edilen ortalama sapma değeri %3,6 olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.1. Parmak eğilme açısı sonlu elemanlar analizleri ile deneysel verilerin sapma oranı.

t = 2 mm		t = 3 mm		t = 4 mm	
P (bar)	Sapma (%)	P (bar)	Sapma (%)	P (bar)	Sapma (%)
0	0	0	0	0	0
0,1	3,2	0,1	18,3	0,1	7,5
0,2	16,6	0,2	0,9	0,2	7,6
0,3	0,6	0,3	7,1	0,3	0,2
0,4	3,2	0,4	5,3	0,4	6,4
0,5	0	0,5	5,5	0,5	5,3
-	-	0,6	2,7	0,6	0,4
-	-	0,7	0,4	0,7	2
-	-	0,8	0	0,8	3,8
-	-	-	-	0,9	3,5
-	-	-	-	1	2,2
-	-	-	-	1,1	2,3
-	-	-	-	1,2	0,5
-	-	-	-	1,3	0

Yapılan parmak ucu kuvveti deneylerinde parmaklara 0,1 bar’lık kademeli artışlar ile parmakların patlama basınçlarından 0,1 bar düşük basınca kadar basınç verilmiştir.

Kuvvet ölçer ile ölçülen değerler incelendiğinde 2 mm duvar kalınlıklı parmağın 1 bar'da 4,08 N, 3 mm duvar kalınlıklı parmağın 1,2 bar'da 3,31 N, 4 mm duvar kalınlıklı parmağın ise 1,3 bar'da 1,27 N kuvvet ürettiği görülmüştür. Toplanan verilere göre duvar kalınlığı arttıkça parmak ucu kuvvetinin azaldığı gözlemlenmiştir. Parmak ucu kuvveti açısından en performanslı parmak 2 mm duvar kalınlıklı parmakken, en az performanslı parmak ise 4 mm duvar kalınlıklı parmak olmuştur. Elde edilen tüm deney verileri ele alındığında dengeli bir performans gösteren 3 mm duvar kalınlıklı parmağın kullanılması kararlaştırılmıştır.

Parmakların kontrol edilebilmesi için bir kavrayıcı geliştirilmiştir. Kavrayıcı mekanizması vidalı miller üzerine konumlanan parmakların step motorlar ile hareket ettirilmesi temeline dayanır. Yatay hareketi 1 adet step motor sağlamaktadır. 2 motor üzerinde bağlı 2'şer parmak, birbirine zıt ve eşit miktarda hareket yapmakta ve kavrama aralığını değiştirmektedir. Bir motor ise parmakların dikey olarak hareket etmesini sağlamaktadır. Kavrayıcıya entegre edilen kamera sayesinde nesnenin dış boyutları algılanarak parmaklar, nesneye göre ön kavrama pozisyonuna getirilmektedir. Ön kavrama pozisyonundan sonra nesne kavranarak zemin ile teması kesilmektedir. Kavrama kabiliyetinin ölçülmesi adına bir deney düzeneği geliştirilmiştir. Farklı boyuttaki nesnelerin manipüle edilebilirliği incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda en ve boyu 50 mm ile 200 mm arasında değişen, yüksekliği ise 12 mm ile 330 mm arasında değişen dikdörtgen veya kare prizma şeklindeki nesnelerin kavranabildiği gözlemlenmiştir. Nesnenin yüksekliği azaldıkça kullanılan basınç değerinin de azalması gerektiği anlaşılmıştır. Fakat basıncın azalması aynı zamanda kavrama kuvvetini de azaltmaktadır. Kavrayıcının yük kapasitesinin belirlenmesi için 0,2 bar, 0,4 bar, 0,6 bar ve 0,8 bar basınçta kaldırabileceği maksimum kütle tespit edilmiştir. Kavrayıcının verimli olarak kaldırabildiği kütle değerleri, 0,2 bar'da 50 g, 0,4 bar'da 200 g, 0,6 bar'da 400 g, 0,8 bar'da ise 600 g olarak belirlenmiştir. Dikey hareketi sağlayan step motor, 600 g yükten sonra yetersiz kaldığı için 1 bar ve 1,2 bar basınç değerleri denenmemiştir.

Yapılan çalışma sonucunda hassas nesneleri kavrayabilecek endüstriyel bir kavrayıcı geliştirilmiştir. Bu kavrayıcı sayesinde kırılğan ve deforme olabilen nesneler otonom olarak kavranabilmektedir. Kamera ile boyut algılama algoritması ile nesneye özel kavrama pozisyonu geliştirebilen kavrayıcının, 600 g yüke kadar nesneleri kaldırabilmesi sebebiyle endüstriyel alanda kullanılabilir bir seviyede olduğu

kanıtlanmıştır. Her ne kadar yapılan çalışma, pnömatik yapay kas tabanlı kavrayıcılar ile ilgili literatür boşluğunu doldurmuş olsa da kavrayıcının bazı noktalarda geliştirmeye açık olduğu görülmektedir. Geliştirmeler yapıldığı takdirde pnömatik yapay kas tabanlı esnek kavrayıcıların endüstriyel alanda kullanım alanlarının artabileceği öngörülmektedir. Geliştirme önerileri maddeler halinde sıralanmıştır.

- Silikon parmakların ucuna plastik malzemeden üretilmiş tırnak eklenirse ince nesneler daha rahat kavranabilir.

- Silikon parmakların kavrama yüzeylerine dışbükey çentikler eklenerek tutma kuvveti artırılabilir.

