



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ROBOTİK-LAPAROSKOPİK CERRAHİ VE
GİRİŞİMSEL RADYOLOJİ ALANLARINDA
KULLANILABİLECEK MULTİ FONKSİYONEL
ROBOTİK KOL BAŞLIKLARININ TASARIMI
VE UYGULAMASI**

ÖZGÜR YURTSEVER

DOKTORA TEZİ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Haluk KÜÇÜK

İSTANBUL, 2020



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**ROBOTİK-LAPAROSKOPİK CERRAHİ VE
GİRİŞİMSEL RADYOLOJİ ALANLARINDA
KULLANILABİLECEK MULTİ FONKSİYONEL
ROBOTİK KOL BAŞLIKLARININ TASARIMI
VE UYGULAMASI**

ÖZGÜR YURTSEVER
(723514002)

DOKTORA TEZİ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Haluk KÜÇÜK

İSTANBUL, 2020

MARMARA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Öğrencisi Özgür YURTSEVER'in "Robotik-Laparoskopik Cerrahi Ve Girişimsel Radyoloji Alanlarında Kullanılabilecek Multi Fonksiyonel Robotik Kol Başlıklarının Tasarımı Ve Uygulaması" başlıklı tez çalışması, 23. Temmuz 2020 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Haluk KÜÇÜK (Danışman)

Marmara Üniversitesi (İMZA) 

Doç. Dr. Erdinç ALTUĞ (Üye)

İstanbul Teknik Üniversitesi (İMZA) 

Dr. Öğr. Üyesi İsmail TEMİZ (Üye)

Marmara Üniversitesi (İMZA) 

Doç. Dr. Gökhan Bora ESMER (Üye)

Marmara Üniversitesi (İMZA) 

Doç. Dr. Serkan TOPALOĞLU (Üye)

Yeditepe Üniversitesi (İMZA) 

ONAY

2020/18-02 Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 22/7/2020 tarih ve sayılı kararı ile Özgür Yurtsever'in Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı Mekatronik Mühendisliği Programında Doktora derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Prof. Dr. Bülent Ekici



ÖNSÖZ

İhtiyacımız olan çağdaş medeniyetin bilimden geçtiğine inanıyorum. Geleceğin kapılarını da kuantum fiziğinin ve mekaniğinin açacağına inanıyorum. Bu konuda Niels Bohr'u gençlik idolüm olduğu için burada anmak istiyorum. Ayrıca bize okuyabilme ve belirli alanlarda kendini geliştirme şansı tanıdığı için Türkiye Cumhuriyeti Sağlık Bakanlığı'na, Cumhuriyetimizin kurucusu Mustafa Kemal Atatürk'e teşekkürlerimi sunuyorum. Temel eğitim ve öğretim hayatında katkıda bulunmuş tüm öğretmen ve hocalarıma, özellikle akademik merdivenin son basamağı olan doktora programında benden yardım ve sabırlarını esirgemeyen Haluk Küçük hocama, beraber çalışma fırsatı ve sınıf arkadaşlığı yapma fırsatı yakaladığım Mehmet Aydın Soydaş'a, bana iş yerini açan ve her türlü olanağı esirgemeyen İpek Dental & İpek Kesici Takım Ltd. Şti. sahibi dostum İlyas İpek'e, bu çalışmayı FEN-C-DRP-090217-0052 nolu proje ile destekleyen Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine, her zaman yanımda olan biricik eşim ve kızım Nilgün-Öykü Yurtsever'e, keşke bugünleri görebilseydi dediğim sonsuz bilim aşığı babam Ahmet Mahmut Yurtsever'e ve emaneti annem Ayşe Yurtsever'e bu tezin oluşumunda sundukları maddi ve manevi katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Temmuz 2020

Özgür YURTSEVER

İÇİNDEKİLER TABLOSU

ÖNSÖZ.....	ii
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
1. Giriş.....	1
1.1 Şekil Hafızalı Alaşımlar	4
1.2 ŞHA Nitinol Tel Karakteristiği.....	6
1.3 ŞHA Eyleyiciler.....	17
1.4 Tutucular.....	26
1.5 Tutucuların Üretim ve Tasarım Yöntemleri	45
1.6 Şekil Hafızalı Alaşım Tabanlı Tutucuların Kontrolü	56
2 Materyal ve Metot	128
2.1 Malzeme Seçimi	128
2.2 Tutucu Tasarımları.....	129
2.3 Kol Tasarımı	135
2.4 Tutucu Sürücü Devresi	135
2.5 Kol Sürücü Devresi.....	136
2.6 Tutucu Uçları Açılma Miktarı, Açılma-Kapanma Ortalama ve Anlık Hızlarının Tespiti	137
2.7 Robot Kol Boynun Orjin ile Yaptığı Eksenel Açı Miktarlarının Tespiti.....	139
2.8 Tutucuların Ürettiği Basma Kuvvetinin Ölçümü	146
3 Deneysel Çalışmalar.....	147
3.1 Artan Besleme Gerilimi ve Darbe Genişlik Modülasyon Doluluk Oranlarının Tutucu Parametrelerine Etkisi	147
3.2 Artan Darbe Genişlik Modülasyon Doluluk Oranlarının Tutucu Kol Parametrelerine Etkisi.....	159
3.3 Artan Frekans Değerlerinin Tutucu Parametrelerine Etkisi	160
4 Tutucuların Ürettikleri Basma Kuvvetleri	173
5 Tutucuların Kavrama ve Kaldırma Potansiyelleri.....	177
6 Mikro Tutucu Dayanımı ve Enerji Tüketimi	180
7 Tartışma	181
8 Sonuçlar	185
9 Ekler.....	193

9.1	Ek 1-Alıcı Devre Kod Yazılımı	193
9.2	Ek 2-Verici Devre Kod Yazılımı	195
9.3	Ek 3-Tutucu Uçlarının Açılma Miktarı, Ortalama Açılma–Kapanma Hızlarının MATLAB Kod Yazılımı ile Hesaplanması	196
9.4	Ek 4-Robot Kol Boynunun Eksene Yaptığı Açının MATLAB Kod Yazılımı ile Hesaplanması.....	198
9.5	EK-5 Kuvvete Duyarlı Sensör ile Tutucu Uçlarında Basma Kuvveti Ölçme Kod Yazılımı	201
9.6	EK-6 Tutucu 1’e Ait Tablo ve Grafikler	202
9.7	EK-7 Tutucu 2’e Ait Tablo ve Grafikler	204
9.8	EK-8 Tutucu 3’e Ait Tablo ve Grafikler	206
9.9	EK-9 Tutucu 4’e Ait Tablo ve Grafikler	208
9.10	EK-10 Tutucu 5’e Ait Tablo ve Grafikler	210
9.11	EK-11 Tutucu 6’ya Ait Tablo ve Grafikler	213
9.12	EK-12 Tutucu 7’ye Ait Tablo ve Grafikler	216
9.13	EK-13 Tutucu 8’ye Ait Tablo ve Grafikler	218
9.14	EK-14 Tutucu 5’e 6V Besleme Gerilimi ve Artan Frekans Değişimine Ait Tablo ve Grafikler	220
10	Özgeçmiş.....	231

ÖZET

“ROBOTİK-LAPAROSKOPIK CERRAHİ VE GİRİŞİMSEL RADYOLOJİ ALANLARINDA KULLANILABİLECEK MULTİ FONKSİYONEL ROBOTİK KOL BAŞLIKLARININ TASARIMI VE UYGULAMASI” başlıklı tez çalışmasında ticari ismi ile Nitinol olarak bilinen Nikel-Titanyum Alaşımı malzemeler ile kontrol edilen ve tıbbi girişim alanlarında kullanılabilecek tutucular ve bu tutucuların yer alacağı bir robotik kol tasarlanmak istenmiştir. Literatürde bu malzemelerin kullanıldığı daha çok eyleyici uygulamalarına ve bunların çeşitli kontrol mekanizmalarına rastlanmıştır. Yine literatürde tıbbi ve endüstriyel alanda kullanılmak üzere geliştirilen bir çok tutucu mekanizmaları incelenmiştir. Bu tez çalışmasında nitinol tabalı mekanizmalar ile kontrol edilen mikro hareketler yapabilen, kavrama, tutma, kaldırma, bırakma işlevlerini yerine getiren sekiz adet tutucu geliştirilmiştir. Ayrıca yanal ve dikey yatma kabiliyetli ve bu tutucuların monte edilebileceği bir robot kol tasarlanmıştır. Tutucular tutma mekanizmalarına ve kullanılan malzemelerin özelliğine göre çeşitlendirilmiştir. Ucuna takıldıkları kol ile uzaktan kablosuz kontrol edilmişlerdir. Hem tutucu kolun hem de tutucu uçlarının hareket miktarı, açılma-kapanma süreleri, hızları benzer şekilde tutucu kolun açısal pozisyon ve hız ile ilgili değişkenleri literatürde rastlanan sensörlü sistemlerden farklı olarak Matlab tabanlı bir Görüntü İşleme uygulaması ile elde edilmiştir. Bütün tasarımlar çeşitli besleme gerilimleri, Darbe Genişlik Modülasyonu Görev Döngü Oranları ve Frekans Sinyali gibi farklı çalışma şartlarında test edilmiştir. Elde edilen performans verileri değerlendirilerek, üretilen her bir tutucu sistemi eksiklikleri, sınırları ve avantajları açısından değerlendirilmiştir. Buradan elde edilen çıkarımlar sonucunda ileri dönem çalışmalarda izlenecek yol tespit edilmiştir.

Temmuz 2020

Özgür Yurtsever

ABSTRACT

In this thesis entitled “DESIGN AND IMPLEMENTATION OF MULTIFUNCTIONAL ROBOTIC ARM AND GRIPPERS FOR ROBOTIC-LAPAROSCOPIC SURGERY AND INTERVENTIONAL RADIOLOGY APPLICATIONS”, the intend was to design grippers and a robotic arm controlled by Nickel-Titanium Alloy materials known as Nitinol, which can be used in medical interventional areas with various gripper designs mounted onto the robotic arm. Many actuation applications and their various control mechanism have been encountered in the literature regarding the use of these materials. In addition, a variety of gripping mechanisms designed for medical and industrial applications have been investigated. In this thesis, eight different grippers were developed performing micro movements by nitinol-based mechanisms to generate grasping, gripping, lifting, and releasing functions. Additionally a robotic arm with pitch and yaw degree of freedom was developed to hold these gripper designs. The grippers are diversified according to their holding mechanism and the properties of the production material utilized during production of the system. These grippers are controlled remotely and wirelessly together with the robotic arm on which they are mounted. Different from the sensor systems found in the literature, the variables related to the amount of jaws clearance, opening-closing times and speeds for gripper jaws and similarly angular position and speed of the robotic arm were obtained with a Matlab based Image Processing application. All gripping systems were experimented under different supply voltage, Pulse Width Modulation duty cycle and frequency signal conditions. According to the performance data obtained, each gripper design was assessed in terms deficiencies, limits and advantages of the system. In light of the inferences derived, the path to be followed in later studies has been determined.

July 2020

Özgür Yurtsever

YENİLİK BEYANI

“Robotik-Laparoskopik Cerrahi Ve Girişimsel Radyoloji Alanlarında Kullanılabilecek Multi Fonksiyonel Robotik Kol Başlıklarının Tasarımı Ve Uygulaması” isimli bu çalışmada Nikel-Titanyum Şekil Hafızalı Alaşım ve Süperelastik malzemeler ile çeşitli mikro tutucu tasarımları yapılmıştır. Literatürde çeşitli mekanizmalarla çalışılan tutucu tasarımlarına rastlanırken bu çalışmada hem şekil hafıza ve süperelastiklik özellikleri kombin edilerek farklı çalışma özelliklerine ve tutma kabiliyetlerine sahip tutucu uçları üretilmiştir. Bu başlıkların takılabileceği yine ŞHA’lı teller ile yönetile bilen robotik bir kol tasarımı gerçekleştirilmiştir. Literatürde bu çalışmaya ilham olan çeşitli kol ve endoskopik cerrahi aletler mevcuttur. Fakat araştırıldığı kadarıyla Radyo Frekansı (RF) ile aktive edilen nikel titanyum eyleyici sistemleri dışında haberleşme modülü kullanılarak kablosuz olarak aktive edilmesi bakımından yeni bir yaklaşım sunulmaya çalışılmıştır. Kol ve tutucuların değişkenlerinin tespit edilmesinde de MATLAB Görüntü İşleme kullanılması Nikel-Titanyum Alaşımları ile yapılan eyleme işlemlerinde yenilikçi bir yaklaşım olmuştur.

Temmuz 2020

Özgür Yurtsever

Prof. Dr. Haluk Küçük

SEMBOLLER

ξ	: Martensit Miktarı
σ	: Gerilim
c^A	: Östenit Sabiti
c^M	: Martensit sabiti
B_2	: Östenit Kübik Faz
B_{19}'	: Monoklinik Martensit Faz
C_p	: Özgöl Sıcaklık
d	: Tel Çapı
D	: Enkoder Dönme Çapı
h	: Isı Transfer Katsayısı
H	: Histeresiz
I	: Akım
E^A	: Östenit Fazı Young Modülü
E^M	: Martensit Fazı Young Modülü
A	: Östenit
LT	: Low Temperature
M	: Martensit
M_b	: Bükme Momenti
N	: Sarım Sayısı
P	: Güç
R	: Korelasyon Katsayısı
R	: Direnç
R	: Romdehedral Faz
R_f	: Geriçekme Açısı
V	: Volt
t	: Zaman
T	: Sıcaklık
α	: Doğrusal Termal Genleşme Katsayısı
α^A	: Östenit Fazı Termal Genleşme Katsayısı
α^M	: Martensit Fazı Termal Genleşme Katsayısı

ϵ^T	: Dönüşüm Deformasyon Katsayısı
Λ	: Akış Kuralı
Δl	: Uzunluk Değişimi
ΔH	: Gizli Isı
$\emptyset$	: Çap
Ω	: Ohm
η	: Verim
θ	: Açılma



KISALTMALAR

AA	: Alternatif Akım
BDT	: Bilgisayar Destekli Tasarım
CMT	: Cisim Merkezli Tetragonal
DA	: Doğru Akım
DGM	: Darbe Genişlik Modülasyonu
DMA	: Dinamik Mekanik Analiz
DSC	: Differential scanning calorimetry
ETE	: Elektro Tel Erezyon
GAO	: Güç Ağırlık Oranı
Gİ	: Görüntü İşleme
İK	: İndüktör-Kondansatör
KAÇ	: Kendinden Algılamalı Çalışan
KDS	: Kuvvete Duyarlı Sensör
KKD	: Kayma Kip Denetleyici
KKK	: Kayma Kipli Kontrol
MİC	: Minimal İnvaziv Cerrahi
NİTi	: Nikel Titanyum
P	: Oransal
PI	: Oransal İntegral
PID	: Oransal İntegral Türevsel
RF	: Radyo Frekansı
SE	: Süperelastiklik
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
SİM	: Stress ile İndüklenen Martensit
SME	: ŞHApe Memory Effect
SPI	: Saturated Proportional Integrated
SoRo	: Soft Robotics
SSC	: Sensorless Signal Conditioning
ŞHA	: Şekil Hafızalı Alaşım
TA	: Termal Analiz
TWSME	: Two Way ŞHApe Memory Effect
TRSME	: Three Way ŞHApe Memory Effect
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik

ŞEKİLLER

Şekil 1.1: Küçülme ve genleşmenin zamana ve voltaja bağlı diyagramı.	7
Şekil 1.2: ŞHA Nitinol telin karakteristiği hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla kullanılan test ekipmanı	9
Şekil 1.3: ŞHA Nitinol telin boyutsal değişim karakteristiği.	9
Şekil 1.4: 250 µm çapındaki tel için su altında çeşitli akım değerlerinde ısıtma eğrileri.	10
Şekil 1.5: 100, 150, 250, 300, 375 µm çaplarındaki Flexinol® tellerin su altında soğuma eğrileri.	10
Şekil 1.6: ŞHA tel karakteristiklerini belirlemek için deney düzeneği.....	11
Şekil 1.7: 0.154 mm çaplı ŞHA telin kuvvet-yer değiştirme diyagramı.....	12
Şekil 1.8: Tutucunun açısal yer değiştirme miktarı.	13
Şekil 1.9: Tutucunun zaman cevabı (Ø 0.13mm) a) Açık mod, b) Kapalı mod.	14
Şekil 1.10: Uyarma akımının etkisi (Ø 0.13 mm).....	14
Şekil 1.11: Eylem frekansının etkisi.	14
Şekil 1.12: Adım ve Rampa dalga formuna sahip akımlar.	16
Şekil 1.13: Hava ve su soğutma koşullarında ŞHA eyleyicilerin tepki hızı.	18
Şekil 1.14: Üç farklı eyleyicinin BDT ve eşdeğer mekanik modelleri a) Gergi ŞHA Eyleyici, b) Diferansiyel ŞHA Eyleyici, c) Uyumlu Diferansiyel ŞHA Eyleyici	19
Şekil 1.15: 2 Serbestlik derecesine sahip aktif endoskop.	19
Şekil 1.16: Aktif endoskopun 2 serbestlik derecesine sahip mobil kafası.....	20
Şekil 1.17: ŞHA telin termo-mekanik karakteristik eğrileri.	21
Şekil 1.18: ŞBA telleri tarafından ön gerinme değerlerine göre uygulanan kuvvet.	22
Şekil 1.19: ŞBA telin terme-mekanik karakteristik eğrileri.....	22
Şekil 1.20: Gerekli kuvvet (gr.) ile eğme açısı (derece).	23
Şekil 1.21: Optimal ön gerinim tayini.....	23

Şekil 1.22: Çok eklemli endoskobun mekanik yapısı.....	24
Şekil 1.23: Alternatif üç NiTi levha yay yapısı.	24
Şekil 1.24: NiTi'nin gerilim-gerinim diyagramı.....	25
Şekil 1.25: Minivalf eyleyici kesit görüntüsü. 1. Tahliye kanalı, 2. ŞBA yay, 3 ve 4. Giriş kanalı, 5. Pleksiglas (PMMA) gövde, 6. Konik kapak, 7. Kauçuk kilit, 8. Bias Yay, 9. Çıkış kanalı.	26
Şekil 1.26: Temas alanındaki tutma kuvveti: (a) dönme hareketi ve (b) paralel hareketi.	27
Şekil 1.27: Tutucu tasarımına ait genel bir üretim algoritması.....	29
Şekil 1.28: a)Helikal yay ile hareket ettirilen tutucu tasarımı, b) NiTiCu (alaşım B25) şerit ile hareket ettirilen tutucu tasarımı.....	31
Şekil 1.29: ŞHA ile tahrik edilen burma yaylı tutucu BDT modeli.....	32
Şekil 1.30: Tutucuların BDT tasarımı (Başlangıç pozisyonu kapalı ve açık tasarımlar).	33
Şekil 1.31: Hareketli kavrama çenesinin serbest gövde şeması.....	34
Şekil 1.32: ŞHA tel kullanılan tutucu prototipi.	35
Şekil 1.33: Tahrik akımına karşın kavrama gücünün değişimi.....	36
Şekil 1.34: Artan akım miktarına bağlı olarak tutucu ucunun yer değiştirme miktarı.	37
Şekil 1.35: Sabit Çeneli Tutucu Tasarımı.	38
Şekil 1.36: Kapama zamanının tespit edilmesi için kurgulanmış deneysel setin şematik gösterimi.	39
Şekil 1.37: Açma zamanının tespit edilmesi için kurgulanmış deneysel setin şematik gösterimi.	40
Şekil 1.38: 100 µm çapa sahip ŞHA tel ile çelik ve paslanmaz çelik yaylar kullanılarak yapılmış bir tutucu aletin sürücü akımı ile kavrama kuvveti değişim grafiği.....	41
Şekil 1.39: 100 µm ve 150 µm çapa sahip ŞHA tellerin çelik burma yayı ile beraber kullanıldığı bir tutucu cihazda tutma kuvveti ve akım arasındaki bağıntı grafiği.	41
Şekil 1.40: 100 µm çapa sahip ŞHA telin çelik ve paslanmaz çelik burgu yayı ile yapılan sürücü akımına bağlı olarak değişen tepki zamanı.	42

Şekil 1.41: 100 µm ve 150 µm çapa sahip ŞBA tellerin çelik burgu yayı ile kullanıldığı tutucu bir cihazda tutucu çenelerin sürücü akımına bağlı olarak açma ve kapama tepki zamanları.....	42
Şekil 1.42: a) Açısal tutma mekanizmasına sahip geleneksel bir laparoskopik kavrayıcı, b) Kavrama mekanizması.	43
Şekil 1.43: Kavrayıcı gücünü kontrol etmek amacıyla akıllı malzeme ile dizayn edilmiş deneysel kurgu.	43
Şekil 1.44: ŞHA telin ve yayın karakterizasyonu için kurulan test düzeneği. 1)Yay ve ŞHA telin elastik karakteristiklerini elde etmek amacıyla uygulanan yer değiştirme ve hıza bağlı doğrusal motor düzeneği. 2) ŞHA ve yaya uygulanan gücün yük ölçer ile ölçülmesi. 3) Doğrusal motorlu düzenek için sabit destek. 4) Yay ve ŞHA tel için sabit destek ve 5)Yay ve 300 mm ve 0.508 mm çapında ŞHA tel.	44
Şekil 1.45: Beş farklı deney için ön gergi yayının ve ŞHA telin karakterizasyon sonuçları.. a) Yayının elastik özelliği, kuvvet yer değiştirme sonuçlarının doğrusal kısmında elde edilmektedir. b) ŞHA telinin başlangıç bellek gerinim değeri, gerilme-gerinim sonuçlarına göre hesaplanır.	45
Şekil 1.46: a) Monoblok tutucu konsept görüntüsü, b) Gerçek görüntüsü.	45
Şekil 1.47: Minyatür tutucu tasarımı.	46
Şekil 1.48: Tutucu operasyon hızı.	47
Şekil 1.49: ŞHA eyleyici için sıcaklık ve yer değiştirme arasındaki ilişki[35].	47
Şekil 1.50: a) Paralel tutucu, b) Açısal tutucu şematik gösterimleri.....	48
Şekil 1.51: DC motor, konektör ve vidadan oluşan doğrusal bir eyleyici.	49
Şekil 1.52: Hibrid tutucu prototipi.	49
Şekil 1.53: Tasarım prototipinin CAD modeli.....	50
Şekil 1.54: Eyleyici ağızını kapatmanın ilk evresi.....	50
Şekil 1.55: Tutma eyleminin devamlılığının ŞBA teller ile sağlandığı ikinci aşama...51	51
Şekil 1.56: Eyleyici ağızını kapatmanın son evresi.	51
Şekil 1.57: ŞHA yay kullanılarak tasarlanmış tutucu yapısı.....	51
Şekil 1.58: NiTi ince levhadan imal edilmiş a) tutucu tasarımı, b) tutucu detay çizimi.	53

Şekil 1.59: Kantilever tipinde ŞHA SEM görüntüsü.	54
Şekil 1.60: Kantilever tipi mikro eyleyicinin sıfırlama tabakası olarak SiO ₂ kullanılarak yer değiştirilmesi: a) genel yapı, b) sıfırlama katmanını yerleştirdikten sonra toplam yer değiştirme.....	54
Şekil 1.61: a) Süperelastik nitinol tüp, b) Kullanıma hazır endoskop.	55
Şekil 1.62: Bir ŞHA eyleyicinin blok diyagramı.	56
Şekil 1.63: ŞHA NiTi Sıcaklık-Direnç özellikleri.	57
Şekil 1.64: Elektrik direnç ve pozisyon geribildirimini ile kombine edilmiş bir kontrol mekanizması.	58
Şekil 1.65: Uygulanan kuvvet ve yer değiştirme arasındaki ilişki.....	59
Şekil 1.66: ŞHA eyleyicinin kuvvet algılama kabiliyeti.....	60
Şekil 1.67: ŞHA yaylar ile eylene mikro tutucu dizaynı.	61
Şekil 1.68: ŞHA yaylara uygulanan deneysel bir kontrol sistemi.	62
Şekil 1.69: Sabit bir λ altında uygulanan kuvvet ve gerinimin ölçümü.....	62
Şekil 1.70: ŞHA'nın sertlik ve direnç değişimleri.....	63
Şekil 1.71: Kuvvet algılamanın deneysel olarak doğrulanması(Kesik çizgiler: Ölçülen sonuçlar, Düz çizgiler: Hesaplanan sonuçlar).....	63
Şekil 1.72: İki farklı alaşımın şekil değişimi ve omik direnç histeresizleri (Malzeme 1 lineer ve çok dar histeresiz aralığı, Malzeme 2 Geniş histeresiz aralığı).....	64
Şekil 1.73: Kapalı devre PI Kontrol Sistemi.....	65
Şekil 1.74: Oransal Kontrol.	66
Şekil 1.75: Oransal ve Integral Kontrol.	66
Şekil 1.76: a) Adım dalga için güç izleme performansı, b) Sinüs dalga için güç izleme performansı.	67
Şekil 1.77: PI denetleyici ile boyutsal küçülme-zaman değişim diyagramı.	68
Şekil 1.78: Dört set basamaklarından oluşan PID kontrol diyagramı.....	69
Şekil 1.79: Eyleyici sistemin matematiksel blok diyagramı.	69
Şekil 1.80: a) Uyumlu Diferansiyel Eyleyicinin pozisyon kontrolü için akış diyagramı,	

b) SPI kontrol stratejisinin yapısı.....	70
Şekil 1.81: Tutucu kuvvetin kapalı çevrim kontrolünün blok diyagramı.	71
Şekil 1.82: ŞHA kontrol elektronik sürücü devresi.	72
Şekil 1.83: İstenilen tutucu kuvvet için bir adım girişi ve sadece P (Oransal) kontrolör kullanılmaktadır.	72
Şekil 1.84: Kendinden Algılayan Kontrol Sistemi verilerini elde etmek için kurgulanan deneysel düzenek.	75
Şekil 1.85: Buffer amplifikatör devresi.	76
Şekil 1.86: a) Gerinim-Voltaj histeresiz döngüsü, b) Gerinim-Direnç histeresiz döngüsü.	76
Şekil 1.87: Farklı ön gerilme kuvvetlerinde elde edilen gerinim ve kuvvet boşlukları.	77
Şekil 1.88: Sensörsüz sinyal düzenleyici devre.	78
Şekil 1.89: a) ŞHA tellerde elektriksel direnç değişimi, b) Sensör sinyali.....	79
Şekil 1.90: Bir serbestlik derecesine sahip ŞHA eyleyicinin şematik blok diyagramı.	80
Şekil 1.91: Manipülatör sistemi için model eşleşmeyi gösteren giriş ve çıkış sinyalleri, (a) sensörsüz (b) sensörlü.....	81
Şekil 1.92: Bulanık çıkarım bloğu.	83
Şekil 1.93: a) K_p , K_i ve K_d 'nin üyelik fonksiyonları, b) K_p , K_i ve K_d 'nin bulanık kontrol kuralları.	84
Şekil 1.94: Uyarlamalı Kontrol Yapısı.	84
Şekil 1.95: Çoklu izleme.....	85
Şekil 1.96: Deney sonuçları (a) sinüs dalga eğrisi, (b) kare dalga eğrisi. Sensörsüz sistemler için ŞHA tarafından üretilen karşılık gelen (c) algılama sinyali, (e) kontrol sinyali,(g) diferansiyel torku. Sensörlü sistemler için (d) algılama sinyali, (f) kontrol sinyali, (h) diferansiyel torku.....	85
Şekil 1.97: Manipülatörün frekans tepkisi (a) açık döngü, (b) kapalı döngü.	86
Şekil 1.98: Genelleştirilmiş kendinden-algılamalı kontrol şemasının blok diyagramı.	87
Şekil 1.99: Elektriksel devre kartı.....	88

Şekil 1.100: Bilye bağlantılı eyleyici sistem.....	89
Şekil 1.101: S-R eğrisi (azaltılmış iç stres altında).....	91
Şekil 1.102: a) Pozisyon-Hata değişkenleri, b) Sınırlama-Hata değişkenleri üyelik değerleri.	92
Şekil 1.103: Bulanık PID Kontrol Blok Diyagramı.....	94
Şekil 1.104: Kuvvet algılamalı antagonistik ŞHA aktüatörü.....	95
Şekil 1.105: Eyleyici Ekleme.	96
Şekil 1.106: Kayma mod kontrolü: beklenen eğri.	96
Şekil 1.107: Kayma Mod Kontrolü: ŞHA hareket stratejisi.	97
Şekil 1.108: Kayma Mod Kontrolü: Tipik eğriler.	98
Şekil 1.109: Kayma mod kontrolü: Kayma hatları deneysel seti.....	98
Şekil 1.110: $k=0.8 \text{ s}^{-1}$ değeri için deneysel sonuçlar.....	99
Şekil 1.111: $k=100 \text{ s}^{-1}$ değeri için deneysel sonuçlar.....	99
Şekil 1.112: $k=4 \text{ s}^{-1}$ değeri için deneysel sonuçlar.....	100
Şekil 1.113: Ölü bölge ile ŞBA etkinleştirme stratejisi.	100
Şekil 1.114: K parametresinin etkileri.	101
Şekil 1.115: Valf adım cevabı: deneysel (düz çizgi) ve teorik (noktalı çizgi). Ziegler Nichols yönteminde deneysel eğriyi karakterize eden geometrik parametreler de gösterilmiştir: Tepki gecikme zamanı (t_0), Artan zaman (T), Genlik (C_0).	102
Şekil 1.116: Elektronik kontrol sistemi blok diyagramı.	103
Şekil 1.117: Deneysel kurgunun diyagramı.....	104
Şekil 1.118: ŞHA tel eyleyiciyi çalıştırmak için amplifikatör devresi.	105
Şekil 1.119: Kavrama sisteminin pozisyon tepkisi.	106
Şekil 1.120: ŞHA eyleyiciye uygulanan akım ve gerilim sinyalleri.....	106
Şekil 1.121: Ölçülen ve simüle edilen çıktılar arasındaki eşleşme.....	107
Şekil 1.122: DGM sinyal jeneratörü şeması.	108
Şekil 1.123: DGM kontrollü ŞHA eyleyicili tutucunun şematik blok diyagramı.....	109
Şekil 1.124: DGM kontrollü adım eğrisi için konum izleme performansı. a)Pozisyon	

Tepkisi, b) Pozisyon Hatası, c) Kontrol Hareketi.	109
Şekil 1.125: DGM kontrolü ile üçgen yörünge için konum izleme performansı. a)Pozisyon Tepkisi, b) Pozisyon Hatası, c) Kontrol Hareketi.	110
Şekil 1.126: DGM kontrollü sinüs yörüngesi için konum izleme performansı. a)Pozisyon Tepkisi, b) Pozisyon Hatası, c) Kontrol Hareketi.	110
Şekil 1.127: Farklı adım yörüngeleri için DGM kontrol tepkisi. a)Pozisyon Tepkisi, b) Pozisyon Hatası.....	111
Şekil 1.128: ŞHA eyleyiciyi çalıştırmak için amplifikatör devresi.	112
Şekil 1.129: Akıllı tutucuların açık döngü yanıtı a) Kapalı mod tutucu, b) Açık mod tutucu.....	113
Şekil 1.130: Ölçülen ve simüle edilen çıktılar arasındaki uyuma ve uyumsuzluk. (a, c) Kapalı mod tutucu, (b, d) Açık mod tutucu.	113
Şekil 1.131: ŞHA yaylar ile harekete geçirilen eyleyici a) şematik görünüm b) gerçek görünüm.	115
Şekil 1.132: ŞHA eyleyicinin dinamik karakteristikleri.	116
Şekil 1.133: İki serbestlik derecesi (TDF) H_{∞} kontrol şeması.....	118
Şekil 1.134: Kuvvet izleme kontrol deneysel düzeneği.....	119
Şekil 1.135: Kuvvet düzenleyici kontrol tepkileri. a) simüle edilen, b) ölçülen.	119
Şekil 1.136: Adım eğrisi için izleme tepkisi. a) simüle edilen, b) ölçülen.	120
Şekil 1.137: Sinüzoidal eğri için kuvvet izleme tepkileri. a) simüle edilen, b) ölçülen.	120
Şekil 1.138: Zamanla değişen frekansa sahip sinüzoidal bir yörünge için kuvvet izleme kontrol yanıtı a) sümüle edilen, b) gerçekleşen.	121
Şekil 1.139: a) Kablosuz kontrollü ŞBA mikro eyleyici b) Çalışma prensibi.	122
Şekil 1.140: a) ŞHA tutucu tasarımı, b) İK devre tasarımının örnek düzeni.	123
Şekil 1.141: ŞHA malzemenin faz geçiş sıcaklıkları.....	124
Şekil 1.142: Kablosuz çalıştırma testleri için kurulum.....	124
Şekil 1.143: Ölçülen devre sıcaklığı ve kavrama açısının alan frekansına karşı değişimi (Yerleşik resimler, kavramanın ilgili frekanslarda uç açıklıklarını göstermektedir)..	125

Şekil 1.144: Ölçülen devre sıcaklığı ve tutucu açılma frekansı, devrenin rezonant frekansına hizalanan harici bir RF manyetik alanı ile tekrar eden uyarılarla elde edilmiştir.	126
Şekil 1.145: KNT örnek malzemelere manipülasyon (her görüntüde f_m ve T sırasıyla alan frekansı ve devre sıcaklığıdır). a) KNT malzeme örneğine yaklaşmak, b) f_m 'yi cihazın 140 MHz'lik rezonant frekansına daha yakın ayarlayarak uçları açma, c) Örnek ile temas kurmak ve f_m 'yi 150 MHz'ye kaydırarak eyleyici uçlarını kapatma, d) Örneğin kavranmış kısmını çekme, e) kavranmış örneği çekmeye devam etme, f) Tutucu tarafından kavranarak koparılmış örneğin tutmaya devam edilmesi.	127
Şekil 2.1 a) 0.508 mm çap, As: 90°C nikel titanyum tel, b) 0.381 mm çap, As: 70°C nikel titanyum tel, c) 0.2032 mm çap, As: 70°C nikel titanyum tel, d) 0.1524 mm çap, As: 70°C nikel titanyum tel, e) 0.8x0.16 mm düz nikel titanyum tel, f) Vücut geçiş sıcaklığına sahip nikel titanyum yaylar.	129
Şekil 2.2: Tutucu çizimleri ve çalışma prensipleri. a) Tutucu 1, b) Tutucu 2, c) Tutucu 3, d) Tutucu 4, e) Tutucu 5, f) Tutucu 6, g) Tutucu 7, h) Tutucu 8.	130
Şekil 2.3: Tutucu görselleri. a) Tutucu 1, b) Tutucu 2, c) Tutucu 3, d) Tutucu 4, e) Tutucu 5, f) Tutucu 6, g) Tutucu 7, h) Tutucu 8.	133
Şekil 2.4: Şekil hafızalı alaşım teller ile kontrol edilen iki serbestlik derecesine sahip kol tasarımı.	135
Şekil 2.5: Mikro tutucunun kontrolüne ait blok diyagramı.	136
Şekil 2.6: Kablosuz robot kolun kontrolüne ait blok diyagramı.	137
Şekil 2.7: Görüntü İşleme tabanlı tutucu ağız açıklığı ölçümü a) boyun spesifikasyonu, b) boyun ile kalibrasyon, c) çene spesifikasyonu, d) açık pozisyon için sol-sağ çene sınır izleme, e) sol çene sınır izleme, f) sağ çene sınır izleme - kapalı tutucu pozisyonu için.	138
Şekil 2.8: MATLAB Görüntü İşleme ile tutucu uç ağız açıklığı ölçümü.	138
Şekil 2.9: a-e) Robot kol boynunun eksen ile yaptığı açının MATLAB Görüntü İşleme ile ölçümü.	139
Şekil 2.10: a) Obje başlangıç pozisyonu ve öteleme, dönme sonrası konumu, b) Referans ve dönmüş obje kontur noktalarının eşleştirilmesi.	140
Şekil 2.11: Referans ve dönmüş obje kontur noktalarının eşleştirilmesi.	144

Şekil 2.12: Kol kontur noktalarının eşleştirilmesi.	144
Şekil 2.13: Kontur nokta eşleştirme algoritması.....	145
Şekil 2.14: MatLab Görüntü İşleme modülü algoritmasından sonra kolun açılmal hareketlerini gösteren grafik	145
Şekil 2.15: Kuvvete Duyarlı Sensöre ait (KDS) blok diyagramı.....	146
Şekil 2.16: Kuvvete Duyarlı Sensöre ile yapılan çalışmanın ait devre şematiği.	146
Şekil 3.1: Tutucu 1'e ait 9, 12 ve 15V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.	148
Şekil 3.2: Tutucu 2'e ait 9, 12 ve 15V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.	150
Şekil 3.3: Tutucu 3'e ait 9, 12 ve 15V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.	151
Şekil 3.4: Tutucu 4'e ait 12 ve 15V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.	153
Şekil 3.5: Tutucu 5'e ait 6, 9 ve 12V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.	154
Şekil 3.6: Tutucu 6'ya ait 6, 9, ve 12V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.	156
Şekil 3.7: Tutucu 7'ye ait 9 ve 12V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.	158
Şekil 3.8: Tutucu 8'e ait 12, ve 15V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.	159
Şekil 3.9: Tutucu 5'e ait 6V Besleme gerilimi ve farklı frekans sinyalleri altında operasyonel parametreler.	161
Şekil 3.10: Tutucu 5'e ait 6V Besleme gerilimi ve artan frekans sinyallerine karşın sistem ortalama akım ve gerilim değişimleri.....	165
Şekil 3.11: Tutucu 5'e ait 9V Besleme gerilimi ve farklı frekans sinyalleri altında operasyonel parametreler.	166
Şekil 3.12: Tutucu 5'e ait 9V Besleme gerilimi ve artan frekans sinyallerine karşın sistem ortalama akım ve gerilim değişimleri.....	168

Şekil 3.13: Tutucu 5'e ait 12V Besleme gerilimi ve farklı frekans sinyalleri altında operasyonel parametreler.....	169
Şekil 3.14: Tutucu 5'e ait 12V Besleme gerilimi ve artan frekans sinyallerine karşın sistem ortalama akım ve gerilim değişimleri.....	171
Şekil 4.1: Tutucu 2'ye ait basma kuvveti ölçüm görseli.....	173
Şekil 4.2: Tutucu 3 uçlarının Kuvvete Duyarlı Sensor (KDS) yardımı ile basma kuvveti ölçümü.....	173
Şekil 4.3: Besleme Voltajı, DGM Görev Döngü Oranlarında Tutucu 3 ve 4'ün Basma Kuvveti Değişimi.....	175
Şekil 5.1: Tutucu 1'in tutma performansı. a) nesne tutma (0.2104 gr), b) nesne kaldırma (0.526 gr), aorta damarının tutulması (0.25gr).	177
Şekil 5.2: Tutucu 2 tutma- kaldırma performansı : a) nesne kavrama(0.2104 g), b) nesne kaldırma (0.3156 g), c) 1 sent madeni para kaldırma (2.3 g), d) Aorta veni tutma (0.250 g).	177
Şekil 5.3: Tutucu 3 kavrama, tutuma, kaldırma ve serbest bırakma eyleminin gerçekleştirildiği 2.30 gr ağırlığındaki madeni para.	178
Şekil 5.4: Tutucu 4'e ait tutma ve kavrama görüntüleri. a-b) 2.3gr metalik para, c) uç uca eklenmiş silindirik nesneler.....	178
Şekil 5.5: Tutucu 6'nın kaldırma, tutma performansı: a) Ağırlıkları farklı nesneleri kaldırma (1) 0.1052 gr , (2) 0.2105 gr , (3) 0.75 gr, b) Tavuk aort venini tutma (0.25 gr).	179
Şekil 5.6: Tutucu 7'nin tutma, kavrama, kaldırma performansı a) Metal parayı tutma (2.3gr), b) Metal parayı kaldırma (2.3gr), c) Tavuk aorta venini kavrama (0.250 gr).	179
Şekil 5.7: Tutucu 8'in tutma kaldırma performansı (3.92gr).....	180

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1 :Çeşitli çaplarda Flexinol tellere ait elektriksel veriler, itme güçleri, soğuma zamanları.	8
Tablo 1.2: Tutuculara entegre edilmiş çeşitli boyutlarda ŞHA teller için tepki süreleri. 13	
Tablo 1.3 : Tutucu uçları.	28
Tablo 1.4: Çeşitli çaplarda teller için reaksiyon zamanı.	37
Tablo 1.5: Tasarımda kullanılan ŞHA malzemenin teknik özellikleri.	52
Tablo 1.6: Tutucu bileşenlerinde kullanılan malzemeler.	52
Tablo 1.7: Flexinol telin özellikleri.	80
Tablo 1.8: PID ayar parametreleri.	84
Tablo 1.9: Kontrol Ayar Parametreleri.....	87
Tablo 1.10: Bulanık PID kontrol kural seti.	93
Tablo 1.11: ŞHA tel özellikleri.	104
Tablo 1.12: Gergi yayının özellikleri.	105
Tablo 1.13: Tutucu yapısının boyutları.	124
Tablo 2.1: Tutucu tasarım detayları.....	131
Tablo 3.1: Artan DGM görev döngü oranlarında tutucu kol eksen parametrelerinin değişimi.	160
Tablo 4.1: Artan DGM Görev Döngüsünde Tutucu 3 ve 4'ün basma kuvveti değişimi	175
Tablo 4.2: Tutucu 5'in basma kuvveti.....	176

1. Giriş

Şekil Hafızalı Alaşımlar (SHA), plastik olarak deforme edilebilen ve daha sonra özel bir ısı rejimleri uygulanarak özgün geometrilerini yeniden kazanmanın karakteristik bir davranışını sergileyen metalik malzemelerdir. Basit yapıları, sessiz çalışmaları, yüksek güç / ağırlık oranı (GAO), yüksek korozyon direnci, biyouyumluluk, düşük maliyetli özellikleri nedeniyle, iletişim, elektronik, tıp, optik, biyoteknoloji gibi çeşitli alanlarda kullanımları yaygınlaşmıştır[1]. Bununla birlikte; düşük enerji verimliliği, ısıtma-soğutma durumları arasındaki dar bant aralığı, çoklu döngülerden sonra doğrusal olmayan davranışlar, düşük reaksiyon oranları ise bu malzemelerin dezavantajları olarak sıralanabilir[2, 3]. Bu dezavantajların bir kısmı bazen özel mekanik tasarım ve kontrol stratejileri ile hafifletilebilmektedir[4].

