

T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**KANAL İÇİ TAHRİBATSIZ MUAYENE MAKSATLI Nİ-Tİ TEMELLİ SOFT
ROBOTİK SİSTEM TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yavuz SAPMAZ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

TEMMUZ 2022

T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**KANAL İÇİ TAHRİBATSIZ MUAYENE MAKSATLI Nİ-Tİ TEMELLİ SOFT
ROBOTİK SİSTEM TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Yavuz SAPMAZ
(181203004)**

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Savaş DİLİBAL

TEMMUZ 2022



T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

Yüksek Lisans Tez Onay Belgesi

Enstitümüz, Mekatronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı (181203004) numaralı öğrencisi Yavuz SAPMAZ'ın "Kanal İçi Tahribatsız Muayene Maksatlı Ni-Ti Temelli Soft Robotik Sistem Tasarımı" adlı tez çalışması 05/07/2022 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aşağıdaki jüri tarafından **Oy Birliği** ile Yüksek Lisans tezi olarak **Kabul** edilmiştir.

Öğretim Üyesi Adı Soyadı

Tez Savunma Tarihi: 05/07/2022

- 1) Tez Danışmanı:** Doç. Dr. Savaş DİLİBAL
- 2) Jüri Üyesi:** Dr. Öğr. Üyesi Aytaç Uğur Yerden
- 3) Jüri Üyesi:** Prof. Dr. Sezgin ERSOY

YEMİN METNİ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum “Kanal içi Tahribatsız Muayene Maksatlı Ni-Ti Temelli Soft Robotik Sistem Tasarımı” adlı çalışmanın, tezin proje aşamasından bitimine kadar olan bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserin Bibliyografya’da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim. (05/07/2022).

Yavuz SAPMAZ

“Her Fabrika Bir Kaledir.”

M. Kemal ATATÜRK

ÖNSÖZ

Tezimi hazırlarken yol gösteren, akademik alanda gelişimimi sağlayıp ilgilenen ve tez danışmanlığımı yapan İstanbul Gedik Üniversitesi öğretim üyesi Sayın Doç. Dr. Savaş DİLİBAL Hocama, Yüksek lisans yapmam için beni cesaretlendiren ve her konuda yardımını esirgemeyen eşim Ümmügülsüm SAPMAZ' a, ve abim Ali Rıza SAPMAZ' a, yüksek lisans sınıf arkadaşım Orhan YILMAZ' a tezimi hazırlarken ihmal ettiğim halde bana anlayış gösteren ve destek veren anneme, babama ve kardeşim Esma Sultan SAPMAZ' a teşekkürü bir borç bilirim.

Temmuz 2022

Yavuz SAPMAZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışma Konusu	1
1.2 Tezin Amacı	2
2. LİTERATÜR TARAMASI	3
2.1 Soft Robotik Sistemler	3
2.1.1 SLABot yumuşak gövdeli robot tasarımı	3
2.1.2 Sıvı basıncı ile hareketi sağlanan yumuşak solucan robot.....	4
2.1.3 SquMaBot tırtıl yürüyüşünden ilham alınan yumuşak köpük gövdeli robot	4
2.1.4 Zıplayan Yumuşak Robot	5
2.1.5 Çok uzuvlu yumuşak robot.....	6
2.2 Boru İçi Robotik Sistemler	7
2.2.1 Boru hattı ve tünel denetimini sağlayan yumuşak robot.....	7
2.2.2 Boru hattı denetimleri için biyo-ilham yumuşak robot.....	8
2.2.3 Kol uzunluğu ayarlanabilen vida tahrikli boru içi kontrol robotu	9
2.2.4 Çok mafsallı tekerlekli boru içi muayene maksatlı yılan robot.....	10
2.3 Ni-Ti Temelli Robotik Sistemler.....	11
2.3.1 Kablosuz olarak tasarlanan Ni-Ti aktüatörlü tırtıl robot.....	11
2.3.2 Yön kontrollü yumuşak robot tasarımı	12
2.3.3 GoQBot yumuşak gövdeli yuvarlanan tırtıl robot	13
2.3.4 MagBot Ni-Ti tahrikli solucandan ilham alınmış yumuşak robot.....	14
2.3.5 Boru hattı denetimleri için şekil bellekli Ni-Ti yay tahrikli biyo-ilham soft robot.....	16
3. ŞEKİL BELLEKLİ ALAŞIMLAR VE Nİ-Tİ İLE YAPILAN UYGULAMALAR.....	18
3.1 Şekil Bellekli Alaşımlar	18
3.1.1 Şekil Bellek Mekanizması.....	18
3.1.2 Şekil bellekli alaşımlar için kontrol değişkenleri	19
3.1.3 Ni-Ti ŞBA Yayların Termomekanik Eğitim Esnasında Davranışı.....	20
3.2 Şekil Bellekli Alaşımlar ile Yapılan Uygulamalar	22
3.2.1 Şekil bellekli alaşımlar ile robotik alanda yapılan uygulamalar.....	22
3.2.2 Şekil bellekli alaşımlar ile medikal alanda yapılan uygulamalar	22
3.2.3 Şekil bellekli alaşımlar ile havacılık alanda yapılan uygulamalar.....	23
3.2.4 Şekil bellekli alaşımlar ile endüstriyel alanda yapılan uygulamalar.....	24

4. GELİŞTİRİLEN Ni-Tİ TEMELLİ SOFT ROBOTUN MEKATRONİK SİSTEM TASARIMI	26
4.1 Tırtıl Morfolojisi ve Yapısı	26
4.2 Robotun Katı Modellemesi	27
4.2.1 Katı modelin RTV-2 silikonu ile kalıba döküm aşaması.....	28
4.2.2 Ni-Ti ŞBA yayların kalıplanması	30
4.2.3 Ni-Ti ŞBA yayların ısıtılma işlemi ve şekil belleğinin verilmesi.....	30
4.2.4 Ni-Ti ŞBA yayların eğitilmesi.....	31
4.3 Robotun Elektronik Alt Sistem Tasarımı ve Uygulaması.....	32
5. SOFT ROBOT ALT SİSTEMLERİNE AİT ANALİZ VE BULGULAR	34
5.1 Prototipi Geliştirilen Soft Robotun Başlangıç Tasarımı için Malzeme ve Yöntem Uygulamaları	34
5.2 Prototipi Geliştirilen Soft Robotun Başlangıç Tasarımından Elde Edilen Kuvvet Testi	35
5.3 Geliştirilen Soft Robotun Son Tasarımı için Malzeme ve Yöntem Uygulamaları	36
5.4 Ni-Ti ŞBA Yayın Analitik Analizleri.....	37
5.5 Ni-Ti ŞBA Yayın Isınma ve Soğuma Deneyi	41
5.6 Geliştirilen Soft Robotun Kuvvetinin Analitik Analizi.....	42
5.7 Geliştirilen Soft Robotun Hareket Analizi	44
5.8 Geliştirilen Soft Robotun Termal Kamera ile Analizleri	46
5.9 Literatür taramaları ve üretilen prototip karşılaştırılması.....	49
6. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	51
7. ÖNERİLER	54
KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ.....	60

KISALTMALAR

Ni-Ti	: Nikel Titanyum
ŞBA	: Şekil Bellekli Alaşım
WPT	: Wireless Power Transmission (Kablosuz Güç Aktarımı)
ΔX	: Yay esneme boyu
Af	: Östenit bitiş
As	: Östenit başlangıç
D	: Yay halka çapı
d	: Yay tel çap (mm)
Di	: Yay İç Çapı (mm)
Dm	: Yay Ortalama Çapı (mm)
Ddi	: Yay Dış Çapı (mm)
P	: Açılmış Yayın Hatvesi (mm)
EBM	: Electron beam melting (Elektron demeti ile ergitme)
F	: Yaya etkiyen kuvvet (N)
h	: Yay hatvesi
a	: Açılmış Yayın Açısı
M_{burulma}	: Burulma Momenti (N.mm)
K_{burulma}	: Burulma Gerilmesi (N.mm ²)
K_{kesme}	: Kesme Gerilmesi (N.mm ²)
Mf	: Martenzit bitiş
Ms	: Martenzit başlangıç
N	: Yay sarım sayısı
T	: Dönüşüm histerisi
PIG	: Pipeline Inspection Gauge (Boru hattı muayene göstergesi)
f	: Uzama miktarı
f₁	: Bir sarımdaki uzama miktarı

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: Yılan robotun teknik özellikleri	11
Çizelge 3.1: Kontrol Değişkenleri	19
Çizelge 4.1: Tedarik edilen Ni-Ti ŞBA tellerin temel bilgileri	30
Çizelge 4.2: Soft robotun elektronik alt sisteminde kullanılan komponentler	33
Çizelge 5.1: Hesaplamalarda kullanılan birimler	39
Çizelge 5.2: Ni-Ti yay için kullanılan parametreler	39
Çizelge 5.3: Ni-Ti yay ile ilgili analitik sonuçlar	41

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1: SLABot.....	3
Şekil 2.2: Sıvı basıncı ile hareketi sağlanan soft robot.....	4
Şekil 2.3: SquMABot çok yönlü hareket yapıları.....	5
Şekil 2.4: SquMABot robotun içyapısı.....	5
Şekil 2.5: (a)Zıplayan yumuşak robot, (b) elektriksel ve mekanik kompetanları	6
Şekil 2.6: Zıplayan yumuşak robot.....	6
Şekil 2.7: Pnömatik temelli soft robotun bileşenleri	7
Şekil 2.8: Pnömatik temelli soft hareket analizi	8
Şekil 2.9: Pnömatik temelli soft hareket analizi	8
Şekil 2.10: Pnömatik temelli soft hareket analizi	9
Şekil 2.11: Çok mafsallı tekerlekli boru içi muayene maksatlı yılan robotun birinci (a) ve ikinci (b) prototipleri	10
Şekil 2.12: Çok mafsallı tekerlekli boru içi muayene maksatlı yılan robotun detaylı teknik çizimi	11
Şekil 2.13: Kablosuz ŞBA temelli Soft Robot	12
Şekil 2.14: Şekil bellekli alaşım ile hareketi sağlanan robot.....	13
Şekil 2.15: GoQBOT robotunun genel yapısı.....	14
Şekil 2.16: MagBot'un hareket mekanizması ve çalışma prensibi.....	15
Şekil 2.17: MagBot'un 15°,30° ve 45°'lerdeki hız ve ağırlık deneyi.....	16
Şekil 2.18: Ni-Ti ŞBA temelli soft robotun boru içerisindeki hareketi.....	17
Şekil 3.1: Sıcaklık değişim aşamalarında sabit gerilme altında şekil bellekli alaşıma ait karakteristik davranış.	19
Şekil 3.2: Şekil bellekli alaşımlara ait genel kontrol değişkenleri.....	20
Şekil 3.3: Ni-Ti ŞBA yayın termomekanik hareketleri ve sayısal analizi.....	21
Şekil 3.4: İTÜ robot el.....	22
Şekil 3.5: (a) Medikal Ni-Ti ortodontik teller ve (b) beyin için uygulanan kateterler için medikal süperelastik Ni-Ti klavuzlar	23
Şekil 3.6: Şekil bellekli alaşım kullanılan chevron uçuş projesi	23
Şekil 3.7: Hızlı trende otomatik yağlama sistemi.....	24
Şekil 3.8: Ni-Ti ŞBA plakaların antagonistik tasarımı (a), zaman-açısal hareket grafiği (b).....	25
Şekil 4.1: Soft robotun mekatronik sistem tasarımı (MST).....	26
Şekil 4.2: Tırtılların morfolojik incelenmesi ve yapısı.....	27
Şekil 4.3: Biyo-ilham soft robotun üç boyutlu gövde tasarımı.....	28
Şekil 4.4: RTV-2 Kalıp silikonu ile yapılan denemeler	29
Şekil 4.5: RTV-2 kalıp silikonun kalıba dökülme işlemi	29
Şekil 4.6: Ni-Ti ŞBA malzemenin kalıplanmış hali	30
Şekil 4.7: Ni-Ti ŞBA tellere ısı işlem uygulaması	31
Şekil 4.8: Ni-Ti malzemenin yük hücresi düzeneği ile eğitim aşaması.....	31
Şekil 4.9: Ni-Ti ŞBA yay üzerine uygulanan PWM sinyalleri.....	32
Şekil 4.10: Robot elektronik komponentlerinin bağlantı şeması.....	33

Şekil 5.1: Soft robotun hareket adımları.....	34
Şekil 5.2: Yük hücresi ile çekme kuvveti testi	35
Şekil 5.3: Ni-Ti ŞBA yayların yük hücresi üzerindeki çekme kuvvet testi.....	36
Şekil 5.4: Soft robotun teknik resim verileri.	36
Şekil 5.5: Soft robot üzerine aktüatörlerin ve elektronik kompetanların yerleşimi...	37
Şekil 5.6: Ni-Ti yay uzunluğu ve sıcaklık grafiği.....	38
Şekil 5.7: Ni-Ti yayın geometrik bilgileri	38
Şekil 5.8: Ni-Ti yayın kuvvet altındaki faz değişimleri	40
Şekil 5.9: Ni-Ti ŞBA yayların farklı sıcaklıklar altındaki faz değişimi ve hareketleri	42
Şekil 5.10: Yük hücresi test düzeneği.....	43
Şekil 5.11: Ni-Ti yayların yük hücresi üzerindeki çekme kuvvet testi.....	43
Şekil 5.12: Sistemim hareketleri ve mikroişlemci çıkış sinyalleri	44
Şekil 5.13: Soft robotun lokomotif çevrimsel hareketleri	45
Şekil 5.14: Soft robotun mesafe-zaman grafiği	46
Şekil 5.15: Soft robotun hareketlerinin termal kamera görüntüleri.....	47
Şekil 5.16: Soft robotun Ni-Ti ŞBA yaylarının 3B kızılötesi görüntüleri.....	48
Şekil 5.17: Üretilen prototipin literatürdeki diğer biyo-ilham soft robotlar ile karşılaştırılması	49

KANAL İÇİ TAHRİBATSIZ MUAYENE MAKSATLI Nİ-Tİ TEMELLİ SOFT ROBOTİK SİSTEM TASARIMI

ÖZET

İnsanlarla kolay etkileşime girebilen ve günlük hayatta doğal ortama uyum sağlayabilen robotlar evde, hastanelerde ve endüstride yardımcı cihazlar olarak giderek hayatımızın vazgeçilmez bir parçası olmaktadır. Bu robotların herkes tarafından kolay kullanılabilmesi, güvenilir ve verilen görevlerin ulaşılabilir, çevreye zarar vermeyen stabil sistemler olması gerekmektedir. Yapılan gözlemler ve deneyler sonucu tasarlanan en stabil ve görevlerini kusursuz yerine getiren cihazların biyo-ilham robotlar olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmada kanal içi tahribatsız muayene maksatlı Ni-Ti temelli soft robot tırtıllardan ilham alınarak tasarlanmıştır. Zor şartlar ve ortamlarda deforme olmayan yapısı ile Ni-Ti Şekil Bellekli Alaşım (ŞBA) aktüatörleri her ortam şartında sorunsuz verim alınan, robotun üzerinde bulunan kablosuz veri aktarımı sağlayan kamera sayesinde karanlık kanallarda dahi görevini yerine getirebilmektedir. Soft robotun üzerindeki kablosuz veri aktarımı yapan kamerasından alınan görüntüler ile kanalın içindeki kaynak yırtıkları, deformeler, delikler ve göçükleri tespit edebilmektedir. Soft robotun içine entegre edilmiş iki adet Ni-Ti ŞBA yay sayesinde sistematik kasılma hareketi yaparak tıpkı bir tırtıl gibi hareket etmektedir. Geliştirilen soft robot 60 saniyede 129 mm yol almasıyla doğadaki tırtıllara göre çok daha hızlı hareket etmektedir. Ayrıca bünyesinde barındırdığı lityum iyon batarya sayesinde kabloları ihtiyaç duymadan çalışabilmektedir. Lityum iyon bataryaları çalışma süresini uzatmakta ve çalışma alanını genişletmektedir. Yalınlaştırılmış tasarımı sayesinde kablo kargaşasını ortadan kaldırarak daha rahat bir çalışma ortamı oluşturmaktadır. Kablosuz veri aktarımı özelliğiyle diğer robotlara göre avantaj sağlamaktadır. Soft yapısı deformelere ve yırtılmalara karşı dayanıklı olması kısa sürede arızalanmasının önüne geçmektedir. Bu alanda yapılan diğer sistemlere göre düşük maliyetli olması tercih edilebilirliğini artırmaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Ni-Ti, ŞBA, Soft Robot, Biyo-ilham, Robotik Sistem Tasarımı*

Ni-Ti BASED SOFT ROBOTIC SYSTEM DESIGN FOR IN-CHANNEL NON-DESTRUCTIVE TESTING

ABSTRACT

Robots, which can interact with people easily and adapt to the natural environment in daily life, are increasingly becoming an indispensable part of our lives as assistive devices at home, hospitals and industry. These robots must be easy to use by everyone, reliable and stable systems that do not harm the environment, are reliable and the tasks given must be accessible. As a result of the observations and experiments, it has been observed that the most stable and flawlessly performing devices are bio-inspired robots. In this study, Ni-Ti-based soft robot was designed with inspiration from caterpillars for nondestructive testing in the canal. With its non-deforming structure in harsh conditions and environments, Ni-Ti Shape Memory Alloy (SMA) actuators can perform their duties even in dark channels, thanks to the camera on the robot that provides smooth data transfer under all environmental conditions. With the images taken from the wireless data transfer camera on the soft robot, it can detect weld tears, deformities, holes and dents in the canal. Thanks to two Ni-Ti SMA springs integrated into the soft robot, it moves like a caterpillar by making systematic contraction movements. The developed soft robot moves much faster than caterpillars in nature, traveling 129 mm in 60 seconds. In addition, thanks to the lithium-ion battery it contains, it can operate without the need for cables. Lithium-ion batteries extend the working time and expand the working area. Thanks to its simplified design, it eliminates cable clutter and creates a more comfortable working environment. It provides an advantage over other robots with its wireless data transfer feature. Its soft structure is resistant to deformations and tears and prevents it from failing in a short time. Its low cost compared to other systems made in this field increases its preferability.

Keywords: *Ni-Ti, SMA, Soft Robot, Bio-inspired, Robotic System Design*

1. GİRİŞ

1.1 Çalışma Konusu

Dünyada endüstri ve taşımacılığın büyük bir kısmı kanallar sayesinde yapılmaktadır. Bu kanallar bazen havalandırma bazen kablo veya boruların geçtiği bölümler bazen ise akaryakıt veya kimyasal maddelerin iletimleri için kullanılmaktadır. Kanallar yapısı gereği inşası sona erdikten sonra tekrar ulaşılması zor konumda olabilirler. Üstleri kapatılmış, toprak altında kalmış veya deniz dibinde dahi bulunma ihtimalleri çok yüksektir. Zamanla erozyona uğrama, delinme, yıkılma, tıkanma gibi birçok faktör ortaya çıkabilir. Bu durumlarda kanal içindeki olağan arızaların tespiti için uygun maliyetli bir ekipmana ihtiyaç vardır. Kanalin içinde hareket eden robotlar sayesinde kanal içindeki kaynak delikleri, kopmalar yırtılmalar veya göçükleri kamerası ile tespit edilebilir ve arızalar hem daha kısa bir sürede daha ucuz bir maliyetle tespit edilmiş olur. Kanal içinde hareket edebilen robotların tırtıllar gibi hareket edebileceği düşünülmüş ve robot tasarımı biyo-ilham yöntemin ile tırtıllardan esinlenilmiştir. Kanal içindeki en doğru hareketin bu olduğu karar verilmiştir. Soft tırtıl robot Ni-Ti ŞBA yaylar, kamerası ve kablosuz çalışması ile mobilete olarak tasarlanmıştır. Robotik sistemlerin gelişmesi ile soft robotlar ile yapılan çalışmalar birçok alanda başarı sağlamıştır. Soft robotun içerisinde iki adet Ni-Ti yay ve bu yayların kontrolünü yapmak için üzerinde Attiny85 mikro denetleyici ve kablosuz veri aktarımı için ise ESP-32 Cam modülü bulunmaktadır. Ayrıcı robotun başlatma ve durdurma hareketini kanal içinde rahat yapabilmesi için hall effect sensor entegre edilmiştir. Attiny85, ESP-32 Cam modülü ve yayların enerjisini beslemek için iki adet 3.7 V 350 mAh lityum iyon bataryası mevcuttur. Hareket kabiliyetini iki adet Ni-Ti yay sağladığından Ni-Ti tasarımı, şekil belleği verilmesi ve eğitimine önem verilmiştir. Literatür çalışmaları ve denemeler sonucunda en verimli ve kullanılabilir 3B tasarım ortaya çıkmıştır. Yeni tasarlanan robotun kalıbı CNC freze sayesinde tırtıla benzeyecek şekilde katı modeli gerçekleştirilerek mekatronik sistem tasarımı fiziksel alt sistemi içine yerleştirilmiştir. Üretilen prototip robot kanal içi tahribatsız muayene amacı için kullanılacaktır. Biyo-ilham yöntemi ile yapılan literatür

araştırmaları, üretilen soft robotunun mekatronik sistem tasarımı ve robot alt sistemlerine ait analiz ve testler tez içeriğine aktarılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin amacı, belirlenen araştırma problemi doğrultusunda Ni-Ti temelli kanal içi tahribatsız muayene robotunun mevcut çalışmalarının bir incelemesini sunmaktır. Literatür araştırmaları sayesinde boru hatlarının bakımı konusunda birçok çalışma yapıldığını gösterirken, kanal içi ve tünellerin bakım onarım görevini yerine getirmek için az miktarda ilgili araştırma ulaşılmıştır. Ni-Ti temelli kanal içi tahribatsız soft robot prototipini biyo-ilham yöntemiyle tırtıla benzetip kanal içi ve boru hatları için üretimini gerçekleştirilmek ve geliştirilmesi amaçlanmıştır. Kanal içi ve boru hatlarında korozyon, çatlak, kaynak yırtılmaları, tıkanıklar ve kaçakların tespiti için çok sayıda ve özellikle tahribatsız muayene yöntemleri kullanılmaktadır. Biyo-ilham tekniği ile üretilen robotun hareketi sağlayan Ni-Ti şBA yaylar sağlamaktadır. Bu alanda Ni-Ti şBA kullanılarak daha önce yapılan bir uygulama literatürde yer almamaktadır. Ayrıca, soft robotun üzerine arıza tespiti için yerleştirilen kablosuz veri aktarımı yapan bir kamera sayesinde kanal içi tahribatsız muayene yapılabilirliği sağlanmıştır. Geliştirilen soft robot ileride alternatif yöntemlerden biri olması hedeflenmektedir. Üretilen prototipin hareket analizi ve teknik verileri teze aktarılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümün amacı, belirlenen araştırma problemi hakkında daha önce alternatif veya amaca uygun mevcut çalışmaların incelenmesi ve mercek altına alınmasıdır. Literatür taraması üç başlık altında incelenmiştir. Soft robotik sistemler, boru içi robotik sistemleri ve Ni-Ti temelli robotik sistemler alanlarındaki taramalar kanal içi tahribatsız Ni-Ti temelli soft robotun gövde tasarım oluşturulması hakkında bilgiler verirken, boru içi hatlarında kullanılan tahribatsız muayene robotları donanım ve amaca uygun malzeme seçimi için yol göstermektedir. Araştırmalarda robotların yapısı, tasarımları, kullanılan eyleyicilerin avantaj ve dezavantajları gibi konular teze aktarılmıştır.

2.1 Soft Robotik Sistemler

2.1.1 SLABot yumuşak gövdeli robot tasarımı

Japonya'da 2017 yılında 8. Uluslararası Makinelerin Uyarlanabilir Hareketi Sempozyumunda Tufts Üniversitesi Barry Trimmer ekibi tarafından sunulan ve yapısında iki adet motor bulunan SLABot, 150x300x10 mm levhadan yapılmıştır. Motor-tendon aktüatörleri, ileriye doğru hareket etmek için düzenlenmiştir. Tendonlar köpük levhanın içinden geçirilerek büzülürken sıkıştırılır ve bükülür. SLABot gövde malzemesi kauçuktan, imalatı ise 3B yazıcı ile eklemeli imalatla üretilmiştir. Şekil 2.1'de SLABot robotu gösterilmiştir.

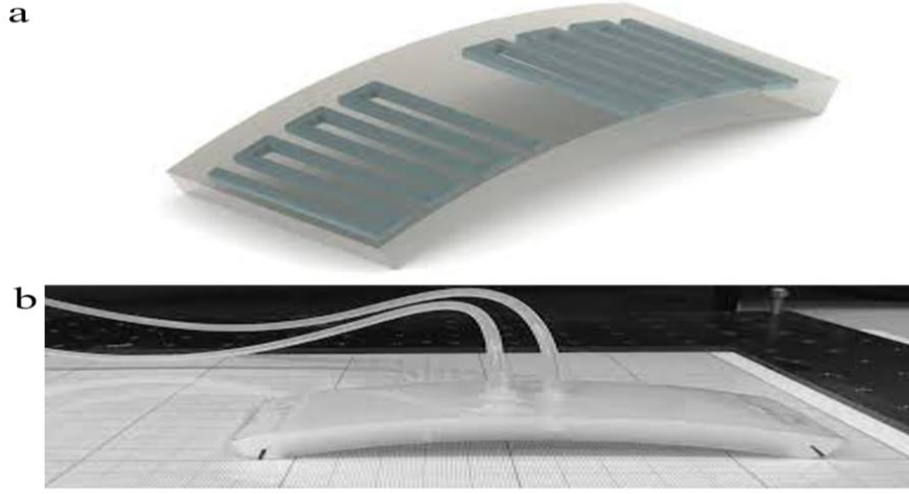


Şekil 2.1: SLABot

Kaynak: Kastor, Mukherjee, Cohen, Vikas, Trimmer & White. (2017)

2.1.2 Sıvı basıncı ile hareketi sağlanan yumuşak solucan robot

2020 yılında İsrail Teknoloji Enstitüsü soft robotlar üzerine yaptığı çalışmada tasarladıkları soft robotun içerisindeki kanallara sıvı enjekte ederek kanalların içerisindeki basınç sayesinde soft robotu hareket ettirmiştir. Robot iki kısımdan oluşmakta. Hareket edebilmesi için dört periyotta sismik hareket sağlanmaktadır. Sırasıyla kanallara basınçlı sıvı basılarak kanalların büzülmesi ve genişmesi sağlanmaktadır Şekil 2.2 (a). Tamamı kauçuktan oluşan soft robotun üzerinde iki adet basınç hortumu bulunmaktadır Şekil 2.2 (b). Bu hortumlar çalışma alanını kısıtlamakta ve hareket kabiliyetini ve hızını düşürmektedir.