- Görüntü işleme mekanizması tüm nesnelerin boyutlarını algılayacak şekilde geliştirilebilir. Karmaşık geometrilerin en geniş noktalarını referans alarak kavrama pozisyonu geliştirebilir.

- Dikey hareketi sağlayan step motorun sağlayacağı tork değeri artırılırsa, kavrayıcının kaldırabileceği maksimum kütle değeri de artabilir.

- Kavrayıcının zemini hareketli hale getirilerek veya kavrayıcının gövdesi hareketli hale getirilerek kavrayıcının kavrama noktası değiştirilebilir hale getirilebilir. Böylece kaldırılan nesne farklı bir konuma taşınabilir.

- Sisteme step motor eklenerek tüm parmakların birbirinden bağımsız hareket etmesi sağlanabilir.

- Parmakları taşıyan kolların boylarının kısalması veya parmakların kollar üzerinde doğrusal hareket yapması sağlanabilir. Böylece parmaklar kavrama alanları içerisinde istenilen pozisyona gidebilir.

- Esnek robotik kavrayıcı masa tipi yerine robot kola monte edilecek şekilde yeniden tasarlanabilir. Bu tasarım parmakların serbestlik derecesini artıracak ve parmakların uzayda istedikleri konuma ulaşmalarını sağlayacaktır.



KAYNAKLAR

- Advancing Standards Transforming Markets. (2021). *ASTM D2240-15 Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness*. <https://store.astm.org/d2240-15r21.html>.
- Armanini, C., Junge, K., Johnson, P., Whitfield, C., Renda, F., Calisti, M., & Hughes, J. (2024). Soft robotics for farm to fork: applications in agriculture & farming. *Bioinspiration & Biomimetics*, 19(2). Institute of Physics. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/ad2084>.
- Caldwell, D. G., & Tsagarakis, N. (2002). Biomimetic actuators in prosthetic and rehabilitation applications. *Technology and Health Care*, 10(2), 107-120. <https://doi.org/10.3233/thc-2002-10203>.
- Chang, W. H., & Kim, Y. H. (2013). Robot-assisted Therapy in Stroke Rehabilitation. *Journal of Stroke*, 15(3), 174-181. <https://doi.org/10.5853/jos.2013.15.3.174>.
- Chou, C. P., & Hannaford, B. (1994). Static and dynamic characteristics of McKibben pneumatic artificial muscles. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1, 281-286. <https://doi.org/10.1109/robot.1994.350977>.
- Cui, Y., Liu, X. J., Dong, X., Zhou, J., & Zhao, H. (2021). Enhancing the Universality of a Pneumatic Gripper via Continuously Adjustable Initial Grasp Postures. *IEEE Transactions on Robotics*. <https://doi.org/10.1109/tro.2021.3060969>.
- Cymerman, J., Yim, S. S., Larkin, D., Pegues, K., Gengler, W., Norman, S., Maxwell, Z., Gasparri, N., Pollin, M., Calderon, C., Angle, J., & Collier, J. (2019, 13-15, Ağustos). Evolving the Robotic Technology Kernal to Expand Future Force Autonomous Ground Vehicle Capabilities. *Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium (GVSETS)*. <https://doi.org/10.4271/2024-01-3824>.
- Daerden, F. & Lefeber, D. (2002). Pneumatic Artificial Muscles: actuators for robotics and automation. *European Journal of Mechanical and Environmental Engineering*, 47(1).
- Desai, J. P., Sheng, J., Cheng, S. S., Wang, X., Deaton, N. J., & Rahman, N. (2019). Toward Patient-Specific 3D-Printed Robotic Systems for Surgical Interventions. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 1(2), 77-87. <https://doi.org/10.1109/tmrb.2019.2912444>.
- Elsayed, Y., Vincensi, A., Lekakou, C., Geng, T., Saaj, C. M., Ranzani, T., Cianchetti, M., & Menciassi, A. (2014). Finite Element Analysis and Design Optimization of a Pneumatically Actuating Silicone Module for Robotic Surgery Applications. *Soft Robotics*, 1(4), 255-262. <https://doi.org/10.1089/soro.2014.0016>.
- Ferris, D. P., Czerniecki, J. M., Hannaford, B., Puget, V. A., & System, H. (2005). An ankle-foot orthosis powered by artificial pneumatic muscles. *J Appl Biomech*, 21(2), 189-197. <https://doi.org/10.1123/jab.21.2.189>.