Şekil Hafızalı Alaşımları ile elde edilen hareket veya eyleme işlemleri, termal değişikliklerle birlikte meydana gelen faz dönüşümünün bir sonucu olan hacimsel küçülmedir. Bu hacimsel değişimi elde etmenin en klasik yöntemi Joule ısıtması olarak adlandırılan ısı işlem türüdür[5]. Elektrik akımının akış yoğunluğu, hacimsel büzülme sürecini etkileyen önemli faktördür. Teorik olarak, bu geri dönüşümlü büzülme miktarının % 8'lik bir değer olduğu söylenirken, pratikte % 4-5 arasında gerçekleşmektedir. Eyleyici gibi sistemler için kullanılan şekil hafızalı tellerin uzunluğunu ve kesitini artırarak yer değiştirme ve yük taşıma kapasitesini artırmak için farklı stratejiler vardır. Tel çapındaki artış, faz dönüşümü için gerekli olan ısıtma ve soğutma süresini önemli ölçüde etkilemektedir. Soğutma süresi, sistem performansını etkiler ve döngüsel periyotlarda artışa neden olmaktadır. Soğutma süresinin kısaltmak için malzeme yüzeyinin arttırılması, doğal soğuma haricinde ek bir hava soğutma sistemi veya ısı yayma gibi mekanizmalar kullanmak mümkündür[6]. Faz dönüşümlerini dolayısı ile şekil hafıza hareketlerini elde etmek için gerekli termal döngülerin üretilmesinde malzemedan direk elektrik akımı geçirilirse; malzemenin tane yada tane sınırlarında çekirdekleşme, çatlak büyümesi ve kristal kafes içinde yeni kırıklar oluşarak şekil hafızalı malzemenin yorgunluk direnci zayıflamaktadır. Bu hem yeni malzeme kusurlarının oluşmasına hem de geri dönüşümlü şekil değiştirme çevrim sayısının ve miktarının azalmasına yol açmaktadır[7].

Genel olarak tutucular yada kavrayıcılar, kavrayabilecekleri nesnelerin boyutlarına bağlı olarak mini, mikro veya nano tutucular olarak sınıflandırılmaktadır. Tutucu uygulamalarında

elektromanyetik, piezoelektrik, elektrostatik, manyetostriktif malzeme bazlı aktivasyonun yanı sıra şekil hafızalı alaşımlar ile bu işlemleri gerçekleştirmek mümkündür. Santimetre boyutlarında imal edilmiş fakat nano uygulamalarda kullanılabilen ağız yapısına sahip tutucular da vardır burada en önemli ve hassasiyeti belirleyen faktör ağız yapısı ve açıklığıdır. Çenelerin hareketine bağlı olarak, kavrama-tutma işlemi paralel veya açısall bir şekilde gerçekleşmektedir. Özellikle nano ve mikro uygulamalarda çenelerin ucundaki olası küçük bir dönme hareketi nedeniyle bu taşıma görevini kolaylaştıran her zaman basit bir kavrama hareketi gerçekleştirmek mümkün olmayabilmektedir. Bu sorun araştırmacıları çeşitli farklı çözümler geliştirmeye motive etmiştir. Örneğin tutulacak nesnenin değişkenlerine ve yapılacak tutma-kavrama işinin niteliğine bağlı olarak bu tutucular başlangıç ağızı açık yada kapalı olarak dizayn edilebilmektedir. Bununla beraber tutma işleminin başlangıç ağız açıklık pozisyonu kapalı olan bir tutucu ile yapılması ağızı açmak için enerji harcanması tutma işleminin ise mekanik kuvvetler ile doğal olarak yapılmasından dolayı enerji tasarrufu sağlamaktadır. Burada dezavantaj ise tutma parametrelerinde herhangi bir kontrolün yapılamamasıdır. Oysa başlangıç ağız pozisyonu kapalı olan ve ŞHA ile ağız açıklığı ve tutma operasyonu gerçekleştirilen tutucuda ağız açıklık, miktarından tutma-kavrama-basma kuvvetlerine kadar birçok değişkeni kontrol etmek mümkündür[8]. Fakat bu tür konfigürasyonlardaki dezavantaj ise tutma işlemin süresi boyunca sürekli enerjiye ihtiyaç duyulmasıdır. Bu da uzun çevrimlerde zamanla tutucunun tutma özelliklerinde kayıplara neden olmaktadır.

Tutucu açma-kapama mekanizmaları için çeşitli makul tasarım alternatifleri vardır. Hatta neredeyse kullanılan malzeme kombinasyonları ile bu durum sınırsızdır. Tasarımı oluşturan malzeme seçiminde ŞHA çiftleri (Tel-tel, tel-yay, yay-şerit vb...) kullanılabileceği gibi tutucu ağızlarını açmak için şekil hafızalı malzemeler kapamak için ise çelik yaylar kullanılabilmektedir. Hem tutucu ağızlarında hem de tutucu ağızı açma ve kapama mekanizmalarında kullanılacak malzemelerin çeşitliliğine ek olarak tutucu ağızların her ikisinin hareketli yada bir tanesinin sabit olması gibi durumlar söz konusudur. Eğer ki tutulacak nesnenin niteliği bunu gerektiriyor ve tutma operasyonlarını kolaylaştırıyor ise bu seçenek tasarımcılar tarafından göz ardı edilmemektedir[9]. Tez çalışmamızda bu tasarım ve malzeme çeşitliliğine yer verilmeye çalışılmıştır.

Tutma işlevi bit tutucu için en önemli parametre gibi gözükse de aslında tutma kadar önemli bir konu da tutulan yada kavranan nesnenin bırakılmasıdır. Serbest bırakma görevi için iki önemli strateji vardır. Pasif salım yönteminde, akım-nesne ve nesne-alt-yüzey arayüz bölgeleri

arasındaki yapışma kuvvetlerini kontrol ederek kavrama ve bırakma işlemleri gerçekleştirilebilmektedir[10]. Bir nesne tutulup kavrandığında çene-nesne arasında meydana gelen sürtünme kuvvetleri, nesne alt-yüzey etkileşiminden nispeten daha yüksek hale geldiğinde kavrama görevi ortaya çıkar. Bununla birlikte, bırakma prosedürü tamamen ters bir mekanizmada meydana gelir. Pasif salım yada bırakma prosedürü sırasında iki yüzey arasında gerilme kuvvetinin azaltılması için bazı etkili yöntemler söz konusudur. Bunlar; çeneler ve malzeme arasında potansiyel olarak daha az yapışkan arayüz malzemesi kullanmak, kavrama alanını azaltmak, daha az temas alanı olan pürüzlü yüzeyler kullanmak, yüzey deformasyonunu önlemek için sert kaplama kullanmak olabilmektedir. Öte yandan, aktif salım yada bırakma işlemi sırasında, nesneye bir elektrik alanı, titreşim veya vakum tipi dış etkilere maruz bırakılarak bu işlem tamamlanmaktadır[11, 12]. Yukarıda bahsedilen tutucular dışında sadece ŞHA levha yada malzemelerden çeşitli kesme yada üretim metotları ile dizayn edilmiş ve literatürde monolitik gövdeli tutucular olarak anılan tutucular söz konusudur. Zaten birim hacim başına büyük miktarda çıktı işi sağlayan bu malzemelerle yapılan tutucular yine kendileri gibi mikro ölçekli hibrid yapılarla birleştiğinde gelişmiş işlevsellik sağlamaktadır[13, 14]. Ayrıca, daha küçük boyutları, minimal ve karmaşık invaziv cerrahi uygulamaları için mikro tutucu tasarımlarına olanak tanımaktadır[15]. ŞHA özellikleri sıcaklık, gerilim-gerinim ve elektriksel direnç parametreleri ile açıklanabilmektedir. Aktüatör, tutucu veya termoelektrik motor tipi tasarımların [16] geliştirilmesi için harici bir ısı kaynağı sayesinde kontrol edilen bir ŞHA'nın faz dönüşümü ve dolayısıyla deformasyonu ve de tersinir geri dönüşümü literatürde nadiren karşılaşılmıştır. Elektrik akımının kullanımına bağlı olarak, ŞHA mekanizmalarını kontrol etmek için açık [17] veya kapalı geri besleme sistemleri [18] kullanılmaktadır. Doğrusal bir kontrolör, ŞHA'nın doğrusal olmayan ve histerezis davranışıyla orta derecede uyumlu çalışmaktadır [19]. Model tabanlı kontrolör, konveksiyon katsayısı, özgül ısı ve ilgili parametrelerin tanımlanmasını gerektirir. Modelleme belirsizlikleri ve parametrik sadeleştirmeler, kayma modlu uyarlamalı kontrol mimarisinin kullanımını motive etmiştir [20]. Klasik kapalı devre kontrol sistemleri, yer değiştirme ve uygulanan kuvvet gibi harici geri besleme verilerini kullanırken, son zamanlarda operasyonel hedeflere ulaşmak ve geri bildirim kontrolleri için sıcaklık ve elektrik direnci [21] gibi dahili parametreleri kullanmaktadır. Bununla birlikte, termal geri besleme ile yapılan kontrollerde ŞHA malzemeyi izole etme ihtiyacı, ŞHA sıcaklığının doğru ölçülmesindeki zorluk [22] ve sıcaklık değişimlerine bağlı olarak değişen gerilim-gerinim ve histerezis gibi iç durum değişikliklerini tahmin etmedeki zorluklar nedeni ile pratik değildir [23].

Çalışmamızda, tasarlanmış tutucu ağız mekanizmaların konum ve hız yanıtını değerlendirmek için pratik ve hızlı bir yöntem olarak oransal açık döngü kontrolü tercih edilmiştir[24]. Sekiz farklı mikro tutucu farklı besleme voltajına, frekans seviyelerine ve Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) görev döngü oranları ayarlanabilen bir sinyal üretici tarafından çalıştırılmıştır. Tutucu uçlarının açma-kapama döngülerinin video görüntülerinin çekiminden sonra, tutucu uçların çalışma esnasındaki hareket süreleri, maksimum ve ortalama hızları, MATLAB Görüntü İşleme (Gİ) araç kutusu kullanılarak sayısallaştırılmış video görüntülerinin art arda işlenmesi ile tespit edilmiştir. Ek olarak tutucu uçlarının tutma ve kavrama esnasında ürettikleri kuvvet basınç sensörü kullanılarak ölçülmüştür. Ayrıca tutucu uçlarının çeşitli ağırlık ve geometrilerdeki nesneleri tutma-kavrama-bırakma kabiliyetleri değerlendirilmiştir. Aşağı bölümlerde detaylı bahsedilecek bu tutucularda dördü başlangıç ağız pozisyonu açık, diğerleri kapalı olarak tasarlanmıştır. Ayrıca hem tutma mekanizmaları hem de tutucunun tasarımı esnasında ŞHA tel, yay, levha, şerit, Süper Elastik (SE) tel, yay, şerit ve çelik yay gibi malzemelerin kombinasyonları kullanılmıştır. Bu tutucu uçların takılabileceği 2 serbestlik derecesine sahip bir soft robotik kol tasarlanmıştır. Bu kolun hareketleri süperelastik nitinol teller ile sağlanmıştır ve kablosuz bir iletişim protokolü kullanılarak kontrol edilmiştir. Bu kolun yaptığı açısal hareketler aynen uçlarda olduğu gibi MATLAB Gİ (Görüntü İşleme) araç kutusu kullanılarak hesaplanmıştır. Kolun hareket kabiliyetini geliştirmek için yazılımdan görev döngü oranları arttırılarak dört ekseninde yaptığı açı değişimleri hesaplanmıştır.

1.1 Şekil Hafızalı Alaşımlar

Şekil Hafızalı Alaşımlar (ŞBA), deformasyona maruz kaldıktan sonra uygun termal işlemler ile orijinal şeklini veya boyutunu geri kazanmanın ilginç özelliğine sahip metalik malzemelerdir. "Bellek Etkisi" olarak bilinen bu özellik, pek çok uygulamada çok yararlı olduğunu göstermiştir. Bellek etkisi malzemenin kristal yapısındaki değişiklikler ile açıklanmaktadır. Düşük sıcaklıkta alaşım Cisim Merkezli Tetragonal (CMT) kristal yapıya sahip martenzit fazındadır. Bu fazda akma sınırı çok düşüktür. Bu durum malzemeye yük uygulanması durumunda kolayca deforme olmasına sebep olan mekanik plastik davranışa sebep olmaktadır. Malzeme yeterli bir sıcaklığa ısıtıldığında faz yapısı Yüzey Merkezli Kübik yapıya (YMK) sahip östenit faza dönüşmektedir. Bu yüksek sıcaklık fazı yüksek akma sınırına sahip bir karaktere sahiptir. Bu faz malzemenin orijinal şekline dönmesini sağlayan fazdır. Isıtma işlemi genellikle Joule etkisi gibi hızlı metotlar ile sağlansa da dinamik performanslar nispeten ısı taşınım ya da iletim gibi

daha yavaş gerçekleşen soğuma evresinde gerçekleşmektedir[2, 6, 25]. Basit yapıları, sessiz çalışmaları, yüksek güç/ağırlık oranı (GAO), yüksek korozyon dayanımı, bio-uyumlulukları, ucuz olmaları, kesip kullanılabilme dışında ek işlemler gerektirmemeleri ve karmaşık sistemleri basitleştirmeleri sebebiyle iletişim endüstrisi, elektronik, tıp, optik, bio-teknoloji gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bununla birlikte düşük enerji verimliliği, ısıtma soğutma arasındaki küçük bant genişliği, tekrarlanan çevrimlerden sonra operasyon performansında lineer olmayan davranışlar, düşük tepki oranları bu malzemenin dezavantajları arasındadır[3, 26].

Yukarıda bahsedilen martenzitten östenite dönüşüm tersinir bir dönüşümdür. Dönüşüm martenzitten (ξ) östenite 1 (tamamen martensit) ile 0 (tamamen östenit) arasında değişen hacimsel bir oranla değişmektedir. Chenglin ve Kai, ŞHA modellemesinde martenzit hacim oranının sıcaklık (T) ve gerilim (σ) ile bağıntılı olduğu kosinüs modelini benimsemişlerdir. Bu modelde martenzitten östenite değişim Denklem 1’de verilen bağıntı ile tanımlanmaktadır.

$$\xi(\sigma, t) = \frac{1}{2} \left(\cos \left[a^M (T - M_f^0) - \frac{a^M}{c^M} \sigma \right] + 1 \right) \quad \text{Denklem 1}$$

Östenitten martenzite olan tersinir dönüşüm ise Denklem 2’de verilen bağıntı ile ifade edilmektedir.

$$\xi(\sigma, t) = \frac{1}{2} \left(\cos \left[a^A (T - A_s^0) - \frac{a^A}{c^A} \sigma \right] + 1 \right) \quad \text{Denklem 2}$$

Sabitler c^A ve c^M ’nin gerilim ve ŞHA geçiş sıcaklıkları arasında doğrusal bir ilişkisi vardır. Oysa a^A ve a^M hacim oranının dönüşümün sonunda 0 veya 1 olmasını sağlayan model sabitlerini temsil etmektedir. İlerleyen konularda anlatılacağı gibi uygun bir besleme ile ısıtıldıktan sonra ŞHA eyleyicinin sıcaklığı kademeli olarak artacaktır. ŞHA malzeme özellikleri martensit hacim oranı ile değiştiğinden (karışımlar kuralı) dolayı eyleyici tarafından üretilen tahrik kuvveti ŞHA’nın sıcaklık ve gerilme durumuna göre değişmektedir. Karışımlar teorisini kullanarak, ŞHA’nın Young modülünü yaklaşık olarak Denklem 3’deki gibi tahmin edebiliriz.

$$E^a = \xi E^M + (1 - \xi) E^A \quad \text{Denklem 3}$$

Burada; E^M martensit, E^A östenit fazındaki ŞHA’nın Young modülüdür. Martensit ve östenit faz arasındaki değer farkı az olduğundan dolayı termal genleşme katsayısı gibi diğer malzeme özelliklerinde dönüşüm esnasında değişkenleri tahmin etmek için Denklem 4’deki ortalama değerler kullanılabilir.

$$\alpha = (\alpha^A + \alpha^M)/2$$

Denklem 4

Burada, α^A ve α^M östenit ve martensit fazındaki termal genleşme katsayılarıdır. Malzeme özelliklerinin tanımı ile ŞBA'nın termo-mekanik tepkisi temel bir kanun ve akış kuralı ile açıklanmaktadır.

$$\sigma = E^a \varepsilon^e = E^a (\varepsilon - \varepsilon^t - \alpha(T - T_0))$$

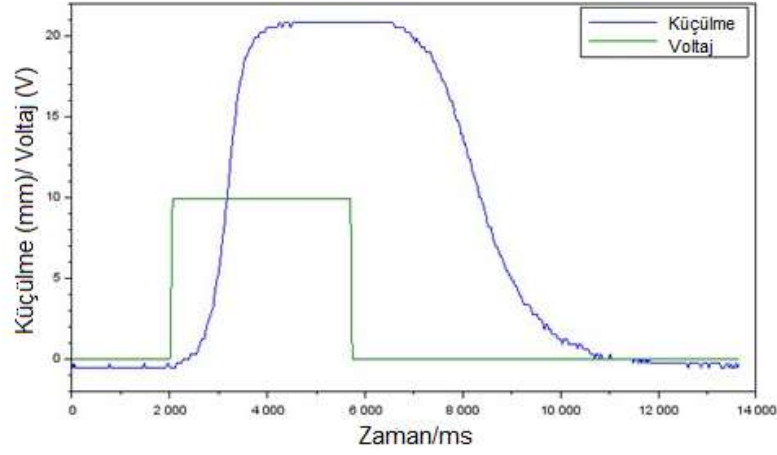
Denklem 5

$$\varepsilon^t = \Lambda \dot{\xi}$$

Denklem 6

1.2 ŞHA Nitinol Tel Karakteristiği

ŞHA avantaj ve dezavantajlarına yukarıda kısaca değinmiştik. Bunun dışında kesit alanı 1 mm² olan ve bir metre uzunluğunda bir ŞHA Nitinol tel 20 kg'lık bir yükü birkaç santimetre kaldırma potansiyeline sahiptir. Bu neredeyse kendi ağırlığının 3000 katıdır. Dezavantaj ise % 4'lük düşük küçülme miktarıdır. Yeterli güç üretmek ve eyleyici hareket ile daha fazla yer değiştirme elde etmek için iki farklı yaklaşım vardır: ilk olarak daha büyük çaplı daha kısa bir tel kullanmaktır. Ortaya çıkan küçük yer değiştirme bir manivela kolu ile çarpılır. İkinci varyant bunun yerine uzun bir tel kullanmaktır ve sonuç olarak bu daha büyük yer değiştirme miktarıdır. Telin çapı ısıtılması ve soğutulması için gereken süreyi büyük ölçüde etkiler. Tel çapında artış çevrim süresinin uzamasına neden olmaktadır. Telin ısıtılması ya bir ısıtma elemanı ya da bir elektrik akımı ile yapılabilir. Uygulamada Joule ısıtması en uygun ısıtma olduğunu kanıtlanmıştır. Isıtma süresi ve bundan dolayı kontraksiyon (küçülme) süresi, kuvvetli olarak akımın miktarına bağlıdır. Bununla birlikte soğutma hızı en çok sistem performansını belirlemektedir. Ancak bunu azaltmak ve kontrol etmek kolay değildir. Soğutma hızı süresini kısaltmak için maddenin yüzeyini arttırmak, hava ile soğutmak veya ısı dağıtma malzemesi kullanmak çözüm olabilmektedir. İyi bir eyleyici sisteminin kısa bir soğutma ve ısıtma fazına sahip olması gerekmektedir. Şekil 1.1'deki diyagram 50 cm uzunluğunda ve 0.25 mm kalınlığındaki bir telin kısılma ve genleşme sürecini zamanın bir fonksiyonu olarak göstermektedir.



Şekil 1.1: Küçülme ve genleşmenin zamana ve voltaja bağlı diyagramı.

Çevrimsel bir işlem için, telin orijinal uzunluğuna getirilmesi için bir geri yükleme kuvveti gereklidir. Geri yükleme yöntemi için bir yay, karşı ağırlık veya başka bir ŞHA teli gereklidir. Bir yay veya ağırlığın kalıcı etkisi çalıştırma kuvvetini yaklaşık % 60 oranında azaltır. Buna ek olarak; bir yer değiştirme uzunluğunda % 1'lik bir düşüşe neden olmaktadır. Bununla birlikte bir sisteme entegrasyonu kolaylığı nedeniyle, yaylar sıklıkla kullanılmaktadır. Agonist-Antagonist sistemi ise birbirinden bağımsız olarak kontrol edilen iki karşı etkili ŞHA telinden oluşmaktadır. Yer değiştirme hareketlerini iletmek ya da saptırmak amacıyla kullanılan makaralar eğer tel çapının 50 katı olursa ŞHA telin çevrimsel ömrünün azalmadığı bildirilmiştir[2].

An ve arkadaşları NiTi şekil bellek alaşımlarının doğrudan elektrik akımı ile tetiklenmesindeki boyut etkisini araştırılmıştır. Bu boyut etkisini farklı konveksiyon ısı katsayısına ait ortamlarda denemişlerdir. Sabit akımlı durumlarda, 10 μm 'lik bir çapın operasyon akımı, güç ve hacimsel güç için kritik bir boyut olduğunu bildirmişlerdir. Logaritmik ölçekte, 10 μm 'lik tel çapları üzerinde tel çapı (d) -güç (P) ve tel çapına (d) - hacimsel güç (P/V) eğrileri tüm konveksiyon ısı transfer katsayısı (h) için sabit olduğunu, bununla birlikte 10 μm 'lik tel çaplarının altında tel çapı(d)-güç (P) ve tel çapına (d)-hacimsel güç(P/V) eğrileri konveksiyon ısı transfer katsayısının (h) artmasıyla arttığını bildirmişlerdir. Öte yandan, giriş akımının bir sinüs dalga formu izlediği döngüsel işlemlerde, 1 Hz'lik çalışma frekansına 3 μm 'lik tel çaplarının altında ulaşabildiklerini belirtmişlerdir[27].

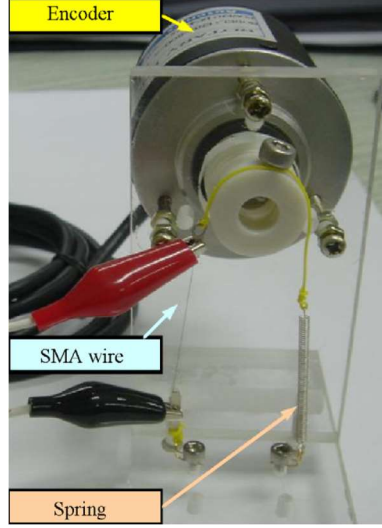
'Flexinol®' ya da 'Muscle Wire' ticari ismi ile anılan bu nitinol teller 37 μm 'den 0.375 mm çapına kadar çeşitli ebatlarda temin edilmesi mümkündür. Bu teller üzerinden direk akım geçirilerek dirençsel ısıtma yolu ile aktif edilebilirler. Tel çapına bağlı olarak büyük kesitli teller

daha yüksek kuvvetler üretmektedirler fakat bunun için doğal olarak daha yüksek akımlarda Joule ısıtmasına gereksinim duymaktadırlar. Bu durum ise ısıtma ve soğuma arasındaki çevrimi uzatacağı için tepki verme zamanını uzatmaktadır. Diğer bir ısı ile alakalı durum ise bu tellerin 70°C ve 90°C olan geçiş sıcaklıklarıdır. Eyleyici hareketleri elde etmek için nispeten düşük geçiş sıcaklığına sahip teller kullanmak enerji tüketimini sınırlayacaktır fakat aynı çapta iki tel için soğuma için gerekli zaman yüksek geçiş sıcaklığına sahip olan telde daha hızlı olacaktır. Bu hususta dikkat edilmesi gereken en önemli husus telleri aşırı ısılara maruz bırakmamaktır. Bu durum tellerin önceden eğitilmiş karakteristiklerini bozacaktır. se

Tablo 1.1 :Çeşitli çaplarda Flexinol tellere ait elektriksel veriler, itme güçleri, soğuma zamanları.

Tel Çapı (mm)	Elektriksel Direnç (Ohm/Metre)	İtme Gücü (Gr)	Soğuma Deformasyon Gücü (Gr)	1 Sn'de Küçülme İçin Ortalama Akım (mA)	Soğuma Zamanı 70°C "LT" Tel (Sn)	Soğuma Zamanı 90°C "HT" Tel (Sn)
0.025	1425	8.9	3.6	45	0.18	0.15
0.038	890	20	8	55	0.24	0.20
0.050	500	36	14	85	0.4	0.3
0.076	232	80	32	150	0.8	0.7
0.10	126	143	57	200	1.1	0.9
0.13	75	223	89	320	1.6	1.4
0.15	55	321	128	410	2.0	1.7
0.20	29	570	228	660	3.2	2.7
0.25	18.5	891	356	1050	5.4	4.5
0.31	12.2	1280	512	1500	8.1	6.8
0.38	8.3	2004	802	2250	10.5	8.8
0.51	4.3	3560	1424	4000	16.8	14.0

Kyung ve arkadaşları Mendotronics Inc. firmasından temin ettikleri 100 µm çapındaki Flexinol® 100 LT nitinol tel ile tasarladıkları tutucu ağız kontrol etmişlerdir. Kullandıkları nitinol telin ısıtma ve soğutma durumlarında gösterdikleri değişimi araştırmak amacıyla Şekil 2.2'de görülen bir enkoder ve 27N/m sertliğe sahip bir yay kullanmışlardır.

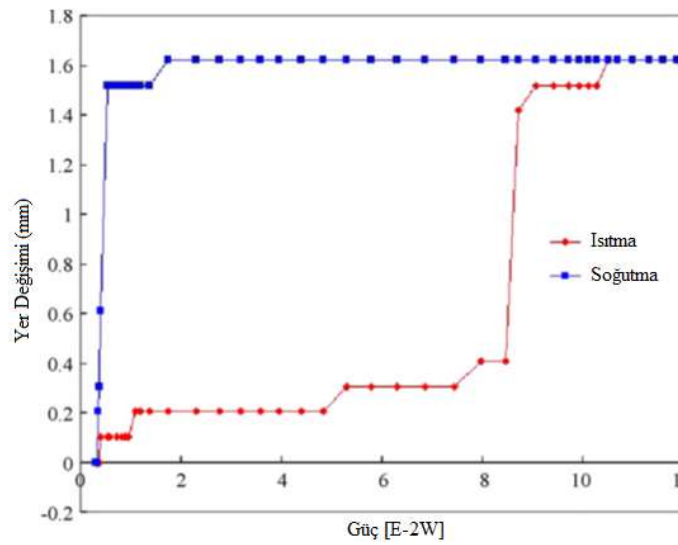


Şekil 1.2: ŞHA Nitinol telin karakteristiği hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla kullanılan test ekipmanı

Tele enerji verip, telin ısınması ile enkoder dairesel bir yer değiştirme yapmış, enerjinin kesilmesi ile tel orijinal boyutuna geri dönmüş ve enkoder da ters yönde dönüş yapmıştır. Buradaki nitinol telin Δl uzunluk değişimini aşağıdaki eşitliği kullanarak hesaplamışlardır.

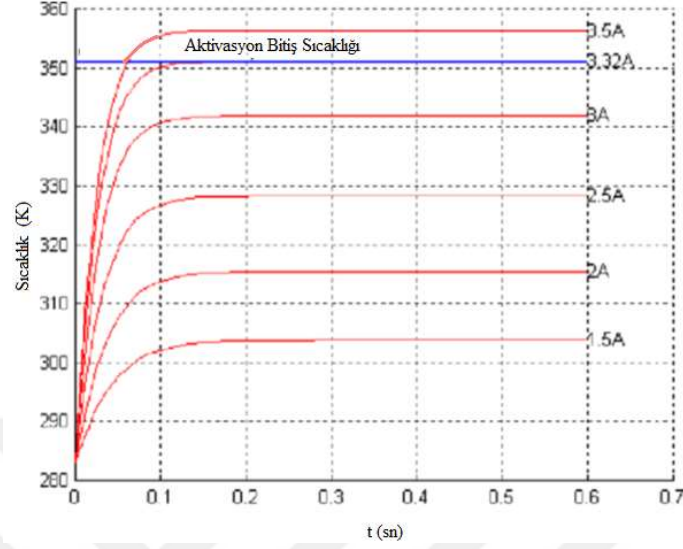
$$\Delta l = r0 = \frac{\pi D}{600} \times \text{enkoder devir sayısı} \quad \text{Denklem 7}$$

Burada D enkoderın dönme çapı ve 600 rakamı ise enkoderın her dönüş için ürettiği atım sayısıdır. Testte kullanılan telin uzunluğu 34 mm ve elektriksel direnci $6.4 \, \Omega$ 'dur. Test sonucunda elde edilen ısıtma ve soğutma esnasında elde edilen boyutsal şekil değişiminin histeresiz eğrisi Şekil 1.3'de görülmektedir[26].



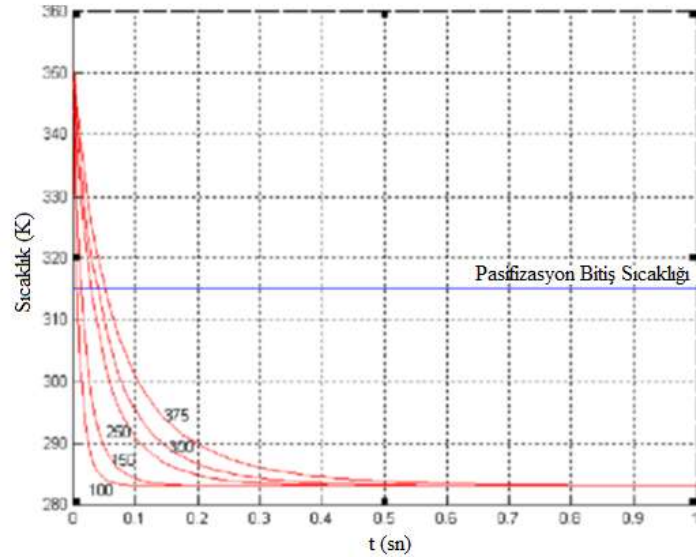
Şekil 1.3: ŞHA Nitinol telin boyutsal değişim karakteristiği.

Suleman ve arkadaşı ŞHA Flexinol® teller ile yaptıkları simülasyon çalışmasında su içinde 250 μm çapındaki teli geçiş sıcaklığına çıkartmak için çeşitli akım değerlerini çalışmışlardır. Şekil 1.4’de bu değişkenlere ait eğriler görülmektedir.



Şekil 1.4: 250 μm çapındaki tel için su altında çeşitli akım değerlerinde ısıtma eğrileri.

Şekil 1.5’de aynı çalışmaya ait su altında çeşitli çaplarda Flexinol® tellerin soğuma zamanlarına ait çalışma görülmektedir[3].

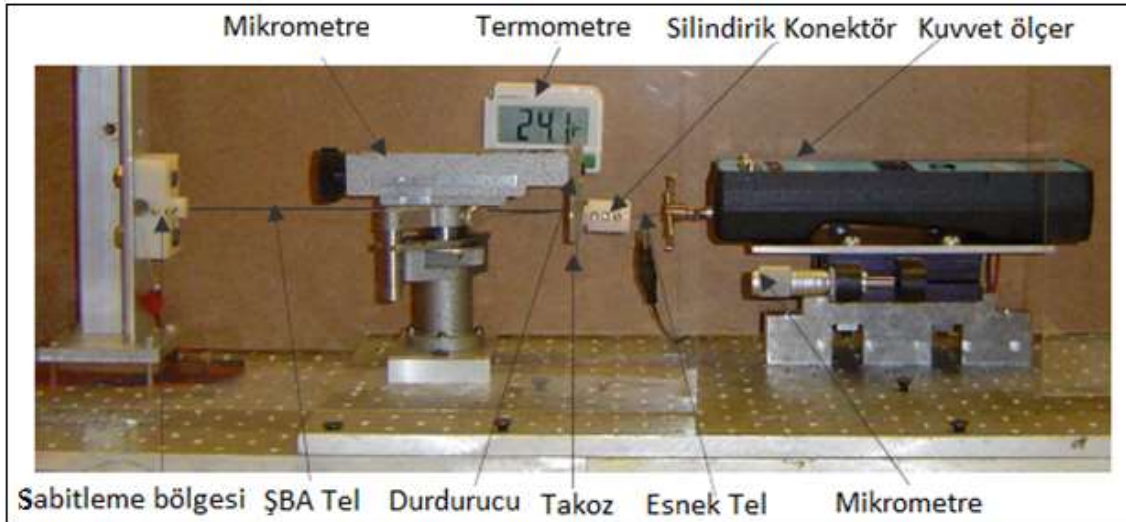


Şekil 1.5: 100, 150, 250, 300, 375 μm çaplarındaki Flexinol® tellerin su altında soğuma eğrileri.