Şekil 2.2: Sıvı basıncı ile hareketi sağlanan soft robot

Kaynak: Benny, Lior, Amir & Yizhar. (2019)

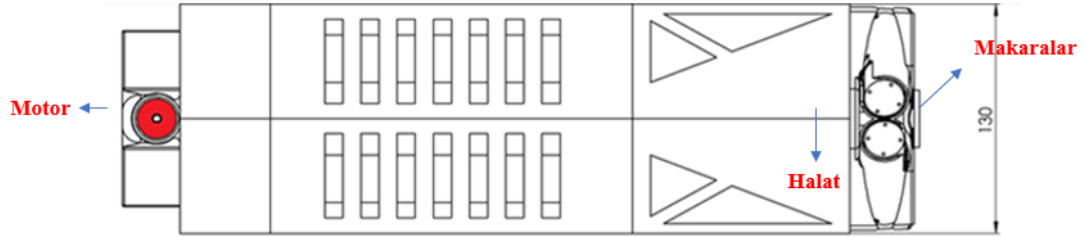
2.1.3 SquMaBot tırtıl yürüyüşünden ilham alınan yumuşak köpük gövdeli robot

SquMaBot tırtıllardan ilham alınarak üretilen bir robottur. Robotun gövdesi yumuşak viskoelastik köpükten oluşmaktadır. Gövde içerisine yerleştirilen motor-tendom sistemi kullanarak hareketi gerçekleştirir. SquMaBot tehlikeli ve insan sağlığını zararlı maddelerin bulunduğu ortamlarda arama ve kurtarma robotu olarak geliştirilmiştir. Yumuşak robotun çalışma stratejisi ise robot gövdesini ileriye doğru itmek için viskoelastik bir köpüğün genişlemesinden veya geri kazanılmasından depolanan enerjisinden yararlanır. Şekil 2.3'te SquMABot'un sağa/sola dönme hareketleri gösterilmektedir.



Şekil 2.3: SquMABot çok yönlü hareket yapıları

Şekil 2.4’te SquMABot motor tendonların bağlantısı genel hatlarıyla gösterilmiştir. Soft robotun baş kısmındaki motorlar bir halat yardımıyla robotun arka bölümünde bulunan tendonları sıkıştırarak bükülme hareketini sağlar. Bu sıkıştırma hareketi ile SquMaBot bir solucan gibi ilerler.

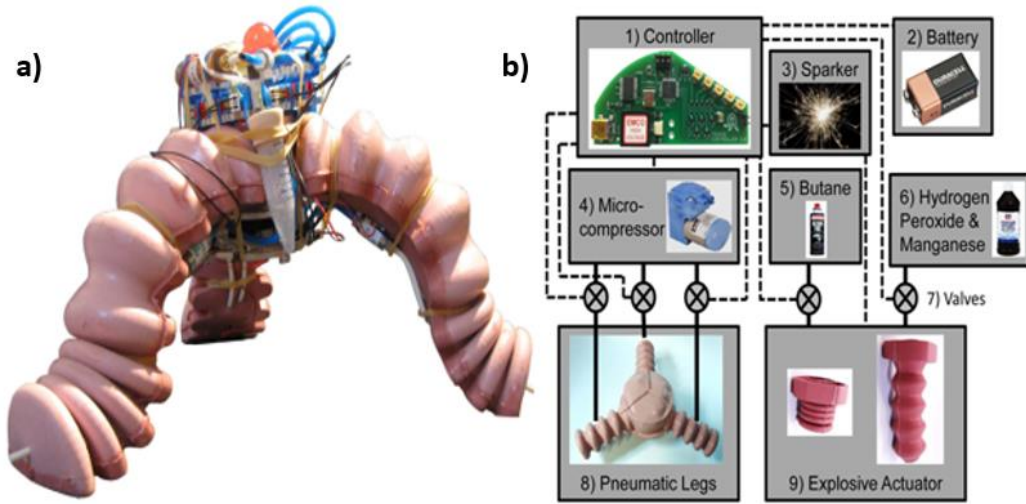


Şekil 2.4: SquMABot robotun içyapısı

Kaynak: Donatelli, Serlin, Jones, Scibelli, Cohen, Musca , Levy , Buckingham , White & Trimmer . (2017)

2.1.4 Zıplayan Yumuşak Robot

Lokomotif hareket sağlayan robotlar tipik olarak diğer alternatiflerine göre yavaş yürür veya sürünür. Zıplama gibi hızlı davranışları gerçekleştirmek için manevra kabiliyetinin yüksek olması ve çok yönlü çalışması gerekmektedir. Bu çalışmada pnömatik ve zıplayan aktüatörler kullanılarak hareket gerçekleştirilmektedir. Geliştirilen robot 60 cm kadar yukarı, 60 cm kadar ise yanal otonom hareket gerçekleştirmektedir. Vücut yüksekliğinin yedi buçuk katı kadar. Robot üzerinde bulunan bir adet pnömatik valf ve robotun elektronik kontrol elemanlarının enerjisi sağlamak için bir adet pil mevcuttur. Şekil 2.5’te zıplayan yumuşak robot bileşenleri görülmektedir.

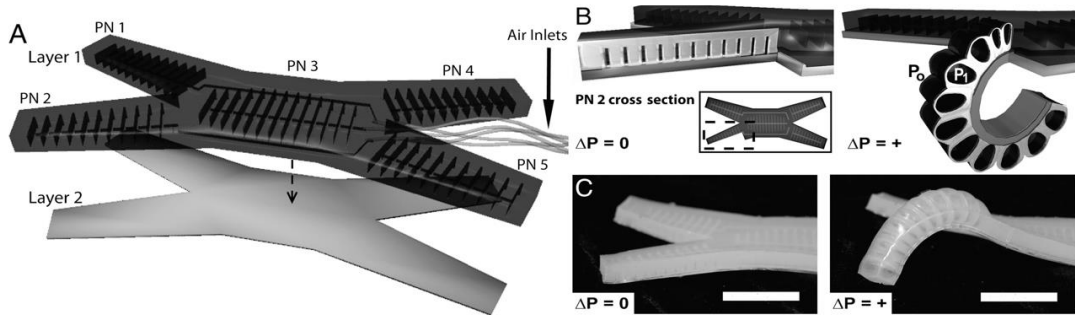


Şekil 2.5: (a)Zıplayan yumuşak robot, (b) elektriksel ve mekanik kompetanları

Kaynak: Tolley, Shepherd, Karpelson, Bartlett, Galloway , Wehner & Wood. (2014)

2.1.5 Çok uzuvlu yumuşak robot

Bu çalışmada yumuşak sert iç iskeleti olmayan yumuşak robot incelenmiştir. Örneğin:(kalamar, deniz yıldızı ve solucan) gibi canlılardan esinlenilmiştir. Bu çalışmadaki yumuşak robot dört adet ayakları vardır. Herhangi bir sensörü bulunmamaktadır. Beş adet aktüatörü ve aynı anda çalışan basit bir pnömatrik valf sistemi vardır. Sürünme ve dalgalanma kombinasyonu ile zor ve engellerin bulunduğu ortamlarda bile rahat hareketin sağlanması gerçekleşir. Bu demonstrasyon, yumuşak robotiğin avantajını göstermektedir: Bunlar, basit çalıştırma türlerinin karmaşık hareket ürettiği sistemlerdir. Şekil 2.6'da yumuşak robotun iç yapısı ve hareket aşamaları gösterilmektedir.



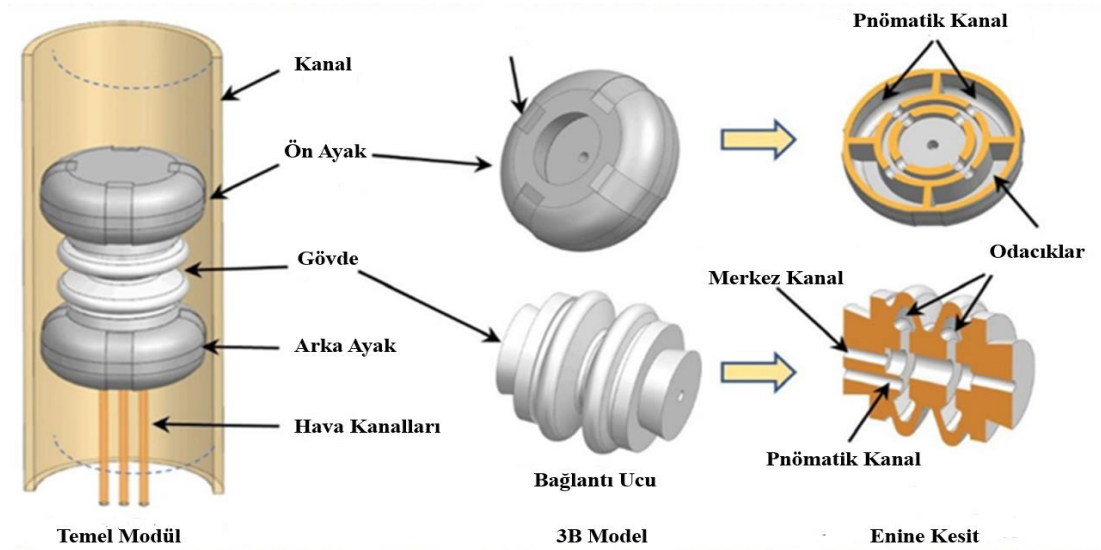
Şekil 2.6: Zıplayan yumuşak robot

Kaynak: Shepherd , Ilievski , Choi , Morin , Stokes , Mazzeo & Whitesides. (2011)

2.2 Boru İçi Robotik Sistemler

2.2.1 Boru hattı ve tünel denetimini sağlayan yumuşak robot

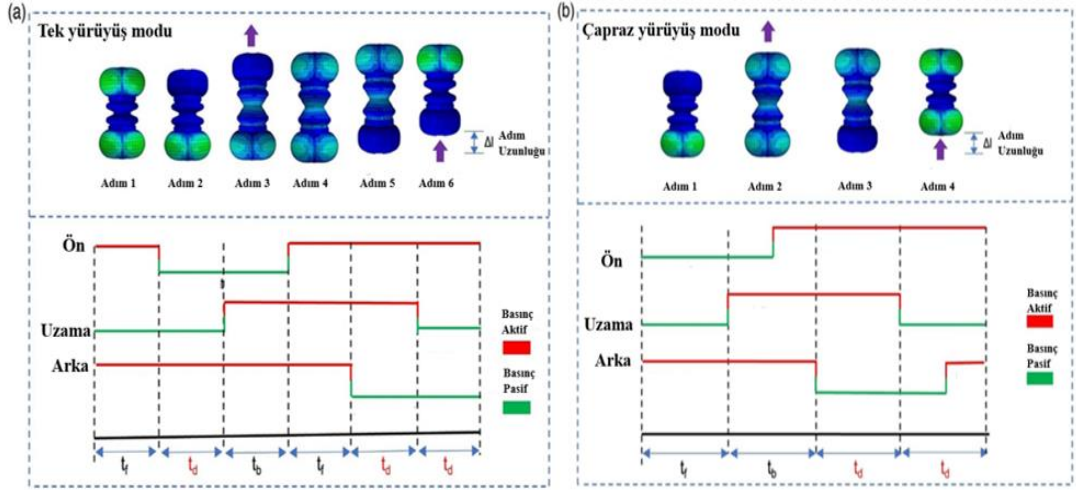
Boru hattı ve tünel altyapısının denetimi, bakımı ve onarımı amacı için geliştirilmiş, karmaşık boru hatları ve tünellerde çeşitli görevleri yerine getirebilen solucandan ilham alınmış soft robot projesidir. Yumuşak boru şeklindeki soft robot, pnömatik aktüatörleri sayesinde uzamsal bükme hareketi ile görevini yerine getirmektedir. Yumuşak robot farklı boru çaplarında, ıslak ve yağlı zeminlerde ve birçok farklı zeminde yapısı gereği çalışma yeteneğine sahiptir. Ayrıca dik boru hatlarında dahi kendi ağırlığının on bir katı yük taşıma kapasitesi vardır. Bu projede Ni-Ti temelli aktüatörlerin kullanılması düşünülmüş fakat boru içerisindeki sıvıların sıcaklık değerlerinin değişken olması sebebi ile sistem kararsızlığı verimsizliğe neden olabileceği karar verilmiştir. Soft robotun hem daha hızlı hareket edebilmesi hem de kararlı yapıda çalışabilmesi için pnömatik sisteme karar verilmiştir. Soft robot iki kısımdan oluşmaktadır ve bu kısımları besleyen iki adet motor pompası mevcuttur. Soft robota yön verebilmek için dört adet hava girişi vardır.



Şekil 2.7: Pnömatik temelli soft robotun bileşenleri

Kaynak: Liu, Song, Fang & Zhao. (2022)

Soft robotun farklı ortamlarda hareket edebilmesi ve yön seçimi yapabilmesi için aktüatörler tek yürüyüş modu (a) ve çapraz yürüyüş modu (b) olmak üzere iki çeşit programı vardır. Şekil 2.8'de hareket analizi gösterilmiştir.

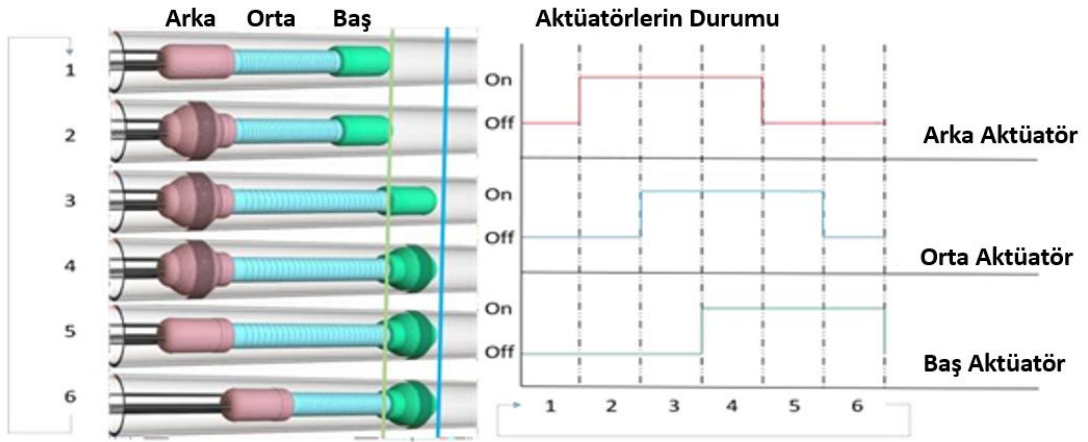


Şekil 2.8: Pnömatik temelli soft hareket analizi

Kaynak: Liu, Song, Fang & Zhao (2022)

2.2.2 Boru hattı denetimleri için biyo-ilham yumuşak robot

Boru hattı denetimleri gibi görevlerde sistem muayenesi genellikle sert yapılı ve dayanımı yüksek malzemeler ile yapılır. Fakat boru çapı değişimlerinde sert malzemeler görevini yerine getirememektedir. Yumuşak robotlar ise denetim için ek bir çözüm yolu sunmaktadır. Robot üç bölümden oluşmaktadır. Baş bölümü ve arka kısım sabit kalması için orta bölüm ise ileri ve geri hareket için tasarlanmıştır. Bu çalışmada yumuşak solucan robot 91 mm büyük boru çaplarından 51 mm küçük boru çaplarına geçerken boru çapının şeklini alarak ortama uyum sağlamakta ve 90° keskin dönüşlü boru hatlarında dahi rahatlıkla gezinebilmektedir. Lokomotif hareket tipine sahip robotun hareket analizi Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9: Pnömatik temelli soft hareket analizi

Kaynak: Zhang, Pan, Heung, Chiu & Li. (2018)

2.2.3 Kol uzunluğu ayarlanabilen vida tahrikli boru içi kontrol robotu

Boru hatları endüstrilerde ve günlük hayatımızda altyapıların önemli bileşenleri olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Önemli sızıntı ve patlakları önlemek için boru hatlarının düzenli muayenesi ve hızlı onarımı gereklidir. Fakat birlikte, muayene ve onarım, manuel olarak gerçekleştirilirse zaman alıcı ve maliyetlidir. Bu nedenle, zayıf noktaları tespit etmek için şimdiye kadar robotik boru içi muayene robotları için alternatif yöntemler denenmiştir. Boru hatlarını sökmeden görsel inceleme yapmak için kameraların kullanıldığı ve ayrıca ultrasonik veya manyetik sensörler geliştirilen robot ayarlanabilen uzun kolları ve tekerlekleri ile alternatif yöntem olarak değerlendirilmektedir. Şekil 2.10'da kol uzunluğu ayarlanabilen vida tahrikli robot görülmektedir. Geliştirilen boru içi robot, itme kuvveti üreten bir ön rotatörden ve rotatörün reaksiyonunu destekleyen bir arka statordan oluşur. Rotatör, çevresinde yerleştirilmiş tekerleklere sahiptir ve spiral bir eğriyi izlerken ileri ve geri hareket edebilir. Boru eksenini boyunca bir motor ve bir dişli mil sayesinde, iletim mekanizması aracılığıyla dönme yönünü değiştirmeden doğrudan rotatöre bağlanabilir. Bu, vidalı tahrik tipinin zorlukla karşılaşmasına rağmen, kolayca minyatürleştirilebilir.

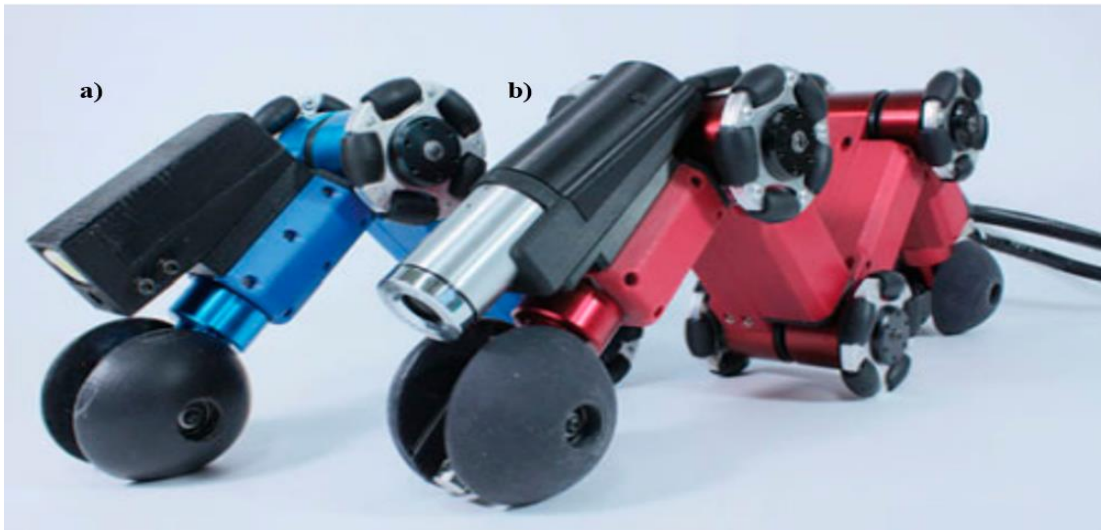


Şekil 2.10: Pnömatik temelli soft hareket analizi

Kaynak: Atsushi, Taiki & Shugen. (2014)

2.2.4 Çok mafsallı tekerlekli boru içi muayene maksatlı yılan robot

Eskiyen boru hatlarında eskiyen noktalarını tespit etmek, kritik sızıntı ve patlamaları önlemek çok önemli bir görevdir. Bununla birlikte birleşim noktalarının manuel olarak incelenmesi ve boru hattının içindeki korozyon ve hasarların tespiti ve denetlenmesi çok zaman alıcı ve maliyetli yöntemlerdir. Bugüne kadar, araştırmacılar ve mühendisler, insanların giremediği dar boruların içine bakmak için muayene robotları geliştirmeyi denediler. Boru hatlarına, özellikle de yeraltına veya yüksek erişilemeyecek yerlere yerleştirilmesi erişme riskine sebep olmaktadır. Son zamanlarda, lokomotif tipi ve yedekli manipülatörlere benzeyen son derece uyarlanabilir boru içi denetim robotları geliştirilmiştir. Genellikle yılan benzeri robotlar olarak adlandırılan bu robotlar, halat benzeri gövde yapılarına sahiptir. Halat benzeri gövdeleri sayesinde özellikle boruların kıvrımlarında ve ayrımlarında üstün performans gösterebilmişlerdir. Boru yılanının her bir tekerleği boru içi duvarlarına temas ederek kendini sıkıştırma hareketi ile ilerlemektedir. Geliştirilen birinci prototip düz borularda hareket ederken, geliştirilen ikinci prototip ise dönüşlü ve çoklu yön kontrolü yapabilmektedir. Birinci (a) ve ikinci (b) prototip Şekil 2.11’de gösterilmektedir.



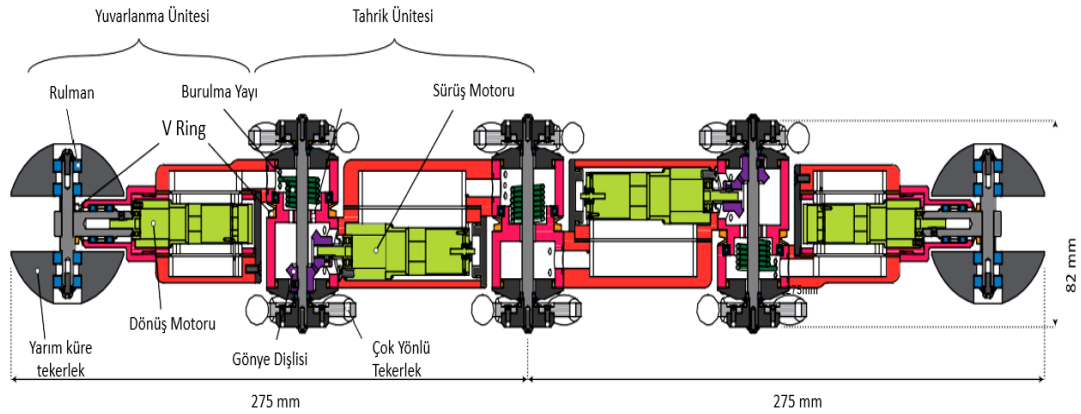
Şekil 2.11: Çok mafsallı tekerlekli boru içi muayene maksatlı yılan robotun birinci (a) ve ikinci (b) prototipleri

Kaynak: Atsushi & Shugen. (2020)

Çizelge 2.1: Yılan robotun teknik özellikleri

Adaptif çap (m)	0,1
Toplam uzunluk (uzatıldığında) (m)	0,55
Toplam ağırlık (kg)	1,7
Maksimum çekiş kuvveti (kgf)	4,0
Maksimum hız (m/s)	0,3

Yılan robotun detaylı teknik çizim ve donanımları Şekil 2.12’de detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Yılan robotun uzunluğu 550 mm ve çapı ise 82 mm’dir. Maksimum hızı ise 0,3 m/s’dir. Robot kontrol ünitesi ile kablolar ile haberleşmektedir. Bu sebepten dolayı kısa mesafelerde kullanılması daha uygundur. Çizelge 2.1’de yılan robotun teknik özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 2.12: Çok mafsallı tekerlekli boru içi muayene maksatlı yılan robotun detaylı teknik çizimi

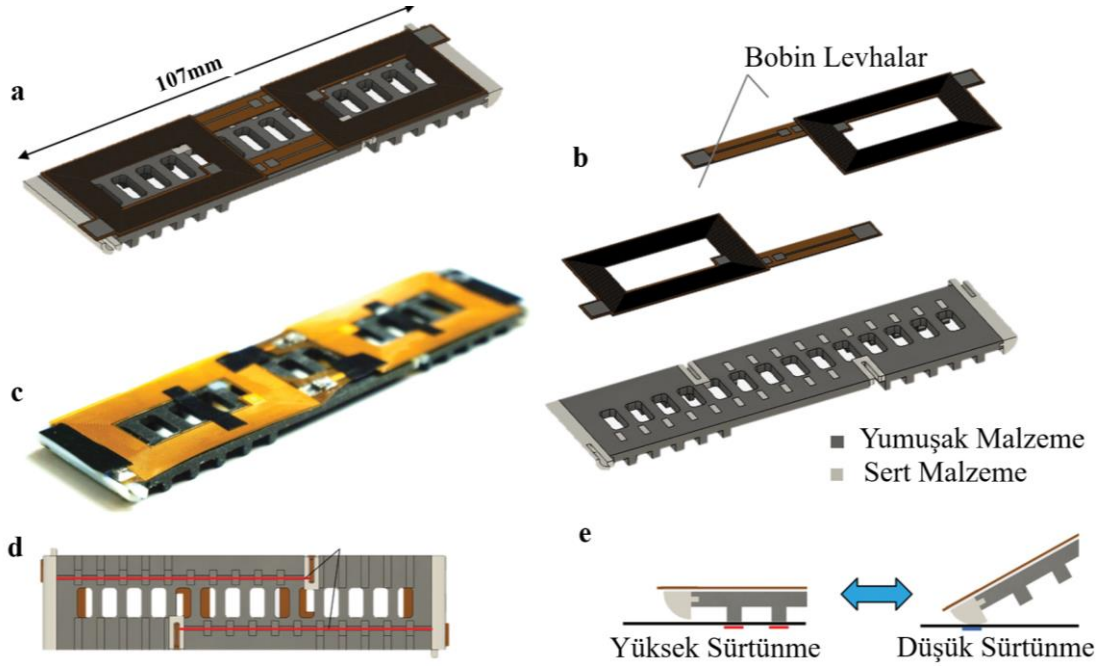
Kaynak: Atsushi & Shugen. (2020)

2.3 Ni-Ti Temelli Robotik Sistemler

2.3.1 Kablosuz olarak tasarlanan Ni-Ti aktüatörlü tırtıl robot

2019 yılında Japonya soft robot bilimi projesi adında Tokyo Üniversitesi Erato Kawahara ekibi ŞBA Ni-Ti yayları kablosuz olarak kontrol ederek soft robot geliştirmişlerdir. Kablosuz güç aktarımı (WPT), yumuşak gövdeli sürekli robotların kullanım süresini uzatması için önemli bir potansiyele sahiptir. Çalışma süresi sınırsızdır ve ağırlığı düşüktür. Bununla birlikte, WPT' de yaygın olarak kullanılan katı güç alıcı bobinleri, robotun süreklilik deformasyonunu engeller. Robotun tasarımı iki bölümden oluşmaktadır. Alt kısım kauçuk malzeme üst kısım ise sert

malzemeden meydana gelmiştir. Sert malzemenin üzerinde Ni-Ti ŞBA malzeme ve alıcı bobin bulunmaktadır. Alıcı bobin Ni-Ti ŞBA malzemeyi aktif edebilmek için enerji üretmekte ve bu sayede soft robot hareket etmektedir. Kablosuz olarak Ni-Ti ŞBA yayların kontrol edilmesini gözlemlediğimiz ilk çalışmadır. Enerji üretimi sorunu olmadığı için robot uzun soluklu kullanılabilir. İki adet Ni-Ti ŞBA yayların karşılıklı kasılması ile hareket sağlayarak hareket etmektedir. Soft robotun boyu 107 mm ve yapıldığı malzemeden dolayı oldukça hafiftir.