- Festo Ürün Kataloğu (2020). Pnömatik sürücüler. https://www.festo.com/tr/tr/p/fluidic-muscle-id_DMSP/ adresinden 18 Aralık 2024 tarihinde alınmıştır.
- Figliozi, M. A. (2020). Carbon Emissions Reductions in Last Mile and Grocery Deliveries Utilizing Autonomous Vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 85. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102443>.
- Flores-Abad, A., Ma, O., Pham, K., & Ulrich, S. (2014). A review of space robotics technologies for on-orbit servicing. *Progress in Aerospace Sciences*, 68, 1-26. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2014.03.002>.
- Gassert, R., & Dietz, V. (2018). Rehabilitation robots for the treatment of sensorimotor deficits: a neurophysiological perspective. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s12984-018-0383-x>.
- Hall, K. (2011). *Dynamic Control for a Pneumatic Muscle Actuator to Achieve Isokinetic Muscle Strengthening* [Doktora Tezi]. Wright State University.
- Hao, Y., Gong, Z., Xie, Z., Guan, S., Yang, X., Ren, Z., Wang, T., & Wen, L. (2016). Universal soft pneumatic robotic gripper with variable effective length. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. 35, 6109-6114. Chinese Control Conference (CCC). <https://doi.org/10.1109/chicc.2016.7554316>.
- Howe, R. D., & Matsuoka, Y. (1999). Robotics for Surgery. Annual Review of Biomedical Engineering. *Robotics for Surgery*, 1, 211-240. <https://doi.org/10.1146/annurev.bioeng.1.1.211>.
- Hu, X., & Assaad, R. H. (2023). The use of unmanned ground vehicles (mobile robots) and unmanned aerial vehicles (drones) in the civil infrastructure asset management sector: Applications robotic platforms sensors and algorithms. *Expert Systems With Applications*, 232. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120897>.
- Immega, G. B., (1986). *ROMAC muscle powered robots*. Technical Report MS86-777, Society of Manufacturing Engineers.
- İbiş, M. Ö., Şimşir, S. E., İriç S., Kaptı, A. O., Kutlu, M. Ç. (2024, 29-30, Kasım). Duvar Kalınlığının Eğilen Pnömatik Yapay Kasların Performansı Üzerine Etkisi. *13 th International Marmara Science and Social Sciences Congress* (202-212), Kocaeli, Türkiye.
- Jain, S., Dontu, S., Teoh, J. E. M., & Alvarado, P. V. Y. (2023). A Multimodal Reconfigurable Workspace Soft Gripper for Advanced Grasping Tasks. *Soft Robotics*, 10(3), 527-544. <https://doi.org/10.1089/soro.2021.0225>.
- Kaptı, A. O. (2023). Nonlinear response and fluctuating torque characteristics of the pneumatic muscle actuators at crankshaft application. *Smart Materials and Structures*, 32(10). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/acf96d>.
- Kaptı, A. O., Atakul, I. (2023). Development of a Pneumatic, Artificial-Muscle- Based Press for Punching Thin Metal Sheets. *Materials and Technology*, 57(3), 267-274. <https://doi.org/10.17222/mit.2023.783>.
- Kukolj, M. (1988). *Axially contractible actuator*. U.S. Patent No. 4 733 603.

- Leclair, J., Partoel, S., Helal, A., & Doumit, M. (2020). Development of an unpowered ankle exoskeleton for walking assist. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 15(1), 1-13. <https://doi.org/10.1080/17483107.2018.1494218>.
- Lei, J., Ge, Z., Fan, P., Zou, W., Jiang, T., & Dong, L. (2022). Design and Manufacture of a Flexible Pneumatic Soft Gripper. *Applied Sciences*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/app12136306>.
- Lim, Y., Pongsakornsathien, N., Gardi, A., Sabatini, R., Kistan, T., Ezer, N., & Bursch, D. J. (2021). Adaptive Human-Robot Interactions for Multiple Unmanned Aerial Vehicles. *Robotics*, 10(1), 1-30. <https://doi.org/10.3390/robotics10010012>.
- Liu, Q., Zuo, J., Zhu, C., & Xie, S. Q. (2020). Design and control of soft rehabilitation robots actuated by pneumatic muscles: State of the art. *Future Generation Computer Systems*, 113, 620-634. <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.06.046>.
- Matheson, E., Minto, R., Zampieri, E. G. G., Faccio, M., & Rosati, G. (2019). Human–Robot Collaboration in Manufacturing Applications: A Review. *Robotics*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/robotics8040100>.
- Mawah, S. C., & Park, Y. J. (2023). Tendon-Driven Variable-Stiffness Pneumatic Soft Gripper Robot. *Robotics*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/robotics12050128>.
- Morin, A. H. (1953). *Elastic diaphragm*. U.S. Patent No. 2 642 091.
- Mosadegh, B., Polygerinos, P., Keplinger, C., Wennstedt, S., Shepherd, R. F., Gupta, U., Shim, J., Bertoldi, K., Walsh, C. J., & Whitesides, G. M. (2014). Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly. *Advanced Functional Materials*, 24(15), 2163-2170. <https://doi.org/10.1002/adfm.201303288>.
- Paynter, H. M. (1988). *Hyperboloid of revolution fluid-driven tension actuators and methods of making*. U.S. Patent No. 4 721 030.
- Peters, B. S., Armijo, P. R., Krause, C., Choudhury, S. A., & Oleynikov, D. (2018). Review of emerging surgical robotic technology. *Surgical Endoscopy*, 32(4), 1636-1655. <https://doi.org/10.1007/s00464-018-6079-2>.
- Polygerinos, P., Lyne, S., Wang, Z., Nicolini, L. F., Mosadegh, B., Whitesides, G. M., & Walsh, C. J. (2013). Towards a soft pneumatic glove for hand rehabilitation. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1512–1517. <https://doi.org/10.1109/iros.2013.6696549>.
- Pretto, A., Aravecchia, S., Burgard, W., Chebrolu, N., Dornhege, C., Falck, T., Fleckenstein, F. V., Fontenla, A., Imperoli, M., Khanna, R., Liebisch, F., Lottes, P., Milioto, A., Nardi, D., Nardi, S., Pfeifer, J., Popovic, M., Potena, C., Pradalier, C., Rothacker-Feder, E., Sa, I., Schaefer, A., Siegwart, R., Stachniss, C., Walter, A., Winterhalter, W., Wu, X., & Nieto, J. (2021). Building an Aerial–Ground Robotics System for Precision Farming: An Adaptable Solution. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 28(3), 29-49. <https://doi.org/10.1109/mra.2020.3012492>.
- Robinson, R. M., Kothera, C. S., & Wereley, N. M. (2014). Control of a Heavy-Lift Robotic Manipulator with Pneumatic Artificial Muscles. *Actuators*, 3(2), 41-65. <https://doi.org/10.3390/act3020041>.