Ruth ve arkadaşları direnç geri besleme ile kontrol edecekleri bir sistem için ŞHA bir tel ve sürekli iki yönlü kontrol eylemi gerçekleştirebilmek için antagonistik olarak diğer bir ŞHA tel

kullanmışlardır. Uygulama için yüksek elektrik iletkenliği sağlayan ve ticari olarak Flexinol® diye anılan 0.010 cm çaplı teli seçmişlerdir. Çok küçük çapta ŞHA tel seçmelerinin nedeni kolay ısı iletimidir. Joule ısıtma etkisi, ŞHA'nın aktivasyonu için yaygın olarak kullanılır, çünkü sıcaklık doğrudan telin içinden geçen akım yoğunluğuyla ilgilidir ve tel çapı küçüldükçe akım yoğunluğu artar ve ısı için daha az akıma ihtiyaç duyulur. Dolayısıyla soğuma için geçecek sürede göreceli olarak azalmaktadır. ŞHA'nın kendini algılama özelliği ve kontrolü harici bir fiziksel sensör ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Gerilme-şekil değiştirme davranışındaki değişiklikler, ŞHA'nın eyleyici olarak kullanılmasını sağlarken elektriksel devresindeki değişiklikler bunların algılama için tam bir sensörsüz sinyal konumlandırma devresi (SSC-Sensorless Signal Conditioning) adayı yapmaktadır[28].

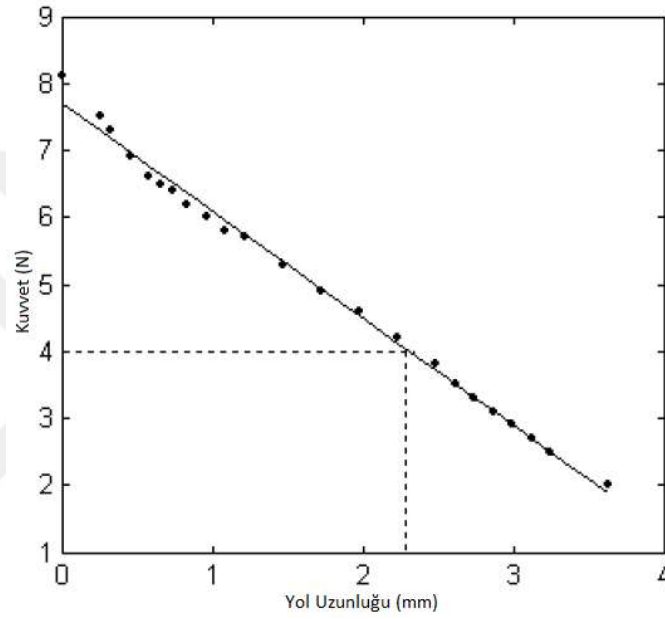
Kode ve arkadaşları, Dynalloy Inc. tarafından sağlanan 0.154 mm çapında Flexinol ŞHA tel ve bir Doğru Akım (DA) motor ile kontrol edilen hibrid bir tutucu prototip üzerine çalışmalar yapmışlardır. Şekil 1.6'da görülen deneysel düzenek ŞHA tel uzunluğunun kuvvet-yol (yer değiştirme) karakteristiklerini elde etmek için kurulmuştur. ŞHA telin bir ucu plaka tabanına sıkıca sabitlenmiştir. Telin diğer ucu silindirik bir konektör ve esnek tel vasıtasıyla bir kuvvet göstergesine bağlanmıştır. Başlangıçta kuvvet göstergesi bir mikrometre yardımıyla ŞHA telindeki gerilme kuvvetini artıran bir yönde hareket ettirilmektedir. Burada amaç ŞHA teli gerginleştirmektir.



Şekil 1.6: ŞHA tel karakteristiklerini belirlemek için deney düzeneği.

Kuvvet göstergesi 0,5 N gösterir göstermez hareket durdurulmuştur. Hareketli durdurucu yükü kuvvet göstergesinden aktarmak için hareket ettirilmiştir. Konektör ile durdurucu arasına bir tampon yerleştirilip ve germe göstergesi 0 N değerini gösterinceye kadar durdurucu konektöre

doğru hareket ettirilmiştir. Ardından, ŞHA tel üzerinden akım geçirerek ve 75 ila 80 ° C'ye kadar ısıtılmıştır. ŞHA telin sıcaklığı Fluke TK80 termal bir prob yardımı ile ölçülmektedir. Bu noktada, her iki ucu kısıtlanmış ŞHA tel harekete geçirildiğinde, ŞHA telinde üretilen kuvvet, yaklaşık olarak sıfır yer değiştirme ile ŞHA telinin üretebileceği maksimum güce yaklaşık olarak eşittir. Kuvvet göstergesi yavaşça durdurucudan konektör ile durdurucu arasına yerleştirilen tapa düşene kadar uzaklaştırılınca, güç göstergesinde okunan değer yaklaşık olarak ŞHA telinde üretilen kuvvete eşit olmaktadır. Bu şekilde okunan bir dizi kuvvet ve bir dizi yer değiştirme miktarından elde edilen kuvvet-yol diyagramı Şekil 1.7'de verilmiştir.



Şekil 1.7: 0.154 mm çaplı ŞHA telin kuvvet-yer değiştirme diyagramı.

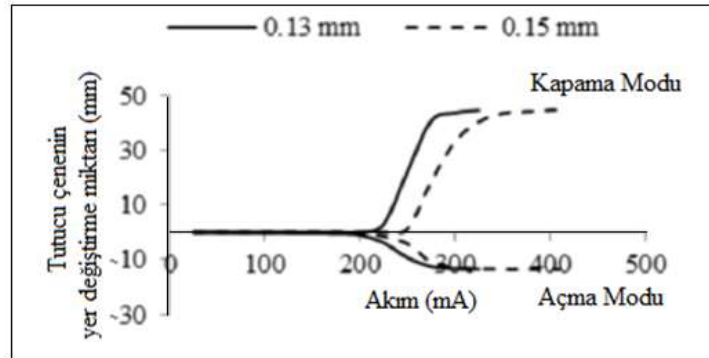
270 mm uzunluğunda ve 0,154 mm çaplı ŞHA telinin 2,25 mm (yaklaşık olarak) yer değiştirme uzunluğunda için 4 N'luk bir kuvvet (strok) oluşturabileceği kayıt edilmiştir[15].

Chaitanya ve Dhanalakshmi ŞHA teller kullanarak yaptıkları tutucu tasarımında kullanılan tellerin çaplarının etkilerini incelemişlerdir. ŞHA telin çapının, hareketli çenenin açılma yer değiştirmesi, kapanma süresi, açma süresi ve tutucu cihazının toplam tepki süresi üzerinde derin etkisi olduğu düşünülmektedir. Bu faktörleri araştırmak üzere ŞHA teller imalatçı tarafından ön görülen akım değerlerine ulaşınca kadar 25 mA'lık adımlar ile gerçekleştirilmiştir. Tablo 1.2'de tutucunun açma ve kapama süresi (yani ısıtma ve soğutma süresi) sonuçlarını göstermektedir. Sonuçlar Ø 0.076 mm ve Ø 0.1 mm'lik ŞHA tellerin kırılma olduğunu ve tutucunun eyleyici olarak yeteri kadar çekme kuvveti oluşturamadığını göstermektedir.

Tablo 1.2: Tutuculara entegre edilmiş çeşitli boyutlarda ŞHA teller için tepki süreleri.

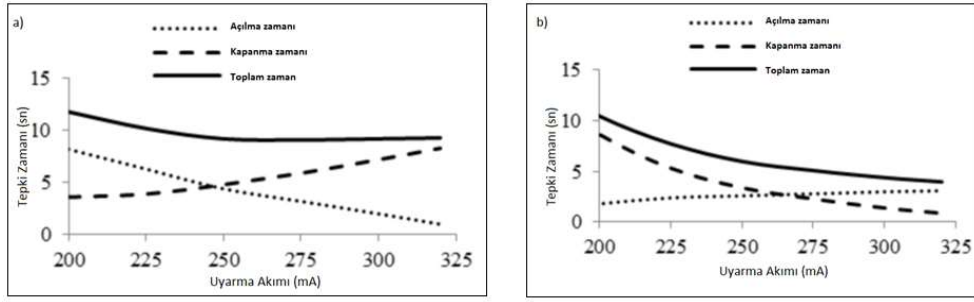
NiTi çap (mm)	Açma Modu		Kapama Modu		Yorumlar
	T _h (s)	T _c (s)	T _h (s)	T _c (s)	
0.076	NA	NA	NA	NA	Kırılgan ve montaj zorluğu
0.1	NA	NA	NA	NA	Kırılgan ve montaj zorluğu
0.13	1	2.25	0.88	3.1	Kullanılabilir
0.15	1.2	2.63	1.05	3.24	Kullanılabilir
0.25	1.08	7.8	1.1	7.6	Yüksek akım tüketimi ve uzun soğuma zamanı

Yapılan çalışma neticesinde Ø 0.13 mm ve Ø 0.15 mm'lik ŞHA teller daha az güç tüketmeleri (<500 mA) ve hareketli tutucu çenenin büyük açısal yer değiştirmesinin sağlanmasındaki avantajlarından dolayı eyleyici hareketi sağlayacak elaman olarak tercih edilmiştir. Tutucu ucun yer değiştirme miktarının artan akım ile arttığı tespit edilmiştir. Ø 0.13 mm ŞHA tel kullanılan tutucunun kapanması için 320 mA'lık bir uyarma akımı gerektiği ve bu akım seviyesinde maksimum çene açıklığının birçok ölçüm ortalamasında 13.48 mm olduğu bildirilmiştir. Kademeli olarak 25 mA'lık akım artışlarında ortalama uç açıklığı sırasıyla 0.1194 mm/mA ve 0.3628 mm/mA artmıştır. Ø 0.13 mm ve Ø 0.15 mm ŞHA telleri için Şekil 1.8'deki eğrilerden elde edilen korelasyon katsayıları (R değerleri) sırasıyla 0.9475 ve 0.9138 (tutucu çeneyi açmak için 0.9021 ve 0.8935)'dir.



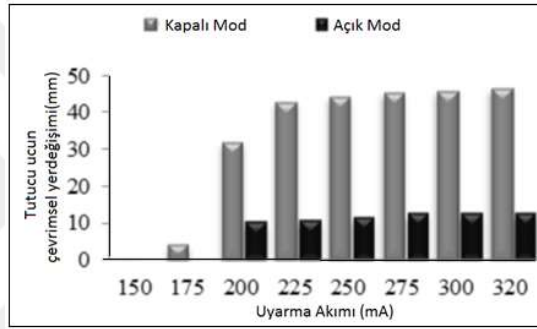
Şekil 1.8: Tutucunun açısal yer değiştirme miktarı.

Bununla birlikte kavrama ucunun yer değiştirmesinin, faz dönüşümünün ötesinde uyarılma akımında bir artış için sınırsız şekilde arttığı görülmemektedir. Şekil 1.9'da tercih edilen ŞHA tel (0.13 mm çap) boyutu için farklı ısıtma akımına karşılık gelen çene açılma, kapanma ve toplam tepki süresini göstermektedir.



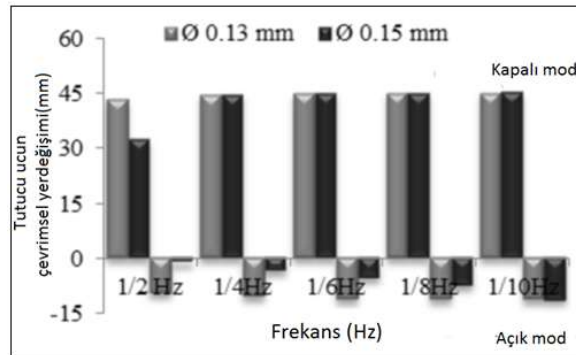
Şekil 1.9: Tutucunun zaman cevabı (Ø 0.13mm) a) Açık mod, b) Kapalı mod.

Isıtma akımı arttığında daha hızlı tepki elde edilmektedir. Tepki zamanındaki sınırsız azalma artan tahrik akımının artışıyla elde edilememektedir. Şekil 1.10'da % 50 görev döngüsünde ve aynı eylem frekansı 1/10 Hz'de tutucu aletin uçlarının açılma yer değiştirmesini sağlayan çeşitli genliklerde akım kontrollü darbe sinyallerin oluşturduğu grafiği göstermektedir.



Şekil 1.10: Uyarma akımının etkisi (Ø 0.13 mm).

Genellikle ŞHA'lar kaçınılmaz soğutma fazı nedeniyle akım kontrollü darbeleri sinyalleri kullanarak çalışmaktadır. Burada çalışma frekansı, döngüsel tepki elde etmede önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 1.11 ise % 50 görev döngüsü ile 1/2, 1/4, 1/4, 1/6, 1/8 ve 1/10 Hz sürüş frekanslarında ŞHA tutucunun açılma yer değiştirme miktarını göstermektedir.



Şekil 1.11: Eylem frekansının etkisi.

Deneyisel sonuçlar ŞHA tutucuların yer değiştirme genliklerinin eylem frekansı tarafından sınırlandırıldığını göstermektedir. Eylem frekansını arttırdıktan sonra eyleyicinin çevrimsel yer değiştirme genliğini azaltmaktadır. Eğer eylem süresi yeterince uzunsa (yani kısa çalışma frekansı), tam ısıtma ve soğutma döngüsü gözlemlenebilmektedir. Dolayısıyla çevrimsel açısal yer değiştirme genliği artmaktadır. Ayrıca eylem periyodundaki artış ile ŞHA tellerinin çevrimsel açısal yer değiştirme genliği sınırsız bir şekilde artmayacaktır. Eğer ŞHA teli tamamen östenit faza dönüşümü tamamlar ise ilave ısıtma ile ilave uzama gözlenmeyecektir. Sürüş devresinin verimliliğini bilmek eyleyicinin işlevselliğini etkili bir şekilde kullanmak için önemlidir. Sürüş devresi güç testi, ŞHA teline, $V_i = 9$ V giriş gerilimi, giriş akımı $I_i = 320$ mA ve çıkış akımını $I_o = 318$ mA olarak kaydedilmiştir. Tutucunun güç girişi ve ŞHA telin tükettiği güç aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. Sonrasında sürücü devresinin verimliliği değerlendirilebilmektedir.

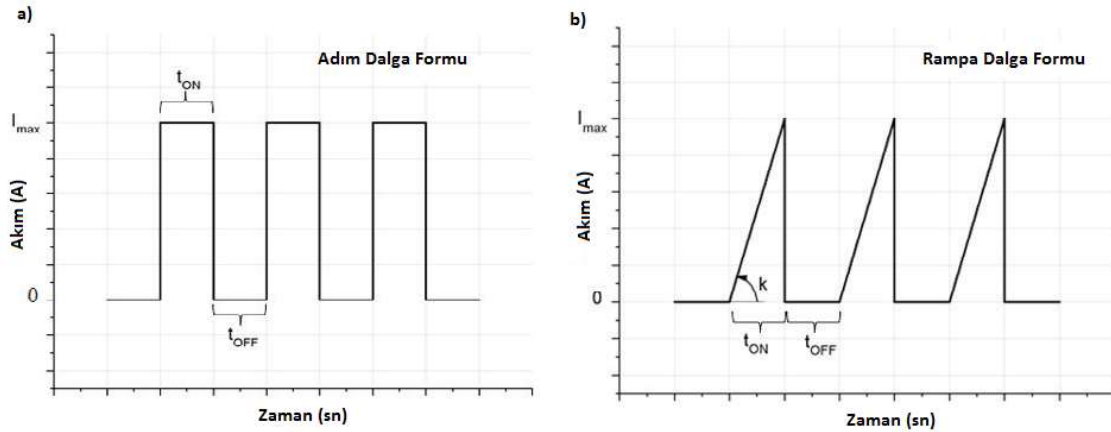
$$\text{Giriş gücü: } P_i = V_i \times I_i = 2.88 \text{ W}$$

$$\text{Çıkış gücü: } P_o = I_o^2 \times R_{SMA} = 2.73 \text{ W}$$

$$\text{Buradan verimlilik, } \eta = (P_i / P_o) \times \% 100 = \% 94.75 \text{ bulunmaktadır[8].}$$

ŞHA'lar birçok uygulamalarda kullanılmaktalar ve diğer malzemeler gibi yorgunluğa maruz kalmaktadırlar. Yorulma mikro yapıda çok ciddi değişikliklere yol açmaktadır. Termal ve / veya mekanik çevrimler kristal kafes, çekirdeklenme ve çatlakların büyümesi ile yeni kusurlara neden olmaktadır. Bu durum klasik mekanik yorgunluk ya da daha yaygın olarak bilinen yapısal yorgunluk olarak adlandırılmaktadır. Diğer mühendislik malzemeleri gibi yorulma, tane boyutu, kafes kusurları, boşluklar, yüzey kalitesi ve sıcaklık, yük tipi, çevresel koşullar, numunenin geometrisi, deneysel ayar parametreleri gibi numunelerin mikro yapısal özelliklerinden etkilenmektedir. Dahası, mikro yapıda geri dönülmez değişiklikler, özellikle yeni dislokasyonların meydana gelmesi; ŞHA'ların süper elastiklik, titreşim sönümleme, hafıza özellikleri ve karakteristik dönüşüm sıcaklıkları gibi fonksiyonel özelliklerin etkilenmesine sebep olmaktadır. Martensitik dönüşüme engel olan yapılarından dolayı dislokasyonların rolü şekil bellekli alaşımların dönüşüm sıcaklıkları için son derece önemlidir. Termal çevrimin düşük sıcaklıkta nano-ölçekli Ni-zengin çökeltilere (Ni_4Ti_3) neden olduğu, bunların matriksteki Ni/Ti oranını değiştirdiği ve de kristal kafes içinde stres alanlarına neden olarak şekil bellek yorgunluğunu etkileyen dislokasyonlar ile etkileştikleri bilinmektedir. ŞHA eyleyiciler dönüşüm aralığı içinde dış yükler altında sürekli termal çevrimlere maruz kalmaktadırlar ve

gerinim tepkisinde herhangi bir bozulma olmaksızın arzulanan işlemi tekrar tekrar tamamlaması beklenmektedir. ŞHA tellerin şekil bellek özelliklerini dengelemek ve fonksiyonel yorgunluğun etkilerini azaltmak için malzeme kusurları termal ve/veya mekanik işlemlerle bilinçli olarak kristal kafes içine yaratılmaktadır. Mükemmel şekil bellek özelliklerini ve kabul edilebilir yorulma davranışını elde etmek için hedef, kafes kusurları ve çökeltileri arasında uygun bir mikro yapı ve doğru denge bulmaktır. Casati ve arkadaşları ŞHA eyleyici NiTi tellerin farklı elektrik vurular altında fonksiyonel yorgunluklarını araştırmışlardır. ŞHA tel numuneleri rampa ve adım akım vuruları kullanarak ısıtmışlar ve termo mekanik çevrimler ile meydana gelen plastik deformasyon, gerinme geri kazanımı, sabit gerilmeler altında dönüşüm sıcaklıkları ve eyleme zamanları ile ilgili bilgiler elde etmişlerdir. Çalışmalarında ticari 76 μm çapında titanyum oksit kaplı NiTi teller kullanmışlardır. Analiz ettikleri telleri Şekil 1.12’de görüldüğü üzere rampa ve adım elektriksel akım vuruları ile 3×10^5 termo mekanik çevrimde, 1.5 sn soğutma zamanında, maksimum 0.25 A akımda (sadece adım dalga formunda) ve 0.85 akım artış oranı (sadece rampa dalga formunda) ile ısıtmışlardır. Malzemenin dönüşüm sıcaklıklarını belirlemek için yorulma testlerinden önce ve sonra bir DSC (Seiko mod. 220C) ile $5^\circ \text{C} / \text{dakika}$ ısıtma / soğutma hızı kullanılarak kalorimetrik test gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca sabit yük geri kazanım testleri (T- ϵ) tek eksenli testler için gergi kelepçeleri bulunan DMA (Dinamik Mekanik Analiz) TA Instrument Q800 tarafından 193 ile 333K arasındaki sıcaklık aralığında $0.8\text{K} / \text{dak}$ ’lık bir ısıtma / soğutma hızı ve 190 MPa’lık sabit stres altında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1.12: Adım ve Rampa dalga formuna sahip akımlar.

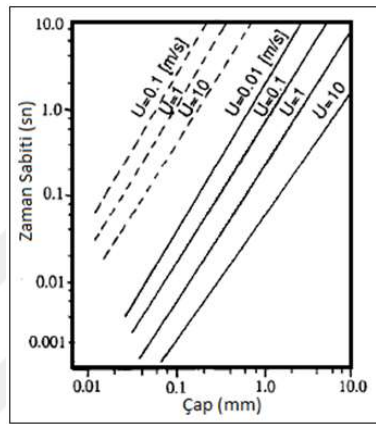
Casati ve arkadaşları NiTi telleri ısıtma yolu ile kontrol etmede farklı elektrik ısıtma metotlarının malzemenin fonksiyonel özelliklerini güçlü bir şekilde etkilediğini tespit etmişlerdir. 300000 çevrimden sonra tellerde rampa vuru çevrimi ile meydana gelen plastik

gerinim miktarının adım vuru çevrimi ile meydana gelenden % 0.6 daha düşüktür. Rampa vurularının adım vurularına göre daha kararlı bir çevrim davranışı sergilediği görülmüştür. Termo-mekanik çevrimler numunelerin dönüşüm sıcaklığında büyük değişiklikler yapmıştır. Diğer önemli bir husus malzemede ısıtma soğutma esnasında faz dönüşümü iki adımda meydana gelirken (B2-R-B19') çevrim sonrası bu dönüşüm tek adımda (B2-B19') meydana gelmeye başlamıştır. Bu husus termal histerezisiz bir azalmanın olduğunun göstergesidir. Termo-mekanik çevrim maksimum gerilme geri kazanımına ve termal histerezisin daralmasına bağlı olarak yük altında malzemenin temel işlevsel özelliklerinde önemli değişiklikler yaratmıştır. Testten önce 955 N eksenel yük altında tel tarafından geri kazanılan maksimum gerinim % 6.32 iken, adım vuru çevriminden sonra % 5.37 ve rampa vuru çevriminden sonra % 4.17 olarak gerçekleşmiştir. Çevrim ile uyarılmış ısı histerezisiz eğrilerinde değişiklikler tellerin harekete geçirilme zamanlarında bir artışa neden olmuştur[29]. ŞHA tellerini ısıtmak için kullanılan elektrik akımı vuruları, eyleyicinin ömür performansını optimize etmek için uygulama türüne göre özelleştirilebilmesi için temel bir parametre olarak düşünülmelidir.

1.3 ŞHA Eyleyiciler

ŞHA'ların karakteristik özellikleri arasında güç/ağırlık oranı bakımından rakip malzemelere ve eyleyici sistemlere karşı bariz üstünlük sağladığından bahsedilmiştir. Bu özellik eyleyici sistemlerin mikro/minyatür boyutlara inmesinde büyük rol oynamaktadır. Minyatürleşmenin getirdiği avantajlar ise; ŞHA eyleyici alaşımın termoelastik martensitik faz dönüşümünü kullanan bir "Direk Tahrik Doğrusal Eyleyici" olarak kabul edildiğinden, herhangi bir redüksiyon dişli sistemi gerekli değildir. Bu avantaj kolaylıkla minyatürize edilmiş son derece basit bir eyleyici sisteminin gerçekleştirilmesine izin vermektedir. Azalan üretim maliyeti ve geliştirilmiş güvenilirlik ise diğer faydalarıdır. ŞHA eyleyici redüksiyon dişlisi gibi sürtünme mekanizmalarına ihtiyaç duymadığından toz ya da aşınma parçacıkları yaymadan ve gürültü çıkarmadan çalışmaktadır. Temiz çalıştıklarından dolayı mikro elektronik, biyoteknoloji, medikal alanda kullanım olanağı bulmaktadırlar. Faz dönüşümünün ilerlemesine bağlı olarak ŞHA'nın elektrik direnci değişimi ŞHA'nın faz dönüşümünün bir monitör değişkeni olarak kullanılabilir. Yani algılama yeteneğine bağlı olarak elektrik direnci geribildirim, sürücünün doğrusallığını ve dayanıklılığını arttırmakla kalmaz, aynı zamanda sonraki bölümde de belirtileceği gibi konum ve gücü izlememizi sağlamaktadır. Diğer bir avantaj düşük sürücü voltajıdır. İyi bir malzeme özelliğine sahip olan NiTi alaşımının direnç değeri, NiCr'a çok yakın

olduğundan Joule ısıtması için uygulanan voltaj Piezo elektrik ve elektro statiklerinden çok daha düşüktür. Bilindiği üzere ŞHA alaşımların en büyük problemi tepki zamanıdır. Bu zaman ölçek etkisi dediğimiz malzeme hacminin küçülmesi ile büyük oranda azalmaktadır. Malzemenin şekil değişimini sağlayan şekil değişimi ısı ile sağlandığından, ısıtma zamanı dolayısıyla ısıtmaya verilen tepki zamanı akımın müsaade edeceği bir noktaya kadar kontrol edilebilmektedir. Fakat soğutma zamanı eğer dışarıdan bir müdahale olmayacaksa tamamen ortamın şartlarına bağlı kalacaktır. Şekil 1.13'deki diyagram farklı soğutma koşullarında ŞHA eyleyicinin zaman sabiti ile tel çapı arasındaki ilişkisini kantitatif olarak hesaplamamıza olanak veren eğrileri göstermektedir.



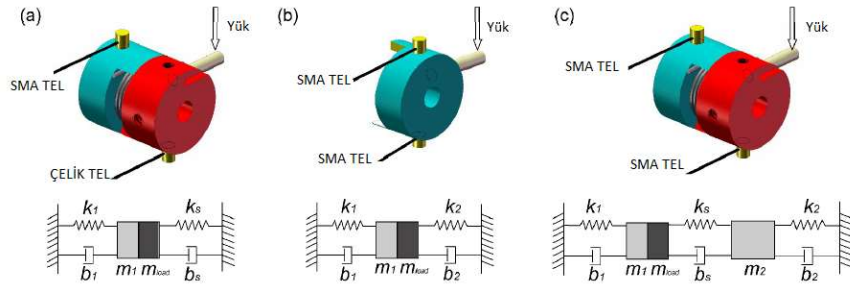
Şekil 1.13: Hava ve su soğutma koşullarında ŞHA eyleyicilerin tepki hızı.

Hilbert eşitliğinde faz dönüşümü nedeniyle latent ısı etkisi aşağıdaki gibi dikkate alınarak düzenlenmiştir. NiTi alaşımların tipik gizli ısı (ΔH) yaklaşık olarak 3×10^4 J/kg ve özgül sıcaklığı (C_p) yaklaşık olarak 2.5×10^2 J/kgk'dır. Sıcaklık bölgesi ve faz dönüşüm arasının (ΔT) 20k olduğu var sayılırsa; sıcaklık birimi başına gizli ısının ($\Delta H/\Delta T$) 1.5×10^3 J/kgk olarak hesaplanabilmektedir ve bu değer özgül sıcaklıktan yaklaşık altı kat daha fazladır. Dolayısıyla $\Delta H/\Delta T$ etkisini ihmal etmek doğru olmayacaktır. C_p yerine ŞHA eyleyicinin tepki hızını analiz etmek için aşağıda tanımlanan "genelleştirilmiş özgül ısı (C^*)" tanımlamıştır. Genelleştirilmiş Özgül Isı; $C^* = C_p + \Delta H/\Delta T$ 'dir. Bu analize göre, 0.1 mm'den küçük mikro ŞHA eyleyicinin servo aktüatör olarak yeterli bir tepki hızına sahip olması beklenmektedir. Bir ŞHA tarafından üretilen enerji, gerinim enerjisiyle orantılı olduğu için birim ağırlık başına enerjisi (enerji yoğunluğu) ağırlık ve ölçeğe bakılmaksızın sabittir[23].

Alışıl gelmiş uygulamalarda ŞBA bir eyleyici dışarıdan uygulanan bir yük ile düşük sıcaklık fazında deforme edilmektedir. Ardından ısıtma ile orijinal şekline dönmekte ya da tel gibi

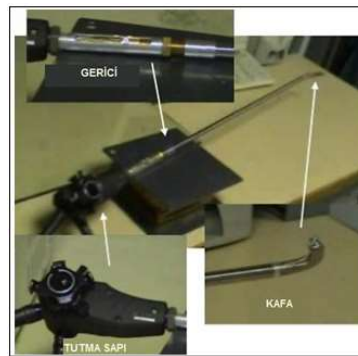
malzemelerde boyutsal kısalmalara maruz kalmaktadır[6]. Özellikle Nitinol alaşımların % 8 üzerinde yüksek gerinime sahip olmaları bu alaşımların mini eyleyici olarak kullanımlarını yaygınlaştırmıştır[30]. Eyleyici olarak bu alaşımların tel, levha, folyo, şerit, yay formları kullanılmaktadır. Özellikle yüksek Young modüllerinden dolayı büyük kuvvetler üretebilmeleri bu tür uygulamalarda kullanımlarının önünü açmıştır.

Tipik olarak ŞHA Eyleyiciler, gergi eyleyiciler ve diferansiyel eyleyiciler olarak iki sınıfa ayrılmışlardır. Bunlardan ilki ŞHA elemanı ve bir gergi yayı içermektedir. Nispeten soğuma işlemi ve pasif yayın sebep olduğu yavaş tepki zamanına sahiptir. Diğerleri iki tane şekil bellekli antagonist elamana sahip olup gergi eyleyiciye göre daha yüksek tepki hızına sahiptir fakat daha yüksek enerji tüketimine sahiptir. Guo ve arkadaşları çalışmalarında Şekil 1.14’de görüldüğü gibi Gergi ŞHA Eyleyici, Diferansiyel ŞHA Eyleyici, Uyumlu Diferansiyel ŞHA Eyleyici dizayn edip bunları modellemişler ve kontrol tasarımlarını yapmışlardır[30].



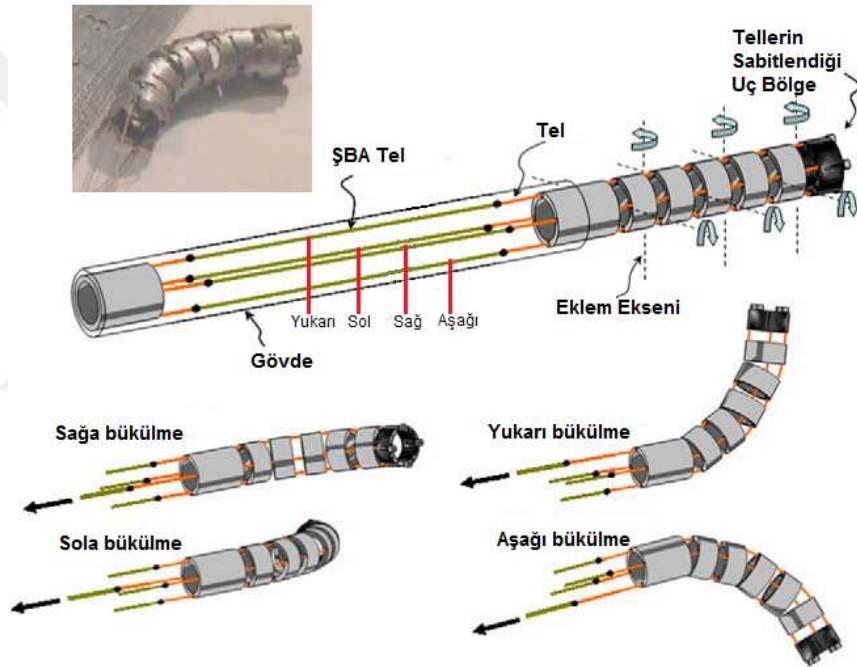
Şekil 1.14: Üç farklı eyleyicinin BDT ve eşdeğer mekanik modelleri a) Gergi ŞHA Eyleyici, b) Diferansiyel ŞHA Eyleyici, c) Uyumlu Diferansiyel ŞHA Eyleyici

De Sars ve arkadaşları ŞHA tabanlı iki serbestlik derecesine sahip endoskop çalışmalarında dört antagonist ŞHA tel ile endoskobu işletmişlerdir. Şekil 1.15’de görüldüğü gibi bu cihaz bir eklemlili kafadan, ŞHA telleri içeren 32 cm uzunluğunda bir boru gövdesinden, ŞHA tellerin ön yüklemesi için bir gergi ve bir saptan oluşmaktadır.



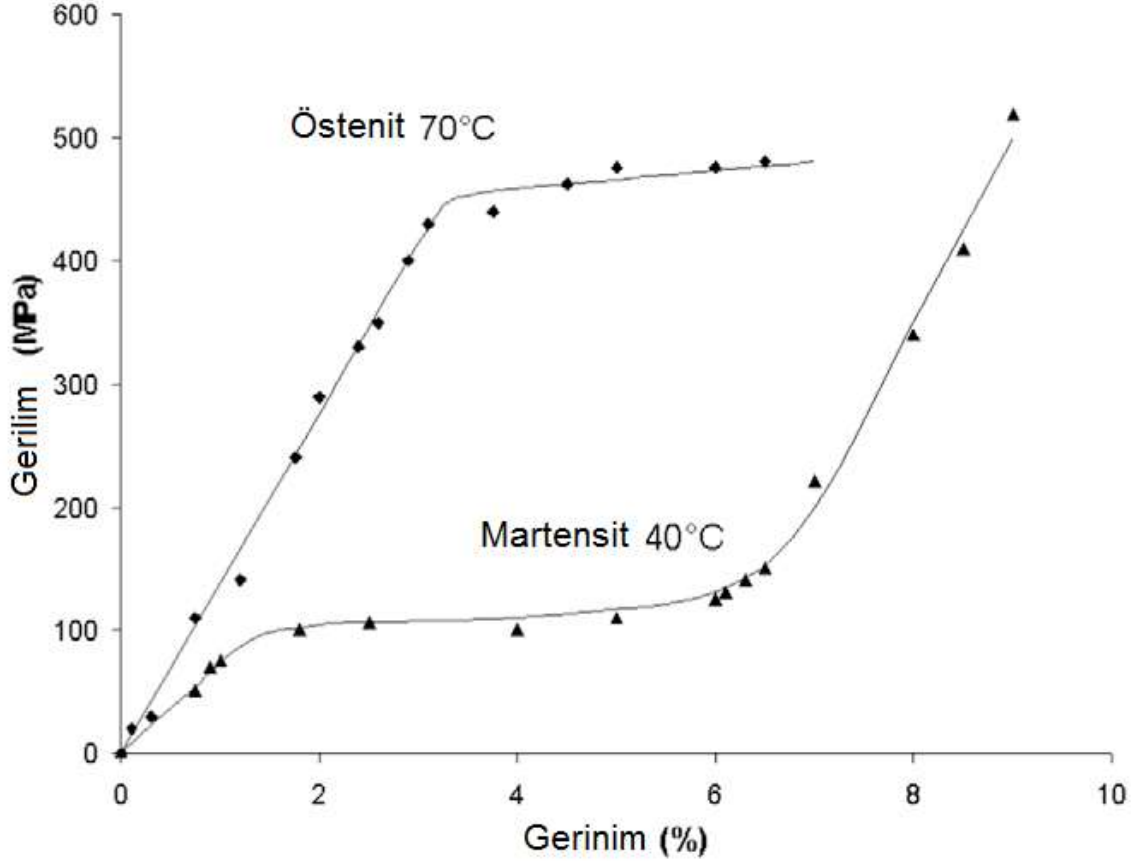
Şekil 1.15: 2 Serbestlik derecesine sahip aktif endoskop.

Endoskopun hareketli kafası, dış çapı 7 mm olan altı paslanmaz çelik halkanın seri olarak bir araya getirilmesinden oluşmuştur. Halkalar, eksenleri alternatif olarak 90° yönlendirilmiş rotoid eklemler vasıtasıyla birbirine bağlanmıştır. Halkaların iç çapları 5.6 mm'dir. Maksimum eğilme açısı her yönde yaklaşık 100° dir ve minimum eğri yarıçapı 20 mm'den düşüktür. Mobil baş klasik olarak Şekil 1.16'da görüldüğü gibi iki antagonist konfigürasyona monte edilmiş dört ŞHA tel gerdirilerek harekete geçirilmiştir. Böylece sol ve sağ kablolar yatay düzlemde bükülme üretmektedirler. Gerilme kuvveti tellere sabitlenmiş ŞHA tellerin kısalması ile elde edilmektedir. ŞHA tellerin kısalması sıcaklığın arttırılmasıyla elde edilmektedir. Güç ŞHA tellerine verilen elektrik akımı ile sağlanmaktadır ve Darbeli Genişlik Modülasyonu ile düzenlenmektedir.



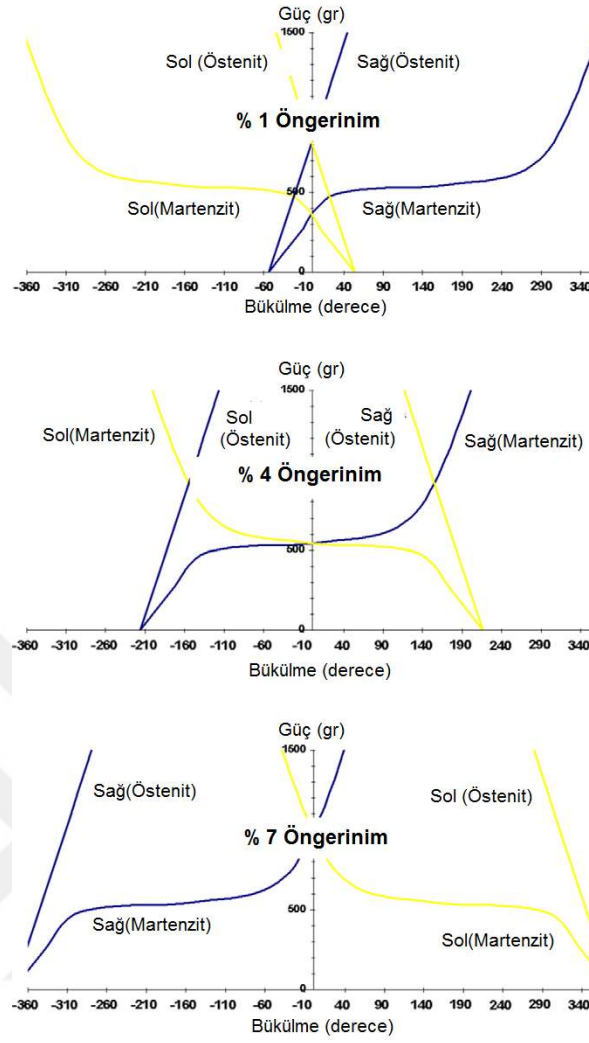
Şekil 1.16: Aktif endoskopun 2 serbestlik derecesine sahip mobil kafası.