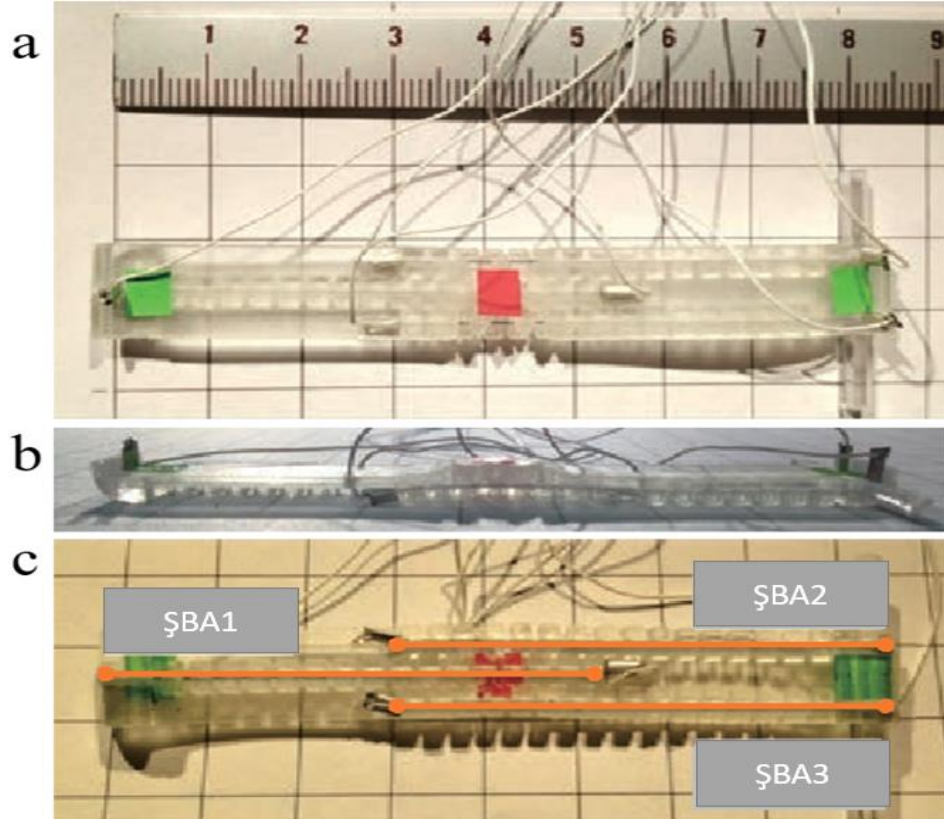
Şekil 2.13: Kablosuz ŞBA temelli Soft Robot

Kaynak: Colm, Takuya, Weiwei, Takuya, Yoshiaki, Ryuma & Yoshihiro. (2020)

2.3.2 Yön kontrollü yumuşak robot tasarımı

Tufts Üniversitesinde 2014 senesinde Umedachi Takuya ve Trimmer Barry tarafından bünyesinde üç adet Ni-Ti ŞBA yay olan aktüatörler sayesinde sağa ve sola dönüş kabiliyeti olan bir model geliştirilmiştir. Yön verme hareketini sağa dönmesi için bir ve iki numaralı ŞBA yayları, sola dönebilmek için ise bir ve üç numaralı Ni-Ti ŞBA yayları aktifleştirmesi gerekmektedir. Şekil 2.14’ de yayların yerleşim yerleri görülmektedir. Yaklaşık boyu 80 mm’dir. Model 3B yazıcıda iki farklı malzeme ile yapılmıştır. Birincisi silikon ikincisi ise korteks malzeme olarak üretilmiştir. Bunun sebebi ise aynı doğadaki gibi bükülme, uzama, sıkışma veya esneme gibi hareketleri rahatça yapabilmesi ve dış ortamdaki kinetik enerjiyi üzerinde sönmüleyebilmesi amaçlanmıştır. Ni-Ti ŞBA yayların kontrollü Arduino Uno ve PWM sürücü entegreler ile sağlamıştır. Bu sayede kontrollü bir hareket elde

edilmiştir. Ni-Ti ŞBA soğuması için robotun ortasında havalandırma kanalları bulunmaktadır. Ni-Ti ŞBA yaylar kontrolü için mikro denetleyiciye kablolar ile bağlı olduğu için hareket çok yönlü olmasına rağmen kullanım alanı sınırlıdır.

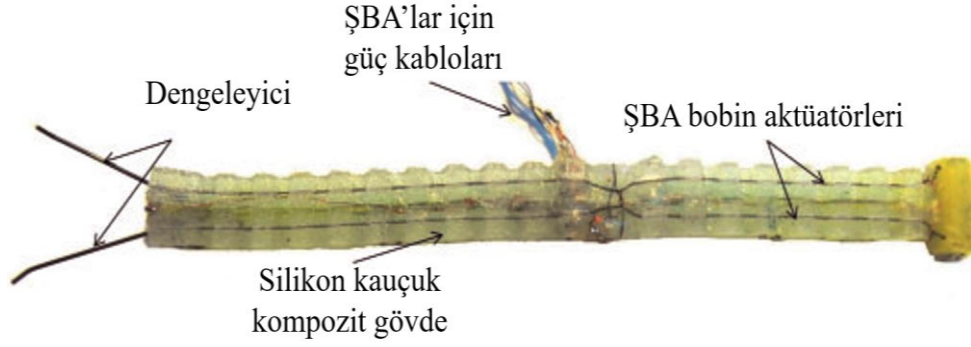


Şekil 2.14: Şekil bellekli alaşım ile hareketi sağlanan robot

Kaynak: Umedachi & Trimmer. (2014)

2.3.3 GoQBot yumuşak gövdeli yuvarlanan tırtıl robot

Tufts Üniversitesinde 2010 senesinde Huai-Ti Lin, Gary G Leisk ve Barry Trimmer tarafından biyo-ilham tekniği ile GoQBot tırtıl tasarlanmıştır. Bu tırtıl klasik tırtıllar gibi kasılma hareketi yerine yuvarlanma hareketi ile ilerlemektedir. GoQBot tırtıl Şekil 2.15’ de görülmektedir. Yuvarlanma hareketi için üç adet Ni-Ti ŞBA yay olan aktüatörler sayesinde 100 sn içerisinde 20 cm yol almaktadır. Robotta tüm gövde kinematiği ve iki boyutlu reaksiyon kuvvetleri 200 rpm üzeri açısal hız ortaya çıkarır. Bu hareketi doğada tırtılların yapması imkansızdır. Bünyesinde iki adet ŞBA barındıran ve dengeleyici çubukları olan robotun, kablolar ile kontrolü sağlandığından kısıtlı çalışma alanı bulunmaktadır.

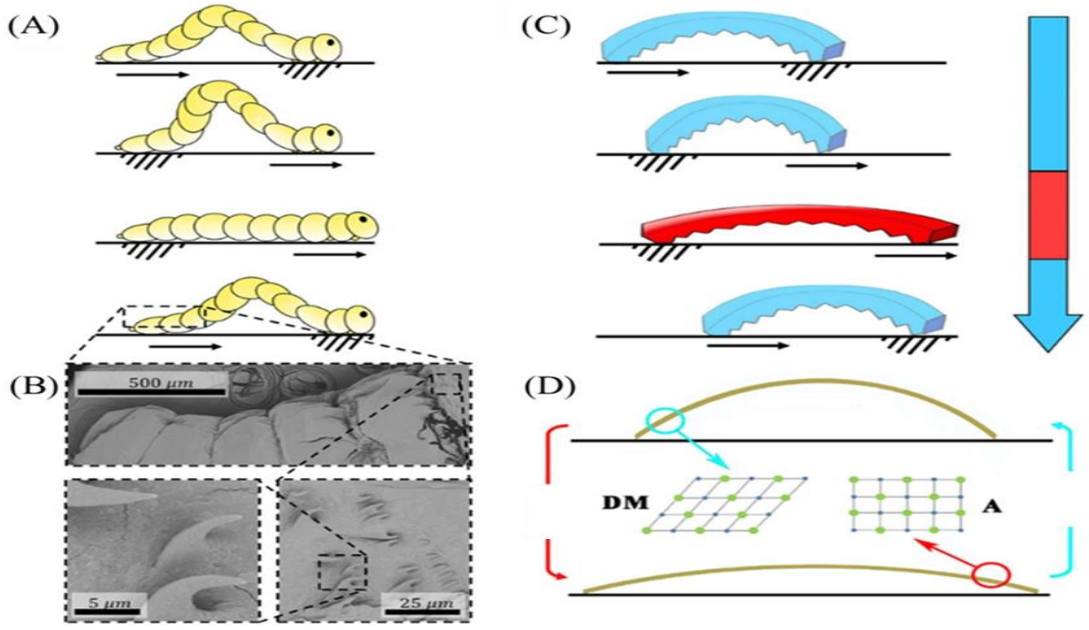


Şekil 2.15: GoQBOT robotunun genel yapısı

Kaynak: Lin, Leisk & Trimmer B. (2011)

2.3.4 MagBot Ni-Ti tahrikli solucandan ilham alınmış yumuşak robot

Yumuşak, solucan benzeri robotlar, sağlam ancak basit hareket kalıpları nedeniyle karmaşık ve kısıtlı ortamlarda umut vaat ediyor. Bu tür birçok robot geliştirilmiş olmasına rağmen, ya bağlı güç kaynaklarına ve karmaşık tasarımlar güven vermemektedirler. Harici yükleri hareket ettiremiyorlar. Bu çalışmada, solucandan larvalarından esinlenerek hareket elde etmek için şekil bellekli alaşım kaynaklı, ısıya duyarlı anizotropik sürtünmeyi kullanan yeni, solucandan ilham alan, manyetik olarak çalıştırılan Magbot incelenmektedir. Küçük boyutları ve düşük maliyetleri göz önüne alındığında, bu robotların küçük nesnelere taşınması için uzak, kapalı alanlarda veya daha karmaşık tasarımlarda bileşen olarak kullanılabilmesini umut ediliyor. Tırtıllar, solucanlar ve diptera (yani sinekler) gibi yumuşak omurgasızlar, çevrelerinde güvenilir bir şekilde hareket etmek için peristaltik veya dalga benzeri aktivasyon kullanmak üzere evrimleşmişlerdir. Bu yumuşak canlıların sürtünme ilkeleri, son zamanlarda çok işlevli ve son derece uyarlanabilir yumuşak, biyomimetik robotların tasarımı ve araştırılması için birçok fikre ilham kaynağı olmuştur. Bununla birlikte, tartışmasız en basit tasarımlar, arasındaki tek harekete geçirme mekanizmaları olarak alternatif bükme ve uzatma modlarıdır. Şekil 2.16(a)'da MagBot'un hareket mekanizması görülmektedir.

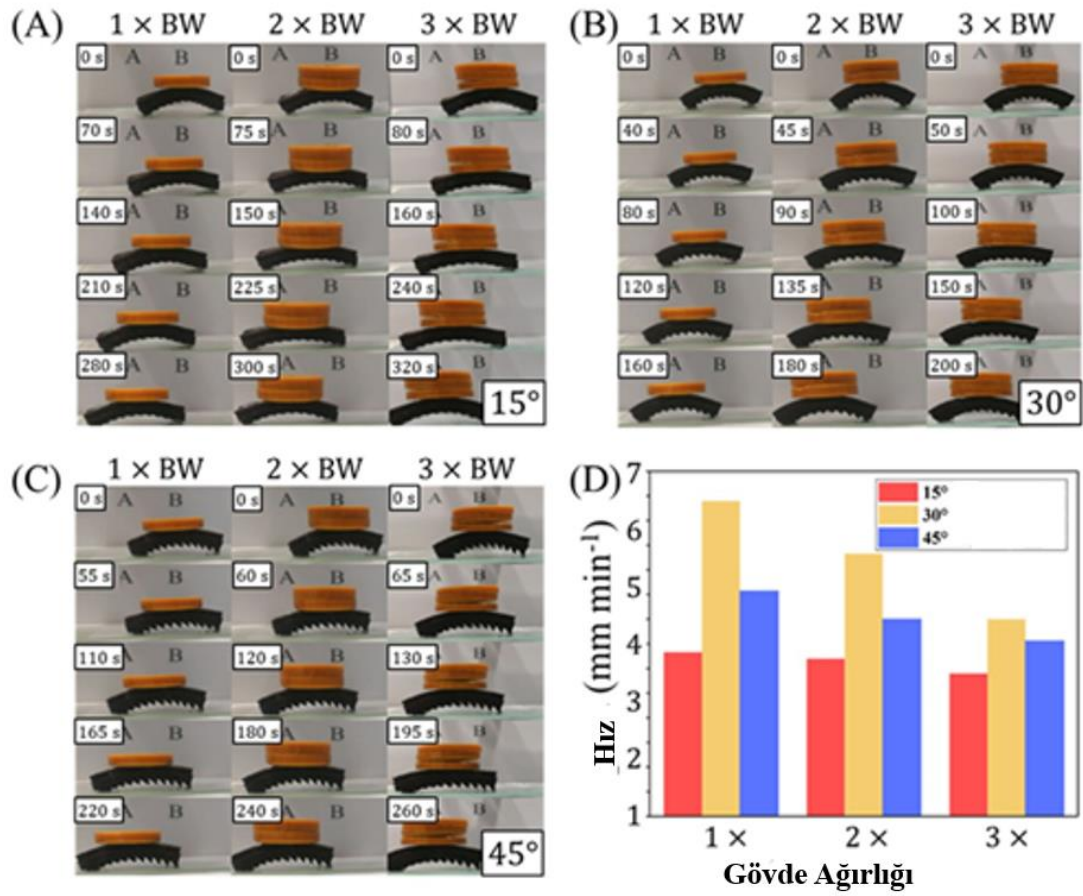


Şekil 2.16: MagBot'un hareket mekanizması ve çalışma prensibi

Kaynak: Xu, Wagner, Liu, He, Li, Pan, Feng, Meng, Zou, Fu, Shi, Zhao, Ding & Vernerey . (2022)

Böylece harmonik olmayan, dalga benzeri peristaltik çalıştırmayı kopyalayan robotlar da olduğu gibi karmaşık iç mekanizmalara, kontrol sistemlerine veya lokalize aktüatörlere olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Bunun yerine, bu basit robotlar tamamen bir veya birkaç uyarana duyarlı malzemedan oluşmaktadır. MagBot ise hareket kabiliyetini içerisine yerleştirilmiş Ni-Ti teller sayesinde sağlamaktadır. Ni-Ti teller ısıtıldığında şekil bellek özelliğinden yararlanılarak bükülme ve kasılma hareketi yapmaktadır. Soft robotun yapısı gereği yüzeye tutunarak sürünme hareketini gerçekleştirmektedir. Şekil 2.16(b)'de ısıya karşı Ni-Ti tellerin davranışlarını görülmektedir. Aynı zamanda güç kaynakları için hidro-pnömatik veya elektrik enerjisi ihtiyacına da azaltır. Ayrıca, daha karmaşık sistemler bacakların ve yapışkan bölgelerin kullanımı yoluyla (tırtılların durumunu taklit ederek) veya lokalize yanal genişleme ve büzülme yoluyla tek yönlü ankrajı indüklemeye çalışırken, daha basit tasarımlar, asimetrik sürtünmeye hareketine neden olan anizotropik yüzeylerden yararlanmayı amaçlamaktadır. Bu basit, bağlantısız tasarım, yüksüz koşullarda gücünün yalnızca %17'lik bir azalma ile kendi ağırlığının üç katına kadar ağırlığa sahip yükleri taşıyabilir ve böylece kontrollü ortamlarda yükleri taşımak için ilk kez yumuşak robotların kullanılabileceğini

gösterir. Şekil 2.17’ de ise MagBot’un farklı ağırlıklardaki yükler ile yapılmış bir deneyi ve sonuçları gösterilmiştir.



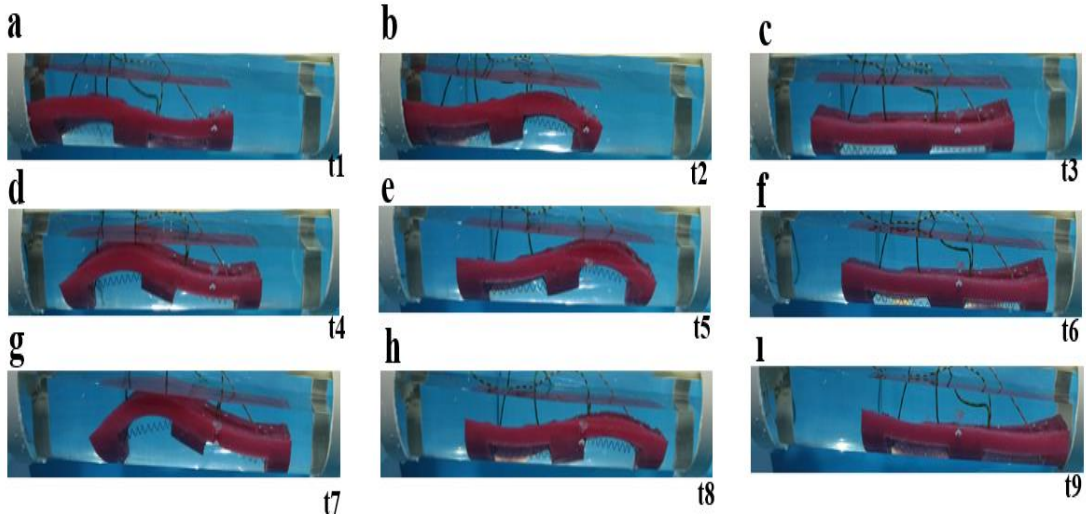
Şekil 2.17: MagBot’un 15°,30° ve 45°’lerdeki hız ve ağırlık deneyi

Kaynak: Xu, Wagner, Liu, He, Li, Pan, Feng, Meng, Zou, Fu, Shi, Zhao, Ding & Vernerey . (2022)

2.3.5 Boru hattı denetimleri için şekil bellekli Ni-Ti yay tahrikli biyo-ilham soft robot

Bu çalışmada soft kurtçuk robotunun boru içerisinde hareket ettirilmesi amaçlanmıştır. Mevcut uygulamalardan daha uygun maliyetli bir nikel-titanyum ŞBA yay kullanılan soft robot sistemi, su dolu boru içerisinde daha rahat hareket etmesi için tasarlanmıştır. Sistemin yumuşak ve esnek gövde kısmı yüksek çekme, yırtılma ve mekanik mukavemetinden dolayı RTV-2 silikon malzemeden yapılmıştır. Nikel-titanyum ŞBA tel, yay şeklini alarak kasılma hareketini vücut içinde homojen olarak dağıtarak vücudun hareketi için termo-mekanik eğitim ile öğretilmiştir. Robotik sistemin içine özel olarak üretilen klemensler yerleştirilmiş ve nikel-titanyum yaylar bu klemenslere sabitlenmiştir. Sistemin kontrolü mikroişlemci

tarafından yapılmıştır. Ni-Ti yaylara enerji 12 V 12,5 A güç kaynağından beslenmektedir. Geliştirilen sistemler ve yöntemlere göre daha uygun maliyetli ve kullanımı kolay olduğu değerlendirilmektedir. Lokomotif sıralı hareketi Şekil 2.18’ de gösterilmektedir.



Şekil 2.18: Ni-Ti ŞBA temelli soft robotun boru içerisindeki hareketi

Kaynak: Sapmaz, Dilibal, Sapmaz & Yılmaz. (2021)

Soft robotun su altında hareket ettirilmesinin amacı Ni-Ti ŞBA telin daha hızlı soğumasını sağlarken aynı zamanda telin aşırı ısınmadan zarar görmesini veya kopmasını da engellenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada üretilen soft robotik sistem kablolu olarak kontrol edilmektedir. Robotun sıvı içerisinde çalışması Ni-Ti ŞBA’ların ısınmasını yavaşlatmaktadır. Boru içerisinde kablolar hareket kısıtlaması oluşturmaktadır. Ayrıca, boru içini gözlemlemek için kamera sistemi bulunmamaktadır. Soft robotun çalışma hızı 3,93 mm/sn’dir.

3. ŞEKİL BELLEKLİ ALAŞIMLAR VE Nİ-Tİ İLE YAPILAN UYGULAMALAR

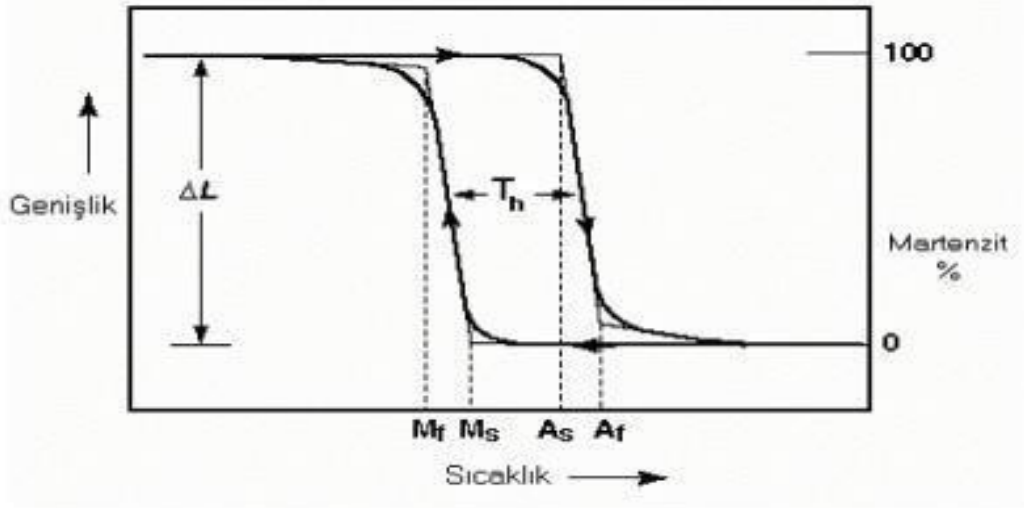
Şekil bellekli alaşımlar, martensitik fazdayken belli bir plastik deformasyona veya baskıya uğradıktan sonra, östenit faz sıcaklığına eriştiklerinde büyük oranda ilk hallerine geri dönebilen alaşımlardır (Dilibal, 2018), (Dilibal, 2016). Diğer bir ifade ile uygulanan sıcaklık ve gerilime bağlı olarak daha önceki şekil formuna ve boyutlarına geri dönebilme özelliğini gösteren alaşımlardır. Süperelastik özelliği ise alaşım östenit fazda olduğunda ısı değişimi yaşanmadan üzerindeki kuvvet kaldırıldığında ilk haline geri dönmesidir (Dilibal, Hamilton & Lanba. 2017). En kritik termomekanik özellikler bunlardır.

3.1 Şekil Bellekli Alaşımlar

Ni-Ti alaşımları ikili alaşım sistemidir ve eş atomlu intermetalik bileşiklerdir. Başka alaşımlara göre çok daha esnek yapısal özelliğe sahiptir. İçerisindeki nikel oranının fazlalığı dönüşüm ısını önemli miktarda düşürür ve östenit fazda akma dayanımını yükseltir. Yaklaşık 500°C ile 800° ısı aralığında istenilen şekil belleği kazandırılır (Calkins & Mabe, 2010), (Otsuka & Kakeshita, 2002). Uygun ısıl işlem şartları sağlamazsa Ni-Ti şekil belleği özelliğini kazanamaz.

3.1.1 Şekil Bellek Mekanizması

Şekil bellekli alaşımlarda katı hal faz dönüşümü bulunmaktadır. Bunlar östenit ve martensit fazlardır (Dilibal, 2013), (Dilibal, 2003). Ni-Ti östenit faz soğutulduğu zaman martensit forma dönüşür. Kuvvet uygulandığında yapılarının bozulması çok kolaydır. Gerilme uygulanırken plastik şekil değişimi sağlanan martensit yapısı, ısı uygulandığında tekrar şekil değişimi ile östenit şeklini geri alır. Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Sıcaklık değişim aşamalarında sabit gerilme altında şekil bellekli alaşıma ait karakteristik davranış.