- Rozo, L., Calinon, S., Caldwell, D. G., Jiménez, P., & Torras, C. (2016). Learning Physical Collaborative Robot Behaviors From Human Demonstrations. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(3), 513-527. <https://doi.org/10.1109/tro.2016.2540623>.
- Sandoval, J. A., Xu, T., Adibnazari, I., Deheyn, D. D., & Tolley, M. T. (2022). Combining Suction and Friction to Stabilize a Soft Gripper to Shear and Normal Forces for Manipulation of Soft Objects in Wet Environments. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 7(2), 4134-4141. <https://doi.org/10.1109/lra.2022.3149306>.
- Shi, L., Kayastha, S., & Katupitiya, J. (2017). Robust coordinated control of a dual-arm space robot. *Acta Astronautica*, 138, 475-489. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.06.009>.
- Stoll, J. T., Schanz, K., & Pott, A. (2020). Mechatronic Control System for a Compliant and Precise Pneumatic Rotary Drive Unit. *Actuators*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/ACT9010001>.
- Sumetheeprasit, B., Martinez, R., Paul, H., & Shimonomura, K. (2024). Long-Range 3D Reconstruction Based on Flexible Configuration Stereo Vision Using Multiple Aerial Robots. *Remote Sensing*, 16(2). <https://doi.org/10.3390/rs16020234>.
- Şimşir, S. E., İbiş, M. Ö., İriç S., Kaptı, A. O., Kutlu, M. Ç. (2024, 29-30, Kasım). Pnömatik Yapay Kaslar için Kuvvet Ölçebilen Deney Düzeneği Tasarımı ve Üretimi. *13 th International Marmara Science and Social Sciences Congress* (331-347), Kocaeli, Türkiye.
- Tennakoon, C. L., Kulasekera, A. L., Chathuranga, D. S., & Gopura, R. A. R. C. (2022). Variable Stiffness Soft Actuator using Layer Jamming for Food Handling. *MERCon 2022. Moratuwa Engineering Research Conference*. <https://doi.org/10.1109/mercon55799.2022.9906262>.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2006). *TS EN ISO 868 Plastikler ve ebonit- Batma sertliğinin durometre ile tayini (shore sertliği)*. <https://intweb.tse.org.tr/standard/standard/StandardAra.aspx>.
- Türk Standartları Enstitüsü. (2024). *TS ISO 37 Lastikler ve termoplastikler - Çekme gerilmesi-uzama özelliklerinin tayini*. <https://intweb.tse.org.tr/standard/standard/StandardAra.aspx>.
- Van Damme, M., Daerden, F., & Lefeber, D. (2005). A Pneumatic Manipulator used in Direct Contact with an Operator. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 4494-4499. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2005.1570812>.
- Wang, L., Gao, R., Váncza, J., Krüger, J., Wang, X. V., Makris, S., & Chryssolouris, G. (2019). Symbiotic human-robot collaborative assembly. *CIRP Annals*, 68(2), 701-726. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.002>.
- Wang, Z., Torigoe, Y., & Hirai, S. (2017). A Prestressed Soft Gripper: Design Modeling Fabrication and Tests for Food Handling. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(4), 1909-1916. <https://doi.org/10.1109/lra.2017.2714141>.

- Wickramatunge, K. C., & Leephakpreeda, T. (2010). Study on mechanical behaviors of pneumatic artificial muscle. *International Journal of Engineering Science*, 48(2), 188–198. <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2009.08.001>.
- Xiao, W., Du, X., Chen, W., Yang, G., Hu, D., & Han, X. (2021). Cooperative collapse of helical structure enables the actuation of twisting pneumatic artificial muscle. *International Journal of Mechanical Sciences*, 201. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106483>.
- Xu, Z., Zhang, H., & Qiu, J. (2022). Simulation on control system of the parallel ankle rehabilitation mechanism driven by Pneumatic Artificial Muscles. *Journal of Physics: Conference Series*, 2383(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2383/1/012096>.
- Yarlott, J. M. (1972). *Fluid Actuator*. U.S. Patent No. 3 645 173.
- Yeoh, O. H. (1993). Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber. *Rubber Chemistry and Technology*, 66(5), 754–771. <https://doi.org/10.5254/1.3538343>.
- Yim, M., Roufas, K., Duff, D., Zhang, Y., Eldershaw, C., & Homans, S. (2003). Modular Reconfigurable Robots in Space Applications. *Autonomous Robots*, 14, 225–237. <https://doi.org/10.1023/A:1022287820808>.
- Yu, M., Liu, W., Zhao, J., Hou, Y., Hong, X., & Zhang, H. (2022). Modeling and Analysis of a Composite Structure-Based Soft Pneumatic Actuators for Soft-Robotic Gripper. *Sensors*, 22(13). <https://doi.org/10.3390/s22134851>.
- Zhang, X., Yu, S., Dai, J., Oseyemi, A. E, Liu, L., Du, N., & Lv, F. (2023). A Modular Soft Gripper with Combined Pneu-Net Actuators. *Actuators*, 12(4), 172. <https://doi.org/10.3390/act12040172>.
- Zhong, G., Hou, Y., & Dou, W. (2019). A soft pneumatic dexterous gripper with convertible grasping modes. *International Journal of Mechanical Sciences*, 153&154, 445-456. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.02.028>.