Yapılan çalışmada endoskop kafasının yatay düzlemde sağa ve sola -90° ve $+90^\circ$ döndürebilmek için gerekli olan kuvvetin 1500 g olduğunu bildirilmiştir. ŞHA telleri 500 MPa'ya kadar sürekli gerilimi destekleyen ve termo-mekanik özellikleri Şekil 1.17'de tasvir edilen bir NiTi alaşımından imal edilmiştir. Teller $250\ \mu\text{m}$ 'lik bir çapta 2400 g'a kadar sürekli bir güç iletebilecek şekilde seçilmiştir. Kullanılacak tellerin uzunlukları hakkında ise ŞHA tellerin maksimum gerinim değerinin % 6 olduğu göz önüne alınarak; sağa ve sola dönüşlerde 5 mm'lik yer değiştirme söz konusu ise toplam 10 mm'lik çekilme için (kontraksiyon) tel uzunluğunun yaklaşık 185 mm olması gerektiği düşünülmüştür.

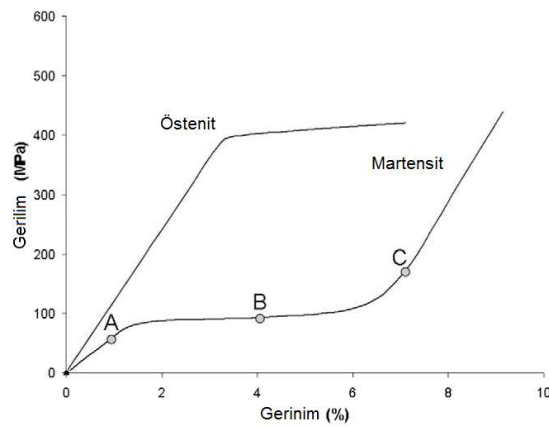


Şekil 1.17: ŞHA telin termo-mekanik karakteristik eğrileri.

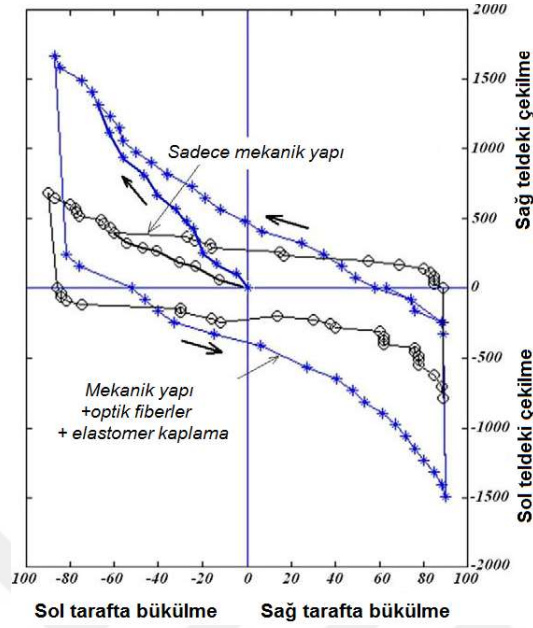
Cihazın elde edebileceği maksimum eğme açısı, ŞHA eyleyicilerin ön gerilimine bağlıdır. Bu ön gerinim harekete geçirilecek mekanik yapı orijinal konumunda olduğunda ve ŞHA telleri aktive edilmediğinde ŞHA tellerin maruz kaldığı gerginlik demektir. Örnek olarak, Şekil 1.18 sağ ve sol ŞHA tellerin üç farklı ön gerilim değeri için yapıya uygulayacağı kuvvetleri göstermektedir. Bu ön gerinim değerleri, sırasıyla % 1, % 4 ve % 7'dir (Şekil 1.19' daki A, B ve C noktalarına karşılık gelmektedir). Sağ ve sol ŞHA tellerin belirli bir ön gerginliği için cihazın ulaşabileceği maksimum eğilme açısı (örneğin yatay düzlemde sağa eğildiğinde), aktive edilmiş sağ ŞHA telinin östenit özelliklerinin kesişimi ve toplam direnç gösteren yük ile belirlenmektedir. Bu toplam rezistif yük gerinmiş sol ŞBA telden ve bükülmüş mekanik yapıdaki yüklerin toplamından (Şekil 1.20) elde edilmektedir. Buna göre endoskop ve seçilen ŞHA tel boyutları için % 3 ile % 7 arasında değişen farklı ön gerinim değerleri için ulaşılabilen maksimum eğilme açısı (Şekil 1.21) hesaplanmıştır. Buna göre optimal başlangıç gerinimi % 5.0 olup, elde edilebilir maksimum eğilme açısı 80° 'ye ulaşmaktadır.



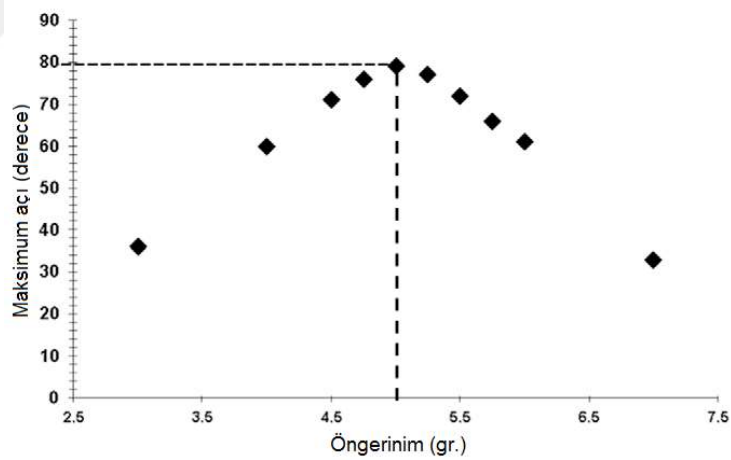
Şekil 1.18: ŞBA telleri tarafından ön gerinme değerlerine göre uygulanan kuvvet.



Şekil 1.19: ŞBA telin termomekanik karakteristik eğrileri.

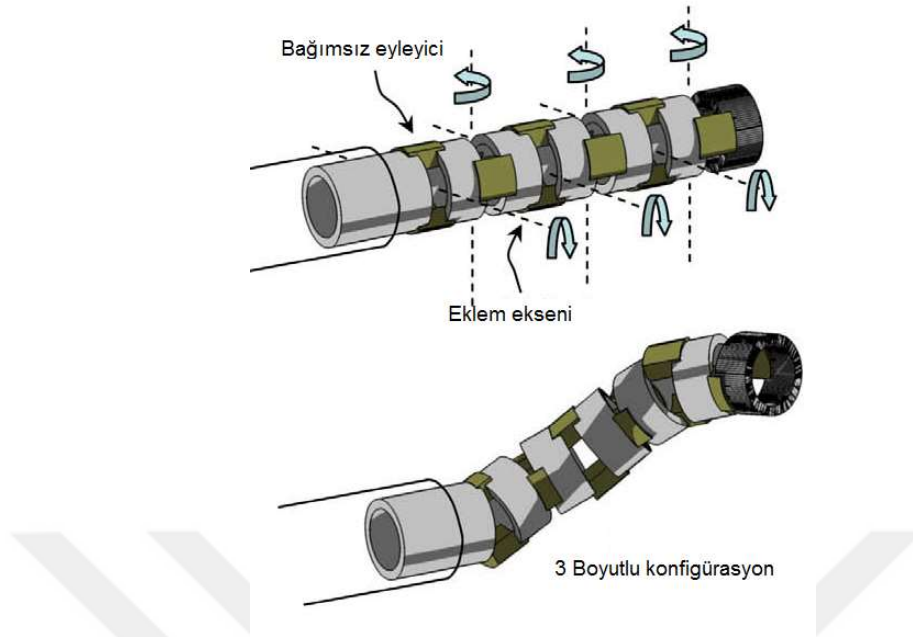


Şekil 1.20: Gereklı kuvvet (gr.) ile eğme açısı (derece).



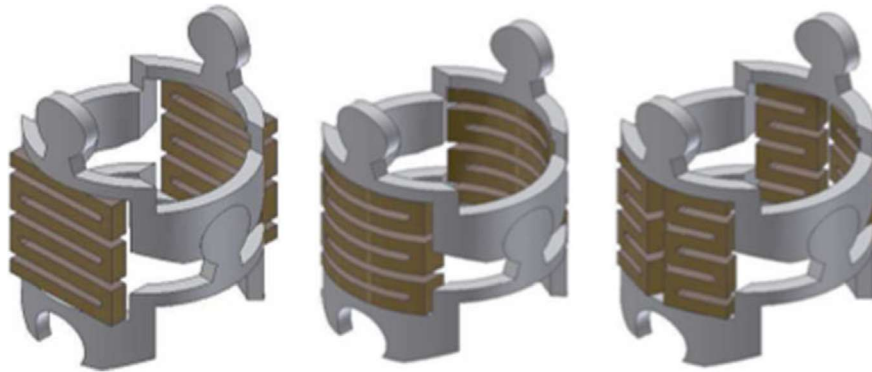
Şekil 1.21: Optimal ön gerinim tayini.

Yukarıda bahsi geçen 2 serbestlik derecesine sahip eyleyici yapı, bir endoskop olarak 3 boyutlu uzayda çoklu eğimsel hareketleri gerçekleştiremeyeceğinden bu kompleks hareketleri yapabilmesi amacıyla birbirinden bağımsız eklemlere ihtiyaç duyulmaktadır. O nedenle De Sars ve arkadaşları, bu amaca ulaşmak için dört ŞHA telden yapılmış eyleyici sistemi, mekanik yapının her bir birleşiminde bulunan bağımsız eyleyicilerden oluşan bir çalıştırma sistemi (Şekil 1.22) ile değiştirmeye karar vermişlerdir.



Şekil 1.22: Çok eklemli endoskopun mekanik yapısı.

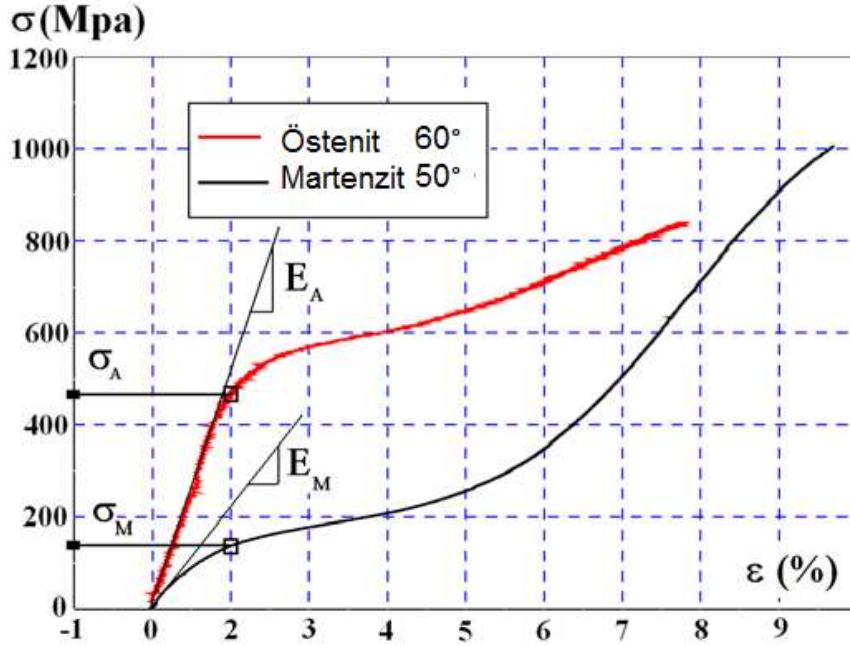
ŞHA eyleyicilerin farklı formları arasında, bu tür kompakt hacimler için en iyi çözüm olarak eklem aralıklarında Şekil 1.23’de görülen levha yayları kullanmaya karar vermişlerdir. ŞHA teller veya yaylarla karşılaştırıldığında bu geometri kuvvet ve yer değiştirme arasında daha iyi bir uyum sunmaktadır. Yüksek kütle yüzeyi oranı, termal dağılıma katkıda bulunacağından dolayı sistemin daha geniş bir bant aralığında çalışmasına izin verecektir.



Şekil 1.23: Alternatif üç NiTi levha yay yapısı.

Yayların imalatında kullanılan ŞHA malzemesi, Memory Metalle GmbH (Almanya) tarafından üretilen eş atomik NiTi dir. Bu malzemenin geçiş sıcaklıkları Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC, ESPC Paris) kullanılarak ölçülmüştür. A_s ve M_s sırasıyla 60 °C ve 50 °C

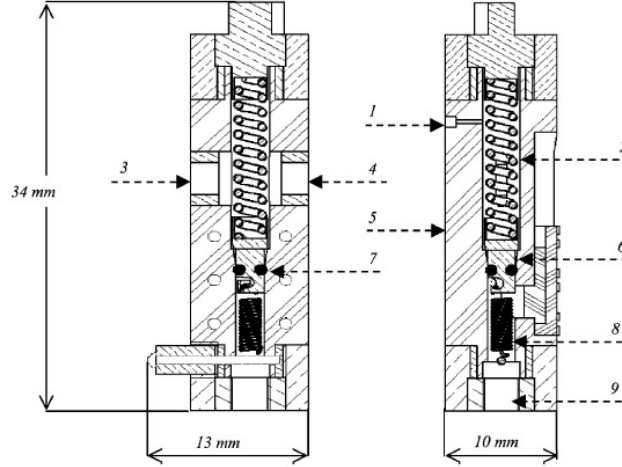
arasında vücut içi kullanıma uygun olduğu tespit edilmiştir. Şekil 1.24'de gösterildiği gibi östenit ve martenzit fazlarının sertliği (sırasıyla E_a ve E_m) arasındaki oran 2.5'dir.



Şekil 1.24: NiTi'nin gerilim-gerinim diyagramı.

Her faz için martenzit reorientasyonun başlangıç gerilmesi (σ_M ve σ_A) arasındaki oran üçtür. Bu malzeme için kabul edilebilir maksimum stres üretici tarafından $\sigma_{max}=550$ MPa olarak verilmektedir. Levha yayların optimizasyonundan sonra Şekil 23'de görülen prototip eyleyici imal edilmiştir. Bu prototip iki mafsal halkasından ve dört entegre ŞBA yaydan oluşmaktadır. Yaylar eklem ekseninin her iki yanında ikişer ikişer monte edilmiştir. Gerekli izolasyonlar yapıldıktan sonra elektrik bağlantıları yapılmıştır. Elektriksel açıdan bağlantısının aynı tarafta bulunan yaylar, aynı anda harici teller ile bağlantı sağlayan esnek bakır bıçaklara seri olarak birbirine bağlanmıştır[22]. Yapılan çalışmanın kontrolü ile ilgili kısımlar, ŞHA 'ın kontrolü bölümünde görülebilir.

ŞHA levha yaylar ile yapılan eyleyici hareketlerden sonra ŞHA yaydan elde edilen eyleyici çalışmasını, Carrozza ve arkadaşları minyatür "inchworm" tırtıl şeklinde minimal girişimsel girişim yada tedavilerinde kullanılacak bir medikal alet üzerinde gerçekleştirmişlerdir. ŞHA'ların termo-mekanik karakteristikleri doğrusal olmamasına ve üç boyutlu bir histeresiz göstermelerine rağmen uygun kontrol sistemleri ile kullanılabileceğinden, hafif ve küçük olduklarından bu tür sistemler için uygun olduğunu düşünmüşlerdir. Şekil 1.25'de kontrol edilebilir oransal minivalf eyleyicinin şematik gösterimi görülmektedir.



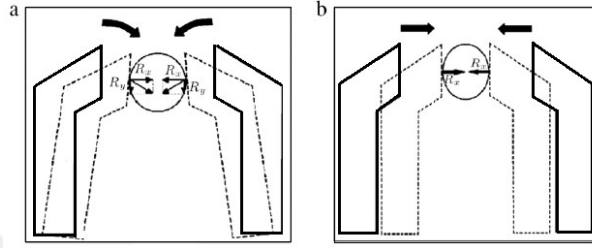
Şekil 1.25: Minivalf eyleyici kesit görüntüsü. 1. Tahliye kanalı, 2. ŞBA yay, 3 ve 4. Giriş kanalı, 5. Pleksiglas (PMMA) gövde, 6. Konik kapak, 7. Kauçuk kilit, 8. Bias Yay, 9. Çıkış kanalı.

Basınç hava kanallarını bir conta (7 nolu parça) üzerine iterek kapatan konik bir pirinç kapak (6 nolu parça) tarafından düzenlenmektedir. Kapak ön gerimli bir çelik yaya (8 nolu parça) karşı hareket eden bir ŞHA Ni-Ti yay (2 nolu parça) ile harekete geçirilmektedir. ŞHA Ni-Ti yayının ana parametreleri, yaklaşık 220 kPa'lık maksimum giriş basıncına ve önyargılı çelik yay kuvvetine karşı yeterli kuvvet oluşturabilmesi amacıyla 0.7 mm tel çapında, 2.2 mm ortalama yay dış çapında ve 9 sarım sayısına sahip olabilecek şekilde seçilmiştir. Bu bileşenler PMMA (pleksiglas) bir gövdeye (5 nolu parça) yerleştirilmişlerdir. Kapak kapalı konfigürasyondayken ŞHA yayın soğutulması, PMMA çerçevesinde işlenmiş "atık hattı" (1 nolu parça) olarak tanımlanan ek bir kanal vasıtasıyla elde edilmektedir. Minivalf girişine basınç uygulandığında tahliye kanalı boyunca sürekli bir soğutma akışı oluşmaktadır. Giriş borusu ŞHA yayındaki soğutma etkisinin homojenliğini artırmak için iki aralıklı yarık biçimli kanallara ayrılmıştır[31]. Mevcut çalışmanın kontrol mekanizması için kontrol bölümüne bakınız.

1.4 Tutucular

Genel hatlarıyla tutucular tutup kavrayabildikleri malzemenin boyutlarına bağlı olarak mini, mikro, mikro altı gibi tutucular olarak adlandırılmaktadırlar. ŞHA ile hareket ettirilen tutucular ana çalışma konumuz olsa da elektromanyetik, piezoelektrik, elektrostatik, manyetositrikatif malzemeler ile hareket ettirilen tutucular mevcuttur. Boyut olarak santimetreler mertebesinde

olan bu tutuculardan bazıları nano seviyelerde tutma, kavrama işlemi yapabilmektedirler. Tutucuların hassasiyetini belirleyen etkenlerden bir tanesi tutucu ağızların aralığıdır. Özellikle mikro seviyelerde tutma hareketleri için bu aralığın küçük olması istenmektedir. Tutma mekanizması, tutma çenelerinin hareketine göre açılmalı ve paralel tutma hareketi olarak gerçekleşmektedir. Açılmalı tutma hareketinde Şekil 1.26 a)'da görüldüğü gibi reaksiyon kuvvetinin X-bileşeni çene boyunca nesneyi tutmaktadır. Y-bileşeni ise uzunlamasına eksenlere paralel hareket etmekte ve nesneyi kavrama uçlarından dışarı itmektedir.



Şekil 1.26: Temas alanındaki tutma kuvveti: (a) dönme hareketi ve (b) paralel hareketi.

Nesnenin kaymasını önlemek için, Şekil 1.26 b)'de gösterildiği gibi, reaksiyon kuvvetinin Y bileşeninin atlandığı şekilde, çenelerin paralel hareketine sahip bir mekanizmanın kullanılması gerekmektedir. Kavrayıcı çenelerin paralel hareketi nesnelerin doğru şekilde kavranmasını, düzgün stres dağılımı ve nesnelerdeki gerilme konsantrasyonunun en aza indirgenmesi dolayısıyla manipülasyonun en kesin ve güvenilir yöntemidir. Çenelerin tüm kavrama aralıklarında temiz bir paralel harekete ulaşmak zor bir iştir ve tutucu çenelerde daima küçük bir dönme hareketi oluşmaktadır. Dolayısıyla dönme hareketlerini azaltmak, bir tutucu tasarlarken önemli bir faktördür. Bir paralelkenar yapılar çenelerin paralel hareketini gerçekleştirmek için basit bir mekanizmadır. Tutucular başlangıç çeneleri açık ya da kapalı olarak dizayn edilmektedirler. Normalde açık ağızlı bir tutucuda, başlangıç açıklığı tutucunun maksimum açıklığıdır. Eyleyici bir kuvvet uygulandığında çeneler boşluk alanı azalana kadar hareket etmekte ve dolayısıyla nesne kavranana kadar bu hareket devam etmektedir. Kavrama kuvvetinin hassas kontrolü bu yöntemin bir avantajıdır ama tutma işleminin devamlılığı enerji tüketimini arttırmaktadır. Normalde kapalı çeneli tutucularda ise açma işlemi eyleyici malzeme ile yapılıp, malzeme kavrandıktan sonra tutma işlemin devamlılığı için gerekli enerji kavrama mekanizmasının elastik gerginlik enerjisinden (burgu yayı gibi) sağlanmaktadır. Bu da enerji verimliliğini arttırmaktadır. Bununla birlikte büyük objelerin kavranması esnasında tutucu çene aralığının fazla miktarda açılması gereklidir. Eyleyici malzeme bu büyük aralığı sağlarken kapama işlemini yapacak olan pasif malzemeye (yay ya da benzeri) çok fazla elastik enerji

depolanmasına sebep olmaktadır. Bu durum kavrama esnasında kavranan nesneye zarar verme potansiyeline sahip olmaktadır. Normalde açık ağızlı tutucu tasarımlar tercih edilmektedir.

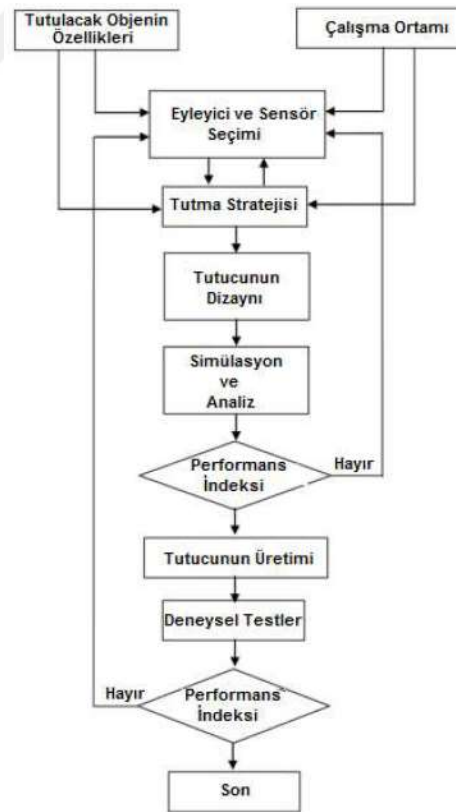
Baskı elemanı (herhangi bir yay çeşidi) tutucu cihazının çenesini kapatmak için eyleyici eleman olarak ŞHA kullanıldığında, ŞHA elemanına karşı hareket etmekte ve böylece kavrama çeneleri açılmaktadır. ŞHA eyleyici eleman üzerinde elektrik akımı geçirildiğinde yani ısıtıldığında tutucunun uçları kapanmakta ve tutma işlemi gerçekleşmektedir. Nesne taşıma süresine bağlı olarak ŞHA aşırı ısınması istenmeyen bir durumdur. Kısa süreli darbe akımları aşırı ısınmanın üstesinden gelebilir ancak nesne taşıma süresini kısaltmaktadır. Ayrıca ilerleyen konularda değinileceği üzere harici soğutma teknikleri kullanılarak aşırı ısınmalardan kaçınıla bilinmektedir. Tutucu cihazın çenesini açmak için ŞHA kullanıldığında, baskı yayı açılmaya karşı koyarken bir potansiyel enerji toplamaktadır. ŞHA üzerinden geçen elektrik akımı kesildiğinde tutucu çeneleri kapanmaktadır. Bu mod nesneleri uzun süre tutmak için daha basit ve etkili bir yol sağlamaktadır. ŞHA malzeme sadece çeneyi açmak için kullanılırken pasif yaydaki enerji, nesneyi tutmak için kullanılmaktadır. Dolayısıyla ŞHA'nın aşırı ısınması sorunu önlenmekte ve dahası az güç tüketimi elde edilmektedir. Tutucu çeneleri ile ilgili olarak diğer bir faktör ise tutucu ağızlarından her ikisinin birden hareketli olması ya da birinin sabit diğerinin hareketli olmasıdır. Tutucu ağızlarının kavrama esnasında eş zamanlı olarak nesneye teması, nesnenin tutucu ağızlarından tek çenesi hareketli tutucuda olduğu gibi kaymasını önlemektedir. O nedenle her iki çenesi hareketli tutucular aşağıdaki çalışmada belirtilenin aksine daha fazla tercih edilmektedir. Tutucu uçları ile ilgili olarak ideal bir dizayn kullanım ortamına ve diğer değişkenlere bağlıdır. Tutucu uçları ve kullanım yerleri ile ilgili olarak örnekler Tablo 1.3'de sergilenmektedir.

Tablo 1.3 : Tutucu uçları.

Tutucu Tipleri	Örnekler	Kullanım yerleri
Düz yüzey tutucu ucu		Düzgün ve düzgün olmayan şekillerin kavranması
Kaba yüzeyli tutucu ucu		Kaymayı ve Van Der Waals kuvvetlerin azaltılması
Özel şekilli, özel uygulamalar için tutucu uçlar		Hücre manipülasyonu
		Teflon tel manipülasyonu
Değiştirilebilir uç		Çeşitli şekilde, büyüklükte malzemelerin tutulması

Tutucularda tutma, kavrama gibi hareketlerin başarı ile yapılması kadar tutulan nesnenin serbest bırakılması da önemlidir çünkü nesneler tutucu uçlarına yapışabilmektedir. Mikro ölçekte yerçekimi ve atalet gibi vücut kuvvetleri, elektrostatik veya kılcal kuvvetler gibi yüzey

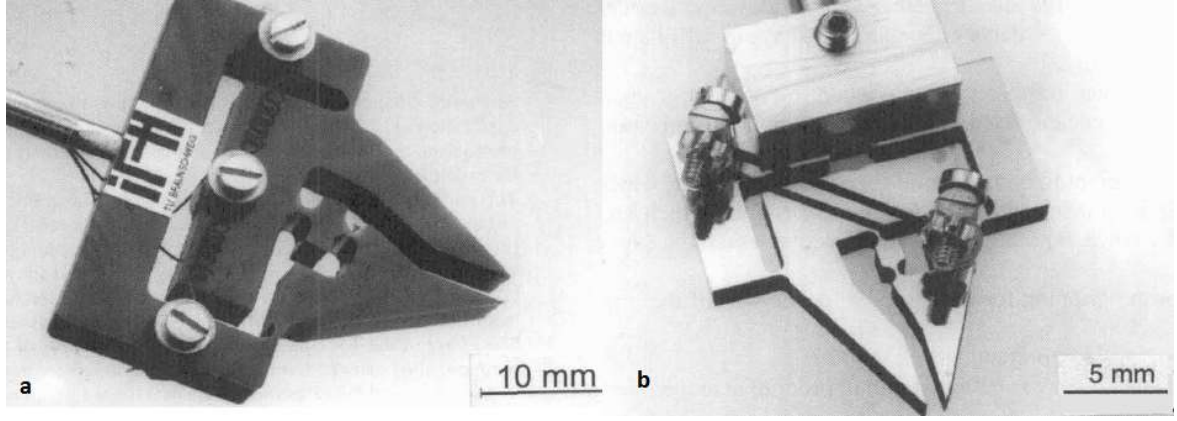
kuvvetlerine kıyasla önemsizdirler ama serbest bırakma olgusunun altında bu kuvvet yatmaktadır. Serbest bırakma stratejisi olarak iki metot söz konusudur. İlk yöntem olan pasif serbest bırakma yönteminde; akım-nesne ara yüzü ve nesne-alt tabaka ara yüzü arasındaki yapışma kuvvetleri kontrol edilerek kavrama ve serbest bırakma işlemleri yapılmaktadır. Kavrama işi, takım-nesne yapışma gücü nesne alt tabaka yapışma gücünden göreceli olarak daha büyük olduğunda gerçekleşmektedir. Serbest bırakma işi ise bu olayın tam tersidir. Pasif serbest bırakma işinde yapışma kuvvetlerini azaltmak için etkili bazı yöntemler arasında nesne ve uçlar arasında düşük yapışma potansiyeline sahip malzeme kullanılmak, temas alanını azaltarak yapışma kuvvetlerini azaltmak ve cisimlerin serbest bırakılmasını kolaylaştırmak (kaba yüzeye sahip uçlar temas alanını azaltmak için yararlı olmaktadır), tutma kuvvetlerinin yaratacağı basınç sonucu oluşabilecek deformasyonlar yapışma miktarını arttırdığından tutucu uç veya çenelerinin imalatında sert malzemeler kullanılmak sayılabilmektedir. Aktif serbest bırakma sisteminde ise kavranan nesnenin tutucu çenelerinden ayrılması için dışardan bir kuvvet kullanılmaktadır. Dış kuvvetin kaynağı, elektrik alan, titreşim, vakum emişi gibi sistemler olabilmektedir. Yukarıda bahsedilen kriterler göz önüne alarak bir tutucunun dizayn aşamasından üretimine kadar olan süreç Şekil 1.27’de gösterilmiştir.



Şekil 1.27: Tutucu tasarımına ait genel bir üretim algoritması.

Öncelikle çalışma ortamı ve tutulacak nesnelerin özellikleri belirlenmelidir. Çalışma ortamı biyolojik, elektrolit, kuru, sıvı, vakum ve benzeri olabilmektedir. Kavranacak nesnelerin özellikleri ise maksimum kavrama kuvvetini, kavrama aralığını ve tutucu çene ve uç şeklini belirlemektedir. Bu faktörler kullanılarak eyleyici ve sensör tipleri ile kavrama stratejisi seçilmelidir. Kavrama stratejisinde tutucunun serbestlik derecesi, bırakma metodu, tutucu ağzın başlangıçta açık ya da kapalı mı olacağına karar verilmelidir. Ardından modellenen tutucunun sonlu analiz ve benzer metotlar ile performansları hakkında bilgi edinilmelidir. Simülasyon sonuçlarına göre paralel hareket, düzlem hareketi, kavrama çenesinin eşzamanlı hareketi ve oluşan gerilimler ile ilgili düzeltmeler yapılmalıdır. Tüm indeksler doğrulanırsa, tutucu imal edilmeli aksi halde önceki adımlar yeniden değerlendirilmelidir[32].

Daha önce de çalışmamızın birkaç yerinde de bahsettiğimiz üzere diğer eyleyici malzemelere kıyasla, şekil bellekli alaşımlar (ŞBA), malzeme hacmi başına önemli ölçüde daha yüksek bir iş çıkışı sunmaktadır. Bu durum ŞBA eyleyicilerin özellikle minyatür uygulamaların gerekli olduğu sistemlerde rakipsiz kılmaktadır. Bu nedenle artan mikro sistem uygulamalarında şekil bellek alaşımına dayalı eyleyicilerin gelecek uygulamalarında potansiyel bir pazar olacaktır. Bu mikro sistemler özellikle MEMS üretim metotlarının gelişimi ile mikro çiplerde olduğu gibi monolitik olarak imal edilebilmektedir. Monolitik üretimler günümüzde hibrid sistemler ile daha fonksiyonel özelliklere sahip olacak şekilde üretilmektedir. Çünkü robotik sistemler gelişmiş hassasiyetlerin yanında gelişmiş ve çok yönlü tutucu sistemlere de gereksinim duymaktadırlar. Konvansiyonel montaj işlemleri için tutucu, tutma nesnelerinin ağırlığına göre tasarlanmıştır, böylece mevcut kavrama kuvveti, taşıma sırasında ivme kuvveti de dahil olmak üzere nesnenin ağırlığını aşacaktır. Tutucu açıldığı anda tutulan nesne hemen serbest kalmaktadır. Nesnenin boyutunun azaltılması konusunda ilerleme kaydedildiğinde nesne ile kavrama tırnakları arasındaki elektrostatik kuvvet, ağırlık ile ilişkili olarak artar ve artık ihmal edilemez düzeye ulaşır. Elektrostatik kuvvetler, kavrama nesnesinin yüzeyi ile orantılıdır. Ağırlık ise hacim ile orantılıdır. Dolayısı ile kavrama çenelerinin açılması mutlaka nesnenin derhal serbest bırakılması ile ilgili değildir. Mikro sistemlerde yüzeyin hacimle olan ilişkisinin ve dolayısıyla elektrostatik etkileşimlerin arttığı açıktır. Elektrostatik potansiyeldeki farklılıkları azaltan iletken ve topraklanmış kavrama çeneleri kullanılarak elektrostatik etkileşimlerle ilgili bu sorunlar çözülmektedir. Yukarıda belirtilen tüm gereklilikler Şekil 1.28 a) ve b) ' de gösterilen son geliştirilen mekanik mikro tutucular tarafından yerine getirilmektedir.

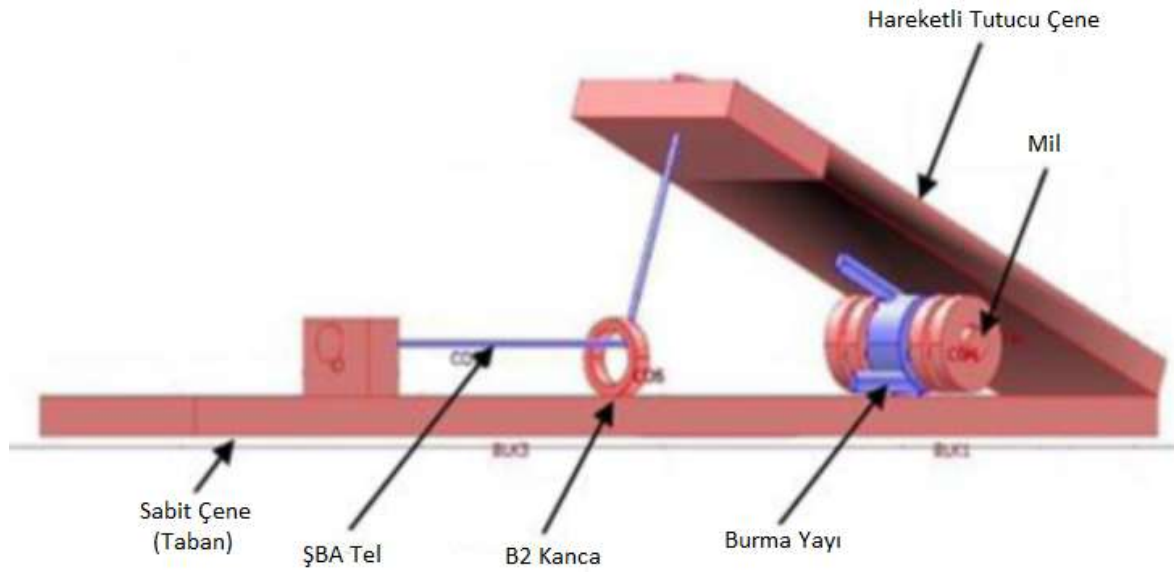


Şekil 1.28: a) Helikal yay ile hareket ettirilen tutucu tasarımı, b) NiTiCu (alaşım B25) şerit ile hareket ettirilen tutucu tasarımı.

Söz konusu tutucular sertliğin azaltılması ve elastik bölgelerin artırılabilmesi amacıyla termoplastik polimerden ya da süperelastik şekil bellek alaşımdan imal edilmektedir. Şekil 1.28 a)'deki tutucunun yapısal bileşeni oldukça esnektir ve herhangi bir elastik deformasyon enerjisi depolamaz. Diferansiyel aktüatör tasarımı, tutucunun tepki karakteristiği ile ilgili önemli avantajlar sunmaktadır: kavrama nesnesinin tutulmasından sonra serbest bırakma agonist aktüatörün anında deforme olmasına neden olan antagonist aktüatörün ısıtılması ile artırılır. Bu deformasyonun nedeni, termal olarak indüklenen bir dönüşümün aksine ekstra soğuma süresine ihtiyaç duymayan strese bağlı bir dönüşümün ortaya çıkmasıdır. Şekil 1.28 b)'de sunulan tutma düzeneği Elektro Erezyon Metodu (EEM) ile işlenmiş süperelastik NiTi'den yapılmış bir yapısal bileşen kullanmaktadır. Süperelastik yapı iki yönlü efektin ortaya çıkması için gerekli olan elastik deformasyon enerjisini depolayabilmektedir. Eyleyici B25 NiTiCu eriyik çekilmiş alaşımdan imal edilmiştir. Bu tutucunun önemli bir avantajı metalik yapıya bağlı sağlamlıktır. Öte yandan bu kavrama aleti Şekil 1.28 a)'da sunulan tutma aracına kıyasla daha yavaş bir tepki karakteristiği gösterir ki bu esas olarak farklı eyleyici tasarımından kaynaklanmaktadır. Buradaki ŞHA şerit hem eyleyici hem de aynı zamanda bir sensör olarak kullanılmaktadır. Fakat bunun için elektrik direnci ile ŞHA şekil değişikliği arasında özel bir ilişki kullanılması gerekli bir ön şarttır[14].