Kaynak: Dilibal (2003)

3.1.2 Şekil bellekli alaşımlar için kontrol değişkenleri

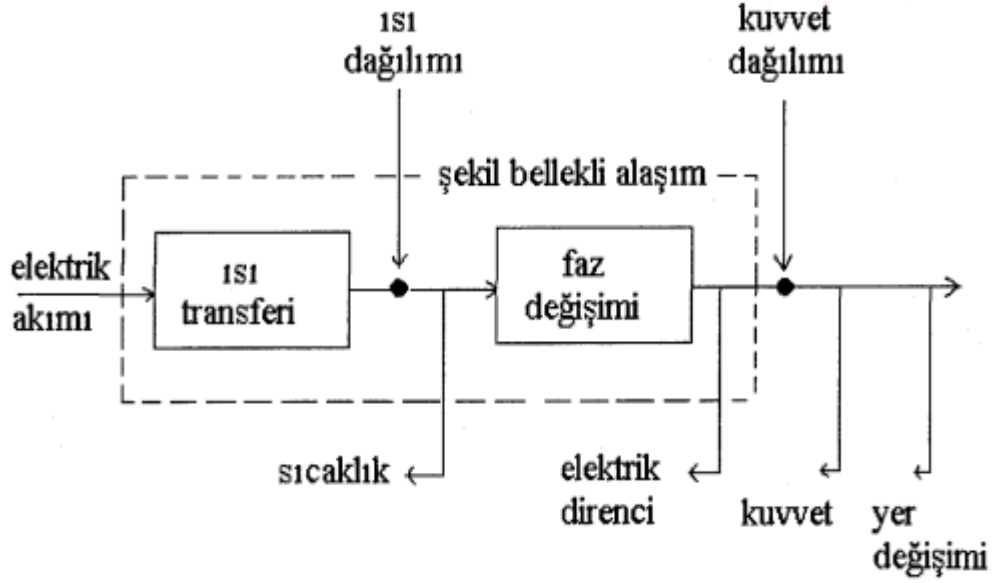
Şekil bellekli alaşımların bir eyleyici olarak kullanılması istenen hareketin gerçekleşmesi veya geri besleme sisteminin sağlanması kabiliyetini artıracaktır. Örneğin bir çekme hareketi yapılıyorsa fazla çekip kopmasına ya da gevşek tutup hareket etmemesine ve görevini yerinen getirmemesine sebep olacaktır.

Şekil bellekli alaşımlar için geri besleme oluşturan kontrol değişkenleri iç ve dış kontrol değişkeni olarak iki gruba ayrılmaktadır.

Çizelge 3.1: Kontrol Değişkenleri

İç Kontrol Değişkenleri	Dış Kontrol Değişkenleri
Sıcaklık	Kuvvet
Elektrik Direnci	Yer Değişimi

İç kontrol değişkenlerinden alaşım sıcaklığı; alaşımın üzerine veya yakınına konabilecek sıcaklık sensörü ile ölçülebilir. Ölçülen sıcaklık sonucunda alaşımın martenzit fazdan östenit faza veya östenit fazdan martenzit faza dönüşümlerinin sıcaklık değerleri tespit edilebilir. Sıcaklık dönüşüm verileri bir bilgisayara aktarılarak kontrol sistemleri belirlenmektedir.

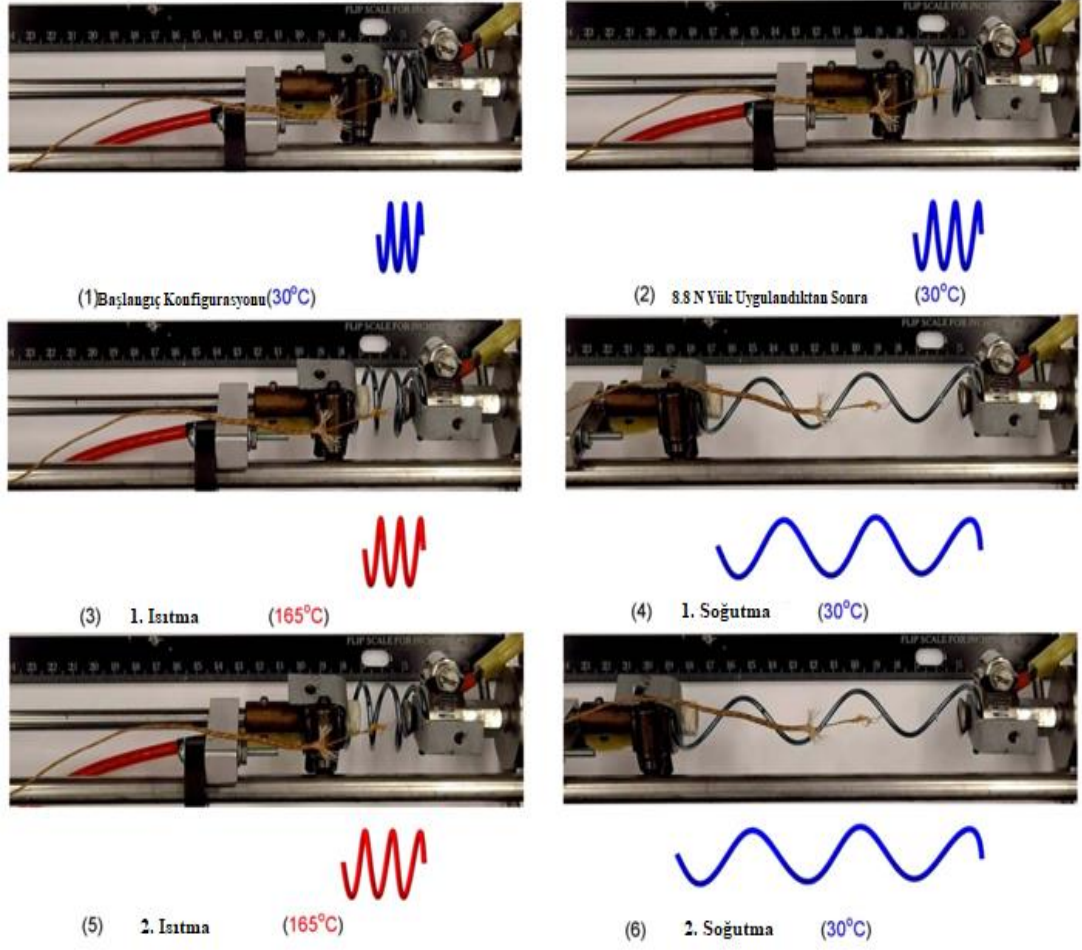


Şekil 3.2: Şekil bellekli alaşımlara ait genel kontrol değişkenleri

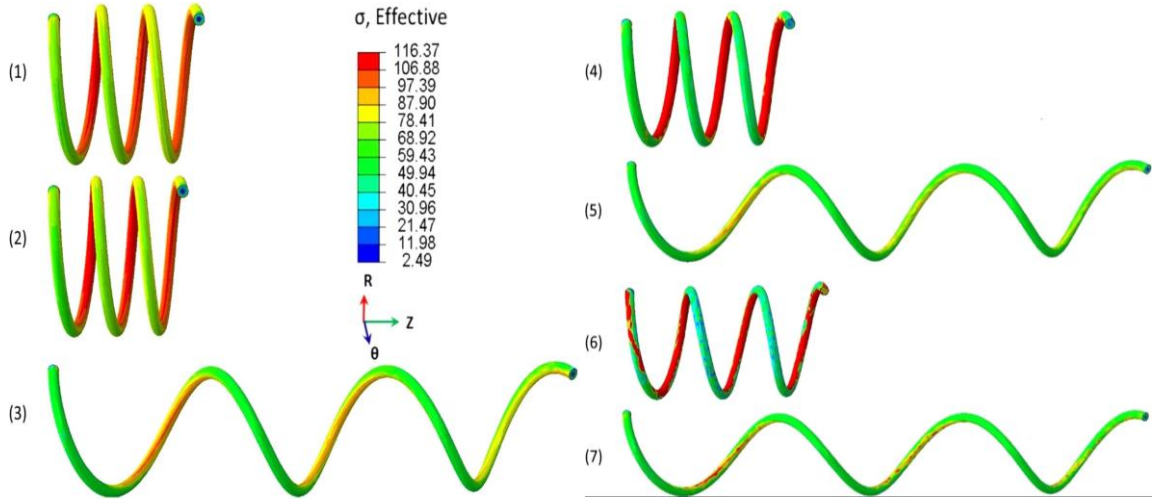
Kaynak: Dilibal (2003)

3.1.3 Ni-Ti ŞBA Yayların Termomekanik Eğitim Esnasında Davranışı

Şekil bellekli alaşım aktüatör mekanizmaları havacılık ve mühendislik alanında tekrarlanan termomekanik döngüler için potansiyel olarak kullanılabilir. Şekil bellekli alaşımlara eğitim verirken çok eksenli durumlarını ve deformasyon özelliklerini hesaba katmak önemlidir. Bu amaçla literatürde Ni-Ti yayların şekil bellek özelliği kazanması ve eğitimleri ile ilgili bir çalışma yapılmıştır (Dhakal, Nicholson, Saleeb, Padula & Vaidyanathan, 2016). Şekil 3.3'te Ni-Ti ŞBA yayların termomekanik eğitimleri ve gerilme dağılımlarına ait 3B modeli oluşturulmuştur (Saleeb, Dhakal, Hosseini & Padula, 2013).



98



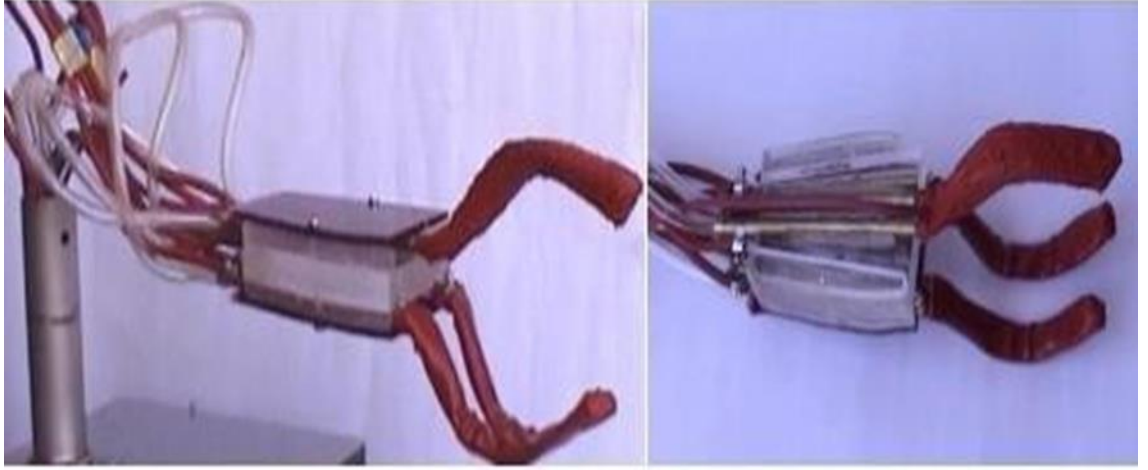
Şekil 3.3: Ni-Ti ŞBA yayın termomekanik hareketleri ve sayısal analizi

Kaynak: Saleeb & Vaidyanathan (2016)

3.2 Şekil Bellekli Alaşımlar ile Yapılan Uygulamalar

3.2.1 Şekil bellekli alaşımlar ile robotik alanda yapılan uygulamalar

Ni-Ti ŞBA robotik el uygulamalarında da kullanılmaktadır. Doç. Dr. Savaş Dilibal ve arkadaşları tarafından geliştirilen robotik sistemde Ni-Ti levhalar kullanılarak sistem ısıtma ve soğutma ile aktive edilmiştir (Dilibal, Guner & Akturk, 2002), (Dilibal, Tabanlı & Dikicioğlu, 2004). İTÜ Robot el üç parmaklı robotik tutma, kavrama ve serbest bırakma, gibi işlemleri yapabilir. Elektrik akımı ile ısıtılan robotik parmaklar, üzerinden geçirilen sıvı ile soğutulmaktadır. Şekil 3.4' te görülmektedir.

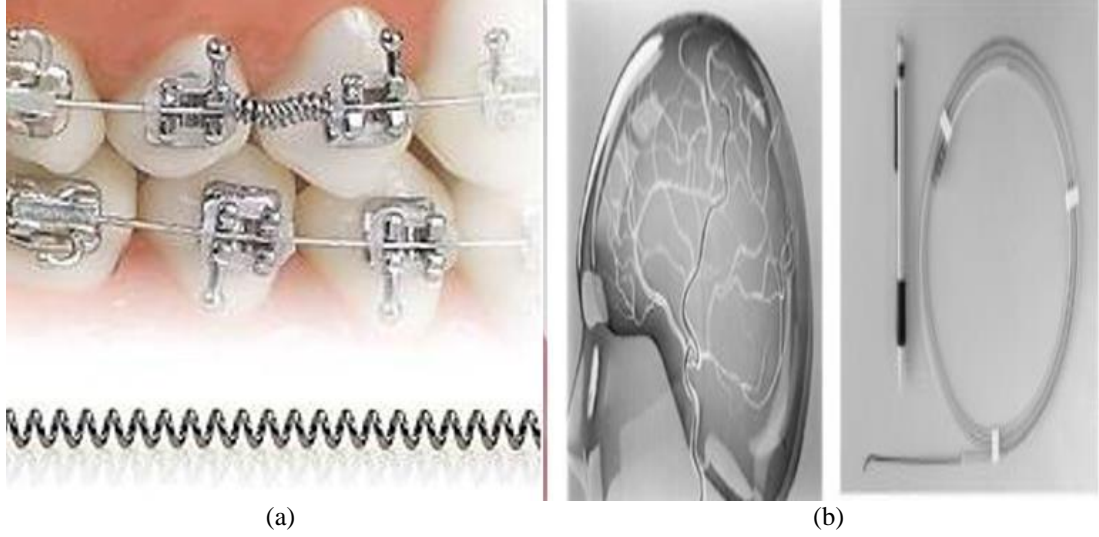


Şekil 3.4: İTÜ robot el

Kaynak: Dilibal, Tabanlı, & Dikicioğlu, (2004)

3.2.2 Şekil bellekli alaşımlar ile medikal alanda yapılan uygulamalar

Sağlık alanında damarların içine yerleştirilen, Ni-Ti yay tellerden kontrol yapılabilen kateterler tasarlanmıştır. Dişlerin yapısını ortodontik düzeltme amacı için Ni-Ti teller kullanılmaktadır. Şekil 3.5 'de farklı uygulamalar yer almaktadır (Wen, Tu, Zong & Xie, 1994).

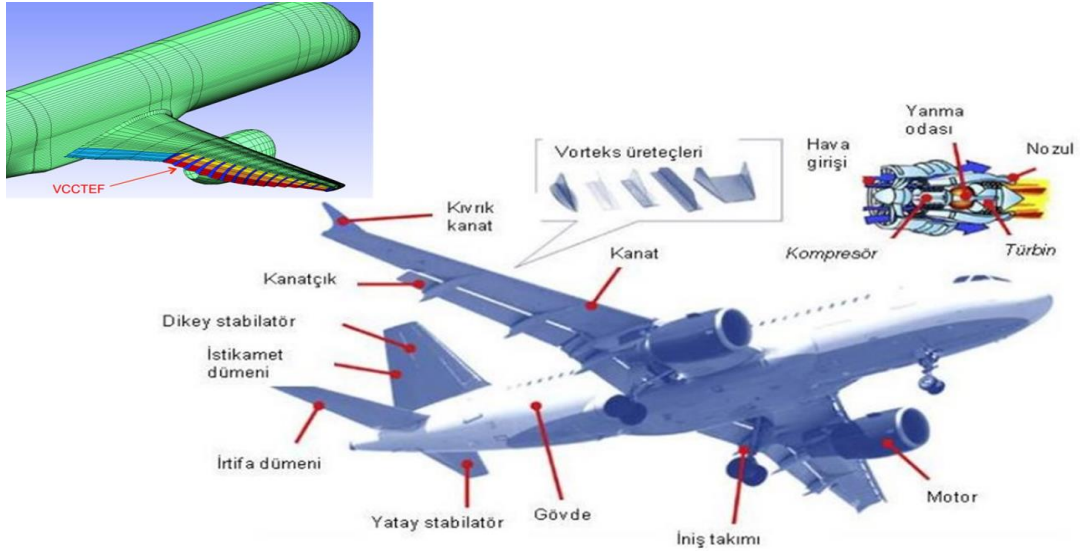


Şekil 3.5: (a) Medikal Ni-Ti ortodontik teller ve (b) beyin için uygulanan kateterler için medikal süperelastik Ni-Ti klavuzlar

Kaynak: Onur & Kurt (2002)

3.2.3 Şekil bellekli alaşımlar ile havacılık alanında yapılan uygulamalar

Ni-Ti ŞBA jet motorunun nozul bileziğini eğme maksatlı için yerleştirilmiştir. Şekil 3.6' da aşamaları gösterilmektedir. Yapılan bu işlem sayesinde kalkış ve iniş anında meydana gelen sorunların giderilmesi amaçlanmıştır (Peduk, Dilibal, Harrysson, Ozbek & West, 2018).

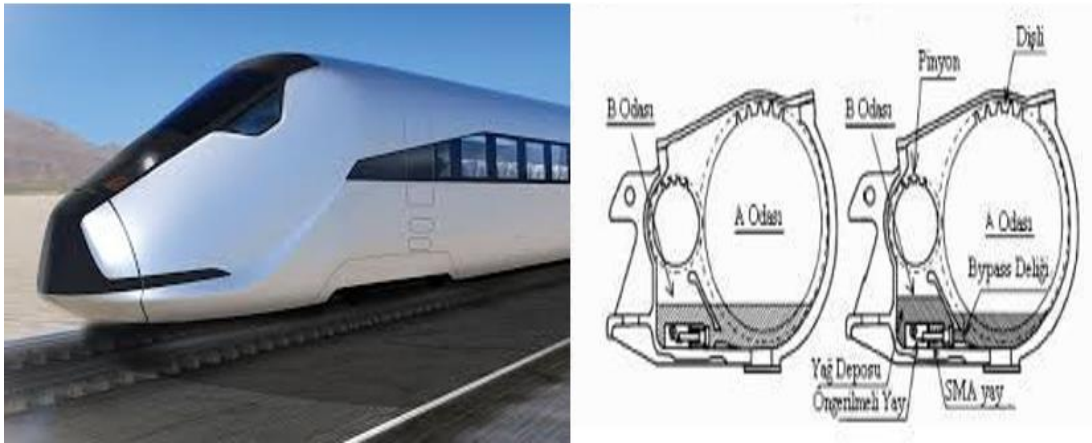


Şekil 3.6: Şekil bellekli alaşım kullanılan chevron uçuş projesi

Kaynak: Peduk, Dilibal, Harrysson, Ozbek & West (2018)

3.2.4 Şekil bellekli alaşımlar ile endüstriyel alanda yapılan uygulamalar

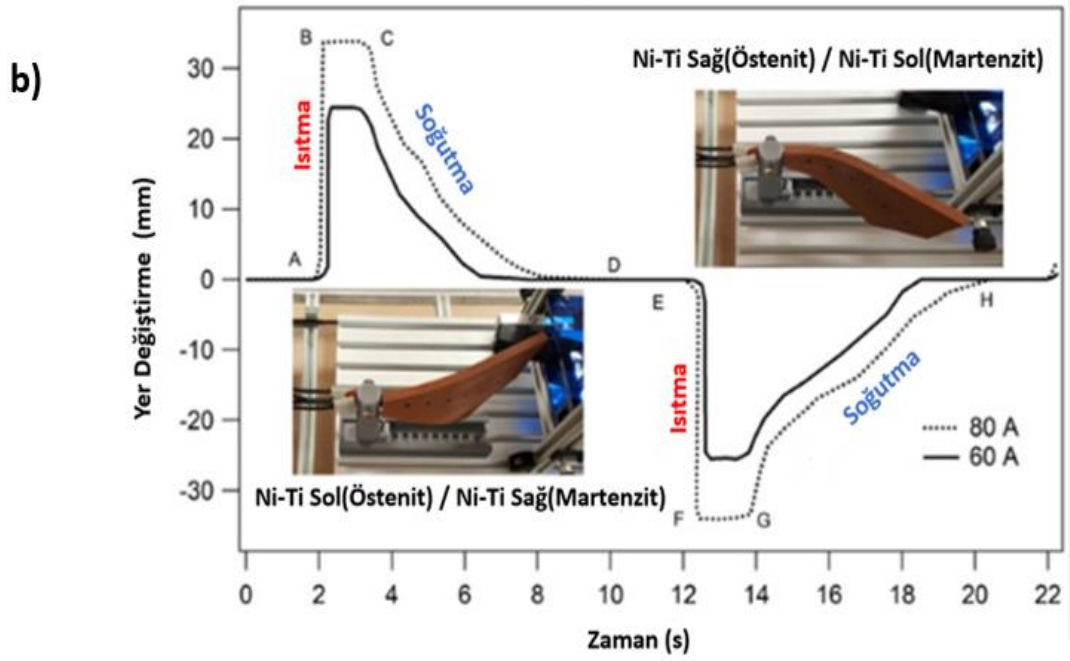
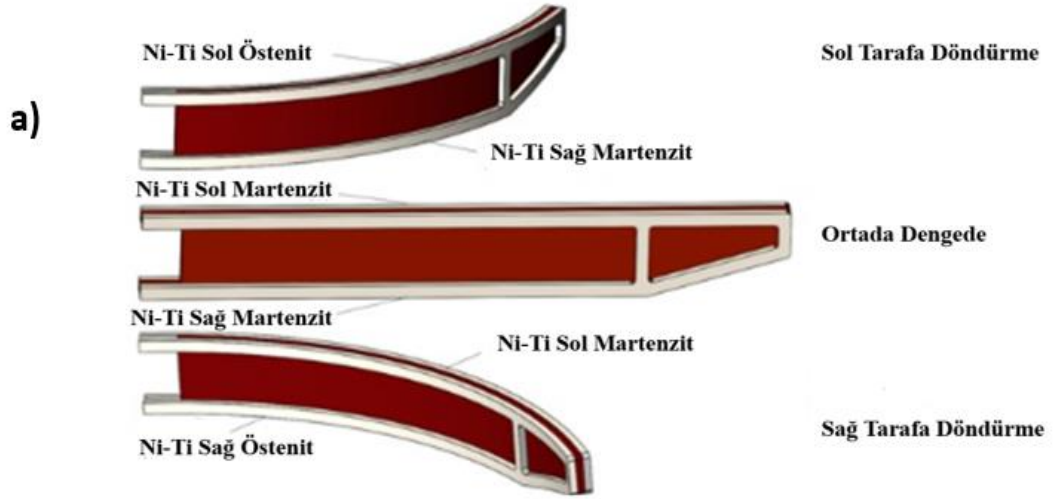
Shinkansen hızlı treninin yağlama sisteminde yağ seviye ayarlayıcı valfi Şekil 3.7’de gösterilmektedir. Ni-Ti ŞBA yaylar yüksek hızlarda ortam ısısının yükselmesi ile şekil belleği özelliği sonucu yayın kışalmasından kaynaklı valfe yön vermektedir. Endüstriyel alanda Ni-Ti alaşımların EBM temelli eklemeli imalat yöntemi ile üretimi ile ilgili çalışmalar yoğunlaşmıştır (Zhu, Gao, Li, Lin & Bi, 2010). Ayrıca endüstriyel robotlarda kullanılmak üzere şekil bellekli alaşım temelli manipülatör çalışması ile ilgili farklı patentler alınmıştır (Engeberg, Dilibal, Vatani, Choi & Lavery, 2015), (Dilibal, Engeberg, 2017). Termal aşırı akım rölesi mekanizması geliştirilmesi ile ilgili tasarım araştırmaları literatürde bulunmamaktadır (Dilibal, Şahin, Dursun & Engeberg. 2017). Ni-Ti alaşımların termo-mekanik davranışı ile ilgili model geliştirme çalışmaları devam etmektedir.



Şekil 3.7: Hızlı trende otomatik yağlama sistemi

Kaynak: Otsuka & Kakeshita (2002)

Ni-Ti ŞBA ayrı zamanda son yıllarda robotik ve su altı uygulamasında çeşitli konfigürasyonlarda kullanılır. Şekil 3.8(a)’da görüldüğü gibi bir su altı aracının kuyruk bileşeni aktüatörleri Ni-Ti plakalardan oluşturulmuştur. Bu çalışmada bir çift Ni-Ti ŞBA plaka geometrisine sahip antagonistik bir tasarım seçilir. Martenzit ve östenit fazdaki Ni-Ti plakalarının büküme mukavemetini ortaya çıkarmak için üç noktalı bir bükme testi yapılır. Ni-Ti aktüatörlü kuyruk sisteminin çift yönlü yer değiştirmenin zaman grafiğini Şekil 3.8(b)’de gösterilmiştir.