EKLER

EK A. Robotik kavrayıcı Python kodları çalışma mantığı

Esnek robotik kavrayıcının manipüle edeceği nesne boyutlarının otomatik ölçümü ve alınan ölçümler doğrultusunda Marlin 1.9 yazılımını kullanan bir donanıma G-code komutları ile yönlendirme yapılması amaçlanmıştır. Sistem; görüntü işleme, seri haberleşme ve kullanıcı arayüzü bileşenlerini bütünleşmiş bir biçimde kullanmaktadır. Bu sistem, referans bir düzlem kullanarak nesne boyutlarını otomatik olarak ölçen ve ölçüm sonuçlarına göre fiziksel hareket komutu üreten bir platform sunar. Görüntü işleme ile ölçüm alınması ve elde edilen değerlere göre yönlendirme yapılması, endüstriyel otomasyon, kalite kontrol ve robotik sistemler için uygulanabilir bir çözüm önerisi sunmaktadır. Ayrıca, sistem kullanıcı dostu bir GUI üzerinden çalıştırılmakta olup, son kullanıcı deneyimini de kolaylaştırmaktadır. Tüm kurgu Python yazılımı üzerinden kurgulanmıştır. Python programlama dili ile OpenCV kütüphanesi ile görüntü işleme, Tkinter ile grafiksel kullanıcı arayüzü (GUI) oluşturma, pySerial ile Marlin tabanlı mikrodenetleyici ile seri haberleşme, PIL (Pillow) ile görsel dönüşüm işlemleri ve özel olarak geliştirilen cm_Oranı_Hesaplama modülü ile kontur tespiti ve fiziksel ölçüm dönüşümleri işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Sistem başlatıldığında şu adımlar gerçekleşir:

1-Sistem açıldığında, bağlı kameralar otomatik olarak listelenir. Kullanıcı, uygun kamerayı seçerek canlı video akışını başlatır. Görüntü, OpenCV aracılığıyla alınır ve her kare capture_video() fonksiyonu üzerinden güncellenir. Arayüz üzerinde görüntü gösterilir.

2-getContours() fonksiyonu ile görüntüdeki nesneler kontur tabanlı olarak tespit edilir. Adaptive threshold, morfolojik işlemler ve Canny edge detection ile birlikte çalışır. Adaptive threshold ve morfolojik işlemlerle nesnenin boyutlarının algılanmasını olumsuz yönde etkileyen gölgelenme ve ters ışık etkileri ortadan kaldırılmıştır. Bu şekilde sistem, değişen ortam koşullarına ayak uydurarak çalışmasını sürdürebilmektedir.

3-Referans piksel ölçeği belirlenir. Ölçek olarak kenarlarına siyah kontür baskısı alınmış A4 kâğıdı kullanılmıştır.

4-Kontur kullanılarak perspektif düzeltme (warpImg) yapılır. Bu sayede düz bir görüntü elde edilir.

5-Elde edilen düz görüntüde ikinci bir kontur tespiti gerçekleştirilir. Bu kontur ölçümü yapılacak nesne olarak kabul edilir.

6-Ölçümü yapılacak nesnenin eni(nW) ve boyu(nH), piksel olarak değil; referans objeye göre oranlanmış cm cinsinden hesaplanır. Ölçüm şu şekilde yapılır:

$$nW=(\text{nesnenin piksel eni})/(\text{scale}*10)$$

$$nH=(\text{nesnenin piksel boyu})/(\text{scale}*10)$$

Buradaki scale ifadesi, piksel dönüşüm katsayısı referansın piksel cm dönüşümünden yola çıkılarak bulunmuştur.

7-Nesnenin hesaplanan en(nW) ve boyu(nH) arayüz ekranında gösterilir. Bu değerler Ölçülen değeri G-kode olarak gönder butonuna basıldığında G-kode dönüştürüldükten sonra Marlin yazılımına gönderilir. G-kode dönüştürme işlemi aşağıdaki şekilde yapılır:

$$X \text{ ekseni için: } \{102 - (nW - 4.3) * 4.8\}$$

Burada 102 değeri kolun maksimum kapanabileceği step motor adımındır.

Burada 4.3 değeri kolun maksimum kapanması durumunda tutabileceği cm cinsinden minimum levha enidir.

Burada 4.8 değeri cm in step motor adım karşılığını bulmak için kullanılan değerdir.

$$Y \text{ ekseni için } \{74.2 - (nH - 4.4) * 4.945\}$$

Burada 74.2 değeri kolun maksimum kapanabileceği step motor adımındır.

Burada 4.4 değeri kolun maksimum kapanması durumunda tutabileceği cm cinsinden minimum levha enidir.

Burada 4.945 değeri cm in step motor adım karşılığını bulmak için kullanılan değerdir.

8-Z ekseni tutma işleminin gerçekleştirileceği yatay eksene gittikten sonra X ve Y eksenleri nesnenin en ve boy değerlerine göre otonom olarak levhanın kenarlarına konumlanırlar.

9-Levhayı tutmak için arayüzden gerekli basınç değeri girildikten sonra basınç komutunu gönder butonuna basıldığında Marlin yazılımına komut gönderilir ve sistem levhayı tutma işlemini gerçekleştirir.

Tutma işlemi gerçekleştirildikten sonra kullanıcı, levhanın ne kadar yerden yükselmesi gerektiğini arayüz üzerinden girerek levhanın yükselmesini sağlar.

10-İşlemler tamamlandıktan sonra arayüz üzerinde bulunan G28 X Y Z gönder butonuna basılarak sistem yeni işlemler için hazırlanmış olur.

Tüm bu işlemler arayüz üzerinde bulunan Otonom çalışmayı başlat butonuna basılarak otomatik yapılabilir.