Chaitanya ve Dhanalakshmi yukarıda bahsedilen avantajından dolayı ikinci tür üzerinden akım geçirildiğinde kapama işlevini yerine getiren bir tutucu tasarlamışlardır. Tasarlanan tutucunun üst çenesi hareket edebilir ve alt tutma çenesi ise standart epoksi yapıştırıcı "Araldite" kullanarak akrilik bir tabana sabitlenmiştir. İki yerine bir hareketli çene kullanılması kavrama tasarımını basitleştirir ve kavrama doğruluğunu arttırmaktadır. Çeneyi kapatmak için bir geri

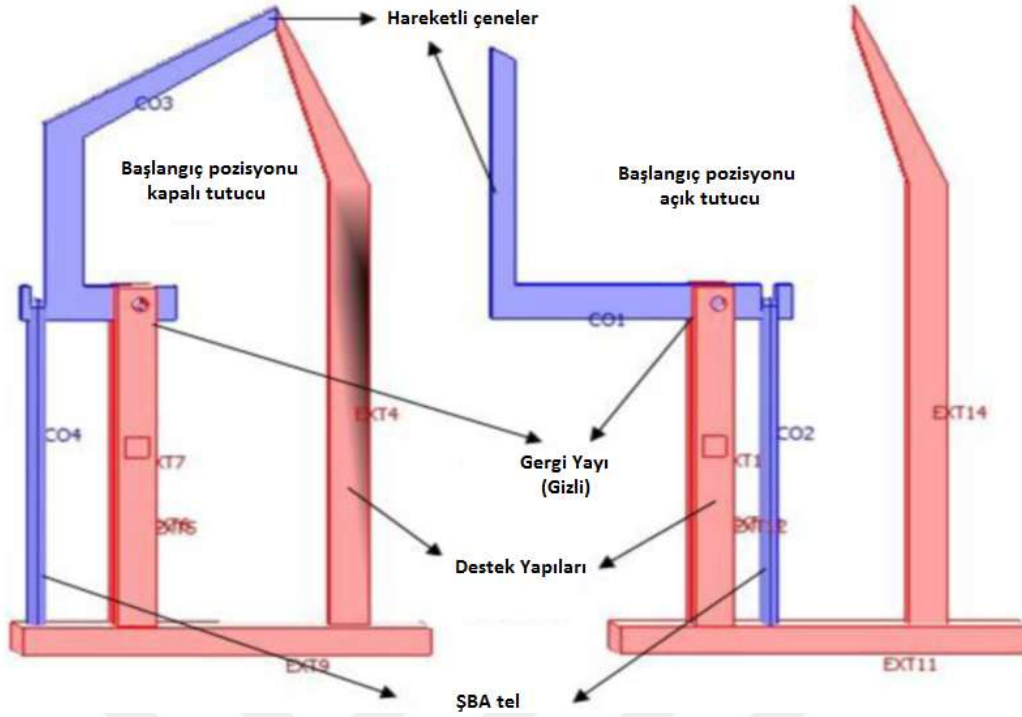
yükleme kuvveti uygulaması amacıyla bir mil tarafından desteklenen paslanmaz çelik burulma yayı çeneler arasında entegre edilmiştir. Eyleyici hareket için tercihen ŞHA' nın gerilim modundaki teli tercih edilmiştir çünkü ŞHA düz tel diğer formlar ile kıyaslandığında maksimum kuvvet yoğunluğuna sahiptir. Çekme kuvvetini maksimize etmek için ŞHA eyleyici tel üst çenenin arka ucuna dik açıyla (B2 Kancası kullanarak) ve diğer ucu ise tutucunun tabanına sabitlenmiştir. Tutucu çene yüzeylerinde yeterli yüzey pürüzlülüğü ve sürtünme üretmek amacıyla küçük oluklar oluşturulmuştur, böylece kavranan nesnenin kayması önlenmektedir.



Şekil 1.29: ŞHA ile tahrik edilen burma yaylı tutucu BDT modeli.

Tutucunun çalışma prensibi, ŞHA tel eyleyicinin doğrusal yer değiştirmesini kavrama çenesinin açısal yer değiştirmesine dönüştürmektir. Harekete geçirilirken ŞHA tel yay üzerine bir sıkıştırma kuvveti uygulayarak üst kavrayıcı çeneyi çekmekte ve kavrama çenesi açılmaktadır. ŞHA tel burma yayının gösterdiği karşı kuvvetten daha yüksek çekilme kuvveti üretmektedir. Böylece yayda bir potansiyel enerji birikmektedir. Sıkıştırma çenesi yayı soğutma fazı esnasında ŞHA telini, ön gerilme yayının sergilediği toparlanma kuvveti nedeniyle gererek ilk konumuna geri döndürmektedir. Böylece nesne kavranıp ve tutulmaktadır[33]. Söz konusu tutucunun kontrolü ile ilgili detaylar ŞHA'nın Kontrolü bölümünde verilmiştir.

Chaitanya ve Dhanalakshmi başka bir çalışmalarında yukarıdaki çalışmaya benzer olarak başlangıç pozisyonu olarak çenesi açık ve kapalı bir tasarım gerçekleştirmişlerdir. Bu tasarıma ait BDT (Bilgisayar Destekli Tasarım) çizimi Şekil 1.30'da görülmektedir.



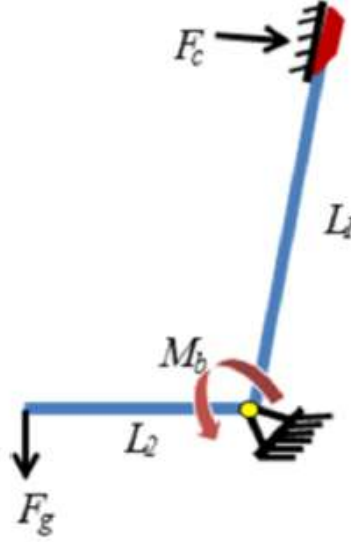
Şekil 1.30: Tutucuların BDT tasarımı (Başlangıç pozisyonu kapalı ve açık tasarımlar).

Şekilde görülen her iki tutucu tasarımı birbirine benzerdir. Ancak ŞHA telin açma ve kapama yapacağı bağlantı noktaları birbirinden farklıdır. Her iki tutucu tasarımı alüminyumdan imal edilmiş olup bir tanesi hareketli diğeri sabit bir tutucu çeneden oluşmaktadır. Tutucu çene bir eksen etrafında dönen sabit bir kolona bağlanmıştır ve eksenel olarak bir ucu ŞHA tele diğer ucu ise bir torsiyon yayına bağlanmıştır. Buradaki basit prensip ŞHA telden elde edilen doğrusal hareketin açısal harekete dönüştürülmesine dayanmaktadır. ŞHA telden akım geçirilmesi ile tel kısalıp hareketli çeneyi eksenel olarak döndürmektedir. Bu olay ile tasarıma bağlı olarak açma veya kapama işlemi gerçekleşmektedir. Bu esnada ise gerilme yayı uzamaktadır. ŞHA telden enerji kesildiğinde soğumaya bağlı olarak bu yay tasarıma bağlı olarak kapama veya açma işlemini gerçekleştirecektir. Bu yayın martensitik fazdaki ŞHA telindeki psödo-plastik gerilimi düzeltmek için gerekli kapatma kuvveti $F_c = 2 \text{ N}$ sağlayacak şekilde boyutlandırılmıştır. Tutucu geometrisinin bir fonksiyonu olan ŞHA tellerin ürettiği F_g kuvveti Denklem 8’te verilen bağıntı ile tanımlanmaktadır.

$$F_g = \left(F_c - \frac{M_b}{L_1} \right) \frac{L_1}{L_2}$$

Denklem 8

Burada; F_c kapama kuvveti, F_g ŞHA tellerin ürettiği kuvvet, M_b Bükme momenti Şekil 1.31’den de görülebileceği üzere,



Şekil 1.31: Hareketli kavrama çenesinin serbest gövde şeması.

Toplam kuvvet F_g tüm paralel ŞHA tellerin ürettiği her bir F_c kuvvetinden ($F_g=2.F_c$) elde edilmektedir. ŞHA telin uzunluğu (L) tutucunun açılma açısına (θ) bağlıdır. θ ve pivot noktası ile kavrama arasındaki mesafe L_1 olduğundan ŞHA telin uzunluğu $L=L_1.\theta/^\circ5$ 'den hesaplanmaktadır. Buradaki %5 ŞHA telin faz dönüşümü ile kısaldığı ya da çekildiği miktarı ve dolayısı ile tutucu çenelerin θ açısıyla açılmasını sağlayan durumdur. Daha büyük L_2 F_c kuvvetine daha fazla katkıda bulunmaktadır ancak aynı zamanda daha kısa olan L_2 , ŞHA telinin uzunluğunu azaltmaktadır. İstenilen tasarım özellikleri ($F_c=2N$ ve $\theta=30^\circ$), destekleyici yapının ($L_1=9.48$ cm ve $L_2=3.5$ cm) geometrik sınırlamaları ve uygun bir ŞHA tel seçimi ($\phi=0.15$ mm ve $L=36.65$ cm) ön gerdirme yayı boyutlandırılmıştır. Kavrama çenesini ilk konumuna geri döndürmek için gerekli olan geri çekme kuvveti (R_f), üreticinin vermiş olduğu martensit fazdan başlangıç pozisyonuna dönüştürmek için gerekli olan minimum geri çekme kuvveti R_{fsma} kullanılarak şu şekilde $R_f=2 \times R_{fsma} = 2 \times 0.62 = 1.24$ N hesaplanmaktadır. Tutucu çenesi açıldığında tork artar ve M_{bmax} maksimum bükme momenti elde edilmektedir. Çenenin kademeli olarak kapanmasıyla yayın momenti azalmaktadır. Sadece bükülme momenti ile yüklenen burulma yayının tel çapı matematiksel olarak Denklem 9'daki gibi hesaplanmaktadır.

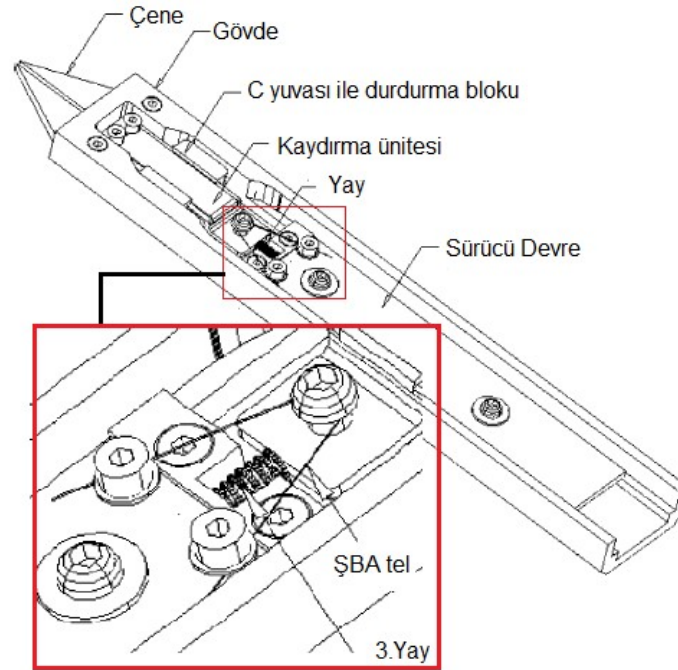
$$d = \sqrt[4]{\frac{64M_{bmax}DN}{\phi E_T}} = 2.1mm$$

Denklem 9

Burada, N yayın sarım sayısı, d yayın tel çapı, D yayın ortalama çapı, θ ön yük açısı ve E_T çelik yayın Young modülüdür. $D = 3.5$ mm, $N = 3$, $\theta = 180^\circ$, $E_T = 200$ GPa olarak seçilirse yay tel çapı yaklaşık 2.1 mm olmaktadır. Bu çap bükülmeyi yaklaşık 30 derece sağlayabilecek yay çap miktarıdır.

Şekil bellekli ya da nitinol bir yayı doğrusal bir eyleyici olarak kullanmak popüler bir metottur. Nitinol yay şafta bağlı bir disk ile ayrılmış çelik yaya karşı bir karşı güç oluşturmaktadır ve nitinol yay aktif edildiğinde çeneler tutucunun açılmasını sağlamaktadır. Soğutma süresi nitinol yayın de-aktif olması ve tutucu ağızını kapatması için gereklidir. Bir başka nitinol uygulaması da nitinol tel kullanılmasıdır. % 3-5 civarındaki kısa çekilme uzunluklarından dolayı tasarımlar hareketi güçlendirmek için makaralar gibi özel mekanizmaları içermektedir. ŞHA tel de-aktif olduğunda çeneye bir yay konulması gerekecektir. Yayın bükme momenti $M_b = R_f \times L_1 = 11.75$ N.cm olarak hesaplanmaktadır. Bu ŞHA teli deforme edebilecek minimum tork değeridir.

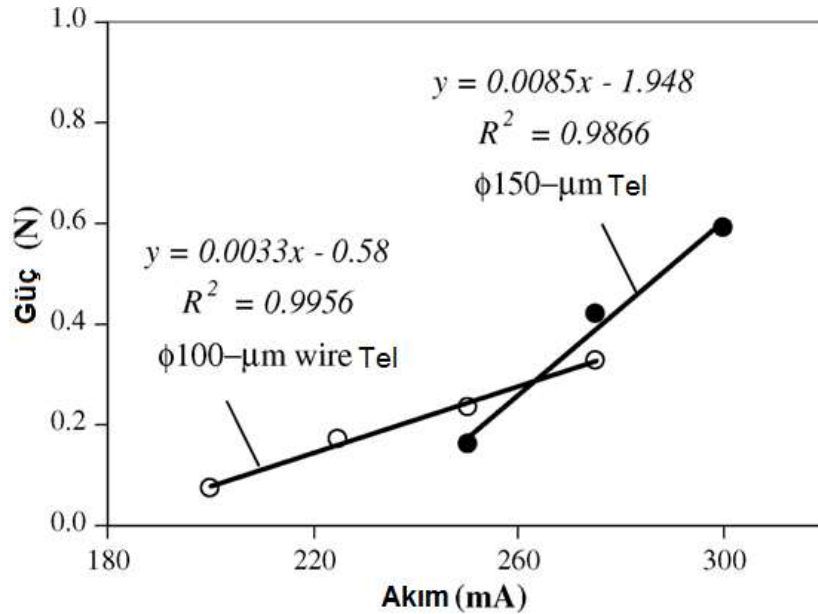
Zhong ve Yeong Şekil 1.32’de görülen 1 mm alüminyumdan yapılmış çenek açıklığına sahip, akrilik esaslı bir gövdeye sahip tutucu tasarımını gerçekleştirmişlerdir.



Şekil 1.32: ŞHA tel kullanılan tutucu prototipi.

Eyleyici hareket, her iki tarafı bir perf tahtasına bir çift cıvata ve somun ile bağlanmış kısa bir parça (33 mm uzunluğunda) ŞHA teliyle sağlanmıştır. ŞHA teli, sürgülü bir birime tutturulmuş bir çıkıntı etrafında bir döngü oluşturur. Bir ucunda her iki çeneye bir bağlantı sağlayan bir açıklık yuvası vardır, böylece ŞHA tel etkinleştirildiğinde çeneleri aynı anda kapatacak şekilde çekmektedir. Kullanılan tel, Mondotronics firmasından ticari ismi Muscle Wire (Flexinol 037–250) olan nitinol teldir. ŞHA tel, de-aktif edildiğinde tutucunun açılması için çenenin arkasına bir çift ön gerilim yayı monte edilmiştir. Tutucunun tabanı, yayların ve durdurma bloğunun yerleştirilmesini sağlamak için oluklar ve basamaklar içermektedir. Kayma ünitesinin arkasına

toparlanma hareketini kolaylaştırmak ve C yivlerinin sıkışmasını önlemek amacıyla Şekil 1.32’de görüldüğü gibi üçüncü bir yay konulmuştur. Sürücü devrede ŞHA telini doğrudan beslemek için 555 IC (zamanlayıcı) çıkışı kullanılmıştır. Burada 555 IC maksimum akım çıkışı 300 mA olduğundan ve ŞHA tel üreticisinin vermiş olduğu tahrik akımının aralığında kaldığı için akım sınırlayıcı rezistör kullanılmamıştır. Devre aktive edildiğinde 0 ile 3 V arasında dalgalanan 2.3 Hz ve % 71 ‘lık döngüde bir çıkış gerilimi sağlanmıştır. Bunun anlamı her dalgalanma çevriminde 0.31 saniye ŞBA telin ısıtılması ve takip eden 0.13 saniye içinde diğer bir çevrim tekrarlanmadan önce dinlenmeye bırakılmasıdır. Böylece bu devre ile hem ŞHA tel tekrar ısıtılmadan önce bir miktar soğuyabilmesi için zaman tanınmaktadır, hem de ŞHA telin aşırı ısınması önlenerek telin kullanım ömründe artış sağlanır. Ayrıca tutucunun ani bir hareket etkisine maruz kalmadan kalıcı bir tutma etkisi sağlanmış olmaktadır. Kuvvet ölçümü, özel bir kuvvet sensörü (Tekscan'dan Flexi-force modeli A201) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sensör, temas kuvvetini algılayan ultra-ince (0,2 mm), esnek baskılı devredir ve iletkenliği ile uygulanan kuvvet arasında doğrusal bir ilişki vardır. Kavrama ve kuvvet sonuçlarına göre ŞHA tellerden çapları 37 µm ve 50 µm olanların eyleyici olarak kullanmak için çok ince ve kırılgan olduğunu bununla birlikte montaj aşamasında zorluk çıkardığını bildirmişlerdir. 250 µm’lik çapa sahip telde ise sonuçların biraz daha farklı olduğu belirtilmiştir. Bu çapın ise çok kalın olduğu, bunun da eyleyici hareket için daha yüksek güç gerektiği bildirilmiştir. 100 µm ve 150 µm çaplara ait tellerle yapılan çalışmada Şekil 1.33’de görüldüğü gibi artan tahrik akımlarında kavrama gücünün arttığı görülmektedir.



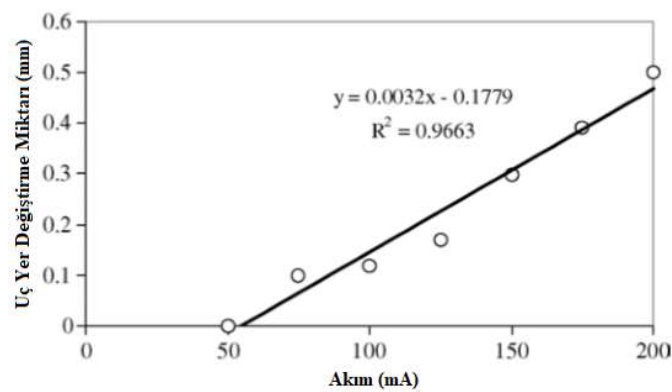
Şekil 1.33: Tahrik akımına karşı kavrama gücünün değişimi.

Yukarıdaki grafikten de görüldüğü üzere 100 μm çapa ait tel ile yapılacak kavrama işi için en az 200 mA tahrik akımına ihtiyaç olduğu görülmektedir. Bu akım seviyesinde yapılan üç ölçüm ortalamasına göre tutma kuvveti 0.0748 N hesaplanmıştır. Her 25 mA'lık artışta ortalama tutma gücü sırasıyla 0.1678 N, 0.2345 N ve 0.3270 N ölçülmüştür. Şekildeki iki eğriden elde edilen bağıntı (korelasyon) katsayısı 100 μm çapa ait ŞHA telde 0.99780 ve 150 μm çapa ait tel için ise 0.99328 R-değerleri elde edilmiştir. Bu durum hataların çok küçük olduğunu göstermektedir. Tel çaplarına bağlı olarak açma ve kapama için gerekli süreleri ise 100 μm ve 150 μm 'lık çapa ait teller için Tablo 1.4'de verilmiştir. Küçük çaplı telin ısı absorblama yeteneğinin ve dolayısıyla aktif olma süresinin kısa olmasına neden olmuştur.

Tablo 1.4: Çeşitli çaplarda teller için reaksiyon zamanı.

Tel çapı (μm)	Açma zamanı (s)	Kapama zamanı (s)	Acıklamalar
37	NA	NA	Çok ince
50	NA	NA	Çok ince
100	0.8	1	
150	1	2.5	
250	NA	NA	Yetersiz akım

Eyleyici ucun akıma bağlı yer değiştirme miktarı üzerine yaptıkları çalışma sonuçları Şekil 1.34'de görülmektedir. 50 mA'den önceki akım değerlerinde belirgin bir yer değiştirme gözlenmemiştir. 75mA'lık değerlerden sonra akım-yer değiştirme karakteristiği doğrusal bir fonksiyon gibi modellenebilmektedir. Doğrulama katsayısı (R değeri) 0.98301 olarak hesaplanmıştır[17, 30].

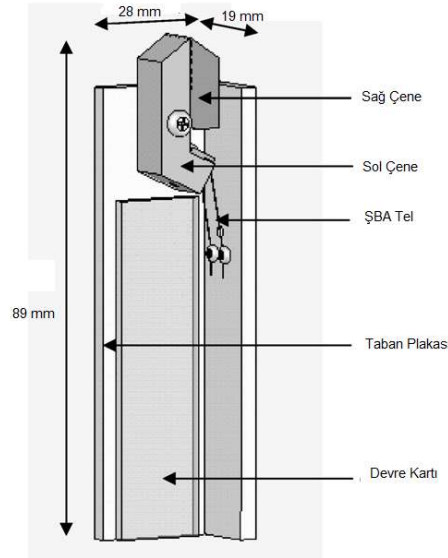


Şekil 1.34: Artan akım miktarına bağlı olarak tutucu ucunun yer değiştirme miktarı.

Bu yapılan çalışmada ki amaç basit ve ucuz (0.7 USD) bir kavrama yapan bir prototip olduğundan çalışmanın amacına uygun olduğu vurgusu yapılmıştır daha doğru ve sonuçlar için

benzer çalışmalarda yüksek hassasiyete sahip güç ve yer değiştirme sensörleri kullanılarak güç ve yer değiştirme geribildirimlerinden faydalanılabilir fakat bunlar sistemin maliyetini ve karmaşıklığını artıracaktır.

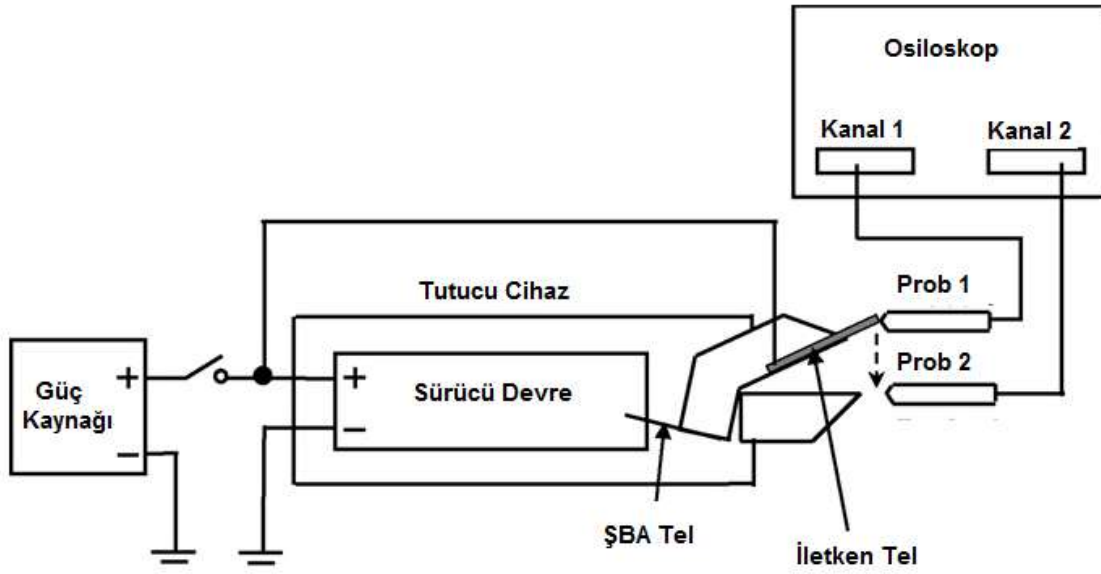
Zhong'un Chan ile yaptığı diğer bir çalışmada bir sabit çene, diğeri ŞHA tel ile hareket ettirilen Şekil 1.35' de görülen tutucu tasarımını gerçekleştirmişlerdir. ŞHA telinin iki ucu, tutma operasyonu esnasında ŞHA teli ısıtmak için elektrik akımı sağlayan bir devre kartına bağlıdır.



Şekil 1.35: Sabit Çeneli Tutucu Tasarımı.

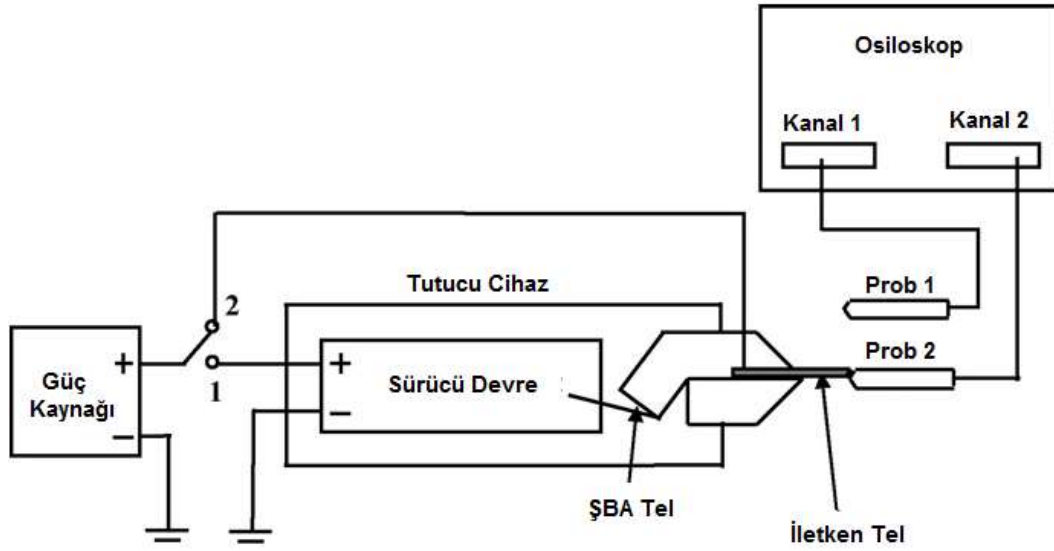
Tutucunun kapanması ŞHA tel ile gerçekleştirilirken tutucuyu açmak için tutucuya bir burma yayı entegre edilmiştir. Tutucuyu açmak için kullanılan burma yayı küçük olabilir çünkü hareketli kavrama çenesini çekmek için kullanılmaktadır. Tutma kuvveti hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla yukarıdaki çalışmalarında olduğu gibi 0.127mm kalınlıkta ve 9.53 mm çapında aktif algılama alanına sahip ince bir film tabakası olan Teksan Flexiforce A201 kullanmışlardır. Bu kuvvet sensörü bir elektrik devresindeki değişken bir direnç gibi görev görmektedir. Kuvvet sensörü yükü boşaltıldığında 5 ohm üzerinde bir direnç sahiptir. Sensöre bir güç uygulandığında bu direnç düşmektedir. Kuvvet sensörü tutucu çenelere yerleştirilmiştir ve çene ağızları tahrik akımı ile bağlı bulunduğu ŞHA telin kısılması ile kapanınca bir multimetre vasıtasıyla sensör uçlarından direnç değişimi ölçülmektedir. Bu direnç değeri iletkenliğe dönüştürülmektedir. Böylece, kavrama kuvvetinin değeri, kalibrasyon sırasında çeşitli yüklerle (20 gr–500 gr) elde edilen doğrusal bir grafikten hesaplanmaktadır. Daha önce bahsedildiği üzere elektrik akımının etkisi ile oluşan ısınn dönüşüm sıcaklığına ulaşması ile eyleyici ŞHA tel östenit faza geçmektedir. Bu durumda tel boyutunda oluşan kısılma tutucu ağız

kapatmaktadır. Elektrik akımı kesildiğinde ŞHA tel soğur ve tekrar düşük sıcaklık fazı martenzit formuna dönüşür. ŞHA tel düşük sıcaklık formundadır ancak boyut olarak orijinal haline dönmesi için dışarıdan bir kuvvete ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle; burma yayıyla uygulanan bir kuvvet ile tel uzamakta ve tutucu çene burma yayı vasıtasıyla açılmaktadır. ŞHA telinin ısıtma ve soğutma çevrimi ile yapılan açma-kapama işlemi zaman almaktadır. Bu nedenle Zhong ve Chan çalışmalarında çeşitli akım seviyelerinde açma ve kapama işlemine yanıt verme zamanını tespit edebilmek için iki deney kurgulanmışlardır. Ayrıca sürücü akımı, burma yayı torku ve ŞBA tel çapının tepki zamanına etkilerini araştırmışlardır. Şekil 1.36'da özellikle kavrama çenelerini tamamen açık bir durumda iken kapatmak için gerekli zamanı belirlemek için tasarlanmış deney düzeneğinin şematik diyagramını göstermektedir.



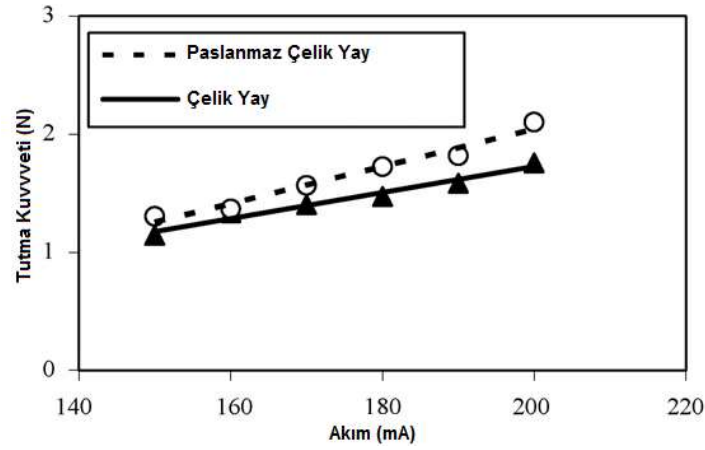
Şekil 1.36: Kapama zamanının tespit edilmesi için kurgulanmış deneysel setin şematik gösterimi.

Hareketli çeneye iletken bir tel bağlanmıştır. Bu tel güç kaynağına bağlanmıştır ve anahtar açıldığında elektrik akımı iletken telden geçmekte ve aynı zamanda ŞHA teli de ısıtmaktadır. Problar 1 ve 2, tutucu çene ucuna, tutucu telin tamamen açıldığında iletken telin 1. proba dokunacağı şekilde yerleştirilmiştir. Tutucu tamamen kapandığında, iletken tel prob 2'ye dokunacaktır. Bu iki prob bir osiloskobun iki kanalına bağlanmıştır. Kapanış süresi, osiloskop kanalları 1 ve 2'den gelen sinyallerdeki iki yükselen şiddet arasında belirtilen süre ölçülerek belirlenebilmektedir. Şekil 1.37'de ise özellikle kavrama çenelerini kapalı bir durumdan açmak için gerekli zamanı belirlemek için tasarlanmış deney düzeneğinin şematik diyagramını göstermektedir.



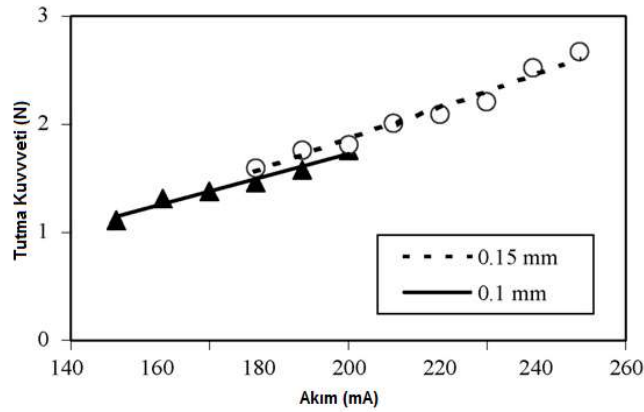
Şekil 1.37: Açma zamanının tespit edilmesi için kurgulanmış deneysel setin şematik gösterimi.

Bu kurguda kapanış zamanını ölçmek için küçük bir değişiklik yapılmıştır. İki yollu devre anahtarı kullanıldığından anahtar devreye girdiğinde, elektrik akımı sadece iletken kablo üzerinden geçecek, sürücü devre üzerinden geçmeyecektir. Bu durumun tam tersi şekilde görüldüğü üzere 1 nolu konuma getirildiğinde sürücü devre üzerinden geçip iletken tel üzerinden geçmeyecektir. Açma zamanı osiloskop kanalları 1 ve 2'den gelen sinyallerdeki iki yükselen şiddet arasında belirtilen süre ölçülerek belirlenmektedir. Kavrama gücüne etki eden faktörler ŞHA telin çapı ve sargı sayısı ve kullanılan burma yayının torkudur. ŞHA tel bobinlerinin sayısının kavrama performansı üzerindeki etkisi, pim etrafında sarılan bobinlerin sayısını değiştirerek incelendiğinde tel bobini sayısı arttıkça kavrama kuvveti artmaktadır. Bununla birlikte ŞHA tel sarım sayısı arttıkça tutucunun performansına negatif bir etkisi olduğu bildirilmiştir. Çünkü daha uzun tel uzunlukları, telin aktive olabilmesi için daha uzun sürelerle ihtiyacı vardır. Burgu yaylarının torkunun tutma kuvvetine etkisini araştırmak için 100 μm çaptaki ŞHA tele 150 mA'lık minimum giriş akımına tabii tutmuşlar ve üreticinin önerdiği 200 mA'lık akım seviyesini aşmamışlardır. İki farklı torka sahip burma yayı (çelik burma yayı ve paslanmaz çelik burma yayı) ile yapılan çalışmada; çelik tel burma yaylı tutucu, paslanmaz çelik burma yaylı tutucu ile tüm akım seviyelerinde kıyaslandığında daha küçük kavrama kuvvetine sahip olmuştur. Bunun sebebi çelik tel burma yayının daha büyük bir torka sahip olmasıdır ve kavrama çenelerinin kapanmasına daha büyük direnç göstermiştir. Dolayısıyla Şekil 1.38'de görüldüğü gibi net tutma kuvveti daha da küçük hale gelmiştir.



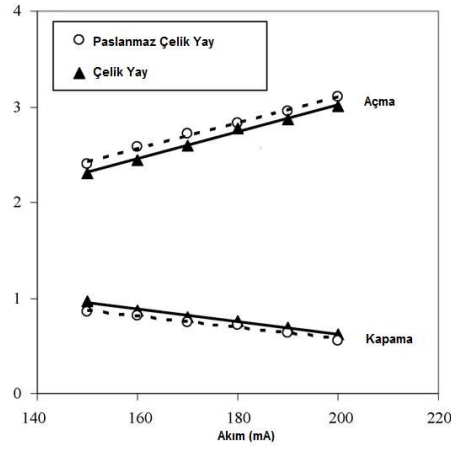
Şekil 1.38: 100 µm çapa sahip ŞHA tel ile çelik ve paslanmaz çelik yaylar kullanılarak yapılmış bir tutucu aletin sürücü akımı ile kavrama kuvveti değişim grafiği.

ŞHA tellerin çaplarının kavrama kuvveti üzerine etkisini araştırmak üzere 100 µm ve 150 µm çaplara sahip (Flexinol 100LT ve 150LT) teller, çelik burgu yayı ile kullanılmıştır. Önceki deneysel çalışmalarda olduğu gibi artan sürücü akımları ile kavrama kuvveti artmıştır. Bununla birlikte 150 µm’lik çapa sahip tel daha kalın olup daha büyük hacime sahip olduğundan dolayı ancak 180 mA’lik sürücü akımında aktif hale gelmiştir. Yani telin tamamen ısınması ve aktif hale gelip, kısalması için daha fazla akım ve güce ihtiyaç duyması demektir. Şekil 1.39’da görüleceği gibi daha kalın ŞHA telleri, daha ince bir ŞHA teline kıyasla daha yüksek bir kavrama kuvveti üretmektedir.



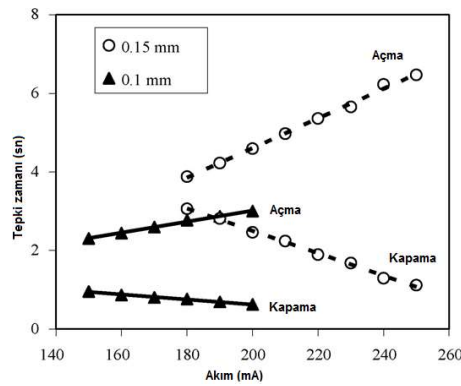
Şekil 1.39: 100 µm ve 150 µm çapa sahip ŞHA tellerin çelik burma yayı ile beraber kullanıldığı bir tutucu cihazda tutma kuvveti ve akım arasındaki bağıntı grafiği.

Uygulanan sürücü akımı, ŞHA telin küçülme ve ardından ilk haline dönme hızını etkileyen ana faktör olabilir. Ayrıca yay torku ve ŞHA telin çapı da tutucunun tepki süresini etkileyebilir. Şekil 1.40’da 100 µm çapa sahip ŞHA telin çelik ve paslanmaz çelik burgu yayı ile yapılan sürücü akımına bağlı olarak değişen tepki zamanı verilmiştir.