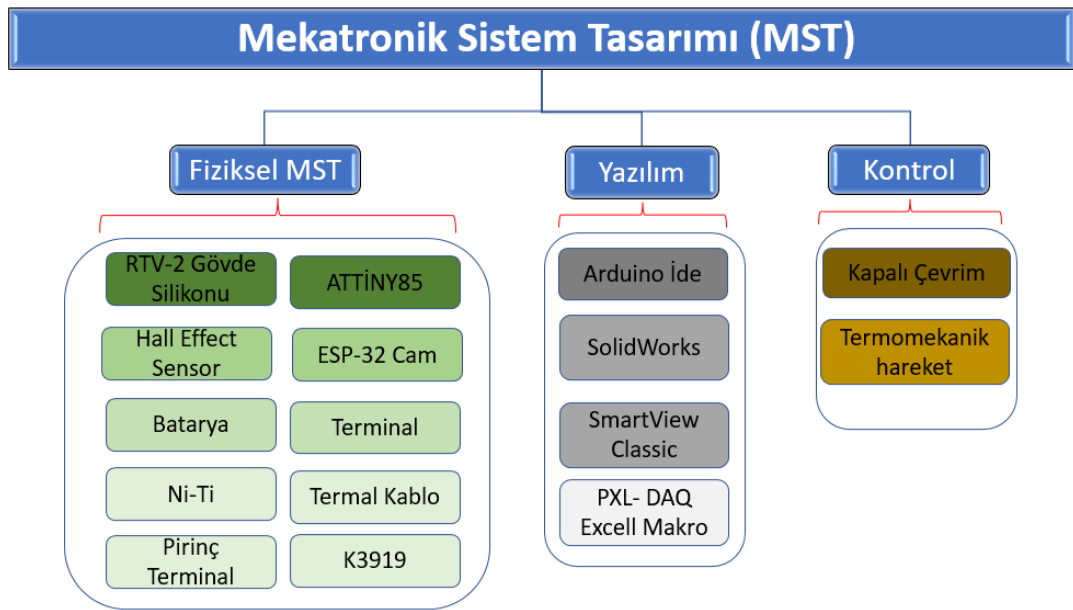


Şekil 3.8: Ni-Ti ŞBA plakaların antagonistik tasarımı (a), zaman-açısal hareket grafiği (b)

Kaynak: Dilibal (2018)

4. GELİŞTİRİLEN Ni-Tİ TEMELLİ SOFT ROBOTUN MEKATRONİK SİSTEM TASARIMI

Kanal içi tahribatsız muayene maksatlı Ni-Ti ŞBA temelli soft robotik sistem tasarımının biyo-ilham yöntemiyle gerçeğe en yakın, üretim aşamalarının kolay, güvenilirlik katsayısı yüksek olabilmesi için mekatronik sistem tasarımının yapılması üretim aşamasında önemli bir rol almaktadır. Sistematik ve pratik bir üretim için çalışmamızın her aşamasında proje ve plan görevini üstlenmektedir. Şekil 4.1’de soft robotun üretimi için gerekli mekatronik sistem tasarımı gösterilmiştir. Üç ana başlıkta altında incelenmektedir.



Şekil 4.1: Soft robotun mekatronik sistem tasarımı (MST)

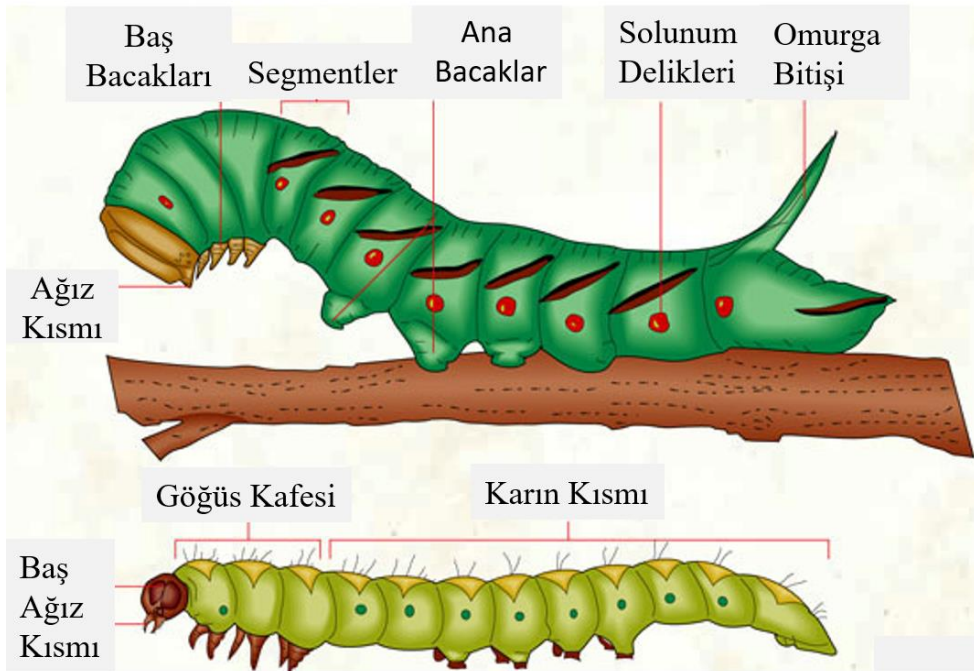
4.1 Tırtıl Morfolojisi ve Yapısı

Mühendislik alanlarında doğayı veya doğadaki canlıları taklit ederek alternatif mühendislik ürünleri tasarlamak çoğu zaman başarıyı beraberinde getiriyor. Ortam koşullarına en iyi uyum sağlayan canlıların davranışları taklit edilerek geliştirilen yeni nesil inovatif robotlar “biyo-taklit” veya “biyo-ilham” konseptinin aktif olarak kullanıldığı alanlardan birini oluşturuyor (Cianchetti, Licofonte, Follador, Rogai & Laschi, 2014).

Kolaboratif robotik sistemlerde, Endüstri 4.0 ve mekatronik sistemlerin en çok tercih edilen elemanlarından biri olarak, insan-robot etkileşiminde soft (yumuşak) robotik tutucu sistem ara yüzleri kullanılmaya başlanmıştır. Döküm ve eklemeli imalat teknolojileri kullanılarak üretilen soft robotik sistemler robotik alanında devrim niteliğinde oyun değiştirici olarak görev yapacak sistemlerdir. Yakın gelecekte bu robotik sistemler başta servis ve endüstriyel robotlar olmak üzere birçok farklı alanda kullanılacaktır (Dilibal & Şahin, 2018).

Bir soft robotun biyo-ilham yöntemi ile tırtıla benzetilerek üretilmesi ve geliştirilmesi hakkında literatür taraması yapılmıştır. Şekil 4.2’de soft robotun doğadaki yapısı ve eyleyicileri detaylı gösterilmiştir. Yapılan taramalarda biyo-ilham tekniği uygulamalarında robotların hareket kabiliyetleri ve aktüerleri incelenmiştir. Hareket kabiliyetini kazandıran eyleyiciler ve mekanizmalar, elde edilen analiz ve veriler incelenmiştir.

Tırtıların Morfolojisi



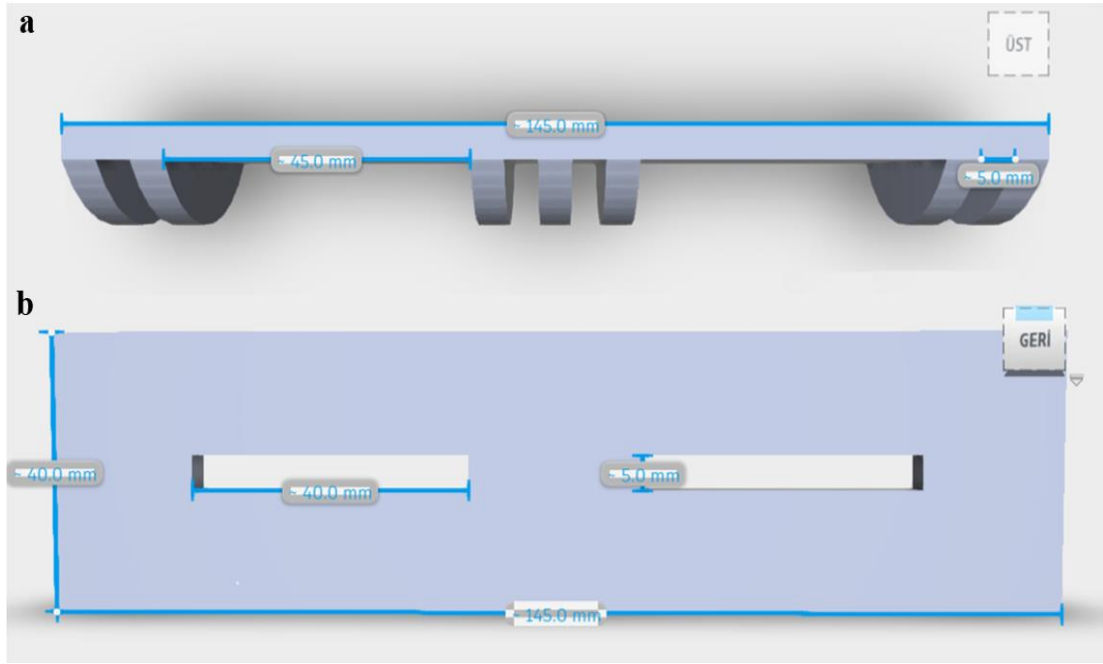
Şekil 4.2: Tırtıların morfolojik incelenmesi ve yapısı

Kaynak: Umedachi & Trimmer (2016)

4.2 Robotun Katı Modellemesi

Yumuşak robotun temel tasarımını oluştururken robotun hareket yeteneği eyleyicilerin seçimi ve robotun hangi yumuşak malzemedden üretileceği detayları

aşamalar halinde karar verilmiştir (Engeberg, Dilibal, Vatani, Choi & Lavery, 2015). Robot tasarımı tırtıl morfolojisi incelenerek biyo-ilham tekniğinden yararlanarak tırtıla benzetilmiştir. Robot tasarımı yapılırken tırtıl robotun bacak yapısı oval şekilde tasarlanmıştır (Mangan, Kingsley, Quinn & Chiel, 2002), (Lu, Wang, Hu, 2020). Bu sayede sadece doğrusal hareketinin yanında boru içleri gibi silindirik zeminlerde rahat hareket edebilmesi amaçlanmıştır (Huang, Kandhari, Chiel & Quinn, 2017). Robot tek parça halinde tasarlanmış fakat döküm aşamasında içerisine Ni-Ti ŞBA yayların sabitlenmesi için dört adet terminal yerleştirilmiştir. Ön ve arka tarafında Ni-Ti ŞBA yayların bağlanabilmesi ve ayrıca soğuması için hava kanalları bulunmaktadır. Ön ve arka kısmında iki adet ayak orta kısmında ise üç adet ayak mevcuttur. Şekil 4.3'te Solidworks programında teknik resmi üç boyutlu çizilmiş tırtıl görünümündeki mekanik tasarımı görülmektedir.

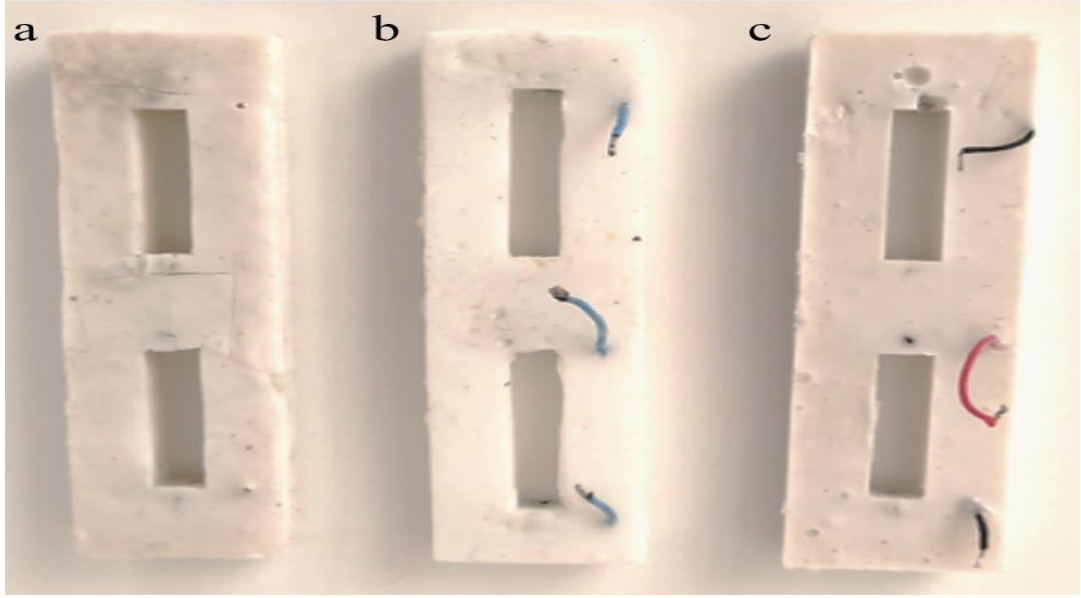


Şekil 4.3: Biyo-ilham soft robotun üç boyutlu gövde tasarımı.

4.2.1 Katı modelin RTV-2 silikonu ile kalıba döküm aşaması

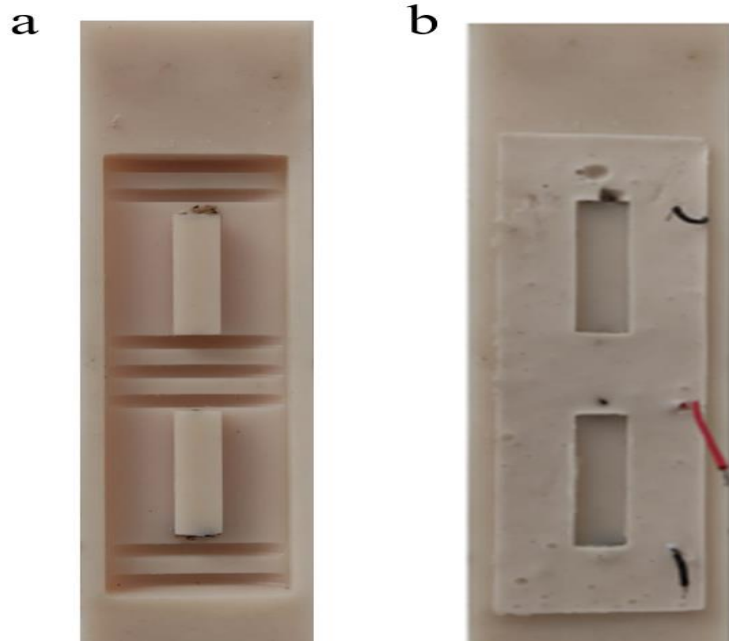
Biyo-ilham soft robotunun tırtıla benzeterek 3B tasarımı SolidWorks ile çizilmiştir. Robotun yapısı elastik, ısıya dayanıklı ve mukavemeti yüksek olması için RTV-2 kalıp silikonu ile döküm yapılmasına karar verilmiştir. RTV-2 silikonu kalıba dökülerek robot gövdesi oluşturulacağı için robotun kalıbı CNC frezede işlenmiştir. Birçok sertlik derecesi denenerek sırasıyla Shore A15, Shore A20 ve son olarak da Shore A25 denemeleri yapılmıştır. Shore A25 ve Shore A20 uygulamalarında istenilen esneklik ve yumuşaklık sağlanamamıştır. Bükülme ve kasılma hareketine

shore derecesi yüksek olduğu için gerçekleştirilememiştir. Shore A25(a), Shore A20(b) ve Shore A15(c) ile dökülen denemeler şekil 4.4' de görölmektedir. şekil 4.4' de (a) denemesinin sertlik derecesi shore A25, (b) denemesinin sertlik derecesi shore A20 ve (c) denemesinin sertlik derecesi shore A15'tir.



şekil 4.4: RTV-2 Kalıp silikonu ile yapılan denemeler

Robotun gövde dökümü gerçekleştirilmesi için teflon malzemeden CNC frezede şekil 4.5 (a)'da yer alan kalıp hazırlanmıştır. Kalıbın içine terminaller ve kabloların yerleştirilme işleminden sonra kalıp silikonunun dökölmüş hali şekil 4.5 (b)'de görölmektedir.



şekil 4.5: RTV-2 kalıp silikonun kalıba dökölme işlemi

4.2.2 Ni-Ti ŞBA yayların kalıplanması

Robotun hareketini sağlayan Ni-Ti ŞBA tellere yay şekil verilerek robotun gövdesinde yer alan hava kanallarında hareket ettirilmesi amaçlanmıştır. Ni-Ti ŞBA tele yay formunda ısıtılma işlemi ile şekil belleği kazandırmadan önce M2 civata etrafına tornada sarım işlemi gerçekleştirilmiştir. Ni-Ti ŞBA tel ısıtılma işlemi sırasında şekil belleğini alacağı şekle hazır hale getirilmiştir. Şekil 4.6’da Ni-Ti ŞBA malzemenin kalıplanmış son hali görülmektedir.



Şekil 4.6: Ni-Ti ŞBA malzemenin kalıplanmış hali

USA Nexmetal firmasından tedarik edilen Ni-Ti ŞBA tellerin temel özellikleri aşağıdaki tabloda verilmiştir. Çizelge 4.1’de tedarik edilen Ni-Ti tellerin temel bilgileri gösterilmiştir.

Çizelge 4.1: Tedarik edilen Ni-Ti ŞBA tellerin temel bilgileri

Özellik	Açıklama
Şekil Bellek Sıcaklığı	520 °C
Martenzit-Östenit Dönüşüm Sıcaklığı	62 °C
Tel çapı	0,3 mm
Nikel Oranı	%55 (ağırlıkça)
Titanyum Oranı	%45 (ağırlıkça)

4.2.3 Ni-Ti ŞBA yayların ısıtılma işlemi ve şekil belleğinin verilmesi

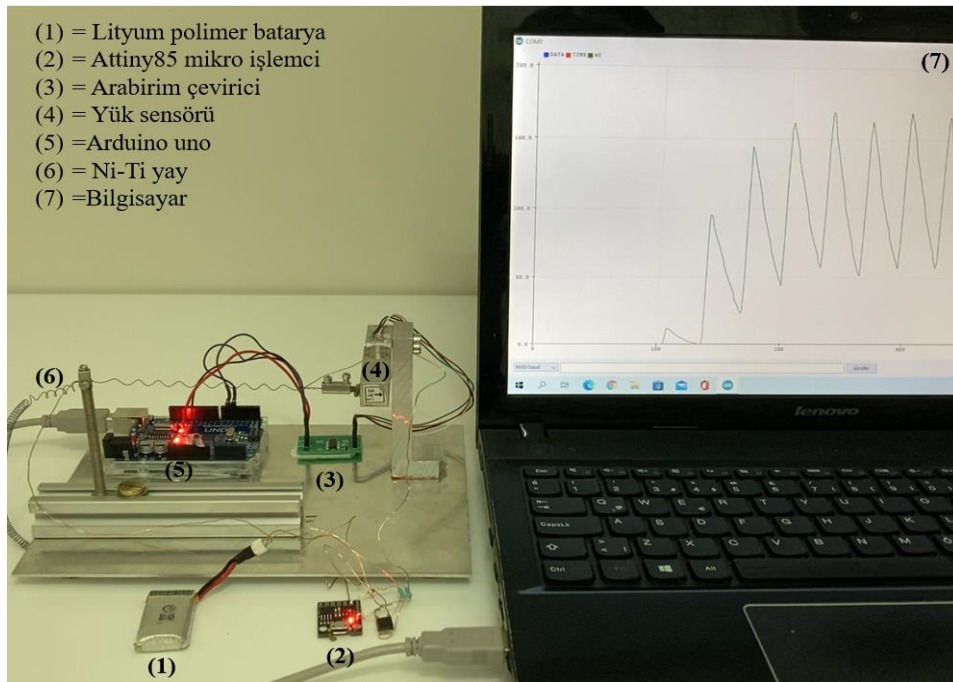
Öncelikle 0,03 mm çapındaki Ni-Ti telin robotun içinde hareket edebilecek bir yay formuna dönüştürmek için uygun bir kalıba sarılması gerekmektedir. Ni-Ti tel M2 civataya sarılarak sabitlenmiştir. Endüstriyel fırın yaklaşık 470 °C’de iken civatalara sarılan telleri fırının içerisine yerleştirilmiştir. Bu esnada fırının iç sıcaklığı 520 °C’ye kadar ısınmaya devam etmektedir. Ni-Ti ŞBA teller 15 dk endüstriyel fırının içerisinde ısıtılma işlemi maruz kalmıştır. 15 dakika sonunda endüstriyel fırından ısıtılma işlemi tamamlanan Ni-Ti ŞBA teller suda soğumaya bırakılmıştır. Ni-Ti ŞBA teller suda soğutulduktan sonra artık istenilen şekil belleğini almış olmaktadır. Şekil 4.7’de kullanılan endüstriyel fırın ve ısıtılma işlemi aşamaları görülmektedir.



Şekil 4.7: Ni-Ti ŞBA tellere ısıl işlem uygulaması

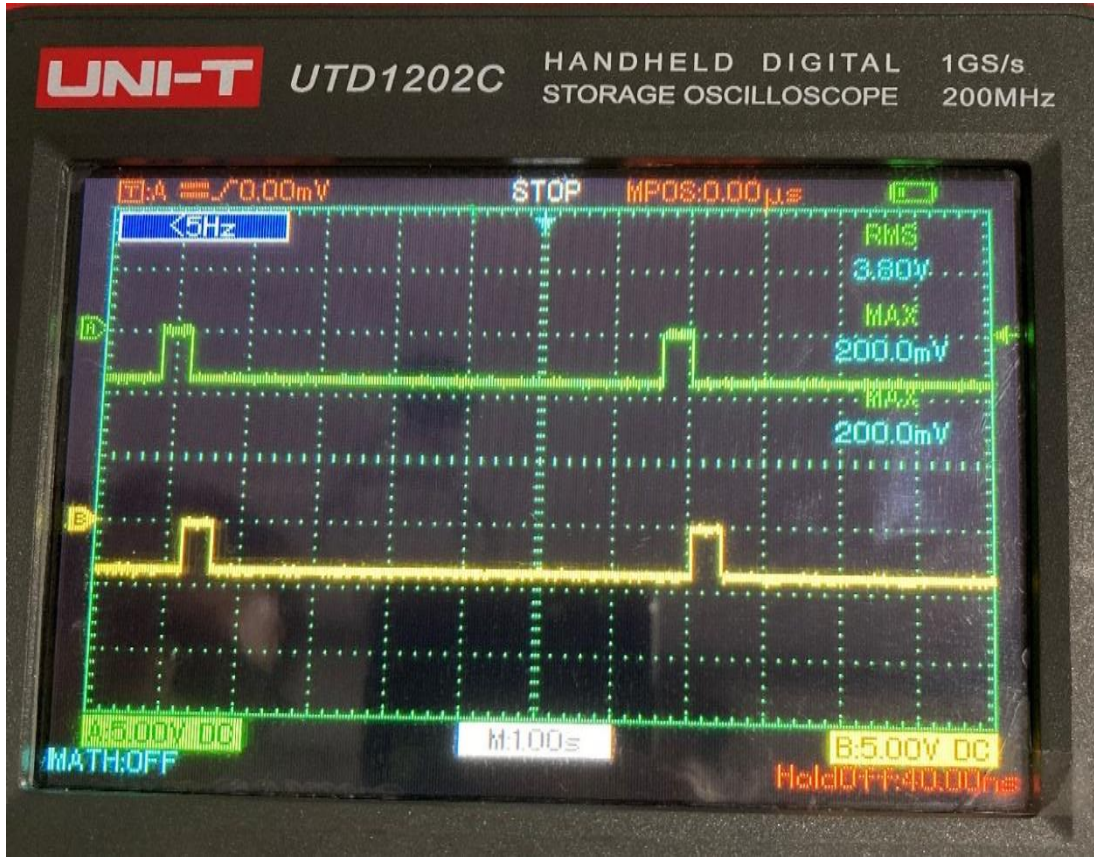
4.1.4 Ni-Ti ŞBA yayların eğitilmesi

Şekil hafızası alan telin mikro denetleyici tarafından PWM sinyalleri ile voltaj verildiğinde şekil belleğini almaya çalışacağından kısalıp yay şeklini alacaktır. Yay şeklini aldıktan sonra soğumaya bırakıldığında yavaş yavaş eski haline dönmeye çalışması gerekmektedir. Fakat bu eski haline dönme istediğini Ni-Ti yaya eğitim verilerek gerçekleştirilmektedir. Bunun için bir düzenek geliştirilmiştir. Bu düzeneğe yük hücresi bağlanarak hem Ni-Ti yaylar eğitilmiş ve ayrıca yük hücresi düzeneği ile Ni-Ti tellerin gerilme kuvveti ölçülerek veriler elde edilmiştir. Bu düzenek Şekil 4.8’de görülmektedir.



Şekil 4.8: Ni-Ti malzemenin yük hücresi düzeneği ile eğitim aşaması

Ni-Ti ŞBA yaylar çok fazla ısınır veya kontrolsüz bir akım çekerse şekil belleğini kaybeder ve tekrar ısıl işlem uygulaması gerekir. Ni-Ti ŞBA yayların çok fazla ısınmaması için yaylara kontrollü PWM sinyalleri verilerek eğitimi yapılmıştır. Ni-Ti ŞBA yayların eğitimi için bu işlem 200 defa tekrarlanmıştır. Daha sonra Ni-Ti ŞBA yayların düzenekten ayrılarak oda sıcaklığında PWM sinyal verdiğinde yay olarak uzayıp kısalma hareketini çift yönlü olarak gerçekleştirmesi istenmektedir. Uzayıp kısalma hareketi gerçekleşmiş ise şekil belleği verme eğitimi başarıyla tamamlanmıştır. Uygulanan PWM sinyalleri Şekil 4.9'da görülmektedir.