EK B. Robotik kavrayıcı Python kodları;

```
##### cm_Oranı_Hesaplama.py modülü #####

import cv2

import numpy as np

def getContours(img, cThr=[100, 100], showCanny=True, minArea=1000, filter=0,
draw=False):

    imgGray = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2GRAY)

    imgBlur = cv2.GaussianBlur(imgGray, (5, 5), 1)

    cv2.imshow('GaussianBlur',imgBlur)

    imgThresh = cv2.adaptiveThreshold(imgBlur, 255,
cv2.ADAPTIVE_THRESH_GAUSSIAN_C,

cv2.THRESH_BINARY_INV, 27, 0.5)

    cv2.imshow('adaptiveTreshhold',imgThresh)

    kernel = np.ones((3, 3), np.uint8)

    imgThresh = cv2.morphologyEx(imgThresh, cv2.MORPH_OPEN, kernel)

    imgThresh = cv2.morphologyEx(imgThresh, cv2.MORPH_CLOSE, kernel)

    cv2.imshow('morpologyEx',imgThresh)

    imgCanny = cv2.Canny(imgThresh, cThr[0], cThr[1])

    cv2.imshow('canny',imgCanny)
```

```

    contours, hierarchy = cv2.findContours(imgCanny, cv2.RETR_EXTERNAL,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)

    finalContours = []

    for i in contours:

        area = cv2.contourArea(i)

        if area > minArea:

            peri = cv2.arcLength(i, True)

            approx = cv2.approxPolyDP(i, 0.02 * peri, True)

            bbox = cv2.boundingRect(approx)

            if filter > 0:

                if len(approx) == filter:

                    finalContours.append([len(approx), area, approx, bbox, i])

            else:

                finalContours.append([len(approx), area, approx, bbox, i])

    finalContours = sorted(finalContours, key=lambda x: x[1], reverse=True)

    if draw:

        for con in finalContours:

            cv2.drawContours(img, con[4], -1, (0, 0, 255), 3)

    return img, finalContours

def reorder(myPoints):

    myPointsNew = np.zeros_like(myPoints)

    myPoints = myPoints.reshape((4, 2))

    add = myPoints.sum(1)

    myPointsNew[0] = myPoints[np.argmin(add)]

    myPointsNew[3] = myPoints[np.argmax(add)]

    diff = np.diff(myPoints, axis=1)

```

```

myPointsNew[1] = myPoints[np.argmin(diff)]

myPointsNew[2] = myPoints[np.argmax(diff)]

return myPointsNew

def warpImg(img, points, w, h, pad=0):

    points = reorder(points)

    pts1 = np.float32(points)

    pts2 = np.float32([[0, 0], [w, 0], [0, h], [w, h]])

    matrix = cv2.getPerspectiveTransform(pts1, pts2)

    imgWarp = cv2.warpPerspective(img, matrix, (w, h))

    imgWarp = imgWarp[pad:imgWarp.shape[0] - pad, pad:imgWarp.shape[1] - pad]

    return imgWarp

def findDis(pts1, pts2):

    return ((pts2[0] - pts1[0]) ** 2 + (pts2[1] - pts1[1]) ** 2) ** 0.5

##### G-kode-flash.py (Program Yazılımı) #####

import serial

import serial.tools.list_ports

import time

import tkinter as tk

from tkinter import messagebox, scrolledtext, ttk

import cv2

from PIL import Image, ImageTk

import threading

import cm_Oranı_Hesaplama as cm

CH340_VID = '1A86'

CH340_PID = '7523'

MEGA_VID = '2341'

```

```

MEGA_PID = '0042'

ser = None

cap = None

frame = None

already_sent = False

# Yeni: ölçüm sonuçlarını saklayan global değişkenler

current_nW = 0

current_nH = 0

def find_marlin_port():

    ports = serial.tools.list_ports.comports()

    for port in ports:

        vid = f'{port.vid:04X}' if port.vid else ""

        pid = f'{port.pid:04X}' if port.pid else ""

        if (vid == CH340_VID and pid == CH340_PID) or (vid == MEGA_VID and pid

== MEGA_PID):

            return port.device

    return None

def open_serial_connection():

    global ser

    if ser is None or not ser.is_open:

        port = find_marlin_port()

        if port:

            try:

                ser = serial.Serial(port, 250000, timeout=2)

                time.sleep(2)

                print(f'Bağlantı sağlandı: {port}')

```

```

        return True

    except Exception as e:

        messagebox.showerror("Bağlantı Hatası", str(e))

        return False

    else:

        messagebox.showerror("Hata", "Marlin cihazı bulunamadı!")

        return False

    return True

def send_g28():
    if not open_serial_connection():
        return
    log_text.delete('1.0', tk.END)
    try:
        ser.reset_input_buffer()
        ser.write("G28 X Y Z\n".encode('utf-8'))
        log_text.insert(tk.END, "Komut gönderildi: G28 X Y Z\n")
        time.sleep(0.2)
        while ser.in_waiting:
            response = ser.readline().decode('utf-8', errors='ignore').strip()
            log_text.insert(tk.END, f'{response}\n')
    except Exception as e:
        messagebox.showerror("Hata", str(e))

def send_custom_command():
    command = custom_command_entry.get()
    if not command:
        messagebox.showwarning("Uyarı", "Bir komut girin!")