Şekil 1.40: 100 µm çapa sahip ŞHA telin çelik ve paslanmaz çelik burğu yayı ile yapılan sürücü akımına bağlı olarak değişen tepki zamanı.

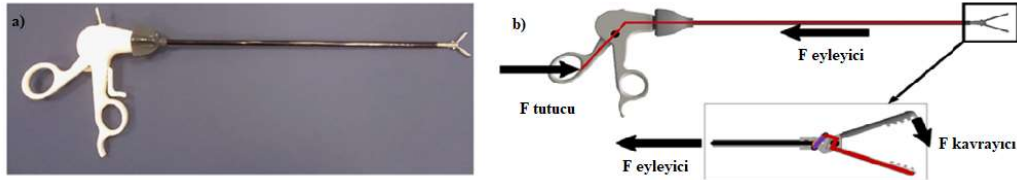
Şekilden de görüldüğü üzere artan sürücü akımları ile beraber çenelerin kapanma süresi de azalmaktadır. Bunun nedeni akım arttıkça ŞHA tele daha fazla güç sağlamasıdır. Bu da telin daha çabuk ısınarak, daha kısa zamanda kısılmasına sebep olmaktadır. Çelik burğu yaylı tutucunun kapanma süresinin, paslanmaz çelik yaydan biraz daha uzun olduğu da görülebilir. Bunun nedeni, çelik tel yayının biraz daha büyük olan torkunun, kapanma işlemine daha büyük bir dirençle göstermesi sonucu tutucunun tamamen kapanması biraz daha uzun süre almasına neden olmasıdır. Diğer taraftan açma zamanı kapanma zamanından daha fazla zaman almaktadır çünkü ısıtma için gerekli olan süre soğumanın doğal halde gerçekleşmesi için gerekli olan süreden çok daha kısadır. Bununla beraber sürücü akımı arttıkça çenelerin açılma zamanı da artmaktadır. Buna ek olarak, çelik tel yaylı tutucu için açma süresi, paslanmaz çelik yay göre biraz daha kısadır. Bunun nedeni; çelik burğu yayının biraz daha yüksek torka sahip olması ve bunun sayesinde çeneyi daha kısa sürede açabilmesidir. Şekil 1.41 ise tel çaplarına bağlı olarak açma ve kapamaya verilen tepki sürelerini göstermektedir.



Şekil 1.41: 100 µm ve 150 µm çapa sahip ŞBA tellerin çelik burğu yayı ile kullanıldığı tutucu bir cihazda tutucu çenelerin sürücü akımına bağlı olarak açma ve kapama tepki zamanları.

Şekilden de görüldüğü üzere her iki tel çapında da artan sürücü akımı ile beraber kapanma zamanı azalmakta fakat açma zamanı artmaktadır. Yine şekilden görüleceği gibi daha ince bir ŞBA telin tutucuyu kapatmak için daha az zaman harcamaktadır. Bunun nedeni öncekilerle benzer bir şekilde daha ince bir telin hacminin daha küçük olması ve bu nedenle tüm tel uzunluğunun ısıtılması için daha kısa bir zaman gerektirmesidir. Yine daha önce bahsedildiği üzere daha küçük bir çapa sahip bir ŞBA telin daha küçük bir hacmi vardır ve daha kalın bir ŞHA telden daha az ısıyı dağıtacağı için daha hızlı soğumaktadır. Son olarak da Zhong ve Chan yaptıkları çalışmada açma-kapama çevrimini 1.175.000 kez sorunsuzca tekrarlayarak sadece 1.45 USD' ye mal olan tasarımlarının basit ve ucuzluğunu vurgulamışlardır[34].

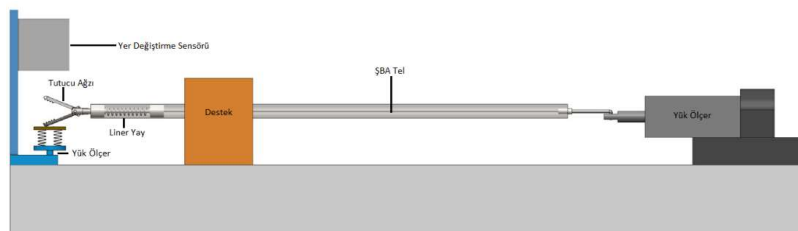
Klinik operasyonlarda kullanılan geleneksel laparoskopik tutucular örnek Şekil 1.42 a)'da gösterilmektedir. Şekil 1.42 b)'de ise kavrama mekanizması verilmiştir.



Şekil 1.42: a) Açılal tutma mekanizmasına sahip geleneksel bir laparoskopik kavrayıcı, b) Kavrama mekanizması.

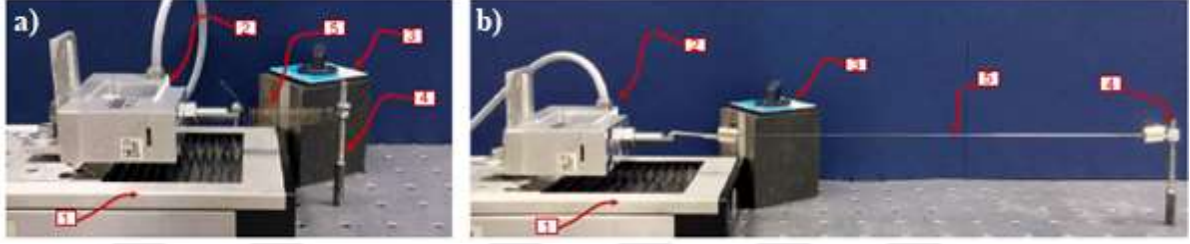
Geleneksel tutucu cerrahin kuvvet uyguladığı bir kol mekanizmasına sahiptir. Kavrayıcı kuvvetinden ($F_{\text{kavrayıcı}}$) dolayı, eyleyici kuvvet (F_{eyleyici}) kavrayıcının orta şaftından elde edilir. Dolayısı ile kavrayıcının ağız kısmı açılır ve kapanır. Ağız kısmının güvenli bir kavrama gücü uygulaması gereklidir. Bu güç ex vivo çalışmalarda doku ve karaciğer gibi organlar için 3N'luk bir sınır değerin üstünde olması gereklidir.

Yukarıdaki şaft mekanizmasının yerine ŞHA bir tel kullanılarak bu tutucuyu akıllı bir medikal cihaz haline getirmek amacıyla Koç ve arkadaşları Şekil 1.43'deki deneysel mekanizmayı kurgulamışlardır.



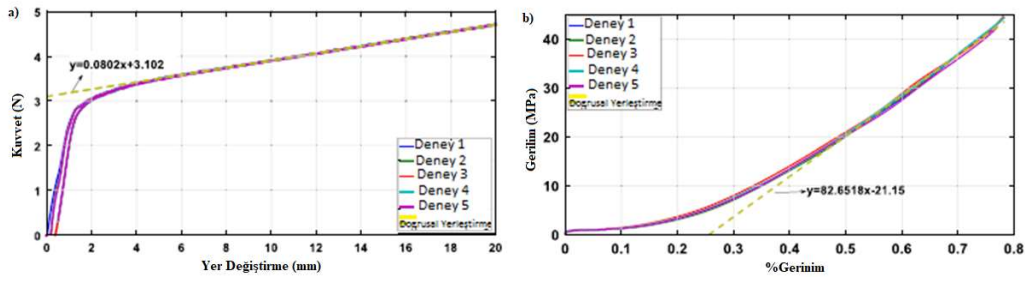
Şekil 1.43: Kavrayıcı gücünü kontrol etmek amacıyla akıllı malzeme ile dizayn edilmiş deneysel kurgu.

Öncelikle akıllı bir laparoskopik tutucu elde etmek amacıyla ticari olarak bulunabilen ŞHA tel (Flexinol, Dynalloy Inc.) 300 mm eyleyici malzeme olarak seçilmiştir. ŞHA tele doğrusal bir yay sabitlemişlerdir. Montaj işlemi esnasında hem ŞHA tel hem de gergi yayı önceden belirlenmiş uzunluğu vermek amacıyla aynı miktarda güç ile gerilmiştir. Hareketin başlangıç aşamasında ağız tamamen açıktır. İlk adım Şekil 1.44 a)'da görüldüğü gibi gergi yayının elastik karakteristiğini tespit etmek olmuştur. Hemen ardından Şekil 1.44 b)'de görüldüğü gibi ŞHA telin gerilim-gerinim karakteristiğini tespit edilmiştir.



Şekil 1.44: ŞHA telin ve yayın karakterizasyonu için kurulan test düzeneği. 1)Yay ve ŞHA telin elastik karakteristiklerini elde etmek amacıyla uygulanan yer değiştirme ve hıza bağlı doğrusal motor düzeneği. 2) ŞHA ve yaya uygulanan gücün yük ölçer ile ölçülmesi. 3) Doğrusal motorlu düzenek için sabit destek. 4) Yay ve ŞHA tel için sabit destek ve 5)Yay ve 300 mm ve 0.508 mm çapında ŞHA tel.

Üretici kataloğunda %3 'lük bir küçülmenin ancak 34.5 MPa'lık bir başlangıç gerilimi ile elde edilebileceği bilgisi verilmiştir. Bu yüzden, farklı seviyelerde kuvvetler, yukarıdaki deney düzeneği kullanılarak ŞBA telin mevcut bellek gerginliğini bulmak amacıyla tekrarlanarak uygulanmıştır. Pasif mekanik elemanın yay sabiti, Şekil 1.45 a)'da görülen kuvvet-yer değiştirme eğrisinin doğrusal bölümünden çıkarılır. Şekil 1.45 b)'de ise 4 N'lük optimum ön gerilim yay gücünün, ŞHA tel üzerinde 19.5 MPa'lık bir gerilim değeri ürettiği bulunmuştur. Dahası, ŞHA telinin ve ön gergili yayının karşılık gelen uzamasının sırasıyla 1.4 ve 1.1 mm olduğu bulunmuştur. (Doğrusal hareket düzeneği hem yay hem de ŞHA telde uzama ve yer değiştirmeyi sağlar. 0.1 mm/sn 'lık hız karakterizasyon işlemi sırasında tüm deneylerde sabittir. Hem yay hem de ŞHA tele uygulanan kuvvet yük ölçer tarafından ölçülmüştür.)

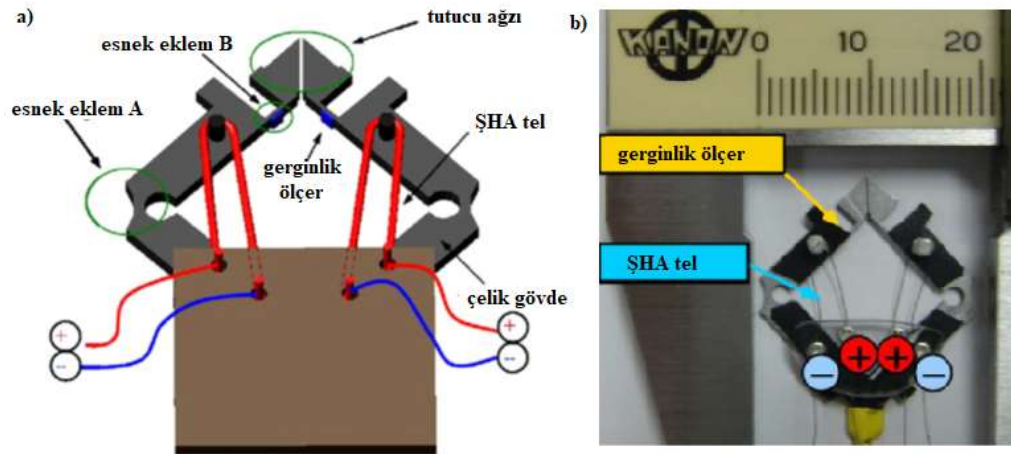


Şekil 1.45: Beş farklı deney için ön gergi yayının ve ŞHA telin karakterizasyon sonuçları.. a) Yayının elastik özelliği, kuvvet yer değiştirme sonuçlarının doğrusal kısmında elde edilmektedir. b) ŞHA telinin başlangıç bellek gerinim değeri, gerilme-gerinim sonuçlarına göre hesaplanır.

Sonuç olarak, ön gerilim yayının uzunluğu 40 mm olarak ve toplam uzunluk yaklaşık 350 mm olarak seçilmiştir. ŞBA tel en az yaklaşık 14 N’luk kuvvet gereksinim şartlarına dayanması gerekir onun için tel çapı 0.508 mm seçilmiştir[19].

1.5 Tutucuların Üretim ve Tasarım Yöntemleri

Çok çeşitli tasarım ve mekanizmalara sahip tutucu ve mikro tutuculara literatürde rastlanmaktadır. Genel anlamda mikro boyutlarda tasarlanmış tutucularda mono blok gövde tasarım olarak tercih edilmektedir. Kyung ve arkadaşları çalışmalarında STS 304 paslanmaz östenitik çelikten bir plakayı Elektro Tel Erezyon (ETE) yöntemi ile elde etmişlerdir. Tasarıma ait konsept ve gerçek görüntü Şekil 1.46’ a) ve b)’de görülmektedir.

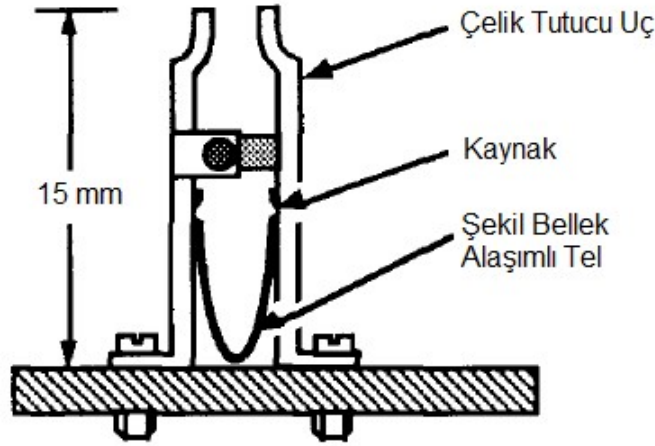


Şekil 1.46: a) Monoblok tutucu konsept görüntüsü, b) Gerçek görüntüsü.

Bu çalışmada tutucu ağzın tutulan nesneye zarar vermemesi amacıyla A menteşesinde üretilen baskının fazlasının B menteşesinde zayıflatılması amaçlanmıştır. Tasarımın optimize edilmesi amacıyla parçaya yapısal analiz uygulanmıştır. Sonlu Elemanlar Analizine (SEA) göre önce A

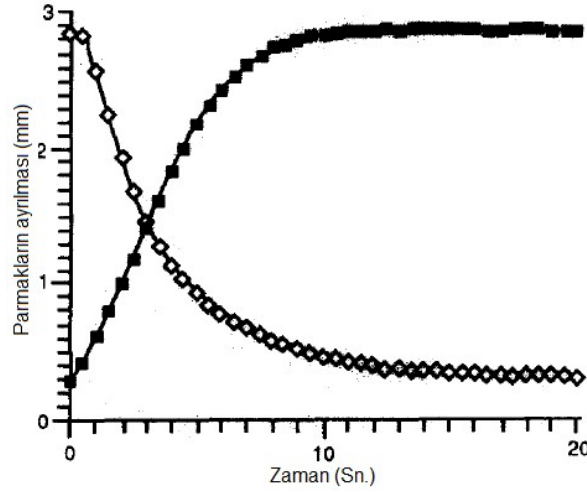
menteşesinin ŞHA tellerin 3N'luk kuvvet uygulaması durumunda 1 mm et kalınlığında kaç mm'lik bir genişlikte tasarlanmasını gerektiğini tespit etmişlerdir. Güvenlik faktörü olarak 1.2 mm'lik et kalınlığında 0.55 menteşe genişliğinde 295 MPa'lık bir gerilim hesaplamışlardır. Benzer şekilde B menteşesine bir gerinim ölçer takılarak 0.3 mm menteşe genişliğinde A ve B menteşelerinde sırasıyla 22 MPa ve 75.5 MPa'lık gerilimler hesaplanmıştır[26].

Erken dönem minyatür tutucu çalışmalarından bir örnek Russell'in paralel bir robotun ucuna takmış olduğu tutucudur. Kavrayıcının tasarımı sırasında tutucu nesneleri 0.2 mm ila 2 mm arasında değişen boyutlarda kavraması, tutucu tasarımının basit olması ve boyutsal olarak daha da küçülmeye olanak tanınması, kavrama işleminin takip edilip geribildirim beslemesinin olması gibi kriterleri göz önüne almıştır. Tutucunun iki parmağı, 0,3 mm kalınlığında, 4 mm genişliğinde, ucu 1 mm'ye kadar inceltilerek 15 mm uzunluğa sahip olan paslanmaz çelik gövdeden yapılmıştır. Innovative Technology International Inc. tarafından üretilen Nitinol Şekil Hafızalı Alaşım (ŞHA), ağırlık oranı için büyük bir kuvvet sağlayan ve basit eyleyici tasarımına olanak verdiği için seçilmiştir. Şekil 1.47'de gösterildiği gibi, parmaklar arasında 0,3 mm çaplı ŞHA teli U şeklinde bir formda kaynak yapılmıştır. Tutucuyu açmak için bilindiği üzere ŞHA tel bir akım geçirerek ısıtılmaktadır.



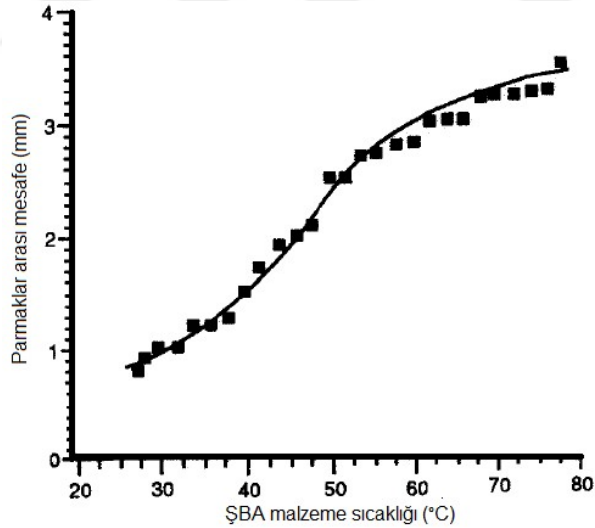
Şekil 1.47: Minyatür tutucu tasarımı.

Tutucu için gereksinimlerden bir tanesi bir sensörün parmak uçları arası mesafeyi ölçmesidir. Bu işlem parmak ayırma işleminin doğru bir şekilde kontrol edilmesini, kavramada tutulan nesnelerin boyutunun izlenmesini veya bir nesnenin tutucu tarafından tutulduğunun onaylanmasını sağlamaktadır. Bunun için optik sensör kullanılmıştır. Parmakların operasyon hızları Şekil 1.48'de gösterilmiştir.



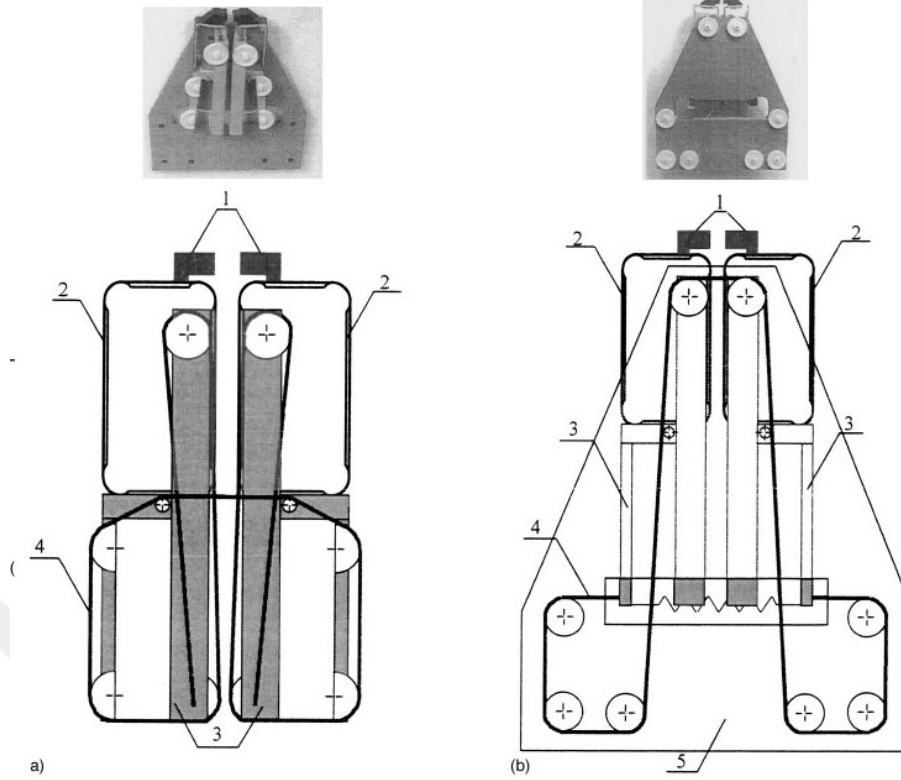
Şekil 1.48: Tutucu operasyon hızı.

Parmakları açmak için şekil bellekli alaşımlı tel eyleyiciden 0.8 A'lık sabit bir akım geçirilmiştir. Isıtma işlemini hızlandırmak için büyük bir başlangıç akım darbesi uygulayarak daha hızlı bir yanıt elde edilebilmektedir. Parmak kapatma işlemi için akım kesilmekte ve şekil bellekli alaşım doğal olarak soğumaktadır. Harici bir soğutma sağlayarak parmakların kapanması daha da hızlandırılabilir. Şekil 1.49 'daki grafik, şekil bellekli alaşım eyleyici malzemenin sıcaklığı ile parmak uçları arasındaki mesafeye ilişkin değişimi göstermektedir.



Şekil 1.49: ŞHA eyleyici için sıcaklık ve yer değiştirme arasındaki ilişki[35].

Bertetto ve Ruggiu 2 serbestlik derecesine sahip paralel hareket ve açısal hareketi temel alan tutucu dizaynları üzerine çalışmışlardır. Şekil 1.50'de söz konusu dizaynları şematik yapısı ve tutucu uçları (1), uyumlu dörtgen (2), kirişler (3), ŞHA telleri (4) ve bunların yolları ve destek plakası (5) görülmektedir.



Şekil 1.50: a) Paralel tutucu, b) Açısal tutucu şematik gösterimleri.

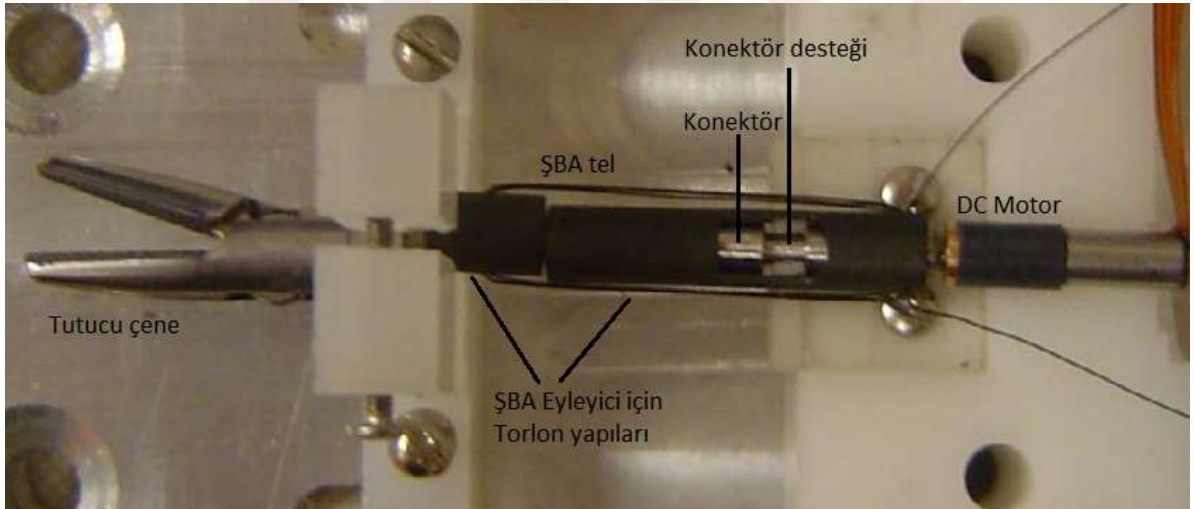
Şekil 1.50 a)' da ŞHA telin çekilmesi ile kirişlerin uçlarının birbirine daha yakın hareket etmesine neden olmaktadır. Bunu yaparken, uyumlu dörtgen deforme olmakta ve parmakların paralel hareketle hareket etmesine imkân tanır ve parmak uçlarının paralel hareket etmesine olanak tanımaktadır. ŞHA tel uzunluğu 600 mm ve sabit makaralar etrafına sarılmıştır. Diğer taraftan açısal hareket eden tutucunun ŞHA teli çekildiğinde, kirişler arasındaki mesafe sabit tutulduğundan simetrik hareketli parçalar rulmanların etrafında sıkı bir şekilde dönmektedir. Bu tahrik sayesinde açısal hareket sağlanmaktadır. Burada da ŞHA telin uzunluğu 600 mm'dir ve telin sarıldığı makaralar da dönebilmektedir. Tutucu uçlarındaki üretilen gücü ölçtüklerinde paralel hareket eden tutucu uçlarında 2.4 N, diğerinde ise 4.4 N'luk bir güç elde etmişlerdir[36].

Kode ve arkadaşları tutucu prototip çalışmalarında ŞHA malzeme ile bir DC motoru kullanarak sistemi hibrid hale getirmişlerdir. Tasarlanan hibrid eyleyici iki fazlı bir eyleyici olarak çalışmaktadır. Birinci faz tutucu çenelerinin açma ve kapama işlemidir. İkinci aşama iğne üzerine baskı uygulanan büyük kuvvetler gerektiren tutma hareketidir. Tutucu çenelerinin kapatılması ve çene ağzında dikiş iğnesinin tutulması işleminde hem ŞHA hem de DC motor çalıştırılmaktadır ama tutucu çene ağızlarının açılmasında sadece DC motor çalışmaktadır. Şekil 1.51'de sistemi hibritleştiren DC motor ve ekipmanları görülmektedir.



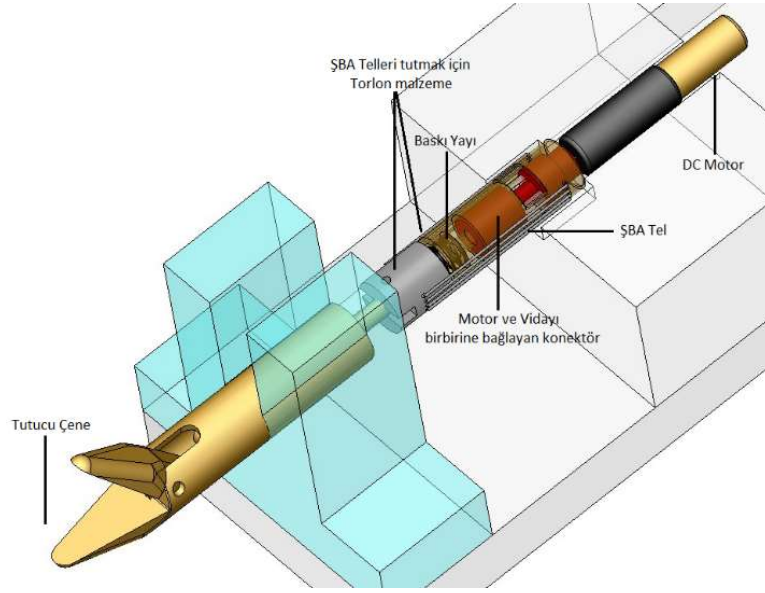
Şekil 1.51: DC motor, konektör ve vidadan oluşan doğrusal bir eyleyici.

Milimetre ölçekli eyleyici prototip 3.4 mm çapında ve 12.22 mm uzunluğunda fırçasız DC motor (BL2S3.025.R.0) ve 1:25'lik bir episiklik dişli redüksiyonu içermektedir. 3,4 mm motor bir konektör vasıtasıyla 1.46 mm çaplı bir vidaya bağlanmıştır. Konektör bir rulman görevi görmektedir ve motoru ŞHA eyleyici çalıştırıldığında üretilen aksenal kuvvetlerden ayırmaktadır. 1:25 redüksiyon dişli kutusu ile DC motor tarafından üretilen tork, üreticinin teknik verilerine göre 0.42 mNm'dir. ŞHA eyleyici Şekil 1.52'de gösterildiği gibi, delikler yoluyla silindirik torlon yapısının çevresine sarılmış 0.1524 mm çaplı bir ŞHA telinden oluşmaktadır.



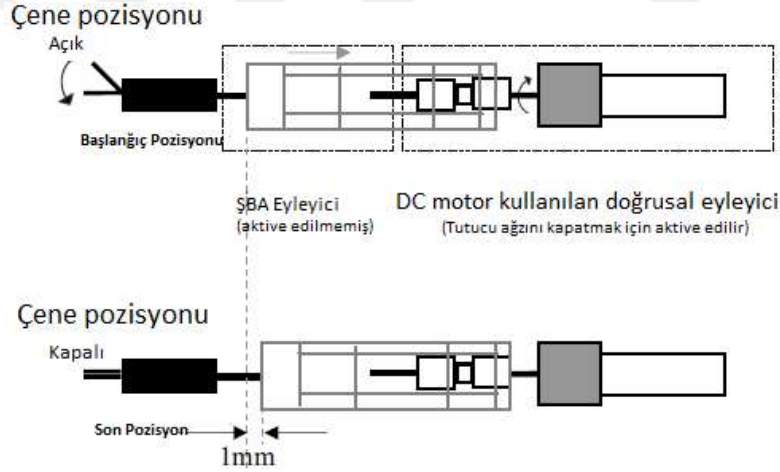
Şekil 1.52: Hibrid tutucu prototipi.

Torlon, yüksek sıcaklığa dayanıklı, iyi mekanik özelliklere sahip ve kolayca işlenebildiği için ŞHA aktuatör yapısını oluşturmak için kullanılmaktadır. Şekil 1.53'de görüldüğü gibi ŞHA eyleyiciye ŞHA teline gerekli geri besleme kuvveti sağlamak için bir yay takılmıştır.



Şekil 1.53: Tasarım prototipinin CAD modeli.

SMA telinin basma kuvvetlerini iletememesi nedeniyle yay kullanılmaktadır ve potansiyel olarak yüklenen yay, tutucunun açılması için gerekli sıkıştırma kuvvetini iletmektedir. Eyleyicide kullanılan ŞHA telinin toplam uzunluğu 150 mm'dir ve ŞHA eyleyiciyi bağlayan her bir telin uzunluğu 25 mm'dir. Şekil 1.54'de görüldüğü gibi DC motoru saat yönünün tersine dönerek, tutucu ağızlarını açık pozisyonundan kapalı pozisyona getirmektedir.



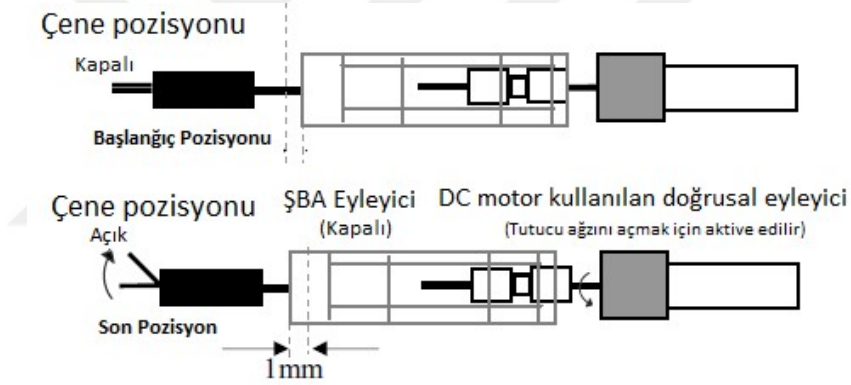
Şekil 1.54: Eyleyici ağızını kapatmanın ilk evresi.

İkinci aşamada, Şekil 1.55'de görüldüğü gibi tutucu çeneleri kapalı olduğundan DC motor devreden çıkartılıp ve ŞHA devreye sokulmaktadır. ŞHA eyleyiciyi harekete geçirmek için paralel olarak tasarlanmış ŞHA tel dizisinden akım geçirilmektedir. Bu pozisyonda tutucu ağızında oluşan basınç 5.5 N'un üstündedir. Bu basınç tutucu çeneleri ile tutulan bir cerrahi iğnenin dikme işlemi yapabilmesi için yeterli bir kuvvettir.



Şekil 1.55: Tutma eyleminin devamlılığının ŞBA teller ile sağlandığı ikinci aşama.

Tutucu çenelerinin açılmasını sağlamak için Şekil 1.56’da görüldüğü gibi öncelikle ŞHA akım kesilerek devreden çıkarılmaktadır. Bu esnada ŞHA soğurken DC motor saat yönünde bir dönüş hareketi gerçekleştirmektedir. Vidanın saat yönünde ŞHA eyleyicinin ileri yönde hareket etmesine neden olmaktadır. ŞHA telleri sıkıştırma kuvvetlerini iletemediğinden, potansiyel olarak önceden yüklenmiş olan gergi yayı DC motor tarafından çeneleri açmak için gerekli olan kuvveti iletmektedir. Motor dönmeye devam ederken tutucu çeneleri açılmaktadır. Çenelerin kapalı pozisyondan açık pozisyona geçmesi 1.5 sn kadar bir süre almaktadır. Bu süre sonunda DC motor devreden çıkartılmaktadır[15].



Şekil 1.56: Eyleyici ağızını kapatmanın son evresi.

Sathıyan ve arkadaşlarının şekil bellekli alaşımlı yay kullanarak tasarladıkları tutucu Şekil 1.57’de gösterilmektedir.



Şekil 1.57: ŞHA yay kullanılarak tasarlanmış tutucu yapısı.

Tasarımda kullanılan şekil bellekli alaşım daha önceki konularda bahsedildiği gibi mekanik basitlik ve ağırlık azaltma operasyonu için en kullanışlı alaşımdır. Aşağıda verilen Tablo 1.5’de önerilen modelde kullanılan ŞHA’nın Özelliklerini, Tablo 1.6 ise önerilen tutucuda kullanılan malzemeleri göstermektedir.

Tablo 1.5: Tasarımda kullanılan ŞHA malzemenin teknik özellikleri.

ŞHA Tel Özellikleri				
Tel Çapı (inç)	Direnç (ohm/inç)	Maks. Çekme Kuvveti (gr)	Oda Sıcaklığında Uygulanan Akım (mA)	Kısalma(Çekme) Zamanı (sn)
0.015	0.2	2000	2750	1
0.020	0.16	3500	4000	1

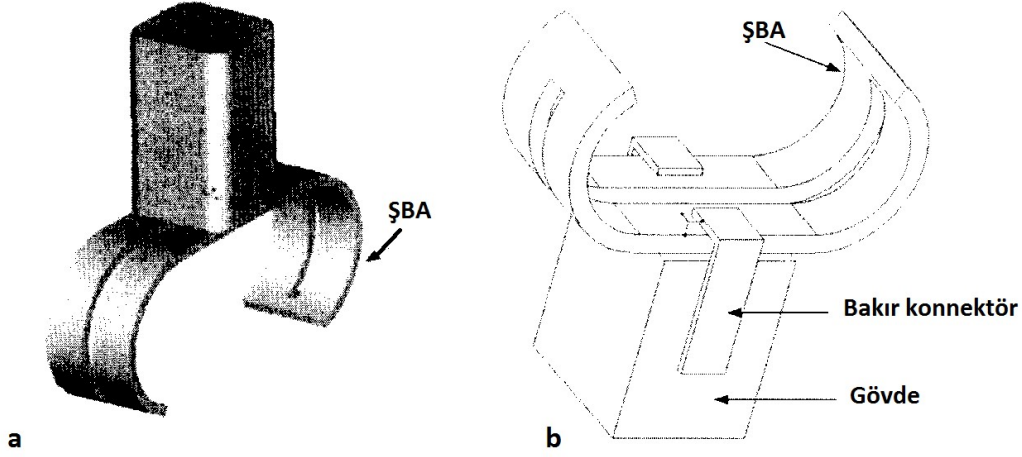
Tablo 1.6: Tutucu bileşenlerinde kullanılan malzemeler.

Tutucu	Polipropilen
Bağlantı Çubuğu	Alüminyum
Çark	Alüminyum
Yay	Çelik
Disk	Ebonit
Tel	Şekil Bellekli Alaşım

Optimize edilmiş özelliklerin elde edilmesi için ısıtılma öncesi %30-40 soğuk işlenmiş malzemeler kullanılmışlardır. Tasarımda kullanılacak nitinol yayı ticari olarak almak yerine şekil hafızalı nitinol malzemeden kendileri imal etmişlerdir. Nitinol alaşımlı tel, yay formunda sarılarak 500° C’de ısıtılmış ve ardından su ortamında ani olarak soğutulmuştur. Bu form malzemenin orijinal şeklidir. Elde edilen şekil hafızalı yay ve normal gergi yayı tutucu çenelerini eyleyici aktif edildiğinde kapatılacak şekilde yerleştirilmiştir. ŞHA yay üzerinden geçen akım kesildiğinde ise normal çelik yay potansiyel olarak biriktirdiği enerjiyi, ŞHA yayın soğumasıyla tutucu çenelerini açacak şekilde tasarlanmış bağlantı çubuğunu aşağıya doğru çekerek, tutucu ağızını açacaktır. Sathiyan ve arkadaşları bu çalışmaları ile 200 gram ağırlığında ve 98 mm civarındaki objeleri kavrayıp taşıyabilecek özelliklerde bir tasarımı literatüre kazandırmışlardır[37].