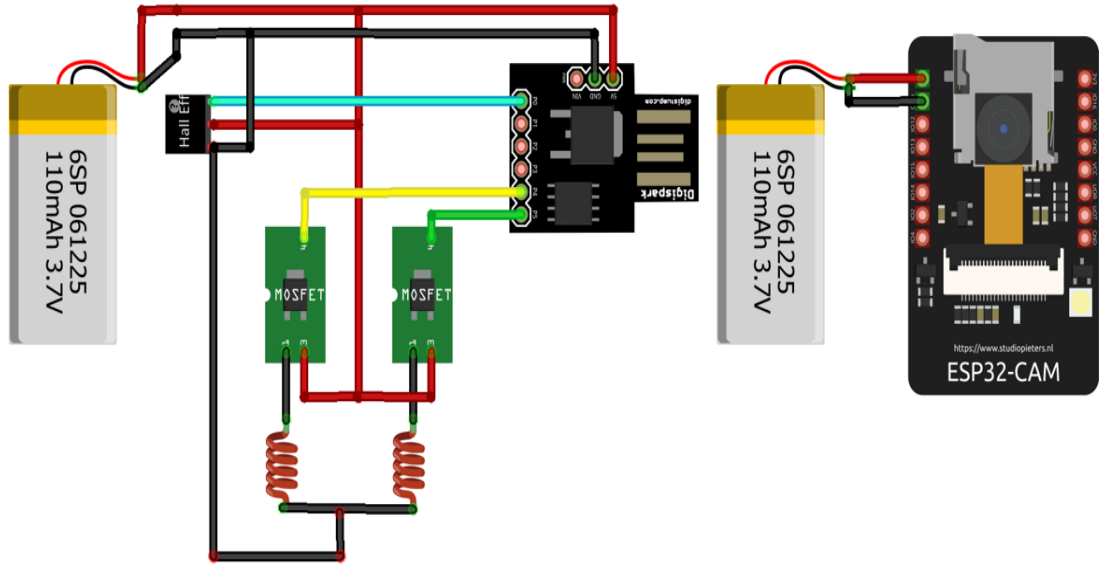


Şekil 4.9: Ni-Ti ŞBA yay üzerine uygulanan PWM sinyalleri

4.3 Robotun Elektronik Alt Sistem Tasarımı ve Uygulaması

Soft robotun elektronik altyapısı kabiliyetleri ve çalışma şartlarına uygun olarak kurulması gerekmektedir. Sistemin uzaktan kontrolü için ATTINY85 mikro denetleyici ve kamera görüntülerini kablosuz bir şekilde işleyebilmek için ise ESP-32 Cam modülü kullanılmıştır. ESP-32 Cam modülü tercih edilmesi sebebi ise kablosuz veri aktarımı, bluetooth ve üzerinde bulunan kamerasıdır. Ayrıca küçük boyutları ve sisteme adaptasyonun kolay olması öne çıkan avantajlarındandır. Ni-Ti

ŞBA yaylarımızı sürmek için ise iki adet K3919 mosfet kullanılmıştır. Robot üzerinde iki adet 3.7V ve 350 mAh batarya kullanılmıştır. Bunun sebebi ise kablosuz haberleşmedeki kopmalar ve kararsızlıktır. Robota hareket başlangıcı, Hall effect sensör ile yapılması sağlanmıştır. Robotun elektronik malzemeleri ve devre şeması aşağıdaki Şekil 4.10'da Fritzing programı ile çizilmiştir. Devrenin çalışma prensibi; ATTİNY85 mikro denetleyiciye Hall effect sensör üzerinden tetik verilmiştir. ESP-32 Cam modülü sayesinde server üzerinden kamera görüntüsünü kablosuz bir şekilde bilgisayara aktarılmaktadır. Sistemin enerjisi bataryadan beslenmiştir. Robotun önünde ise karanlık şartlarda ortamı aydınlatması ve görüntü net alabilmek için bir adet flaş mevcuttur. Flaşın kontrolü tıpkı kamera gibi server üzerinden sağlanmaktadır. Çizelge 4.2'de soft robotta kullanılan kompetanların listesi gösterilmiştir.



Şekil 4.10: Robot elektronik komponentlerinin bağlantı şeması

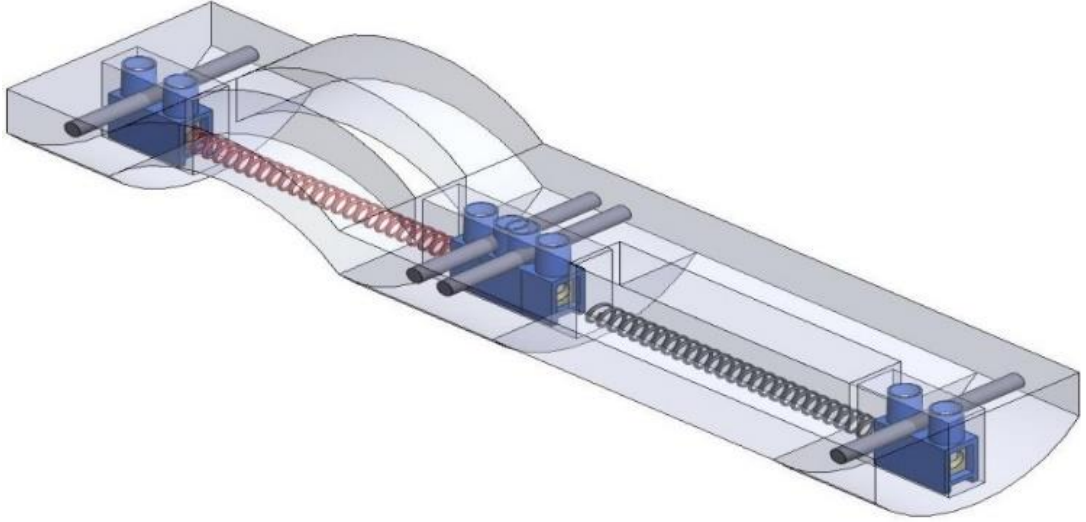
Çizelge 4.2: Soft robotun elektronik alt sisteminde kullanılan komponentler

Komponent Adı	Adet	Özellik
ESP-32 Cam	1	Besleme: 5 V, Dijital I/O:10, Analog I: 6
ATTİNY85	1	Besleme: 5 V, Dijital I/O:10, Analog I: 6
K3919 Mosfet	2	Besleme: 25 V 64A N Kanal 150 °C
Lityum-İyon Batarya	2	3.7V, 350mAh
Batarya Şarj Modülü	1	Şarj akımı: 1A, Giriş:4,5V-5V, Full Şarj: 4,2V
Terminal 4mm	4	Maks. 25A
Hall Effect	1	4.5 V / 24 V. -40 °C / 85 °C, 18,5 mm x 15 mm

5. SOFT ROBOT ALT SİSTEMLERİNE AİT ANALİZ VE BULGULAR

5.1 Prototipi Geliştirilen Soft Robotun Başlangıç Tasarımı için Malzeme ve Yöntem Uygulamaları

Soft robotun başlangıç tasarımı boru hatlarının denetimi için geliştirilmiştir. Ni-Ti yayların soğuması için su içerisinde çalıştırılmaktadır. Boruda yürüyen robot için yumuşak bir gövdeye ihtiyaç duyulduğundan, yüksek kopma, yırtılma, düşük mekanik dayanım ve viskozitesi ve penetrasyon avantajları nedeniyle vücut formu için RTV-2 shore A15 kalıp silikonu kullanılmıştır. Sistemin çalışması için Ni-Ti ŞBA kullanılmıştır. Soft robotun mikro denetleyicisi ve enerji kaynağı kablolar ile harici bir kaynaktan beslenmektedir. Soft robot suyun içerisinde çalıştığı için Ni-Ti ŞBA yaylar 12 V 12,5 A güç kaynağıyla yüksek akımlarda çalışmaktadır.

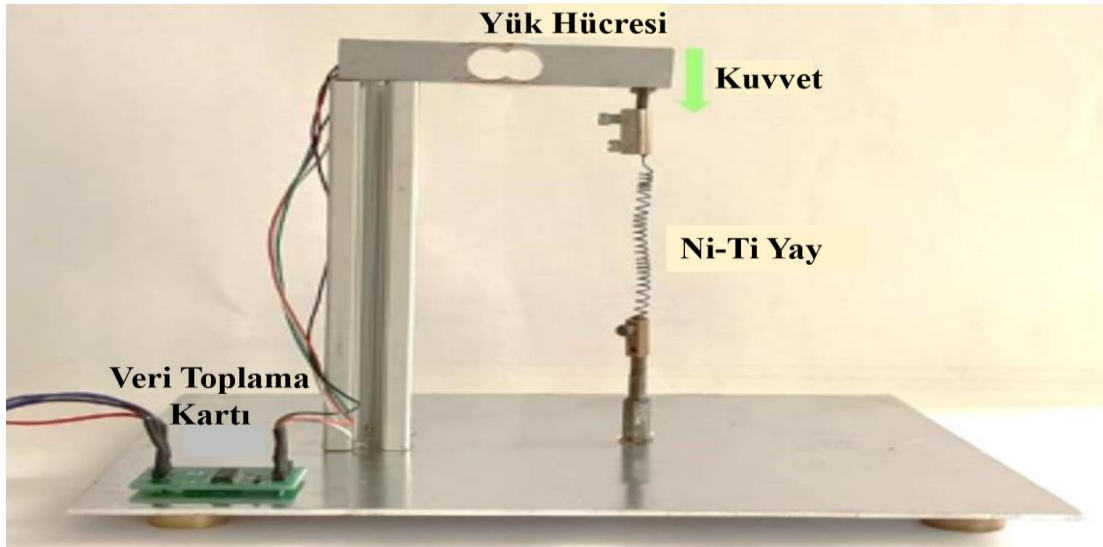


Şekil 5.1: Soft robotun hareket adımları

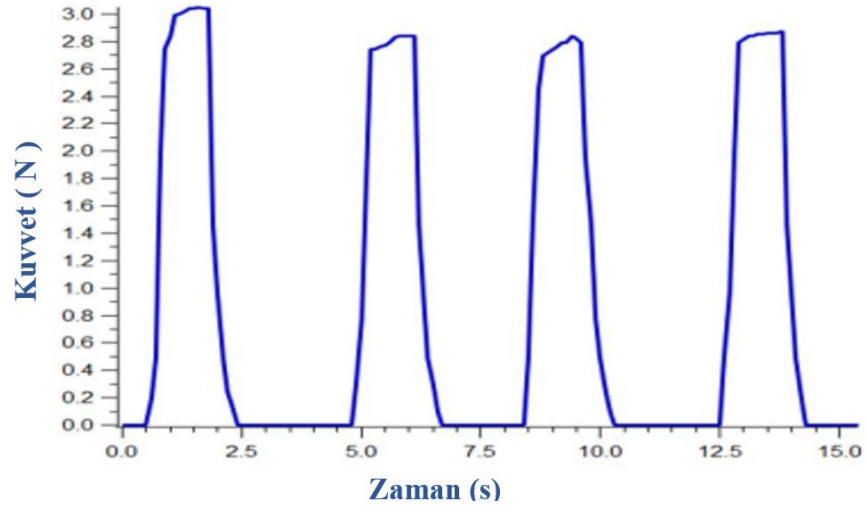
Şekil 5.1’de gösterildiği gibi, akım kırmızı renkte gösterilen Ni-Ti ŞBA yay üzerinden geçerse, robotun borunun içerisinde gereken büzülme hareketi Ni-Ti ŞBA yayın eğitildiği şekil belleği hareketini uygulayarak büzülecek ve birinci ve ikinci yaylar bu hareketi senkronize bir şekilde tekrar ederek esnek gövdeli robot boruda ilerleyecektir.

5.2 Prototipi Geliştirilen Soft Robotun Başlangıç Tasarımından Elde Edilen Kuvvet Testi

Sistem üzerindeki Ni-Ti ŞBA yayların gerilme kuvvetini ölçmek için bir deney düzeneği kurulmuştur. Kurulan düzenek üzerinde bir adet yük hücresi, verileri bilgisayara aktarmak için veri toplama kartı, yük hücresi ve Ni-Ti ŞBA yayları sabitlemek için iki adet terminal üretilmiştir. Deney düzeneği Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Sistemdeki Ni-Ti ŞBA yayların gerilimi veya yay çalışma prensibi, yayın gerilme mukavemetinin N cinsinden bir yük hücresi yardımıyla deneysel olarak ölçülmüştür. Veriler bilgisayar ortamında grafiksel olarak düzenlenmiştir. Ni-Ti ŞBA yayların katsayısı, yay elemanı tarafından uygulanan kuvvetin yay katsayısı ile uzama miktarı ile çarpılmasıyla hesaplanmaktadır. Ni-Ti ŞBA yay sayısının yay uzunluğuna dönüşme sayısının yay perdesine oranı, yay adımlarının sayısını verir. Bu ifade aşağıdaki denklemde gösterilmiştir. Şekil 5.2’de yayın ortalama 2.92 N çekme kuvveti uyguladığı gözlenmiştir. Yay katsayısı, Şekil 5.3’den alınan grafik verilerine dönüştürülmüştür.



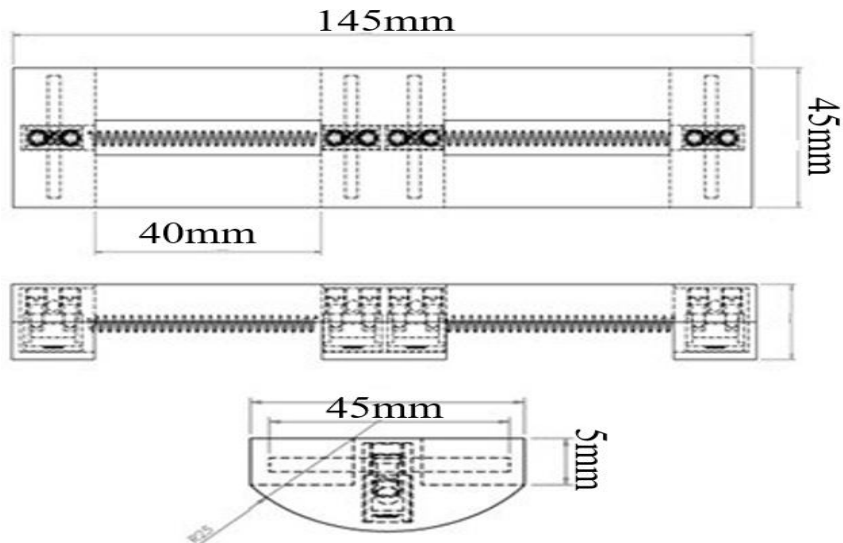
Şekil 5.2: Yük hücresi ile çekme kuvveti testi



Şekil 5.3: Ni-Ti ŞBA yayların yük hücresi üzerindeki çekme kuvvet testi

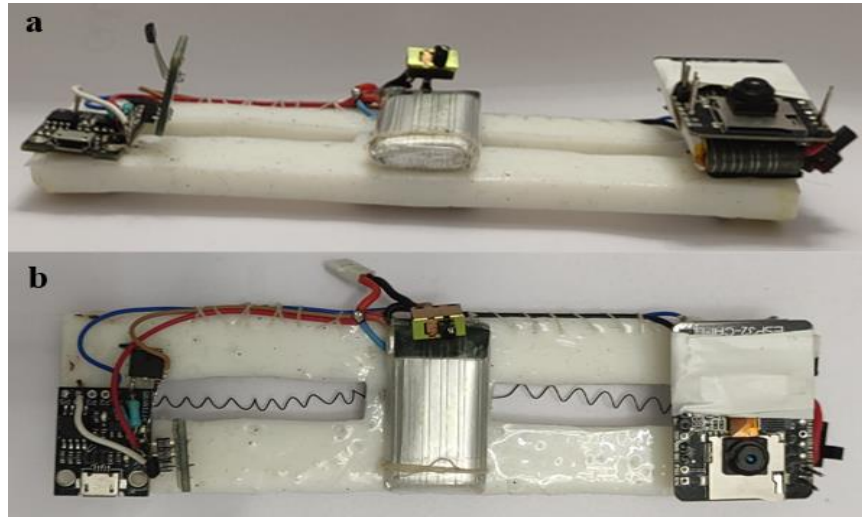
5.3 Geliştirilen Soft Robotun Son Tasarımı için Malzeme ve Yöntem Uygulamaları

Geliştirilen son prototip robotun uzunluğu 145 mm, genişliği 45 mm ve yüksekliği ise alt tutucu eyleyicileri ile toplam 8mm'dir. Robotun tasarımı yapılırken hem düz zeminlerde hem de boru içerisinde rahatça hareket edebilmesi için alt tutucu eyleyicileri R25 çapında oval olarak tasarlanmıştır. Robotik sistem tasarım sayesinde boru nakil hatlarında kullanılabilir hale gelmiştir. Robotun alt tutucu eyleyicileri boru içerisinde hareket kabiliyetinin yanı sıra engebeli ve kaygan zeminlerde ters kuvvet uygulayarak ortam adaptasyonunu artırmayı planlanmıştır. Bu yeni tasarımın teknik resmi Şekil 5.4'te görülmektedir.



Şekil 5.4: Soft robotun teknik resim verileri.

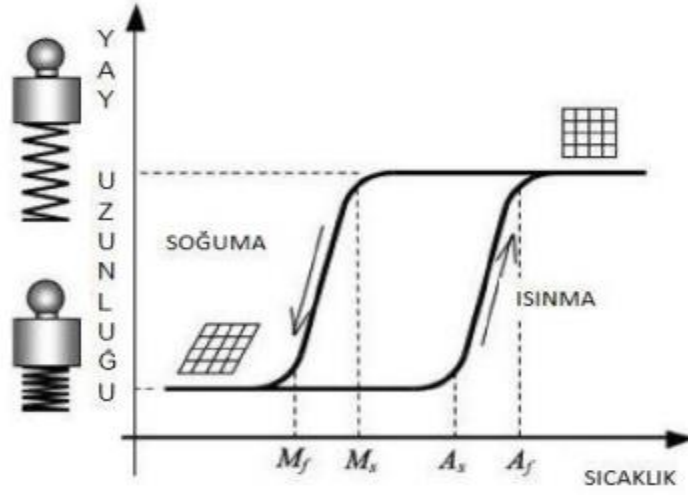
Soft robot üretim aşamalarında birçok deney ve testler yapılmıştır. İstenen esneklik için shore değerleri farklı RTV-2 silikonlarıyla prototipler ortaya çıkarılmıştır. Kalıba döküm aşaması, çekme ve gerilme hızının yüksek ve olması sebebi ile Shore A15 tercih edilmiştir. Soft robotun içerisinde dört adet 35 mm boyutunda gümüş kaynak ile yan kolları tutturulmuş terminaller vardır. Ni-Ti ŞBA'lar bu terminallere bağlanarak soft robotun hareket halinde iken gövdesi üzerinde herhangi bir yırtılma veya kopma olmamasını engellemektedirler. ESP-32 Cam mikro denetleyiciden gelen bilgiler ve K3919 mosfetler üzerinden geçen voltajın herhangi bir kayba uğramadan Ni-Ti ŞBA yaylarımıza aktarılmasını işlemi de terminaller yapmaktadır. Soft robot üzerine aktüatörlerin ve elektronik kompetanların yerleşimi Şekil 5.5'te görülmektedir.



Şekil 5.5: Soft robot üzerine aktüatörlerin ve elektronik kompetanların yerleşimi

5.4 Ni-Ti ŞBA Yayın Analitik Analizleri

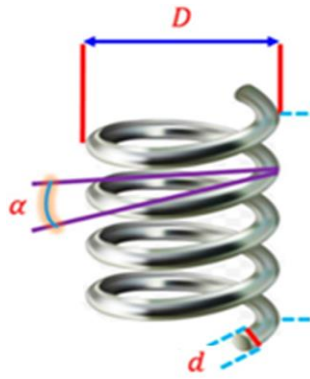
Son yıllarda, çeşitli mekatronik sistem tasarımları ve robotik sistem çalışmaları, Ni-ti temelli malzemelerin aktüatör olarak kullanılmasına odaklanmıştır (Wen, Tu, Zong & Xie, 1994). Ni-Ti temelli malzemeleri, özellikle lineer ve döner aktüatörleri üretmek için tel veya yay tasarımları içeren aktüatör teknolojilerindeki araştırma faaliyetlerinin çoğalması ile belgelenmiştir. Şekil belekli alaşımlar termoelastik martenzitik yapı sergileyen alaşımlardır. Şekil bellekli alaşım ana faza dönüşüm için ısıtma uygulandığında ikizlenmiş olan yapı faz değişimi yaparak eski haline döner, Şekil 5.7'de yay uzunluğu ve sıcaklık ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 5.6: Ni-Ti yay uzunluğu ve sıcaklık grafiği

Kaynak: Wen, Tu, Zong, Xie, (1994)

Şekil bellekli alaşımlar ile yay aktüatörü oluştururken iki önemli temel veri vardır. Bunlar Ni-Ti telin çapı ve uzunluğudur. Tel çapı üretilecek en yüksek kuvveti, tel uzunluğu ise faz değişimde meydana gelecek uzama miktarını belirler. Ni-Ti ŞBA kullanılarak üretilen yay formundaki aktüatörde: yay çapı(D), tel çapı(d), adım açısı(α) ve sarım sayısı(n) çok önemlidir. Şekil 5.7'da Ni-Ti çekme yayının geometrik detayları gösterilmiştir.



Şekil 5.7: Ni-Ti yayın geometrik bilgileri

Kaynak: Zhu, Gao, Li, Lin & Bi. (2010)

Çizelge 5.1: Hesaplmalarda kullanılan birimler

Birim	Açıklama
D	Yay Çapı (mm)
d	Tel Çapı (mm)
Di	Yay İç Çapı (mm)
D _m	Yay Ortalama Çapı (mm)
D _{di}	Yay Dış Çapı (mm)
p	Açılmış Yayın Hatvesi (mm)
a	Açılmış Yayın Açısı
F	Kuvvet (N)
M _{burulma}	Burulma Momenti (N.mm)
K _{burulma}	Burulma Gerilmesi (N.mm ²)
K _{kesme}	Kesme Gerilmesi (N.mm ²)
f	Uzama Miktarı
G	Kayma Mödülü (MPa)
f ₁	Bir Sarımdaki Uzama Miktarı
n	Aktif Sarım Sayısı

Çizelge 5.1’de yay hesaplamasında kullanılan ölçü birimlerinin detayları gösterilmiştir. Toplam 232 gram ağırlığındaki soft robotu hareket ettirebilmek için kullanılacak yay ile ilgili detaylı hesaplama aşağıdaki formüller ışığında gerçekleştirilmiştir. Yay Eş (5.1) kuvvetini bulabilmek için telin çapı, yayın ortalama çapı Eş (5.2), yay uzama miktarı Eş (5.3) ve malzemenin kayma modülü bilgilerine ihtiyaç vardır.

$$D_i = D - (2xd) \quad (5.1)$$

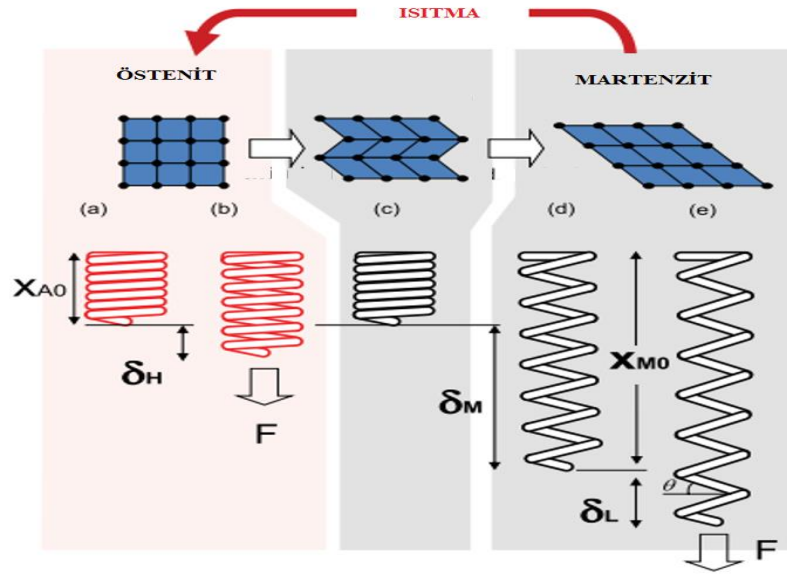
$$D_m = D_i + d \quad (5.2)$$

$$D_{di} = D_i + (2xd) \quad (5.3)$$

Çizelge 5.2: Ni-Ti yay için kullanılan parametreler

Birim	Açıklama	Ölçülen
D	Yay Çapı (mm)	4 mm
d	Tel Çapı (mm)	0,3 mm
Di	Yay İç Çapı (mm)	3,4 mm
D _m	Yay Ortalama Çapı (mm)	3,7 mm
D _{di}	Yay Dış Çapı (mm)	4 mm

Çizelge 5.2 ‘de soft robotta kullanılan Ni-Ti yayın teknik özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 5.8: Ni-Ti yayın kuvvet altındaki faz değişimleri

Kaynak: Seok, Onal, Cho, Wood, Rus & Kim (2013)

Şekil 5.8’de Ni-Ti yayın beş farklı hal durumu görülmektedir:(a) yüksüz tam östenit, (b) yük altında tam östenit, (c) yüksüz ikiz martenzit, (d) yüksüz ikiz martenzit, (e) yüklü ikiz martensit (Seok, Onal, Cho, Wood, Rus & Kim, 2013), (Shimoga, Kim & Kim, 2021).