```

```

        return

if not open_serial_connection():

    return

log_text.delete('1.0', tk.END)

try:

    ser.reset_input_buffer()

    ser.write(f'{command}\n'.encode('utf-8'))

    log_text.insert(tk.END, f'Komut gönderildi: {command}\n')

    time.sleep(0.2)

    while ser.in_waiting:

        response = ser.readline().decode('utf-8', errors='ignore').strip()

        log_text.insert(tk.END, f'{response}\n')

except Exception as e:

    messagebox.showerror("Hata", str(e))

def capture_video():

    global cap, frame

    while cap.isOpened():

        ret, new_frame = cap.read()

        if ret:

            frame = new_frame

            time.sleep(0.05)

def update_video_frame():

    global frame, current_nW, current_nH

    if frame is not None:

        scale = 26 / 10

        wP = int(210 * scale)

```

```

hP = int(286 * scale)

imgContours, conts = cm.getContours(frame, minArea=50000, filter=4)

if len(conts) != 0:

    biggest = conts[0][2]

    imgWarp = cm.warpImg(frame, biggest, wP, hP)

    imgContours2, conts2 = cm.getContours(imgWarp, minArea=2000, filter=4,
cThr=[50, 50], draw=False)

    if len(conts2) != 0:

        for obj in conts2:

            cv2.polylines(imgContours2, [obj[2]], True, (0, 255, 0), 2)

            nPoints = cm.reorder(obj[2])

            nW = round((cm.findDis(nPoints[0][0], nPoints[1][0]) / scale) / 10, 1)

            nH = round((cm.findDis(nPoints[0][0], nPoints[2][0]) / scale) / 10, 1)

            x, y, w, h = obj[3]

            cv2.arrowsLine(imgContours2, (nPoints[0][0][0], nPoints[0][0][1]),

                (nPoints[1][0][0], nPoints[1][0][1]),

                (255, 0, 255), 3, 8, 0, 0.05)

            cv2.arrowsLine(imgContours2, (nPoints[0][0][0], nPoints[0][0][1]),

                (nPoints[2][0][0], nPoints[2][0][1]),

                (255, 0, 255), 3, 8, 0, 0.05)

            cv2.putText(imgContours2, '{} cm'.format(nW), (x + 30, y - 10),

                cv2.FONT_HERSHEY_COMPLEX_SMALL, 1.5, (255, 0, 255),

2)

            cv2.putText(imgContours2, '{} cm'.format(nH), (x - 70, y + h // 2),

                cv2.FONT_HERSHEY_COMPLEX_SMALL, 1.5, (255, 0, 255),

2)

            dimensions_label.config(text=f"En: {nW}cm, Boy: {nH}cm")

```

```

        current_nW = nW

        current_nH = nH

        img_show = cv2.resize(imgContours2, (320, 240),
interpolation=cv2.INTER_AREA)

    else:

        img_show = cv2.resize(frame, (320, 240), interpolation=cv2.INTER_AREA)

        img_pil = Image.fromarray(img_show)

        img_tk = ImageTk.PhotoImage(img_pil)

        video_label.img_tk = img_tk

        video_label.config(image=img_tk)

        video_label.after(10, update_video_frame)

def send_m42_ramp(start=0, end=45.174, step=5, delay=0.2):

    if not open_serial_connection():

        return

    try:

        current = start

        while current <= end:

            cmd = f"M42 P6 S{current:.3f}"

            ser.write((cmd + "\n").encode('utf-8'))

            log_text.insert(tk.END, f"Komut gönderildi: {cmd}\n")

            ser.flush()

            time.sleep(delay)

            current += step

        except Exception as e:

            messagebox.showerror("Hata", str(e))

def send_m42_ramp_down(start=45.174, end=0, step=5, delay=0.2):

```

```

if not open_serial_connection():

    return

try:

    current = start

    while current >= end:

        cmd = f"M42 P6 S{current:.3f}"

        ser.write((cmd + "\n").encode('utf-8'))

        log_text.insert(tk.END, f"Komut gönderildi: {cmd}\n")

        ser.flush()

        time.sleep(delay)

        current -= step

    except Exception as e:

        messagebox.showerror("Hata", str(e))

def send_autonomous():

    global current_nW, current_nH

    if not open_serial_connection():

        return

    try:

        ser.reset_input_buffer()

        ser.write("M211 S0\n".encode('utf-8'))    #soft Endstop devre dışı bırakılır

        log_text.insert(tk.END, "Komut gönderildi: M211 S0\n")

        gcode_command = f"G1 X{102 - (current_nW - 3.8) * 4.8} Y{74.2 - (current_nH
- 4) * 4.945}"

        ser.write(f"{gcode_command}\n".encode('utf-8'))

        log_text.insert(tk.END, f"Komut gönderildi: {gcode_command}\n")

        ser.write("M400\n".encode('utf-8')) # Bekle

```

```

ser.write("G1 Z-320\n".encode('utf-8'))

log_text.insert(tk.END, "Komut gönderildi: G1 Z-330\n")

ser.write("M400\n".encode('utf-8')) # Bekle

send_m42_ramp(start=0, end=34.28, step=5, delay=0.2)

ser.write("G1 Z-100\n".encode('utf-8'))

log_text.insert(tk.END, "Komut gönderildi: G1 Z-100\n")

ser.write("M400\n".encode('utf-8')) # Bekle

ser.write("G1 Z-320\n".encode('utf-8'))

log_text.insert(tk.END, "Komut gönderildi: G1 Z-330\n")

ser.write("M400\n".encode('utf-8')) # Bekle

ser.write("M42 P6 S0\n".encode('utf-8'))

log_text.insert(tk.END, "Komut gönderildi: M42 P6 S0\n")

# Başlangıç konumuna dön

ser.write("G1 X0 Y0 Z0\n".encode('utf-8'))

log_text.insert(tk.END, "Komut gönderildi: G1 X0 Y0 Z0\n")

ser.write("M400\n".encode('utf-8')) # Bekle

except Exception as e:

    messagebox.showerror("Hata", str(e))

def send_measurement_as_gcode():

    global current_nW, current_nH

    gcode_command = f"G1 X{102 - (current_nW - 3.8) * 4.8} Y{74.2 - (current_nH - 4) * 4.945}"

    if open_serial_connection():

        try:

            ser.reset_input_buffer()

            ser.write(f"{gcode_command}\n".encode('utf-8'))