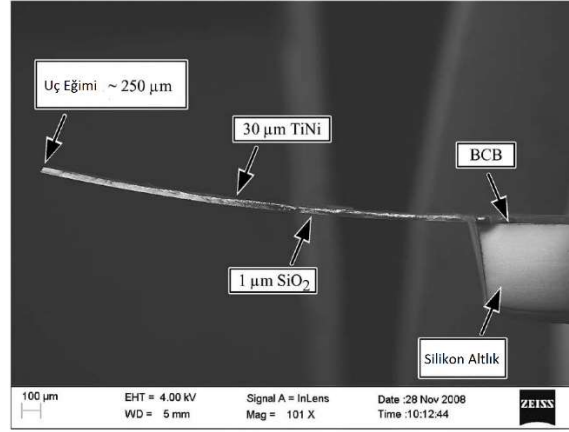
Tutucu mekanizmalarında ŞHA malzemenin eyleme hareketinden sonra başlangıç pozisyonuna getirilebilmesi amacıyla ikinci bir yay yada antagonist sisteme ihtiyaç duyulduğu önceki bölümlerden bilmekteyiz. Yine aynı şekilde ŞHA malzemelerin karakteristik özellikleri bölümünde sergiledikleri tek yönlü şekil bellek ve iki yönlü şekil bellek özelliklerinden bahsetmiştik ve genel olarak eyleyici sistemlerde tercih edilen metotun tek yönlü şekil bellek

olduğunu yukarıdaki çalışmaların çoğunda görmekteyiz. Bununla birlikte eyleyicilerde iki yönlü şekil belleği kullanmanın avantajı olduğu ve döngüsel uygulamalarda sıfırlama mekanizmasını yani yay yada antagonist yapıları ortadan kaldırdığı ve böylece eyleyicilerin daha basit ve daha küçük olabilmesi söz konusudur. Huang ve arkadaşları buradan yola çıkarak Şekil 1.58 a) ve b)'de gösterilen tutucu çene tasarımı üzerine çalışmışlardır.

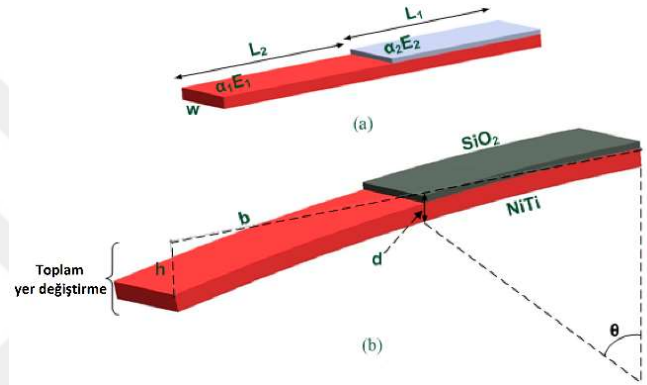


Şekil 1.58: NiTi ince levhadan imal edilmiş a) tutucu tasarımı, b) tutucu detay çizimi.

Başlangıçta yalnızca düz şeklini yani tek yönlü şekil bellek özelliğine sahip 0.02 mm kalınlığındaki ŞHA NiTi malzeme iki yönlü şekil bellek etkisi gösterebilmesi amacıyla eğitilmiştir. Bunun için düz şekle sahip malzeme kavisli şekil alacak şekilde şekillendirilerek, bu şekilde kalması için kısıtlanmış ve 500 °C’de iki kez ısıtma ve soğutma çevrimine tabii tutulmuştur[38]. Çift yönlü şekil bellek etkisinin yanı sıra, şekil bellekli alaşımlarda üç yönlü şekil bellek efekti (TRSME) hakkında da çalışmalar bulunmaktadır. Üç yönlü şekil bellek etkisinde malzeme ön tanımlı iki şekil geçişinden sonra orijinal şekline dönmektedir. Sonuçlar TRSME’nin sıcaklığın R Fazından östenite ve martenzitten östenite 10 °C’nin üstünde olması koşuluyla sadece R fazlı NiTi ŞHA’da elde edilebildiğini göstermiştir. Bulk formda ŞHA’lar eyleyicilerin imalatında tel, tüp, yay ve levha formlarında kullanılabileceğinden önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Ayrıca ince film tabakası haline oluşturulmuş NiTi ince film tabakaları da eyleyici uygulamalarında yer bulmaktadır. Levha NiTi’den genellikle kantilever tipinde üretilen eyleyiciler, ince film tabakası formunda NiTi eyleyiciler ile karşılaştırıldığında daha yüksek bir eyleyici kuvvetine sahiptirler. İki yönlü eyleme hareketi, mekanik TWSME aracılığıyla, Şekil 1.59’da gösterildiği gibi ŞHA üzerinde bir sıfırlama katmanı (SiO₂ veya Si₃N₄) yerleştirilmesi ya da dahili TWSME kullanılarak elde edilebilmektedir. Şekil 1.60, kantilever tipi çalıştırıcının östenit-martensit fazı arasındaki eğim ucunu göstermektedir.



Şekil 1.59: Kantilever tipinde ŞHA SEM görüntüsü.



Şekil 1.60: Kantilever tipi mikro eyleyicinin sıfırlama tabakası olarak SiO₂ kullanılarak yer değiştirmesi: a) genel yapı, b) sıfırlama katmanını yerleştirdikten sonra toplam yer değiştirme.

Toplam yer değiştirme SiO₂/Si₃N₄'ün ŞHA üzerindeki biriktirme uzunluğunu kontrol ederek değiştirilebilmektedir. Deformasyon her iki malzemenin termal genleşme katsayıları arasındaki fark ile elde edilmektedir. Kantilever tipi ŞHA oda sıcaklığı koşullarında depozisyon ile yüzeyde SiO₂ katmanının yani diğer bir deyişle sıfırlama tabakası tarafından uygulanan gerilme stresinden ötürü bükülmektedir. Östenit başlangıç sıcaklığından (As) daha yüksek bir sıcaklığa ısıtıldığında eğitilmiş düz şekline dönecektir. Deformasyon açısı θ , SiO₂ paterninin uzunluğuna göre belirlenmekte ve r yarıçapına sahip bir yay geometrisi şekillenmektedir. Bu yarıçap Denklem 10'da görüldüğü gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{1}{r} = \frac{6w_1w_2E_1E_2t_1t_2(t_1+t_2)(\alpha_1-\alpha_2)\Delta T}{(w_1E_1t_1^2)^2 + (w_2E_2t_2^2)^2 + 2w_1w_2E_1E_2t_1t_2(2t_1^2 + 3t_1t_2 + 2t_2^2)} \quad \text{Denklem 10}$$

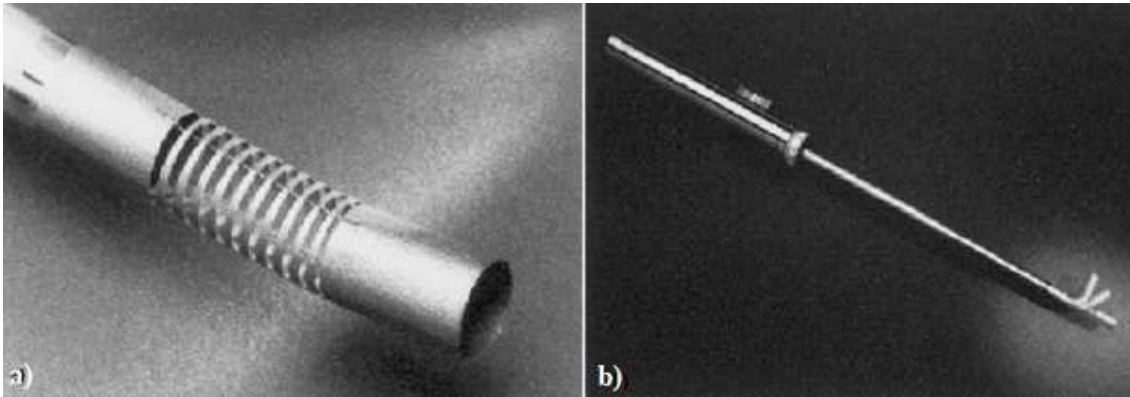
Burada E Young modülü, w genişlik, t kalınlık, α termal genleşme katsayısı, T sıcaklık ve 1 ve 2 alt simgeleri sırasıyla NiTi ve SiO₂'yi temsil etmektedir. Bu tür zorlama geri kazanımlarının (mekanik TWSME sağlamak için sıfırlama katmanının kullanılması) serbest geri kazanımın

(sıfırlama tabakası olmaksızın) aksine iyileşme özelliklerini (diğer bir deyişle geçiş sıcaklığı ve maksimum gerilimi) önemli ölçüde etkilediğini belirtmek gerekmektedir[39].

Minimal İnvaziv Cerrahi (MİC) metotlarından olan laparoskopik cerrahi son yıllarda dikkat çekerek klasik cerrahi ile kıyaslandığında hastaların cerrahi sonrası daha az ağrı çekmeleri, daha az ilaç kullanma gereksinimleri ve daha düşük enfeksiyon risklerinden dolayı geniş bir uygulama alanı bulmuştur[19].

Minimal girişim esnasında hastanın karın boşluğundaki 3-15 mm büyüklüğünde bir kesiden cerrahi aletler ile kesme, tutma, sıkıştırma dikme gibi cerrahi işlemler yapılmaktadır. Endoskopik cerrahi manipülasyonlar fiziksel olarak sınırlıdır. Açık cerrahi ile kıyaslandığında cerrahi aletlerle çalışma alanının küçüklüğü, cerrahi bölgenin video görüntüsü ile görüntülenmesi, cerrahın doku ve organlar ile yaptığı işlemler esnasında dokusal hislerin yokluğu bu girişimlerin temel dezavantajları arasında sayılmaktadır.

Laparoskopik cerrahide endoskop kamera entegre bir rod lens sisteminin sonuna monte edilmektedir. Erken dönemdeki tüm endoskopik kamera sistemleri bu sebepten rijit bir yapıya sahiptir. Çalışma alanı hakkında daha iyi bir genel bakış elde etmek için belirli açılardaki farklı lens sistemleri (0, 32, 45 ve 70°) kullanılmaktadır. Fischer ve arkadaşları operasyon sırasında kamera sisteminin değiştirilme gereksiniminin önüne geçmek amacıyla kamera biriminin yerleştirilmesi için esnek uzak bir uç tasarlamak istemişlerdir. Bunun için Nitinol süper elastik malzemeden yapılmış bir tüp boru kullanmaya karar vermişlerdir. Tasarladıkları sistem üç ana birimden; modüler kamera ünitesi, kamera ünitesinin yerleştirilmesi için süper elastik uç ve kamerayı belirli açılar altına tutup kilitlemeye yarayan işletme ünitesinden oluşmaktadır. Ana bileşen 90 ° açığa kadar açılma özel yapısı ile esnek NiTi tüpüdür. Şekil 1.61 a) ve b)'de söz konusu tasarım görülmektedir.



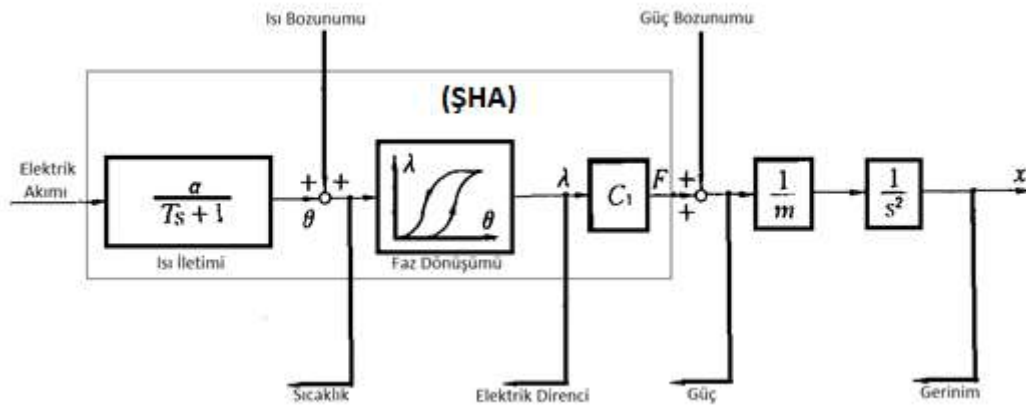
Şekil 1.61: a) Süperelastik nitinol tüp, b) Kullanıma hazır endoskop.

Borunun dış çapı 10.5 mm, uzunluğu yaklaşık 60 mm'dir. Kullandıkları tüpün et kalınlığı 170 μm ve 500 μm 'dir. Yaptıkları bükülme ve yorulma testlerinde nitinol süperelastik malzemenin endoskop uçlarında hareket serbestliği sağlamak amacıyla kullanılabileceği sonucunu elde etmişlerdir[40].

1.6 Şekil Hafızalı Alaşım Tabanlı Tutucuların Kontrolü

ŞHA'nın özellikleri sıcaklık, üretilen kuvvet (gerilme), yer değiştirme (gerinim) ve elektrik direnci dört temel değişkenle açıklanabilmektedir. ŞHA tabanlı eyleyiciler için çeşitli kontrol şemaları türleri literatürde önerilmiştir. Genellikle üç tip kontrol sisteminden bahsetmek mümkündür. Birincisi; doğrusal kontrolörler, basit fakat ŞHA'nın doğrusal olmayan ve histersiz davranışıyla zayıf bir şekilde uyumludur. İkincisi konveksiyon katsayısı, özgül ısı gibi zorlu bir çevrim dışı parametrelerin tanımlanmasını gerektiren model tabanlı denetleyicilerdir. Son olarak, parametrik basitlik ve model belirsizliklerine göre göreceli duyarsızlığı kombine eden açma- kapama kontrolörleri ya da kayma kipi modu gibi değişken yapı kontrolörleridir[22].

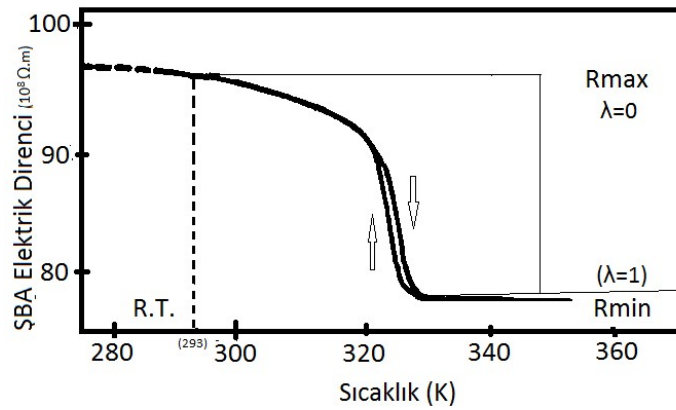
Isı transferinin birinci dereceden gecikmesi ve faz dönüşümü histerezisi nedeniyle, doğrusal olmayan terimler Şekil 1.62'de gösterildiği gibi ŞHA'nın transfer fonksiyonuna dahil edilmektedir.



Şekil 1.62: Bir ŞHA eyleyicinin blok diyagramı.

ŞHA bir eyleyicinin parçası olarak düşünüldüğünde üretilen kuvvet ve yer değiştirme, eyleyicinin çıkış değişkenleri olarak kabul edilebilirken, sıcaklık ve elektrik direnci iç durum değişkenleri olarak kabul edilmektedir. Pratikte bir ŞHA eyleyici kullanıldığında, servo mekanizmayı oluşturmak için hangi değişkenin ölçülmesi ve geri beslenmesi gerektiğini belirlenmesi gerekmektedir. Geri bildirim değişkenine göre erken dönem ŞHA kontrol

yöntemleri Ikuta'ya göre iki şekilde sınıflandırılmıştır. Bunlarda ilki dış geri bildirim kontrolüdür ve iki çıkış değişkeninden biri olan yer değiştirme veya üretilen kuvvetin kontrol için geribildiriminden oluşmaktadır. Birincisi deneysel üretim ve araştırmalarda kullanılmaktadır çünkü servo sistemi konum bilgisi geri bildirim için bir potansiyometre gibi basit bir sensör kullanılarak oluşturulabilmektedir. Diğer değişkende deneysel çalışmalarda geribildirim için düşünüldüğünde gerinim ölçer kullanılması gerekmektedir. Eyleyici için soğutma koşullarındaki değişikliklerden veya çalışma sırasında yük dalgalanmasından dolayı, bu yöntemler muhtemelen bir sıcaklık bozukluğu oluştuğunda ŞHA'nın aşırı ısınmasına neden olmaktadır. Bu durum malzemede yorgunluğa yol açarak performansın düşmesine ya da şekil hafıza bozunumuna neden olabilmektedir. İkinci kontrol yöntemi iç durum değişkenlerinin kullanılmasıdır. ŞHA eyleyicinin iki iç durum değişkeni sıcaklık ve elektrik direncidir. Bununla birlikte, sıcaklık geri besleme yöntemi pratik değildir çünkü ŞBA termal sensörden izole edilmelidir ve küçük ŞHA gövdesinin sıcaklığını tam olarak ölçmek çok zordur. Bu problemler aşılsa bile, sıcaklık-gerinim stres histerezis hala faz dönüşümünde ortaya çıkmaktadır. Yani sıcaklık ölçülerek iç durumun tam olarak bilinemeyeceği anlamına gelmektedir. Bu nedenle, sıcaklık geri besleme yöntemi özellikle mikro minyatür ŞHA eyleyicilerde pratik değildir[23]. Elektrik direnç geri bildirimine ait Şekil 1.63'de pratik olarak kullanılabilen ŞHA'nın (Ti-Ni alaşımı) sıcaklığa karşı elektrik direnci eğrisini göstermektedir. Bu alaşım R fazı (düşük sıcaklıklarda) ve ana faz (yüksek sıcaklıklarda) arasında bir dönüşüme sahiptir.



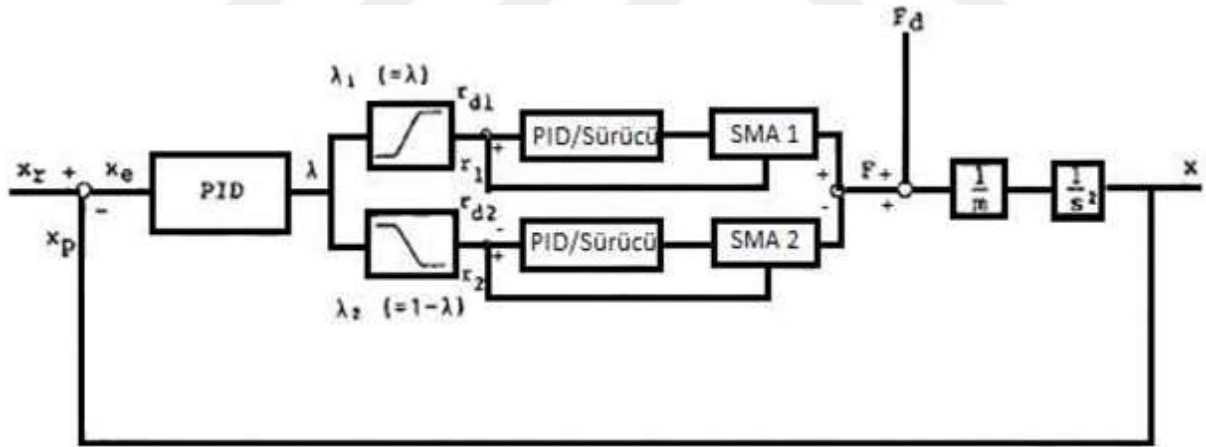
Şekil 1.63: ŞHA NiTi Sıcaklık-Direnç özellikleri.

Elektrik direncinin sıcaklık ile negatif bir ilişkisi vardır ve histerezis oldukça küçüktür. Elektrik direncinin yaklaşık olarak R faz oranının doğrusal bir fonksiyonu olduğu düşünülürse, normalize edilmiş dirençler: λ (R_{min} 'de 0, R_{max} 'de 1) geri besleme değişkeni olarak kullanılabilir. Elektrik direncini dahili bir durum geri besleme sinyali olarak kullanmak

çok daha iyi olacaktır. Bu yöntem ŞHA'nın faz dönüşümünü direk olarak daha önce tarif edildiği gibi kontrol edebildiğinden birkaç avantajlı kontrol karakteristiği sunmaktadır.

- 1) ŞHA'nın aşırı ısınmasını önlemek,
- 2) Isıtma ve soğutma koşullarındaki değişikliklere karşı sağlamlık,
- 3) ŞHA aktuatörünün histerezisini azaltmak,
- 4) Konum veya kuvvetin sensör fonksiyonu.

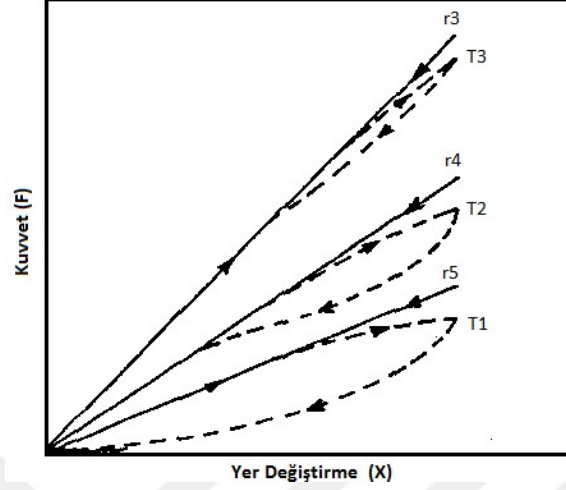
Avantajlar 1) ila 3), uygulanabilir ŞHA servo sürücüyü gerçekleştirmek için vazgeçilmezdir. Üstelik madde 4)'den herhangi biri sabitlendiğinde, her iki pozisyonun veya kuvvetin açık döngü kontrolünün mümkün olduğu anlamına gelmektedir. Bu ilginç özellik ile herhangi bir konum veya kuvvet sensörünün kullanılmadığı süper minyatür servo tahrik sistemleri gerçekleştirmek için mümkündür. Ikuta yaptığı çalışmada pozisyon geri bildirimini ve elektrik direnci geri beslemesini birleştiren yeni bir geribildirim kontrol şeması önermiştir ve kuvvet sensörleri olmadan kuvvet algılamanın söz konusu olduğu ileri bir teknik tartışılmıştır. Elektrik direnci ve pozisyon geri bildirim ile ilgili söz konusu karma bir kontrol sisteminin şematik gösterimi Şekil 1.64'de görülmektedir.



Şekil 1.64: Elektrik direnç ve pozisyon geribildirimi ile kombine edilmiş bir kontrol mekanizması.

Burada pozisyon geribildirimi mevcut olduğunda kuvvet algılaması, herhangi bir kuvvet sensörü olmadan mümkün olabilir. Bu yeni ŞBA eyleyicinin tesisi pratik, küçük ve temiz tutucuların üretilmesinde avantajlı olacaktır. Şekil 1.65'deki noktalı çizgiler, sabit sıcaklık koşulları altında ŞHA'nın uygulanan kuvvet (gerilme) ve yer değiştirme (gerinim) arasındaki tipik ilişkiyi göstermektedir. Her eğri sırasıyla sabit bir sıcaklığa karşılık gelmektedir. Bu

eğrilerin ŞHA'nın plastik deformasyonu yerine ŞHA'nın Stresle İndüklenen Martensitik (SIM) dönüşümü nedeniyle büyük histerezis gösterdiği dikkat çekicidir. Kısacası ŞHA sadece sıcaklığa değil aynı zamanda strese karşı da bir hassaslığa sahiptir.



Şekil 1.65: Uygulanan kuvvet ve yer değiştirme arasındaki ilişki.

Bu nedenle faz dönüşümü sabit bir değer olarak kontrol edilebilirse, ŞHA'ya uygulanan kuvvet-yer değiştirme (gerilme-gerinim) ilişkisi Şekil 1.64'de gösterildiği gibi lineer bir şekilde (düz çizgiler) gerçekleşmektedir. O halde ŞHA'nın faz dönüşümü nasıl kontrol edilmelidir? Malzeme biliminin teorik ve bilimsel tabanı baz alındığında ŞHA'nın elektriksel direnci "bire bir ilişki" olarak adlandırılan doğrudan faz dönüşümüne karşılık gelmektedir. Ikuta ve ark. Isı bozunumuna karşı sağlamlığı artırmak ve ŞHA'nın aşırı ısınmasını önlemek için elektrik direncini, ŞHA sinyalinin faz dönüşümünü izleme sinyali olarak kullanmışlardır. Dahası ŞBA'nın sertliği direkt olarak faz dönüşümüne karşılık geldiği için, elektrik direnci geri beslemesi kullanılarak direkt olarak ŞBA'nın sertliği öğrenilmektedir. Bu "direkt ŞHA malzemenin sertlik kontrol şeması"nın daha ayrıntılı ve nicel olarak tartışılması şu şekildedir: Faz dönüşümü düşük sıcaklıkta R fazı (veya martensitik faz) ve yüksek sıcaklıkta ana (östenitik) faz olmak üzere iki faz karışımının oranına bir değişikliğe neden olmaktadır. Basitlik açısından bir dönüşüm oranı tanımlamak, R_p dönüşüm miktarını ölçmek için kullanılabilir. $R_p = \text{Ana faz hacmi} / \text{ŞBA toplam hacmi}$ olarak hesaplanabilir. Böylece; R_p 0'dan 1'e kadar R fazdan ana faza dönüşürken değişmektedir. Faz dönüşümünün teorik değerlendirmesine dayanarak, ŞHA'nın (k) sertliğinin dönüşüm oranına bağlı olduğu varsayılabilir. Her ikisi doğrusal bir fonksiyon olarak modellenecek bir birleriyle bire bir ilişkili fonksiyonlardır. ŞHA'nın elektrik direnci (r) dönüşüm oranına bağlıdır.

$$k = f(R_p) = C_1 R_p + C_2 \quad \text{Denklem 11}$$

ŞBA'nın elektrik direnci (r) dönüşüm oranına bağlıdır. NiTi alaşımında (Nitinol) ana faz ve R fazı arasında büyük dönüşüm meydana geldiğinde, direncin oransal olarak R_p ve sertlik ile ilişkili olduğunu düşünmek makuldür;

$$r = g(R_p) = C_3 R_p + C_4 \quad \text{Denklem 12}$$

Denklem 11 ve 12'den ŞBA'nın sertliği malzemenin elektriksel direncinden aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir.

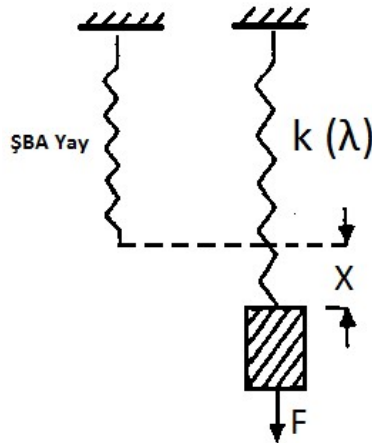
$$k = f(g^{-1}(r)) = h(r) = (C_1/C_3) (r - C_4) + C_2 = C_5 r + C_6 \quad \text{Denklem 13}$$

Elektrik direncinin işlenmesini kolaylaştırmak için elektrik direnci (r) normalize edilir, böylece dirençteki değişim 0 ila 1 aralığına karşılık gelmektedir. Bu normalize edilmiş direnç λ olarak adlandırılır. λ doğrudan R_p 'ye karşılık geldiği için, R_p önceki tüm denklemlerde λ ile değiştirilebilir. Böylece Denklem 12 aşağıdaki gibi tekrar yazılabilmektedir.

$$K = k(\lambda) = C_5 \lambda + C_6 \quad \text{Denklem 14}$$

Bir dizi deneysel çalışmadan çıkarılan iki katsayının (C_5 , C_6) bilinmesiyle ŞBA eyleyici Denklem 14 kullanılarak sertlik kontrol yolu ile kontrol edilebilmektedir.

Diğer bir konu olan sensörsüz kuvvet algılamanın temel ilkelerini anlamak için Şekil 1.66'da görülen ŞHA yayı ve uçuna bağlı ağırlığın olduğu en basit bir ŞHA eyleyiciyi ele alırsak;



Şekil 1.66: ŞHA eyleyicinin kuvvet algılama kabiliyeti.

ŞHA'nın ilk uzunluğundan yer değiştirmeler (x) bir foto-sensör gibi bir dokunmatik olmayan sensör ile tarafından ölçülmektedir. ŞHA yayının sertliği normalize edilmiş elektrik direncinin değeri bilindiği için ağırlığın (F) değeri şu şekilde hesaplanabilmektedir.

$$F = f(k, x) = f(k(\lambda), x)$$

Denklem 15

Hooke kanunu uygulandığında $F=k.x$, burada x ölçülen yer değiştirme ve k ise Denklem 14'deki doğrusal ilişkiyi göstermektedir. Buradan uygulanan kuvvet Denklem 16'deki gibi hesaplanmaktadır.

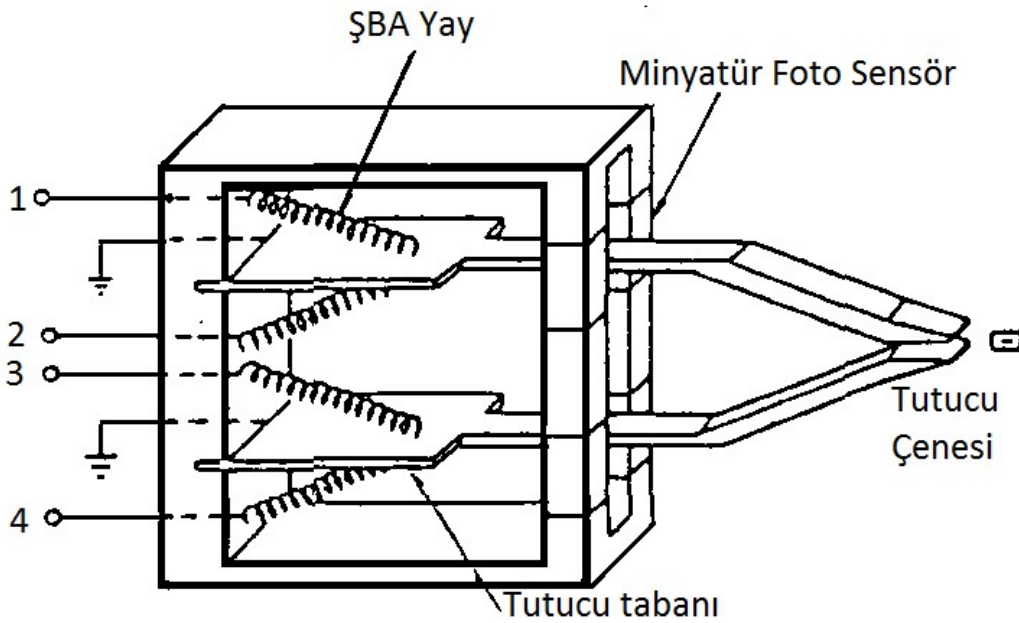
$$F = [C_5\lambda + C_6]x$$

Denklem 16

Ikuta ve arkadaşlarının tasarladıkları tutucuda iki çift ŞBA eyleyici bulunmaktadır. Her bir ŞBA'nın normalleştirilmiş elektrik dirençleri ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$) bir mikrobilgisayar tarafından ölçülür ve kontrol edilmektedir. Her iki tutucu ağzın pozisyonları (X_1, X_2) bir foto sensör tarafından ölçülmektedir. Böylece uygulanan kuvvet Denklem 14'dekine benzer ilişki ile hesaplanmaktadır. Çünkü Şekil 66'de görüldüğü gibi iki tutucu kol yayının eğme kuvveti ($P_{(x_1)}, P_{(x_2)}$) kavrama tasarımında dikkate almak gereklidir. Bu durumda Denklem 14 aşağıdaki gibi modifiye edilmektedir.

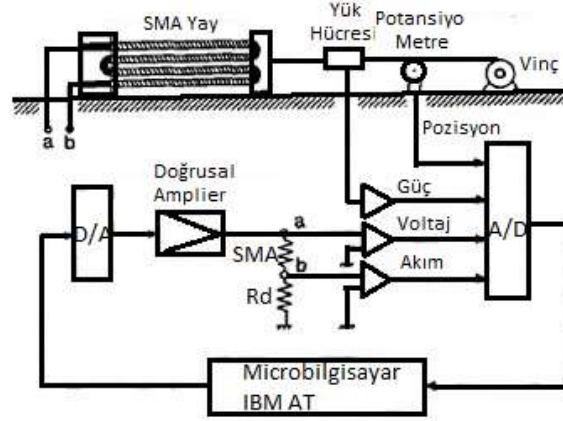
$$F = f(k(\lambda_1), k(\lambda_2), k(\lambda_3), k(\lambda_4), x_1, x_2) + P(x_1) + P(x_2)$$

Denklem 17



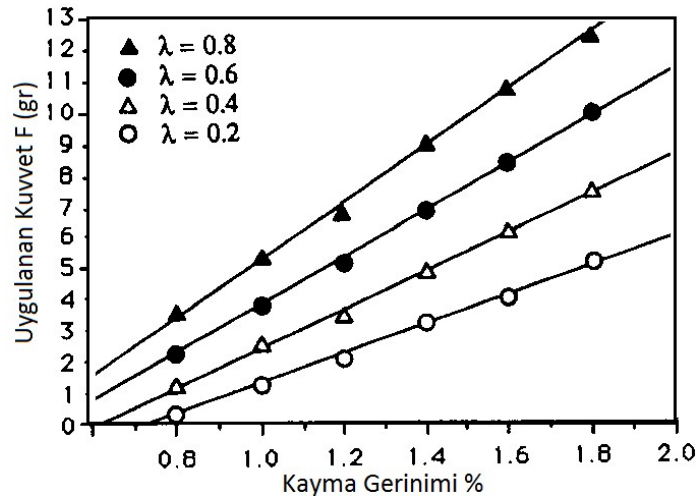
Şekil 1.67: ŞHA yaylar ile eylenen mikro tutucu dizaynı.

Ikuta ve arkadaşları direk sertlik kontrolü ve kuvvet kontrolünü çalışmak üzere Şekil 1.68'de görülen deneysel düzeneği kurgulamışlardır. Burada ŞHA dizininin bir ucu sabitlenmiş diğer ucu ise bir güç sensörü vasıtasıyla ŞHA'nın gerinim sonucu oluşan yer değişimini ölçen kayabilen ve ayarlanabilen bir mikrometreye bağlanmıştır.



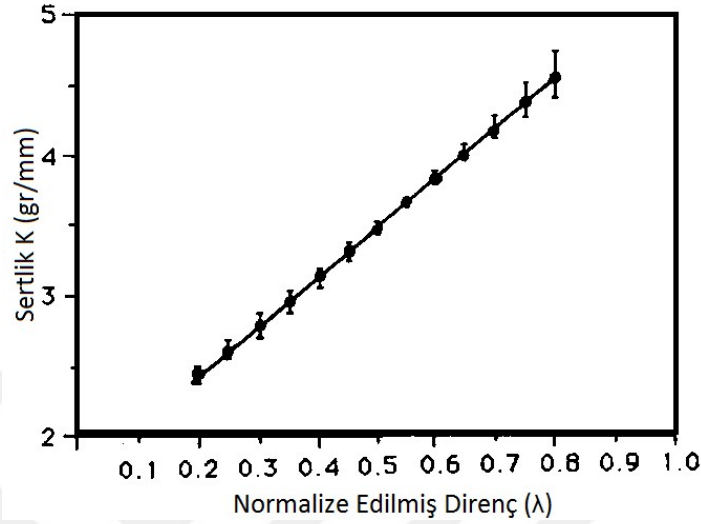
Şekil 1.68: ŞHA yaylara uygulanan deneysel bir kontrol sistemi.

ŞHA direncinin PI kontrolü, deney için istenen değerlerde ŞHA elemanı direncini ayarlamaktadır. Kontrol devresi direnç ölçümü için ŞHA'yı ısıtan akımın aynısını kullanan bir direnç ölçer olarak kabul edilmektedir. DGM (Darbe Genişlik Modülasyonu) sürücüsü ve direnç ölçümü için bir köprü kullanılan konvansiyonel devrelerle karşılaştırıldığında, bu yeni devrenin birkaç avantajı var: 1) basittir, 2) yüksek güçlü sistemler yapmak kolaydır, 3) Köprünün neredeyse "kalibrasyonsuz" olmasını sağlayan dirençleri tekrar tekrar ayarlamak gerekli değildir. Sabit sertlik için ölçümler, uygulanan kuvvetin değişen değerini mikrobilgisayar (IBM-AT) ile kaydederken, λ 'yi sabitlenmiş bir değere kontrol ederek ve daha sonra ŞHA gerinimini yavaş yavaş arttıracak şekilde yapılmıştır. Bu duruma ait veriler Şekil 1.69' da görülmektedir. Buradaki herhangi bir noktanın eğimi gerinim ve λ için sertlik değerini vermektedir ve neredeyse doğrusal bir eğriye sahiptir. Bu sebep ile eğrinin hemen hemen λ 'nın 0.3'den büyük olduğu sonuçlar için doğrusaldır.



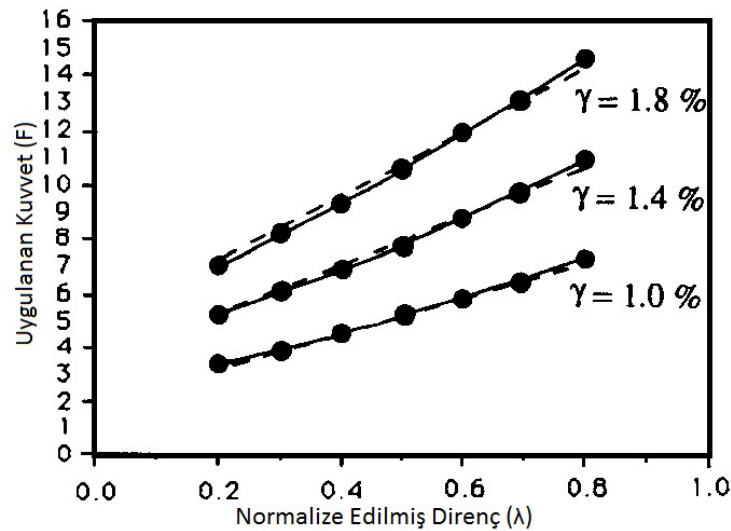
Şekil 1.69: Sabit bir λ altında uygulanan kuvvet ve gerinimin ölçümü.