Yayın açılmış haldeki açısını hesaplamak için Eş (5.4): açılmış yay hatvesi ve ortalama yay çapının yayda oluşacak deformasyonda ise yaya f kuvveti uygulandığında uzama miktarının bilinmesi gerekmektedir. Yaya etki eden kuvvet için ise kayma modülü ve her sarımdaki uzama miktarının bilinmesi gerekir Eş (5.5). Kayma modülü için ise elastiklik ve poisson oranı Eş (5.6) önemlidir. Sarım başına düşen uzama katsayısı Eş (5.7)’da verilmiştir. Burulma momenti Eş (5.8), burulma gerilmesi Eş (5.9) ve kesme gerilmesi Eş (5.10) için yaya uygulanan kuvvetin bilinmesi gerekir (Konuk 2014).

$$a = \tan^{-1} \left(\frac{p}{p x D_m} \right) \left(\frac{p}{\Pi} \right) \quad (5.4)$$

$$E = 2G(2 + \nu) \quad (5.5)$$

$$f_i = f/n \quad (5.6)$$

$$F = \frac{f_1 x G x d}{8 x D_m} \quad (5.7)$$

$$M_{burulma} = \frac{Fx D_m}{2} \quad (5.8)$$

$$K_{burulma} = \frac{M_{burulma}}{(pxd^3)/16} \quad (5.9)$$

$$K_{kesme} = \frac{F}{(pxd)^2} \quad (5.10)$$

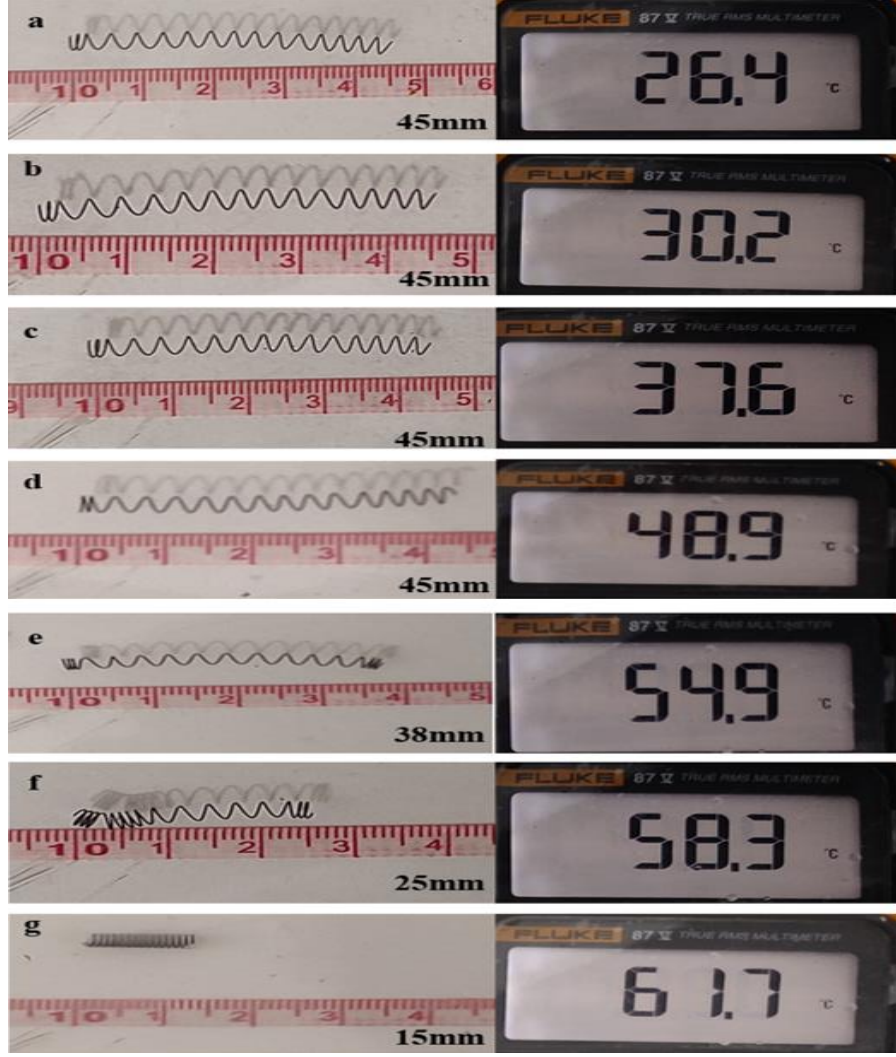
Bu formülleri ışığında soft robotun Ni-Ti yay hesaplamaları sonucu Çizelge 5.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.3: Ni-Ti yay ile ilgili analitik sonuçlar

Birim	Hesaplanan
v	0,2
D _m	3,7 mm
E	197,6 MPa
p	4 mm
a	35°
F	8,01N
M _{burulma}	14,818 N.mm
K _{burulma}	13,720 N.mm ²
K _{kesme}	5,562 N.mm ²
f	40 mm
G	112 MPa
f ₁	5
n	8

5.5 Ni-Ti ŞBA Yayın Isınma ve Soğuma Deneyi

Şekil bellekli alaşımların karakteristik özelliği gereği iki farklı faz yapısına sahip olabilmektedir. Eşik sıcaklığı üzerinde östenitik yapıda, altındaki sıcaklıklarda ise martenzitik faz yapısındadırlar. Ni-Ti ŞBA martenzitik faz yapısında iken uygulanan sıcaklık veya gerilmeye bağlı olarak ilk şekle geri döner. Bu hareketin başlangıcı alaşımın faz yapısına ve sıcaklığa göre değişmektedir. Sıcaklık artışına göre Ni-Ti ŞBA yayın martenzitik fazdan östenitik faza geçişi ve yayların hareketi Şekil 5.9'da gösterilmiştir.

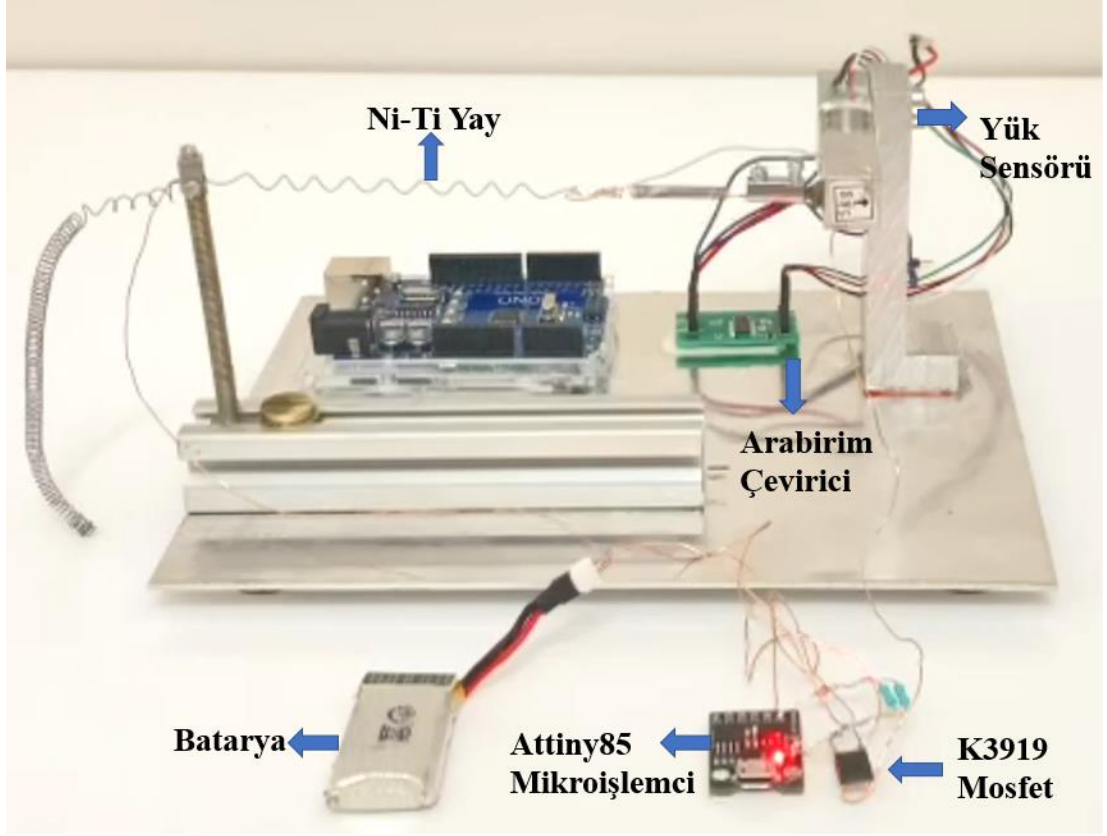


Şekil 5.9: Ni-Ti ŞBA yayların farklı sıcaklıklar altındaki faz değişimi ve hareketleri

5.6 Geliştirilen Soft Robotun Kuvvetinin Analitik Analizi

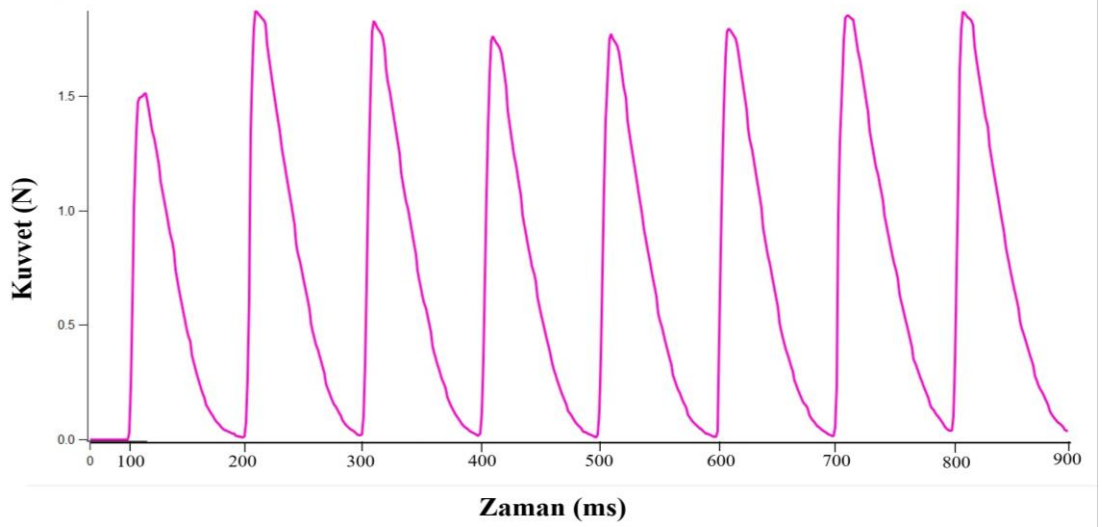
Tasarımı biten soft robotun Ni-Ti ŞBA yaylarının gerilim ve yay çalışma prensibi, yayın gerilme mukavemetinin N cinsinden bir yük hücresi yardımıyla deneysel olarak ölçülmüştür. Veriler bilgisayar ortamında grafiksel olarak düzenlenmiştir.

Şekil 5.10'da gösterilen düzenek üzerinde yük hücresi ve bu yük hücresine bağlı Ni-Ti ŞBA yay bulunmaktadır. Ni-Ti yayın çekme düzeneği ile yayda oluşan gerilme kuvveti bir ara birim çevirici sayesinde bilgisayara aktarılmıştır. Elde edilen veriler grafik halinde düzenlenmiştir.



Şekil 5.10: Yük hücresi test düzeneği

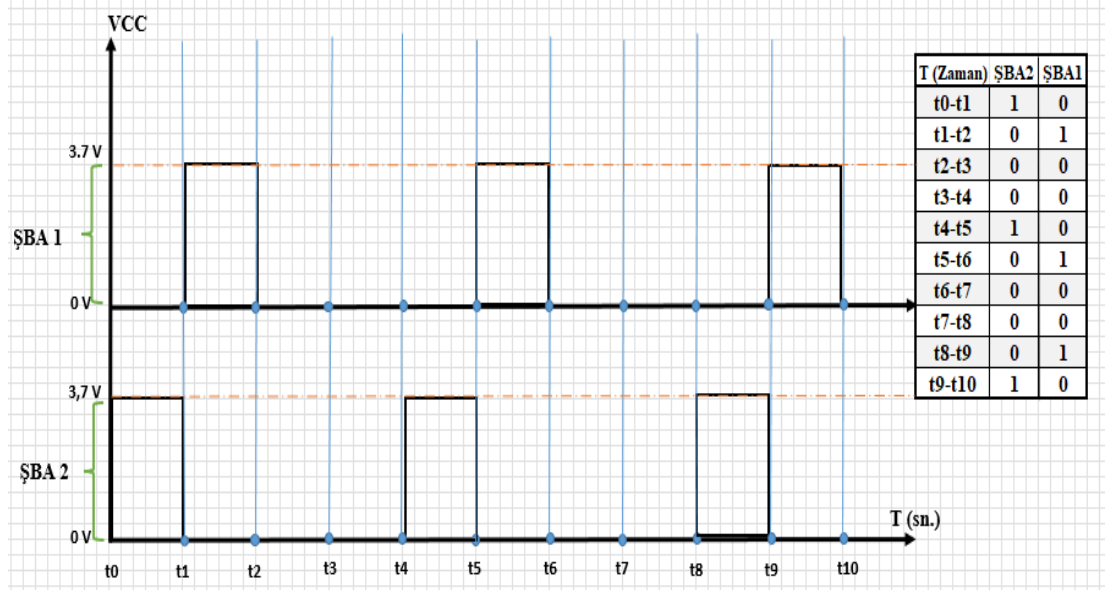
Şekil 5.11'deki düzenekte yayın ortalama çekme kuvveti 1,75 N olarak ölçülmüştür. Yay katsayısı ve Eş (5.1) denkleminde faydalanarak grafiksel verilere ulaşılmıştır.



Şekil 5.11: Ni-Ti yayların yük hücresi üzerindeki çekme kuvvet testi

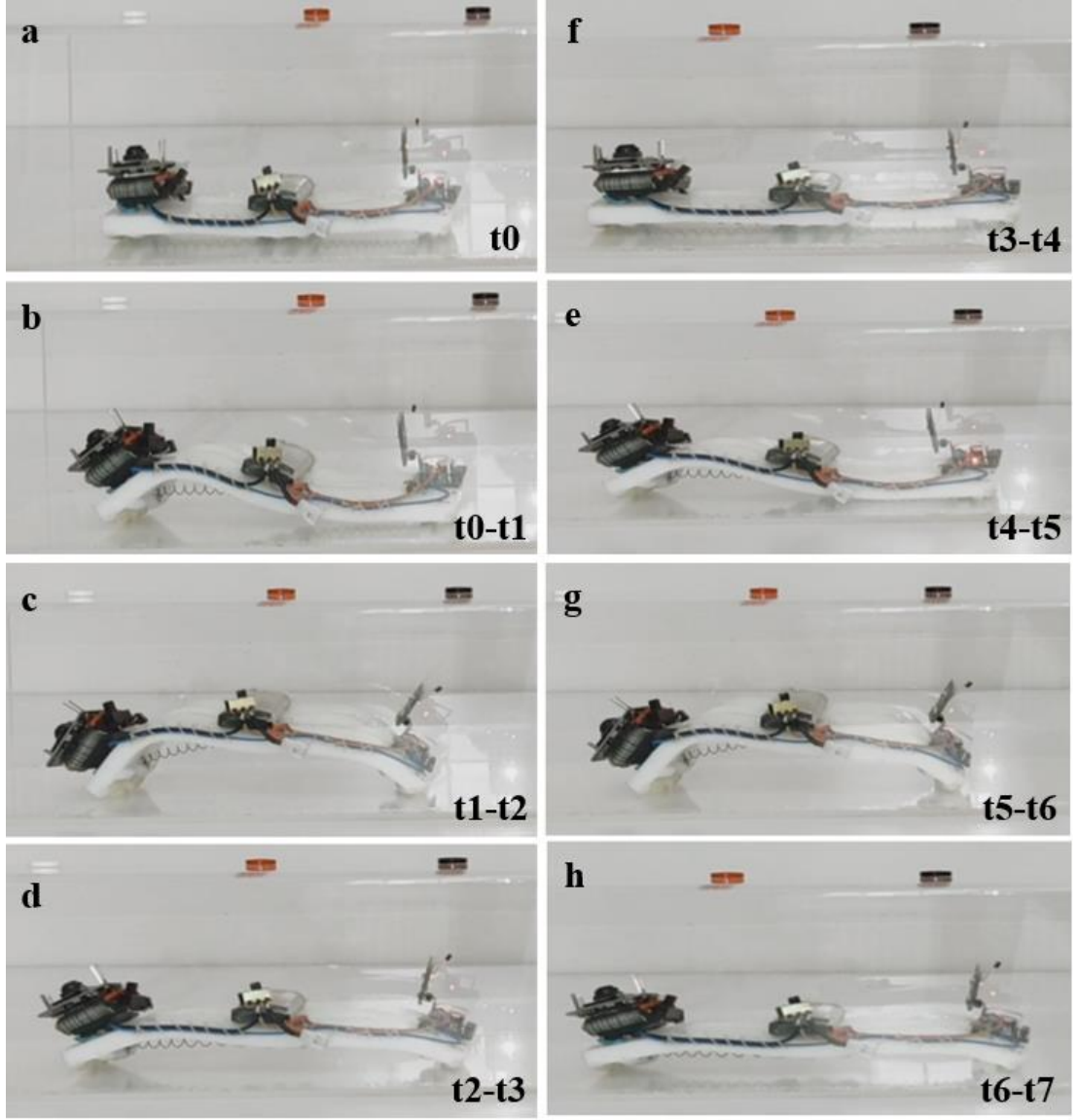
5.7 Geliştirilen Soft Robotun Hareket Analizi

Yapılan deneyler ve alınan deneysel verilere göre soft robot 60 saniye içerisinde toplam 129 mm lineer olarak hareket etmiştir. Bu durum 2.15 mm/sn hareket hızına sahip olduğunu göstermektedir. Lokomotif tipi hareket kabiliyeti olduğundan bir periyodun tamamlanması dört saniye sürmekte olduğu gözlenmiştir (Zarrouk, Sharf & Shoham, 2010), (Hamzaçebi & Morgül, 2017), (Daltorio, Boxerbaum, Horchler, Shaw, Chiel & Quinn, 2013).



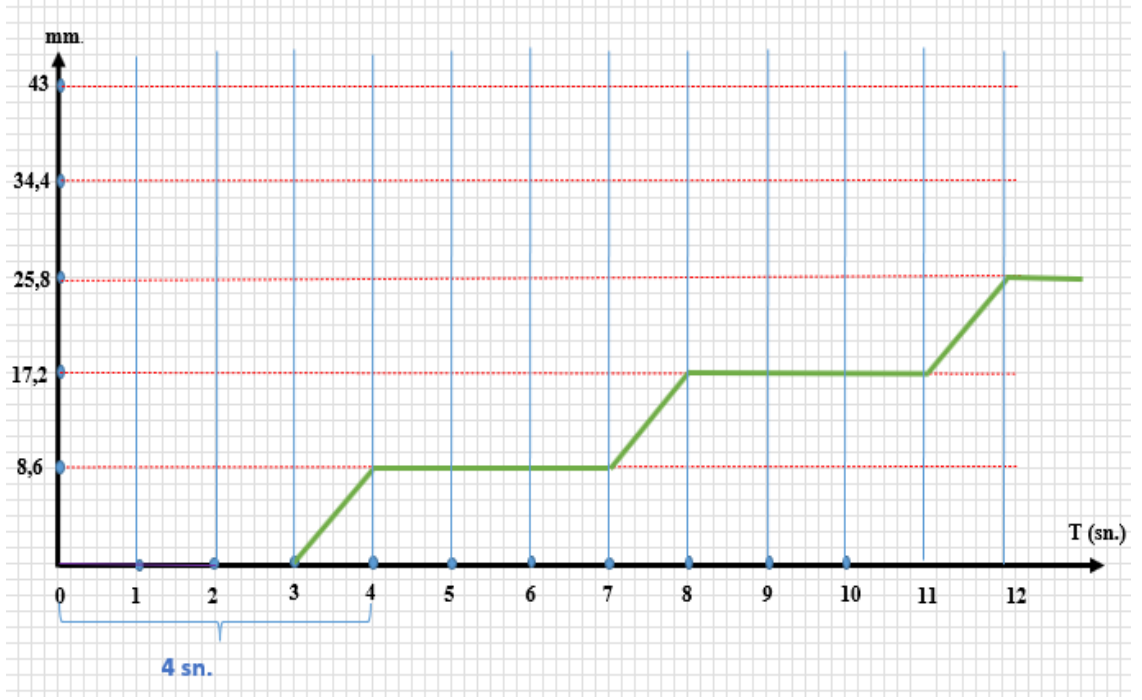
Şekil 5.12: Sistemim hareketleri ve mikroişlemci çıkış sinyalleri

Sistemin hareketleri t0-t1 / t1-t2 / t4-t5 / t5-t6 / t8-t9 / t9-t10 saniyeleri arasında tanımlanır. Tanımlanan hareketler Şekil 5.12’de gösterilmiştir.



Şekil 5.13: Soft robotun lokomotif çevrimsel hareketleri

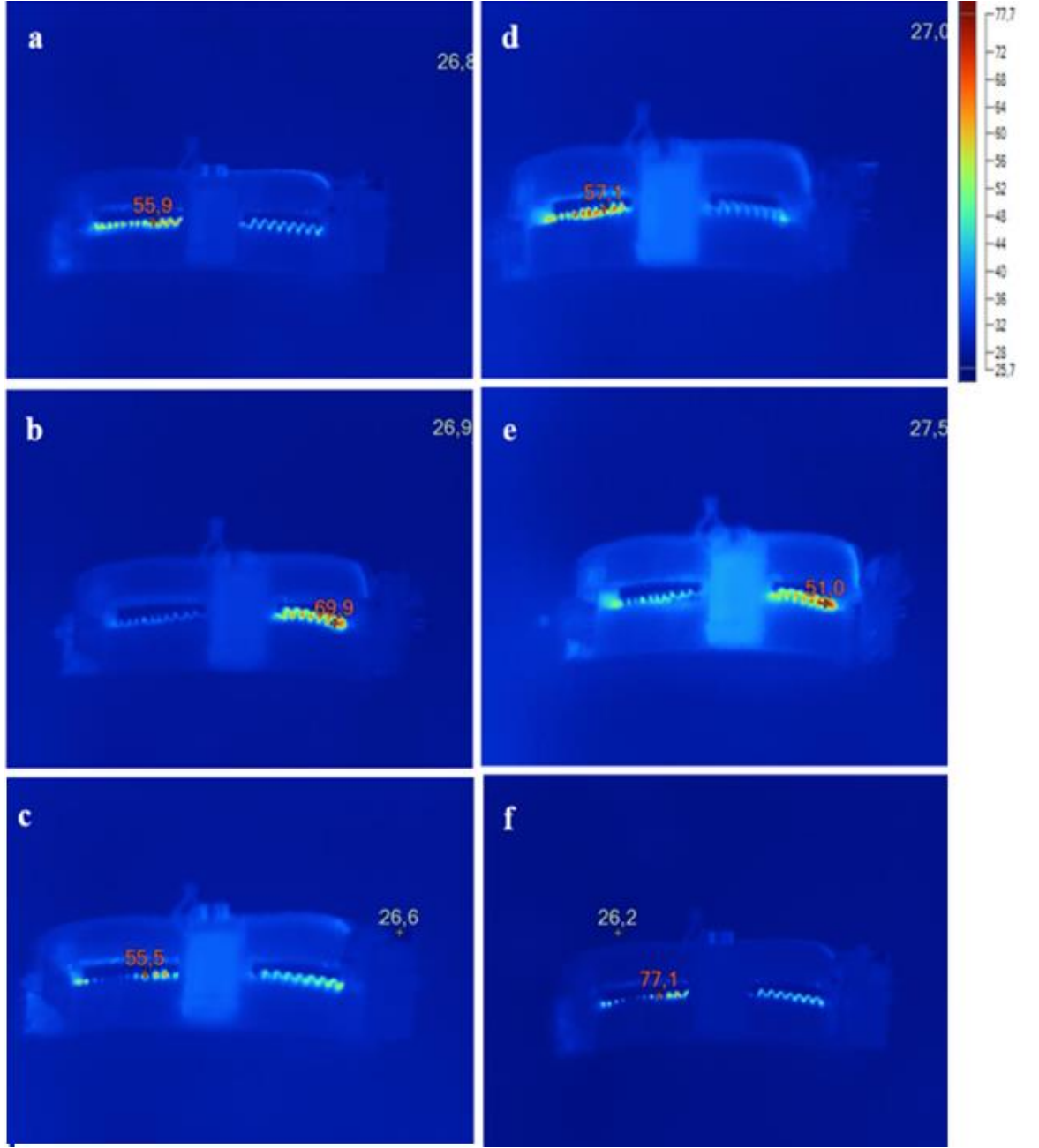
Senkronize hareket sürekli Ni-Ti ŞBA yayları tetikleyen mikroişlemcinin çıkış sinyalleri şekil 5.13'te verilmiştir. Deneylerin tamamı pleksiglas kanal içinde 25 °C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.14'te soft robotun 12 saniye içinde kat ettiği mesafe gösterilmiştir.