```

```

        log_text.insert(tk.END, f"Komut gönderildi: {gcode_command}\n")

    except Exception as e:

        messagebox.showerror("Hata", str(e))

def on_camera_select(event):

    global cap

    selected_camera_index = camera_combobox.current()

    cap = cv2.VideoCapture(selected_camera_index)

    update_video_frame()

def reset_command_flag():

    global already_sent

    already_sent = False

    log_text.insert(tk.END, "Yeni ölçüm için komut gönderimi sıfırlandı.\n")

def send_pressure_command():

    selected_label = pressure_combobox.get()

    if not selected_label:

        messagebox.showwarning("Uyarı", "Bir basınç değeri seçin!")

        return

    s_value = pressure_values.get(selected_label)

    if s_value is None:

        messagebox.showerror("Hata", "Geçersiz seçim!")

        return

    gcode_command = f"M42 P6 S{int(s_value)}"

    if open_serial_connection():

        try:

            ser.reset_input_buffer()

            ser.write(f"{gcode_command}\n".encode('utf-8'))

```

```

        log_text.insert(tk.END, f"Komut gönderildi: {gcode_command}\n")

    except Exception as e:

        messagebox.showerror("Hata", str(e))

pressure_values = {
    "1.4 bar": 80,
    "1.2 bar": 68.571,
    "1.0 bar": 51.143,
    "0.8 bar": 45.714,
    "0.6 bar": 34.28,
    "0.4 bar": 22.86,
    "0 bar": 0
}

# Arayüz
root = tk.Tk()
root.geometry("800x600")

def list_cameras():
    available_cameras = []

    for i in range(5):
        cap_test = cv2.VideoCapture(i)
        if cap_test.isOpened():
            available_cameras.append(i)
            cap_test.release()

    return available_cameras

cameras = list_cameras()

camera_label = tk.Label(root, text="Kamera Seçin:")
camera_label.place(x=720, y=25)

```

```

camera_combobox = ttk.Combobox(root, values=cameras)

camera_combobox.place(x=690, y=5)

camera_combobox.bind("<<ComboboxSelected>>", on_camera_select)

video_label = tk.Label(root)

video_label.pack(pady=10)

dimensions_label = tk.Label(root, text="En: 0px, Boy: 0px")

dimensions_label.pack(pady=10)

tk.Label(root, text="Cihaz algılandıktan sonra home için butona basılmalı.").pack(pady=10)

tk.Button(root, text="G28 X Y Z Gönder", command=send_g28, width=25).pack(pady=10)

tk.Label(root, text="G-code Komutu Girin:").pack(pady=10)

custom_command_entry = tk.Entry(root, width=40)

custom_command_entry.pack(pady=5)

tk.Button(root, text="Komut Gönder", command=send_custom_command, width=25).pack(pady=10)

tk.Button(root, text="Ölçülen Değeri G-code Olarak Gönder", command=send_measurement_as_gcode, width=30).pack(pady=10)

tk.Button(root, text="Otonom çalışmayı başlat", command=send_autonomous, width=30).place(x=970, y=290)

log_text = scrolledtext.ScrolledText(root, width=600, height=15)

log_text.pack(padx=10, pady=10)

tk.Label(root, text="Basınç Değeri Seçin (M42 P6 Sxxx):").place(x=975, y=185)

pressure_combobox = ttk.Combobox(root, values=list(pressure_values.keys()), state="readonly", width=20)

pressure_combobox.place(x=995, y=210)

tk.Button(root, text="Basınç Komutunu Gönder", command=send_pressure_command, width=30).place(x=970, y=240)

```

```
cap = cv2.VideoCapture(cameras[1] if len(cameras) > 1 else 0)

def start_video_thread():
    capture_video()

video_thread = threading.Thread(target=start_video_thread)

video_thread.daemon = True

video_thread.start()

root.mainloop()

cap.release()

cv2.destroyAllWindows()
```

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Seyda Emir ŞİMŞİR

ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans** : 2020, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- Yükseklisans** : Devam ediyor, Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Makine Tasarım ve İmalat

MESLEKİ DENEYİM:

- 2020-2024 yılları arasında ESKA A.Ş.'de ARGE Mühendisi olarak çalıştı.
- 2024'ten beri Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışıyor.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- İbiş, M. Ö., Şimşir, S. E., İriç S., Kaptı, A. O., Kutlu, M. Ç. (2024, 29-30, Kasım). Duvar Kalınlığının Eğilen Pnömatik Yapay Kasların Performansı Üzerine Etkisi. *International Marmara Science and Social Sciences Congress* (202-212), Kocaeli, Türkiye.
- Şimşir, S. E., İbiş, M. Ö., İriç S., Kaptı, A. O., Kutlu, M. Ç. (2024, 29-30, Kasım). Pnömatik Yapay Kaslar için Kuvvet Ölçebilen Deney Düzeneği Tasarımı ve Üretimi. *International Marmara Science and Social Sciences Congress* (331-347), Kocaeli, Türkiye.