Şekil 5.14: Soft robotun mesafe-zaman grafiği

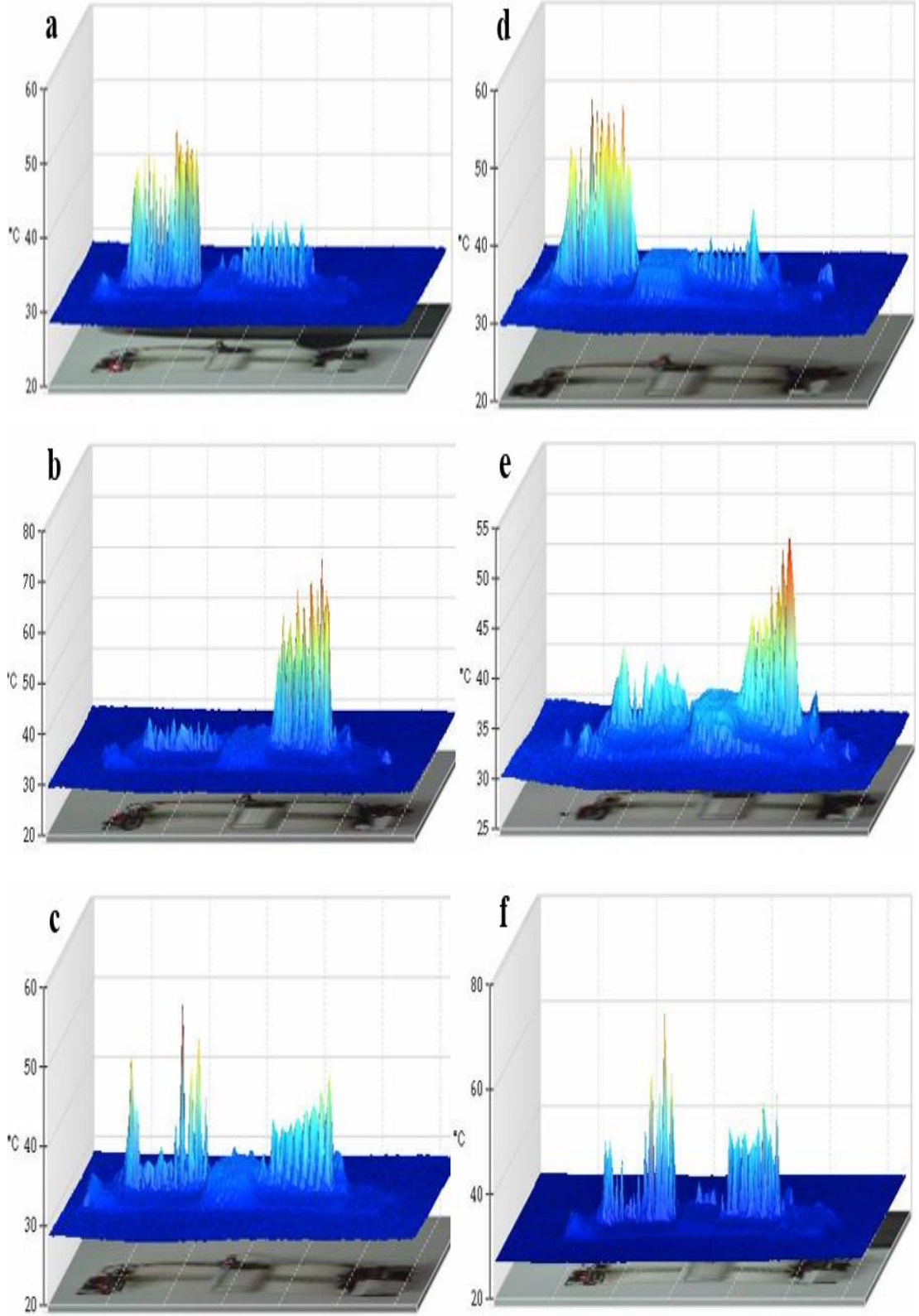
5.8 Geliştirilen Soft Robotun Termal Kamera ile Analizleri

Sistemin t_0-t_1 / t_1-t_2 / t_4-t_5 / t_5-t_6 / t_8-t_9 / t_9-t_{10} saniyeleri arasında tanımlanan lokomotif senkronize hareketi Ni-Ti ŞBA yayları tetikleyen mikroişlemcinin çıkış sinyalleri ile K3919 mosfetleri tetiklenerek ŞBA Ni-Ti yaylar üzerinden elektrik akımı geçirilmiştir. Elektrik akımının Ni-Ti ŞBA yaylar üzerindeki termo-mekanik enerjiden kaynaklı sıcaklığın ölçümleri termal kamera görüntülenmiştir. Deneilerin tamamı pleksiglas kanal için de 25 °C'de yapılmıştır. Şekil 5.15'te soft robotun periyodik hareketinin termal kamera görüntüleri gösterilmiştir.



Şekil 5.15: Soft robotun hareketlerinin termal kamera görüntüleri

Soft robotun termal görüntüleri Fluke Ti300+ cihazı kullanılarak alınmıştır. Görüntüler Fluke SmartView programına aktarılarak Ni-Ti ŞBA yayların 3B kızılötesi görüntüleri elde edilmiş olup soft robot üzerindeki kinetik enerjinin yayılımı gözlenmiştir. 3B kızıl ötesi grafikleri Şekil 5.16'te gösterilmiştir.


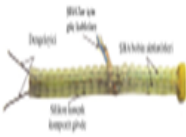




Şekil 5.16: Soft robotun Ni-Ti ŞBA yaylarının 3B kızılötesi görüntüleri

5.9 Literatür taramaları ve üretilen prototip karşılaştırılması

	Robot Adı	Boyut (mm)	Hız	Güç
	SlaBot	150x300x10	-	-
	Sıvı basıncı ile hareketi sağlanan yumuşak solucan robot	-	-	-
	SquMABot	440x130x113	30 cm/sn	-
	Zıplayan Yumuşak Robot	150x8	-	0.5 MJ/kg
	Çok uzuvlu yumuşak robot	160	-	-
	Boru Hattı ve Tünel Denetimi Sağlayan Yumuşak Robot	54x82	2,27 mm/sn	-
	Boru hattı denetimleri için biyo-ilham yumuşak robot	94x26	-	DC 6V, 150kPa
	Kol uzunluğu ayarlanabilen vida tahrikli boru içi kontrol robotu	129x109x175	0,5 m/s	DC 9V
	Çok mafsallı tekerlekli boru içi muayene maksatlı yılan robot	550x82	0,3 m/s	DC 12V

Şekil 5.17: Üretilen prototipin literatürdeki diğer biyo-ilham soft robotlar ile karşılaştırılması

	Kablosuz olarak tasarlanan Ni-Ti aktüatörlü tünel robot	107x25x5	1,22 mm/sn	3,7 VDC - 220 mAh
	Yön Kontrollü Yumuşak Robot	150x26x16	1,75 cm/sn	-
	GoQBot	105x86	2 cm/sn	-
	MagBot	40x6x4	6 mm/sn	-
	Boru hattı denetimleri için şekil bellekli Ni-Ti yay tahrikli biyo-ilham soft robot	180x40x20	3,93 mm/sn	12V 12,5A
	Kanal içi Tahribatsız Muayene Maksatlı Ni-Ti Temelli Soft Robot	145x45x8	2,15 mm/sn	3,7VDC - 200 mAh

Şekil 5.17: (Devamı) Üretilen prototipin literatürdeki diğer biyo-ilham soft robotlar ile karşılaştırılması

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Dünyada endüstri ve taşımacılığın büyük bir kısmı kanallar sayesinde yapılmaktadır. Bu kanallar bazen havalandırma, bazen kablo veya boruların geçtiği bölümler bazen ise akaryakıt veya kimyasal maddelerin iletimleri için kullanılmaktadır. Geliştirilen endüstriyel robotların kullanım alanının artması, bilgisayar bütünleşik sistemlerin arıza onarımı ve modernizasyon işlemlerine dahil olması ile kanallar içinde oluşan hasar veya akışı engelleyen durumlar dahilinde, hasar tespiti için genellikle tahribatsız muayene maksatlı ve hidrostatik test yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yöntemlere alternatif olarak geliştirilen Ni-Ti ŞBA yaylar kullanılarak kanal içi tahribatsız muayene edebilen esnek gövdeli robotu uzman personel ve karmaşık ekipmanlara ihtiyaç duymaksızın kullanılabilmesi değerlendirilmektedir.

Bu ihtiyaçlar doğrultusunda tasarlanan soft robotun hedeflenen ihtiyaçları karşılayabilmesi için gövde yapısı, gövde için kullanılacak malzeme seçimi, aktüatörlerin tasarımı, elektromekanik sistem tasarımı ve robot amacına uygun donanım seçimi için araştırmalar yapılmıştır.

Robotun tasarımı yapılırken gövdenin bir tırtıl gibi elastik olabilmesi için silikon malzeme uygun görülmüştür. Tırtıl morfolojisinden esinlenerek önde iki çekici ayaklar ortada üç adet dengeleyici ayaklar ve arkada ise iki adet itici ayaklar şeklinde tasarlanmıştır. Ayakların tasarımı yapılırken hem düzlemsel hem de silindirik yüzeylerde daha rahat hareket edebilmesi için oval yapıda tasarlanmıştır.

Gövde silikonun en uygun sertlik derecesini bulmak için farklı Shore derecelerine sahip gövde dökümleri yapılmıştır. En uygun Shore sertlik derecesinin Shore A15 olduğu deneyler sayesinde saptanmıştır. Ni-Ti ŞBA eyleyicilerin robot hareket halindeyken gövdeye zarar vermemesi ve gövdede herhangi bir kopma veya yırtılma olmaması için gövde içerisine dört adet terminal yerleştirilmiştir. Bu terminaller üzerinden aktüatörlere kablolar yardımıyla bataryadan elektrik akımı verilmektedir. Geliştirilen soft robotun gövdesi üzerinde aktüatörlerin bulunduğu bölgeye 5 mm eninde 40 mm uzunluğunda kanal açılmıştır. Bu kanalın açılma sebebi aktüatörlerin kolay hareket edebilmesinin yanı sıra Ni-Ti yayların daha çabuk soğumasıdır.

Ni-Ti ŞBA tellere şekil bellek özelliği kullanılarak yay şekli verilmiştir. Soft robotun hareketi Ni-Ti ŞBA yayların uzayıp kısılması vasıtasıyla robotun hareket edebilmesi amaçlanmıştır. Ni-Ti ŞBA yayların sıcaklık farkından dolayı uzayıp kısılması için çift yönlü şekil bellek eğitimi verilmesi gerekmektedir. Bu eğitim için bir düzenek kurulmuştur. 0,3 mm çapındaki Ni-Ti tellerin M2 cıvata etrafına bir torna tezgahında sarılıp kalıplanmıştır. Kalıplanan Ni-Ti ŞBA yaylar bir endüstriyel fırında 520 °C'de 15 dakika ısıl işleme tabi tutulmuştur. Isıl işlemde sonra şekil belleği eğitim düzeneğinde şekil belleğini tam olarak kazanabilmesi için 200 defa tetiklenerek uzayıp kısılma bellek eğitimi gerçekleştirilmiştir. Ni-Ti ŞBA yayların eğitiminden sonra yapılan deneylerde 58 °C'den sonra yayların termo-mekanik hareketini gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Şekil bellek eğitim düzeneğine bağlanan yük hücresi vasıtasıyla Ni-Ti yayların çekme kuvveti 1,75 N olarak ölçülmüştür.

Soft robota montajı yapılan Ni-Ti ŞBA yayları kontrol edilebilmesi için elektronik sistem tasarımı oluşturulmuştur. Kontrolcü olarak Attiny85, Ni-Ti ŞBA yayların akımını bataryadan sürebilmek için K3919 mosfet, kablosuz görüntü ve veri aktarımı için ESP-32 Cam modülü kullanılmıştır. Ayrıca, robotun uzaktan tetiklenerek başlangıç hareketinin sağlanması için Hall effect sensor eklenmiştir. Soft robot üzerinde 3,7 V ve 400 mAh Lityum polimer batarya bulunmaktadır. Haberleşmedeki kopmalardan dolayı ESP-32 Cam modülü için ayrı olarak eş bir batarya sisteme dahil edilmiştir. Ni-Ti ŞBA yaylar aktif halde iken 3,7 V ve 200 mAh akım çekmektedir. ESP-32 cam modülü kablosuz görüntü ve veri aktarı için kullanılmıştır. Kablosuz görüntü aktarımı ise, robotun bağlandığı kablosuz veri ağı üzerinde 192.168.137.15 adresinden sağlanabilmektedir. İnternet sağlayıcısı üzerinden video kaydı ve fotoğraf çekme imkânı sağlamaktadır. Bu özellik sayesinde arıza tespiti hızlı bir şekilde yapılmaktadır. Ayrıca, ESP-32 Cam modülü üzerinde bulunan flaşı sayesinde karanlık ortamları aydınlatarak ortam şartlarını iyileştirmektedir.

Soft robotun kontrol kartının içerisine yazılan algoritma sayesinde belirli periyotlarda tetikleme yapılmaktadır. Bu tetiklemeler sayesinde şekil belleği özelliğinden yararlanarak robota hareket kabiliyeti kazandırmıştır. Soft robot yapılan deneysel çalışmalarda 60 saniye içerisinde 129 mm lineer ilerleme göstermiş olup amaçlanan hedefe yaklaşmıştır. Gerekli hesaplamalar yapıldığından robotun hızı 2,15 mm/sn olarak ortaya çıkmıştır. Soft robotun hareket analizleri çıkarılmıştır. Hareket analizleri termal kamera altında incelenmiştir.

Ni-Ti yayların sıcaklık değişkenliğinin üç boyutlu grafik analizi yapılmıştır. Ni-Ti şBA yaylar 62 °C sıcaklıktan sonra faz değişimine uğraması nedeni ile ortam şartlarının da göz önünde bulundurularak maksimum çalışma eşiğinin 65 °C altında gerçekleştirilmesi uygundur. Soft robotun 65°C üzerinde çalışmaya uygun olmaması sadece tek sebebi Ni-Ti şBA yaylar değildir. Soft robotun üzerinden bulunan mikrodenetleyiciler, batarya ve kamera modülünün yapısı gereği yüksek sıcaklığa mağruz kalması durumunda arızalanması yüksek ihtimaller dahilindedir.

7. ÖNERİLER

Robot sisteminde kullanılmış olan kabloların robotun hareketlerinde yavaşlatıcı etkileri gözlemlenmiştir. Bir sonraki çalışmada robotun yapısında kablolar yerine karbon elastik yollar kullanılması düşünülmektedir. Ayrıca soft robot bünyesinden bulunan iki adet eyleyicinin robotun merkezinde olması sebebi ile sağa ve sola dönüş kabiliyeti bulunmamaktadır. İleride yapılacak alternatif sistemlerin üç adet Ni-Ti ŞBA yay kullanılarak bu yaylar sayesinde sağa solo dönüş kabiliyeti olan geniş kullanım alanına sahip daha etkin ve daha hızlı aksiyon alabileceği tasarımlar hedeflenmektedir. Robota entegre edilmiş kameranın yazılımın daha iyileştirilmesi ile arıza tespiti ve onarımının yapılıp yapılmayacağı hususunda daha somut veriler sunulabilir.

Ni-Ti ŞBA ile yapılan çalışmalar sistem çalışma mekanizmasının yalınlığı, uzaktan kontrol edilebilmesi, sessiz ve titreşimsiz olması, korozyonlara karşı dayanıklı olması, yüksek kopma mukavemetinin olması gibi özellikleri ile gelecek yıllarda mühendislik çalışmalarında robotik alanında kullanım oranının artacağı değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- Atsushi, K. & Shugen, M.,** (2020), “A Multi-link In-pipe Inspection Robot Composed of Active and Passive Compliant Joints”, IEEE/RSJInternational Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) 6472-6478.10.1109/IROS45743.2020.9341478.
- Atsushi, K., Taiki, N. & Shugen, M.,** (2014), “Designing arm length of a screw drive in-pipe robot for climbing vertically positioned bent pipes”, *Robotica*, 34. 1, 22. 10.1017/S026357471400143X.
- Benny, G., Lior, S., Amir, D.G. & Yizhar V.,** (2019), “Understanding Inchworm Crawling for Soft-Robotics”, *IEEE Robotics and Automation Letters* 5(2):1-1, DOI:10.1109/LRA.2020.2966407.
- Calkins, F.T. & Mabe, J.H.,** (2010), “Shape Memory Alloy Based Morphing Aerostructures”, *Journal of Mechanical Design* 132(11):111012 DOI:10.1115/1.4001119
- Cianchetti, M., Licofonte, A., Follador, M., Rogai, F. & Laschi C.,** (2014), “Bioinspired soft actuation system using shape memory alloys. In: *Actuators*, volume”, 3. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Basel, pp. 226–244.
- Colm, M.C, Takuya, U., Weiwei, J., Takuya, S., Yoshiaki, N., Ryuma, N. & Yoshihiro, K.,** (2020), “Continuum Robotic Caterpillar with Wirelessly Powered Shape Memory Alloy Actuators”, *Soft Robotics* 7(6) March 2020, DOI: 10.1089/soro.2019.0090.
- Daltorio, K. A., Boxerbaum, A. S., Horchler, A. D., Shaw, K. M., Chiel, H. J. & Quinn R. D.,** (2013), “Efficient worm-like locomotion: Slip and control of soft-bodied peristaltic robots”, August 2013, *Bioinspiration & Biomimetics* 8(3):035003 DOI:10.1088/1748-3182/8/3/035003.
- Dhakal, B., Nicholson, D.E., Saleeb, A.F., Padula, S.A. & Vaidyanathan, R.,** (2016), “Three-dimensional deformation response of a NiTi shape memory helical-coil actuator during thermomechanical cycling: experimentally validated numerical model”, *2016 Smart Materials and Structures* 25(9):095056, DOI:10.1088/0964-1726/25/9/095056.
- Dilibal S. & Şahin H.,** (2018), “İşbirlikçi Endüstriyel Robotlar ve Dijital Endüstri”, *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, vol. 2, no. 1, pp. 86-96,
- Dilibal, S. & Engeberg, E.D.,** (2017), “Antagonistically actuated shape memory alloy manipulator”, USPTO 2017, 9744055 B2 USA.

- Dilibal, S.,** (2003), “Nikel-Titanyum Şekil Bellekli Alaşımlar Kullanarak Geliştirilen İTÜ Robot El Prototipi ve Performans Analizleri”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Dilibal, S.,** (2013), “Investigation of nucleation and growth of detwinning mechanism in martensitic single crystal NiTi using digital imagecorrelation”, *Metallography Microstructure, and Analysis*, 2(4), 242-248 (2013), Doi: 10.1007/s13632-013-0083-7
- Dilibal, S.,** (2016), “The effect of long-term heat treatment on the thermomechanical behavior of NiTi shape memory alloys in defense and aerospace applications”, *Defense Science Journal*, 15(2).
- Dilibal, S.,** (2018), “Stabilized actuation of a novel NiTi shape memory alloy actuated flexible structure under thermal loading”, *Materiali in Tehnologije*, 52(5), 599-605, Doi: 10.17222/mit.2018.042.
- Dilibal, S., Guner, E. & Akturk N.,** (2002), “Three-finger SMA robot hand and its practical analysis”, *Robotica*, 20(02), 175-180, DOI: 10.1017/S0263574701003757.
- Dilibal, S., Hamilton, R. F. & Lanba, A.,** (2017), “The effect of employed loading mode on the mechanical cyclic stabilization of NiTi shape memory alloys”, *Intermetallics*, 89(null), 1-9(2017): DOI: 10.1016/j.
- Dilibal, S., Şahin, H., Dursun, E. & Engeberg E.,** (2017), “Nickel–titanium shape memory alloy-actuated thermal overload relay system design”, *Electrical Engineering* 99(3), 923930, Doi: 10.1007/s00202-016-0458-2
- Dilibal, S., Tabanlı, M. & Dikicioğlu, A.,** (2004), “Development of shape memory actuated ITU Robot Hand and its mine clearance compatibility”, *Journal of Materials Processing Technology* 155156(1):1390-1394, DOI:10.1016/j.jmatprotec.2004.04.221.
- Donatelli, C.D., Serlin, Z.T., Jones, P., Scibelli, A.E., Cohen, A., Musca, J.M., Levy, S.R., Buckingham, D., White, R. & Trimmer B.,** (2017), “Soft Foam Robot with Caterpillar-Inspired Gait Regimes for Terrestrial Locomotion”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS)*, DOI: 10.1109/IROS.2017.8202196.
- Engeberg, E.D., Dilibal, S., Vatani, M., Choi, J.W. & Lavery, J.,** (2015), “Anthropomorphic finger antagonistically actuated by SMA plates”, *Bioinspiration Biomimetics*, 10(5), 1-15, Doi: 10.1088/1748-3190/10/5/056002.
- Engeberg, E.D., Dilibal, S., Vatani, M., Choi, J-W. & Lavery J.,** (2015), “Anthropomorphic finger antagonistically actuated by SMA plates”, *Bioinspiration Biomimetics*, 10(5), 1-15, Doi: 10.1088/1748-3190/10/5/056002.

- Hamzaçebi, H. & Morgül, Ö.,** (2017), “On the periodic gait stability of a multi-actuated spring-mass hopper model via partial feedback linearization”, *Nonlinear Dyn* (2017) 88:1237–1256 DOI 10.1007/s11071-016-3307-y.
- Huang, Y., Kandhari, A., Chiel, H.J. & Quinn, R.D.,** (2017). “Slip Reduction Controls of Mesh-Body Worm Robot Developed from a Mathematical Model”, *IEEE International Conference On Robotics And Biomimetics*, DOI:10.1109/ROBIO.2017.8324625.
- Kastor, N., Mukherjee, R., Cohen, E., Vikas, V., Trimmer, B. & White, R.D.,** (2017),” SLABot An Experiment in the Design of Soft Bodied Robots”, *The 8th International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines*, At:Sapporo, Japan, Affiliation: Tufts University, DOI:10.13140/RG.2.2.23297.35681/1.
- Konuk, G.,** (2014), “Şekil Hafızalı Alaşım ile Çok Amaçlı Aktüatör Tasarımı ve Uygulaması”, *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, TÜRKİYE
- Lin, H.T., Leisk, G.G., Trimmer, B.,** (2011), “GoQBot: A caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot”, *Bioinspiration & Biomimetics* 6(2):026007, DOI:10.1088/1748-3182/6/2/026007.
- Liu, X., Song, M., Fang, Y. & Zhao, Y.,** (2022), “Worm-Inspired Soft Robots Enable Adaptable Pipeline and Tunnel Inspection“, *Advanced Intelligent Systems* 4(1), DOI:10.1002/aisy.202100128.
- Lu, X., Wang, K. & Hu, T.,** (2020), “Development of an annelid-like peristaltic crawling soft robot using dielectric elastomer actuators”, *Bioinspiration & Biomimetics* 15(4) DOI:10.1088/1748-3190/ab8af6.
- Mangan, E.V., Kingsley, D.A., Quinn, R.D. & Chiel H.J.,** (2002), “Development of a peristaltic endoscope”, *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (Cat. No.02CH37292).
- Onur, N. & Kurt, B.,** (2002), “Şekil Hafızalı Alaşımların Kullanım Alanları Üzerine Son Gelişmeler”, 9. Denizli Malzeme Sempozyumu PAÜ-Mühendislik Fakültesi, Denizli.
- Otsuka, K. & Kakeshita, T.,** (2002), “Science and Technology of Shape-Memory Alloys: New Developments”, *MRS Bulletin*, 27(2), 91-100.Doi:10.1557/mrs2002.43
- Peduk, G., Dilibal, S., Harrysson, O., Ozbek, S. & West H.,** (2018), “Characterization of Ni–Ti alloy powders for use in additive manufacturing” *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 59(4), 433-439, Doi: 10.3103/S106782121804003X
- Saleeb, A. F. & Vaidyanathan R.,** (2016), “A Computationally-Efficient, Multi-Mechanism Based Framework for the Comprehensive Modeling of the Evolutionary Behavior of Shape Memory Alloys”, *Metals and Metallic Materials*, NASA/CR—2016-219139

- Saleeb, A. F., Dhakal, B., Hosseini, M. S. & Padula, S. A.,** (2013), “Large scale simulation of NiTi helical spring actuators under repeated thermomechanical cycles”, *Smart Materials and Structures* 22(9):094006, DOI:10.1088/0964-1726/22/9/094006.
- Sapmaz, Y., Dilibal, S., Sapmaz, A., Yilmaz, O.,** (2021). “Nickel-Titanium SMA Springs Actuated Bioinspired Soft Robot for Pipeline Inspections”, 3rd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications (HORA), DOI: 10.1109/HORA52670.2021.9461361.
- Seok, S., Onal, C.D., Cho, K.J., Wood, R.J., Rus, D. & Kim S.,** (2013), “Meshworm: A Peristaltic Soft Robot With Antagonist Nickel Titanium Coil Actuators”, *IEEE/ASME Trans. Mechatronics* 18(5) 1485-97.
- Shepherd, R. F., Ilievski, F., Choi, W., Morin, S.A., Stokes, A. A., Mazzeo, A. D. & Whitesides, G. M.,** (2011), “Multigait soft robot”, *Proceedings of the national academy of sciences*, 108(51), 20400-2040.
- Shimoga, G., Kim, T.H. & Kim, S.Y.,** (2021), “An Intermetallic NiTi-Based Shape Memory Coil Spring for Actuator Technologies”, August 2021, *Metals-Open Access Metallurgy Journal* 11:1212, DOI:10.3390/met11081212.
- Tolley, M.T., Shepherd, R. F., Karpelson, M., Bartlett, N. W., Galloway, K. C., Wehner, M. & Wood, R.J.,** (2014), “An untethered jumping soft robot”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 561-566). IEEE.
- Umedachi, T. & Trimmer, B.A.,** (2014), “Design of a 3D-Printed Soft Robot with Posture and Steering Control”, *International Conference on Robotics & Automation*, DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907272.
- Umedachi, T. & Trimmer, B.A.,** (2016), "Autonomous decentralized control for soft-bodied caterpillar-like modular robot exploiting large and continuum deformation", 2016 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 292-297, doi: 10.1109/IROS.2016.7759069.
- Wen, M., Tu, G.F., Zong, Q.Y. & Xie, C.X. A.,** (1994), “Study of NiTi shape memory alloy springs and its application in a new robotic actuator”, In *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Industrial Technology—ICIT’94*, Guangzhou, China, 5–9; pp. 215–219.
- Xu, L., Wagner, R.J., Liu, S., He, Q., Li, T., Pan, W., Feng, Y., Feng, H., Meng, Q., Zou, X., Fu, Y., Shi, X., Zhao, D., Ding, J. & Vernerey, F.J.,** (2022), “Locomotion of an untethered, worm-inspired soft robot driven by a shape-memory alloy skeleton”, *Scientific Reports* 12(1):12392, July 2022, DOI:10.1038/s41598-022-16087-5.
- Yamashita, A., Matsui, K., Kawanishi, R., Kaneko, T., Murakami, T., Omori, H., Nakamura, T. & Asama H.,** (2011), Self-localization and 3-D

model construction of pipe by earthworm robot equipped with omnidirectional rangefinder”, 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, DOI: 10.1109/ROBIO. 2011.6181421

Zarrouk, D., Sharf, I. & Shoham M., (2010), “Analysis of Earthworm- like Robotic Locomotion on Compliant Surfaces”, International Conference on Robotics and Automation (ICRA).

Zhang, X., Pan, T., Heung, H. L., Chiu, P. W. Y. & Li, Z., (2018), "A Biomimetic Soft Robot for Inspecting Pipeline with Significant Diameter Variation ", 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS),s.7486-7491,doi: 10.1109/IROS.2018.8594390.

Zhu, J. G., Gao, J. Y., Li, K.J., Lin, W. & Bi S. J., (2010), “Embedded Control System Design for Coal Mine Detect and Rescue Robot”, 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology: 64-68

ÖZGEÇMİŞ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Orta Öğretim:** 2010, Pendik Anadolu Meslek Lisesi Endüstriyel Otomasyon Bölümü
- **Lisans:** 2017, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- Didaktik (2010-2011), Festo A.Ş
- Elektrik- Elektronik Bakım-Onarım (2011-), İstanbul Tersane Komutanlığı