Şekil 1.69'den alınan veriler ile Şekil 1.70'deki sertlik değerleri elde edilmiştir. Buradaki eğriler doğrusal ve histeresizdir. Ötesi, yükleme ve boşalta esnasında elde edilen eğimler aynıdır. Buradan yukarıdaki Denklem 14'ün hesaplanmasında kullanılacak olan C_5 ve C_6 değerleri sırasıyla 3.63 gr/mm ve 1.67 gr/mm olarak elde edilmektedir.



Şekil 1.70: ŞHA'nın sertlik ve direnç değişimleri.

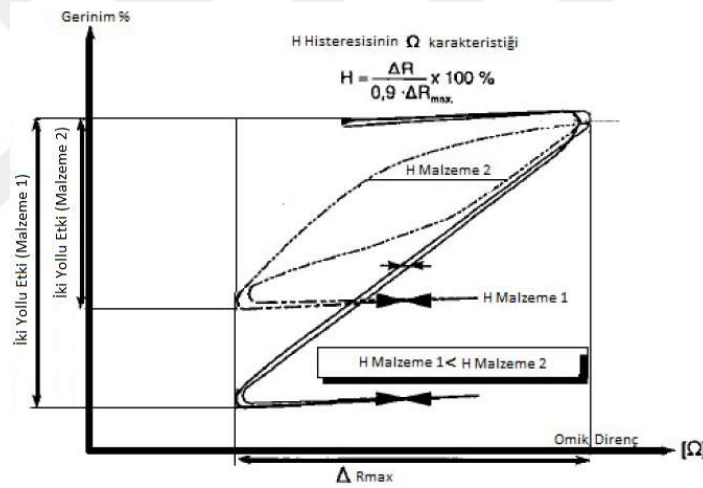
Şekil 1.71' Denklem 15'nin bir doğrulamasıdır. Hesaplanan sonuçlar (düz çizgi), Denklem 16'ya uygulanarak bulunmuştur. Ölçülen sonuçlar (noktalı çizgi), λ 0.2 ila 0.8 aralığında kesintisiz olarak değiştirildiğinden uygulanan kuvvet kaydedilerek bulunmuştur. Her iki sonucun karşılaştırılmasıyla, ikisinin eğimleri neredeyse aynıdır. Hesaplanan ve ölçülen sonuçlar arasındaki örtüşme, kuvvet algılama yönteminin fizibilitesini göstermektedir.



Şekil 1.71: Kuvvet algılamanın deneysel olarak doğrulanması (Kesik çizgiler: Ölçülen sonuçlar, Düz çizgiler: Hesaplanan sonuçlar).

Bu 'algılayıcısız' kuvvet algılama tekniği, pahalı amplifikatörlü herhangi bir kuvvet sensörü gerektirmez ve özellikle küçük, hafif ve temiz tutucuların gerçekleştirilmesinde avantajlıdır. Kavranacak cismin boyutu önceden biliniyorsa harici bir algılayıcıya gerek yoktur[41].

Şekil 71 a)'da görüldüğü üzere bazı özel alaşımlar doğrusal ve histeresiz farkı göstermeyen bir özellik sergilemektedirler. Bu Ω karakteristik eğrisi özellikle kontrol amaçlı olarak kullanılmaktadır çünkü eyleyicinin kapalı bir kontrol devresine doğrudan entegrasyonunu sağlamaktadır. Şekil 71 b) iki farklı malzeme için bu ilişkiyi göstermektedir; malzeme 1 iyi, malzeme 2 ise oldukça zayıf kontrol özellikleri sergilemektedir. Buradan bir eyleyicinin daha iyi bir kontrol özelliklerinin Ω karakteristiğinde histerezisin küçük bir genişlikte ($H = \% 1$) ve doğrusal ilişkiye sahip olduğu durumlarda sağlandığı görülmektedir. Histerezis genişliği pozisyon kontrolünün hassasiyeti ile doğrudan ilişkili olduğundan özellikle önemlidir: ne kadar düşük miktarda histeresiz aralığı (H) o kadar kapalı devrede kaliteli pozisyon kontrolü anlamına gelmektedir.



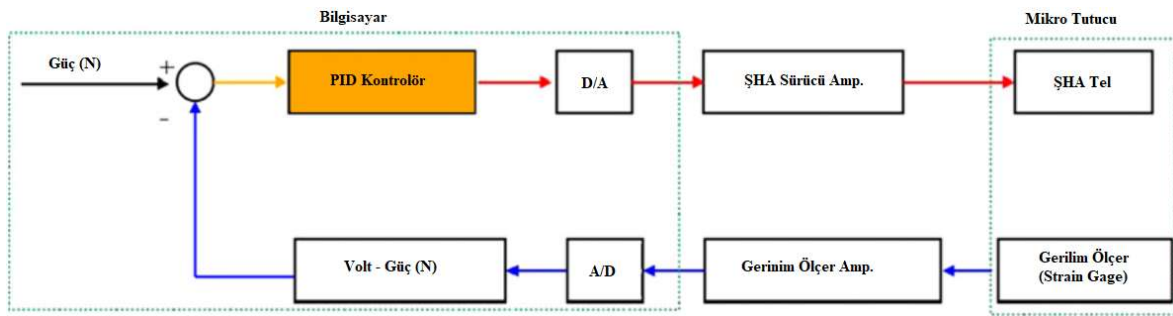
Şekil 1.72: İki farklı alaşımın şekil değişimi ve omik direnç histeresizleri (Malzeme 1 lineer ve çok dar histeresiz aralığı, Malzeme 2 Geniş histeresiz aralığı).

İlerleyen sayfalarda bahsedileceği üzere kontrol üzerinde önemli bir etkisi olan histeresiz aralığı çeşitli kontrol yöntemleri ile azaltılabildiği gibi kullanılan malzemenin kompozisyon miktarı ve termomekanik özellikler ile de optimize edilebilmektedir. Mertmann ve Hornbogen'nin yaptıkları çalışmada NiTiCu üçlü alaşım sisteminde yaklaşık olarak % 9-10 civarında bir bakır kompozisyonunun şekil değişimine karşı direnç histerezisini azaltarak kontrol özelliklerini iyileştirdiğini ileri sürmüşlerdir. Bunun nedeni NiTiCu alaşımlarında östenit fazda martenzit faza soğutma esnasında meydana gelmesi muhtemel premartensitik bir R-faz dönüşümünün gerçekleşmemesidir. Ayrıca, histerezis miktarı % 15'lik soğuk bir işlemde ve daha sonra 350

ila 450°C arasındaki sıcaklıklarda tavlama işlemlerinden oluşan optimum termomekanik bir işlemle de azaltılabilmektedir[14].

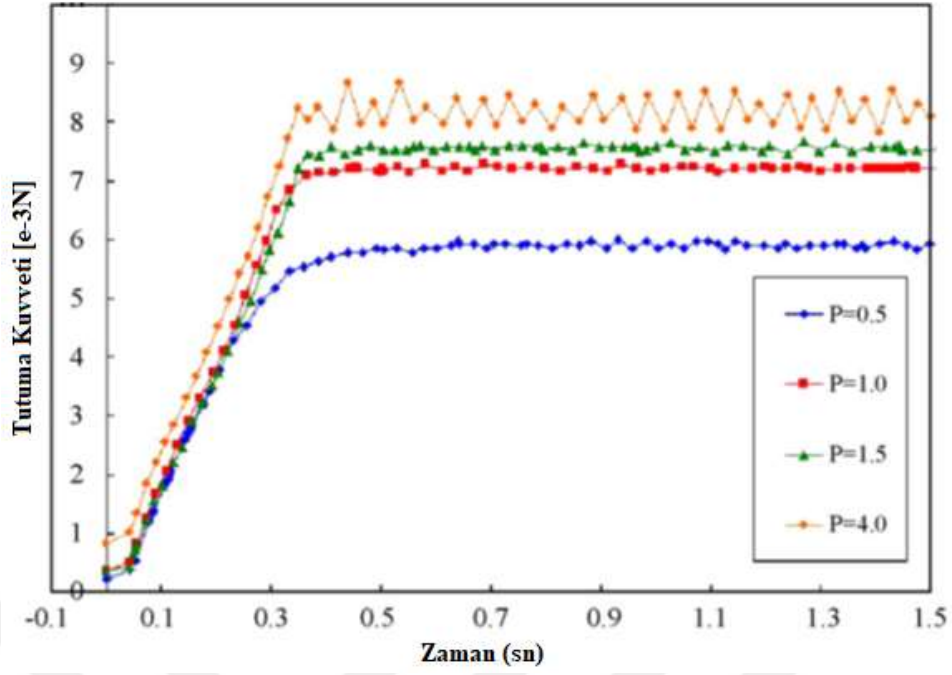
Eyleyicilerde uygulanan kontrol sistemi, özel olarak yüksek histerezisde faz dönüşüm prosesinden kaynaklanan doğrusal olmayanları absorbe etmelidir. PID denetleyicileri sağlam ve genellikle iyi dinamiklerine sahip olsa da, doğrusal olmayan denetleyicileri kullanarak daha iyi performans elde edilebilir. Modelleme ve parametre hatalarını emme kapasitesi büyük olduğundan dolayı PID denetleyicilerle kıyaslandığında Kayma Kip Denetleyiciler (KKD) daha iyi bir seçenek olarak görülmektedir. Her ikisi de çıkış ekseninin açılal konumunu kontrol etmek için uygulan KKD’de 1.14 Hz’lik kesme frekansına karşılık PID denetleyicilerinde 0.89 Hz’lik bir kesme frekansı elde edilmiştir.

Laparoskopi gibi kapalı alan cerrahi işlemlerinde kullanılan geleneksel tutucularda işlem manuel olarak yapıldığından cerrah işlem yaptığı doku, organ gibi yapıları tutma, sıkıştırma gibi olayları hissedebildiğinden dolayı tutucuyu manuel olarak yönetirken tutma kuvvetini yönetebilir. Oysa Soft Robotik (SoRo) olarak adlandırılabilen tutucuların tutma kuvvetleri hakkında bilgi sahibi olunması gereklidir. Çünkü operasyon sırasında cerrah tutma, kavrama, sıkma hislerinden yoksun olacaktır ancak ekrandan tuttuğunu ya da kavradığını görecektir ama organ ya da dokulara ne kadar tutma basıncı uyguladığını kestiremeyecektir. Bu durumda dokular ve organlar iyi kavranamadıklarından tutma işlemi gerçekleşmeyecek ya da fazla kuvvet uygulanması dolayısı ile zarar görecektir. O nedenle bu tutma gücünün aktif olarak kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle Kyung ve arkadaşları çalışmalarında Şekil 1.73’de kapalı devre kontrol sistemi kullanmışlardır.



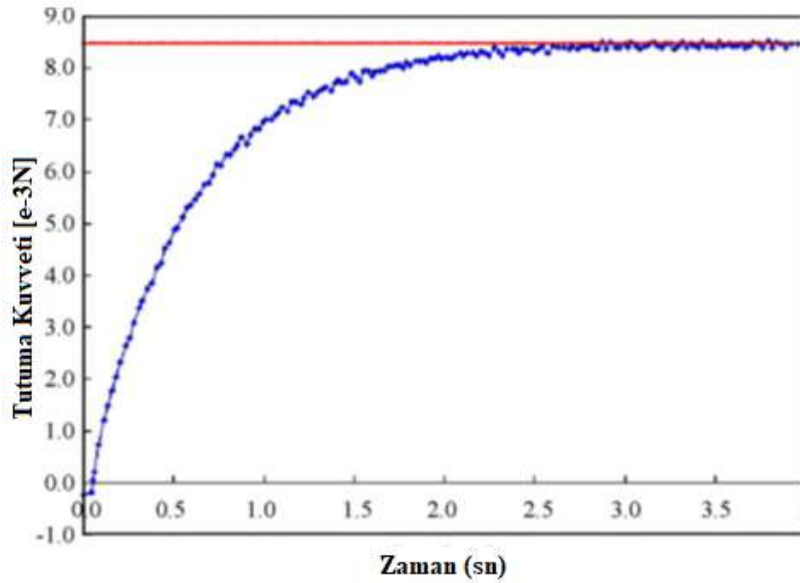
Şekil 1.73: Kapalı devre PI Kontrol Sistemi.

Kontrol deneyi çeşitli oranlarda güç elde etmek için (P) başlatılmış ve Şekil 1.74’de yatay çizgide görülen zaman ve dikey çizgide görülen tutma kuvvetleri elde edilmiştir.



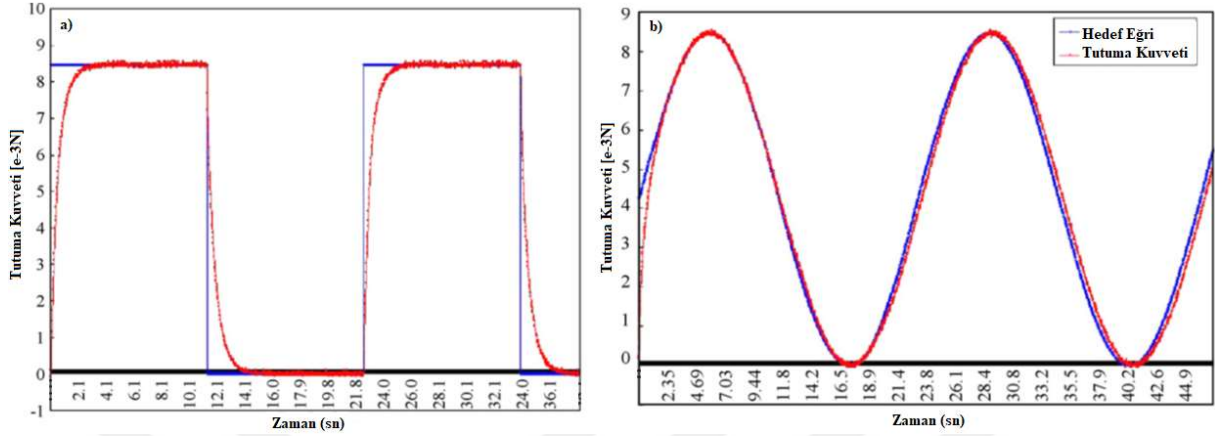
Şekil 1.74: Oransal Kontrol.

Artan zaman ve normal durum hataları artan oransal kazanç (P) ile azalmış ancak $P=4$ 'ten sonra mikro tutucu istikrarsız hale gelmiştir. Mikro tutucunun tepkisinin normal durum hatası kolaylıkla bir integral kontrolör kullanılarak giderilebilir. Adımsal tepki deneyi ise kapalı devre sisteminde çeşitli I 'lar elde edebilmek amacıyla yapılmıştır ve Şekil 1.75'de tekrarlanan deneylerden elde edilen mikro tutucunun optimal tepkileri $P=1.3$ ve $I=0.01$ için gösterilmektedir.



Şekil 1.75: Oransal ve Integral Kontrol.

Mikro tutucunun tutma güç kontrol performansının doğrulanması amacıyla akımlar sürekli olarak adım ve sinüs dalgaları olarak gönderilmiştir ve tutma gücündeki değişimler izlenmiştir. Şekil 1.76' a)ve b)'de bu durum görülmektedir.

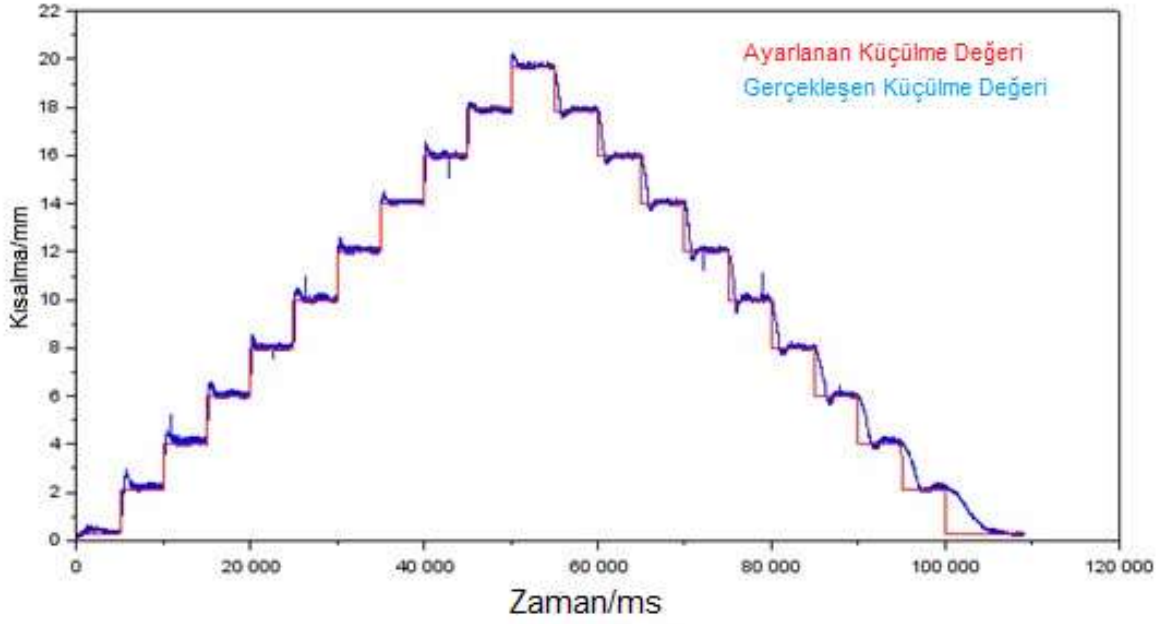


Şekil 1.76: a) Adım dalga için güç izleme performansı, b) Sinüs dalga için güç izleme performansı.

Her iki durumda da, kuvvet izi izleme performansları, tasarlanan kontrol cihazının istenen performansı sağladığını kanıtlayarak, amaçlanan uygulama için yeterli olmuştur[26].

Kontrol davranışı için çok önemli olay martenzit fazdan östenit faza ve tam tersi dönüşüm sürecidir. Histeresiz eğimli faz geçişi çok dar bir sıcaklık aralığına bağlıdır. Faz dönüşüm sıcaklıklarını anlamak çok önemlidir. Çünkü malzemenin deforme edilmeden önceki haline dönüşebilmesi için en düşük dönüşüm sıcaklığının uygulanması gerekmektedir. Bununla birlikte, tel üzerine uygulanan aşırı yüksek sıcaklık sonucunda oksit veya karbür fazı tabakası oluşması histerezis özelliklerini sınırlandırabilir. Histeresiz çevrimini bozabilecek her etken histerezis özelliklerinde gecikmelere neden olur ve ortaya çıkan son derece doğrusal olmayan davranış, hareketin hatalı olmasına yol açabilir. Amaç ŞBA teli hızlı ve doğru bir şekilde sürebilme yeteneğine sahip bir mekatronik kontrol sisteminin gerçekleştirilmesidir.

Lange ve arkadaşları yaptıkları robotik el ŞHA uygulamasında P denetleyicisinde $K_p=10$ değeri için nispeten iyi sonuçlar almışlardır fakat tipik sabit sapma nedeniyle hedef değere ulaşamamışlardır. Bunun üzerine bir I denetleyicinin sisteme eklenmesi ile sıfır sapma değerini elde etmişlerdir. Kontrol döngüsünün tüm değer aralığı boyunca performansı Şekil 1.77'de deneysel olarak tanımlanmış basamak fonksiyonu ile gösterilmektedir. Sinyaller adım adım 2 mm olarak artırılmıştır. Kontrol edilen sinyal referans değişkenini takip etmektedir. Soğutma fazının sonunda yavaş tepki davranışına dikkat çekicidir.



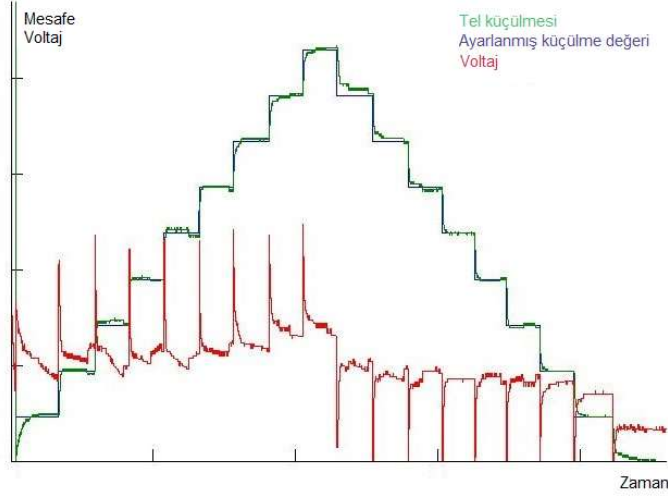
Şekil 1.77: PI denetleyici ile boyutsal küçülme-zaman değişim diyagramı.

Telin belirli pozisyonlarına izin veren PI kontrol cihazı ile belirli pozisyonlar için ilgili voltaj değerleri kaydedilmiştir ve bunlar kontrol için kullanılmıştır. Faz dönüşümünün gerçekleştiği dar sıcaklık aralığı ile belirli pozisyonları ayarlamak için karşılık gelen dar gerilim aralığının bu şekilde bir denetim için doğru olmadığı belirtmişlerdir. Kontrol aşaması esnasında ŞHA histeresiz davranışından ötürü belirlenmiş bir pozisyona ulaşmak için gerekli voltaj ihtiyaçları esnasında aşırı yüklenmelerin olduğu bildirilmiştir. Bu aşırı yüklenmelerin önüne geçmek için PID kontrol parametreleri ayarlanmıştır. Uyarlamalı (adaptif) bir PID denetleyicisi kullanılması bu sorunları çözmeyi başarmıştır. Telin mevcut uzunluğuna bağlı olarak parametrelerin değiştirilmesinin aşırı yüklenmelerin giderilmesine yardımcı olduğunu göstermiştir ve telin ayarlanan konuma ulaşma hızını arttırmıştır.

$$u(t) = K_p \times e(t) + K_i \times \int e(T) dx$$

Denklem 18

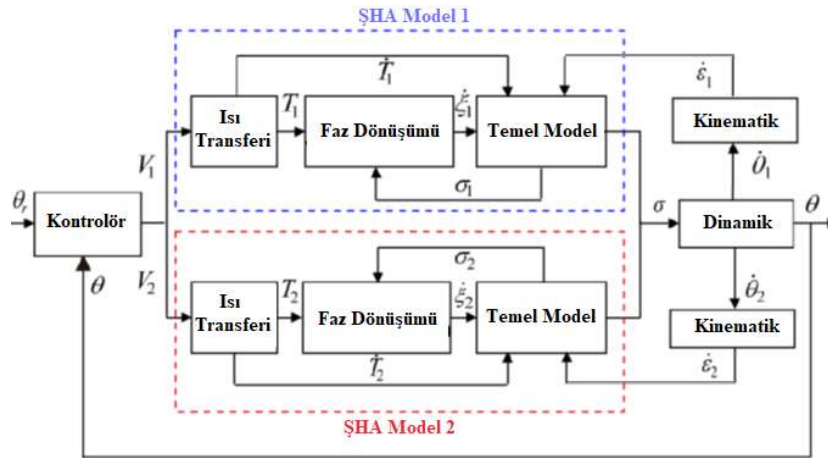
Soğutma fazı için $K_p = 2$, $K_i = 0.1$ ve $K_p = 2$, $K_i = 0.18$, Isıtma fazı için sırasıyla $K_p = 2$, $K_i = 0.4$ ve $K_p = 2$, $K_i = 0.18$ kullanılmıştır. Isıtma ve soğutma çevriminin sonunda $K_i = 0.18$ olan setler kullanılmıştır. Bireysel basamaklar için uygulanan voltaja bakıldığında dar bir sıcaklık / gerilim bandı yanı sıra ısıtma ve soğutma arasındaki ŞHA 'nın histerezis karakteri Şekil 1.78'de görülmektedir.



Şekil 1.78: Dört set basamaklarından oluşan PID kontrol diyagramı.

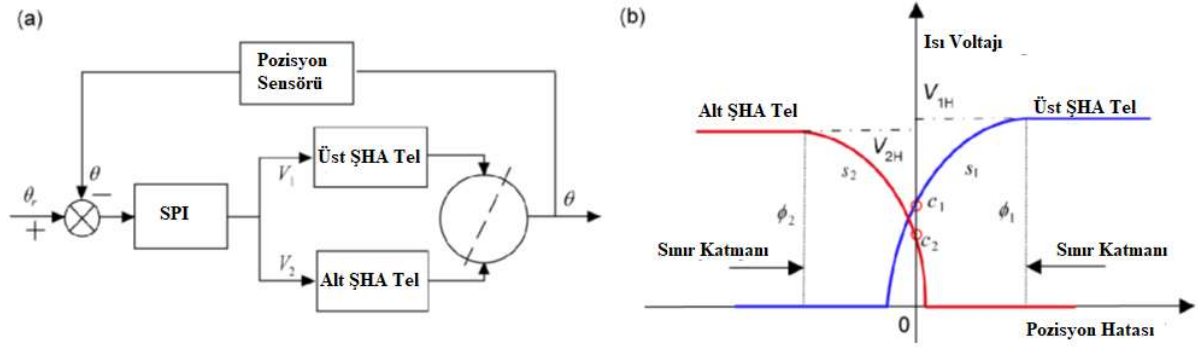
Lange ve arkadaşları robotik el manipülasyonlarını yapmada ŞHA tellerin eyleyici olarak kullanılabileceğini fakat sistemin aksak ve güçlendirilmesi gereken yerlerinin olduğunu bildirmişlerdir. ŞHA'nın iyi kuvvet/ağırlık oranı çok ümit verici olduğu ancak düşük yer değiştirme oranı ve karmaşık entegrasyon ihtiyacının minyatür uygulamalarda etkin kullanımı engellediğini vurgulamışlardır[20].

Guo ve arkadaşları yaptıkları çalışmada iki şekil bellekli eyleyiciyi matematiksel olarak modellemişler ve Şekil 1.79'da görülen blok diyagramı modellemişlerdir. Bu model, çapraz bağlanma etkili karmaşık bir çoklu giriş-çoklu çıkış (MIMO) sistemini açıkça göstermektedir. İki bağımsız θ_1 ve θ_2 çıkış değişkeni, her iki ŞHA tele ayrı ayrı voltaj uygulanarak kontrol edilebilmektedir. Birinci ŞHA telin bağlantısına 100 g'lık yük uygulandığından, $\theta = \theta_1$ eyleyicinin çıkış açılarını temsil etmektedir.



Şekil 1.79: Eyleyici sistemin matematiksel blok diyagramı.

Modelleyip imal ettikleri üç tür Gergi ŞHA Eyleyici, Diferansiyel ŞHA Eyleyici, Uyumlu Diferansiyel ŞHA Eyleyicilerden Uyumlu Diferansiyel Eyleyiciyi Doymuş Oransal Tümlleşik (SPI) sistem ile kontrol etmişlerdir. Bu kontrol sisteminin şematik görünümü Şekil 1.80 a) ve b)'de görülmektedir.

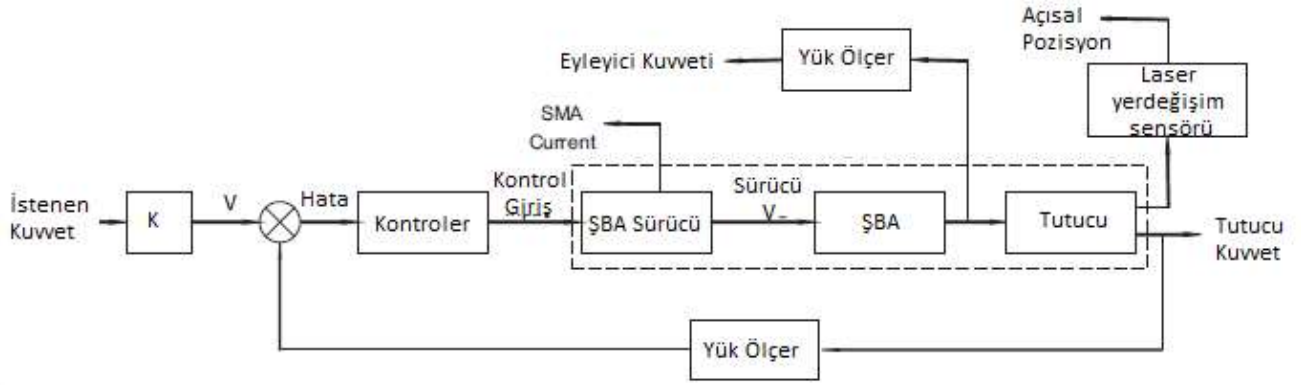


Şekil 1.80: a) Uyumlu Diferansiyel Eyleyicinin pozisyon kontrolü için akış diyagramı, b) SPI kontrol stratejisinin yapısı.

Deneyisel kurgularında Lab VIEW yazılımı (National Instruments Corp., TX), güç kaynağı (Dual-tracking DC 6306D, Topward Electric Instrument Co., TW), NI-PCI-6221 Data Acquisition (DAQ) kart (National Instruments Corp., TX), gerilim farkı yükselticisi voltaj amplifikatörü ve eyleyicinin açısal pozisyonunu ölçmek için her devir için 2500 atıma sahip shaft enkoder (Omron E6B2-CWZ1X, Omron Inc., Japan) kullanılmıştır. Kıyaslama için ise Lab VIEW yazılımında PI ve SPI kontrol stratejileri programlanmıştır.

Deneyisel araştırmalar sonucunda uyumlu diferansiyel eyleyicilerin geleneksel diğer iki eyleyiciye göre daha üstün özelliklere sahip olduğu kanaatine varılmıştır. Diferansiyel eyleyicilerin gergili eyleyicilere göre daha hızlı tepki zamanına sahip olmalarına rağmen iç faz dönüşümleri esnasında gerginliğin artmasına bağlı olarak çalışma aralıkları sınırlıdır. Deneyisel sonuçlar ayrıca doymuş oransal tümlleşik kontrol sisteminin oransal tümlleşik sisteme göre uyumlu diferansiyel eyleyicilerin konum takiplerinde daha hızlı tepki zamanı ve doğruluğa sahip olduğunu göstermiştir[30].

Koç ve arkadaşlarının akıllı laparoskopik tutucu çalışmalarında, ŞHA teli aktif etmek için gerekli olan sürücü voltaj ŞHA Sürücü Devresinden elde edilmektedir. ŞHA tel, tutucu ağızda tutucunun altına yerleştirilen bir yük hücresi tarafından ölçülen eyleyici bir kuvvet oluşturmaktadır. Burada elde edilen tutucu kuvvetin hakkında bilgi sahibi olmak ve kontrol edebilmek amacıyla Şekil 1.81'de verilen kapalı devre kontrol blok diyagramı kullanılmıştır.



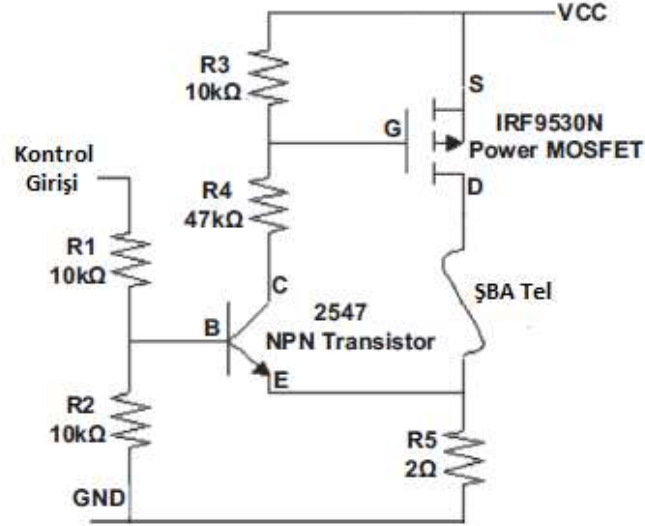
Şekil 1.81: Tutucu kuvvetin kapalı çevrim kontrolünün blok diyagramı.

Ölçülen tüm değişkenler, iki tür kontrol kurallarının elde edildiği kullanıcı tarafından tanımlanan bir ara yüzde toplanır. Oransal İntegral Türevsel (PID) kontrol sistemi ve Kayma Kipli Kontrol (KKK) kuralları aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$u_{PID}(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{Denklem 19}$$

$$u_{SMC}(t) = f(s, t) + K \text{sign}(s) \quad \text{Denklem 20}$$

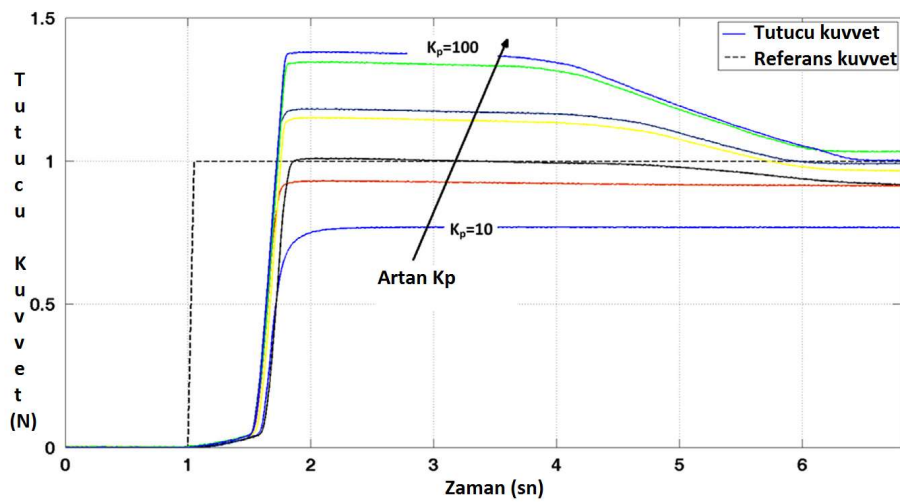
Burada, $u_{PID}(t)$ ve $u_{SMC}(t)$ PID ve SMC kontrol kuralları, K_p , K_d , K_i PID kontrol sistemlerinin kazançları, $e(t)$ istenilen ve ölçülen tutma kuvveti arasındaki hata ve t ise zamandır. SMC için ise $s(e, t)$ kayma yüzeyi, $s(e, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda e(t)\right)^{n-1}$ olarak tanımlanır. Burada n sistem sırası, λ ise $s(e, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda e(t)\right) = 0$ gibi hata dinamiklerini tespit amacıyla yapılandırılabilir değişkenleri, $f(s, t)$ sistem dinamikleri ve kayma yüzeyinin fonksiyonlarını, K kazanç ve sign ise signum işlevini temsil etmektedir. Tek yönlü şekil bellek etkisinden dolayı, geri yükleme kuvveti pasif yay tarafından sağlanmaktadır. Bu yüzden tutucu kuvvetin kontrolü hatanın işaretine bağlıdır, böylece hata pozitifse, denetleyiciler ŞHA telini etkinleştirmek için bir çıktı üretmektedir. Aksine, hata negatifse kontrolörler bir çıkış üretmez ve ön gergi yayı ŞHA telini başlangıç fazına çekmeye çalışır. Bu yüzden kontrolörler hata pozitif ise çalışmaktadırlar. Kontrolör çıkışı, Şekil 1.82’de verilen ŞHA’nın elektronik sürücü devresine girmektedir.



Şekil 1.82: ŞHA kontrol elektronik sürücü devresi.

PID kontrol kazançları deneysel olarak kazanç parametrelerini (K_p , K_i ve K_d) araştırmak için farklı kontrolör tipleri (P, PI ve PID) kullanıldığında belirlenmektedir. KKK tasarımında sadece kazanç K değeri ayarlanmaktadır.

Yapılan çalışmalarda, değerlerin 10, 15, 20, 30, 50, 70 ve 100 sırasıyla yükseldiği kavrama kuvvetindeki farklı oransal kazanç (K_p) değerlerinin sonuçları Şekil 1.83'de verilmiştir. Yüksek oransal kazanç sürücü akımının daha yüksek hale gelmesinden dolayı daha hızlı tepki vermektedir. Sonuç olarak daha kısa tepki zamanları elde edilmektedir. Bununla birlikte yüksek sürücü akımları % 38.18 gibi yüksek kazanç değerlerinde üst aşım ile sonuçlanmakta ve kararlı durum hatasını kaybetmektedirler.



Şekil 1.83: İstenilen tutucu kuvvet için bir adım girişi ve sadece P (Oransal) kontrolör kullanılmaktadır.

Bu yüzden aşım daha yüksek bir tutucu gücü ile sonuçlanmaktadır. Burada asıl amaç yüksek aşım değerlerine karşılık gelen aşırı kuvvet değerlerinde, tutucu kuvvetini dokulara hasar verecek limit değerlerin altında tutmaktır. Bu bağlamda en uygun oransal kazanç (K_p), kalıcı durum hatasının %9,1 olduğu ve tepki aşımının olmadığı 15 seçilmiştir. K_p değeri 15'e sabitlendikten sonra integral kazancın etkisi (K_i) 0.7 ve 1.5 değerleri arasında çalışılmıştır. İntegral kazanç yükselirken, kalıcı durum hataları daha azalır fakat aşım daha yüksek hale gelmektedir. Bu konfigürasyonda integral kazanç 1,3 olarak kararlaştırılmış aşım % 4.54 ve kalıcı durum hatası % 2.1 olmuştur. Türevsel kazanç etkisini (K_d) araştırmak için oransal kazancın $K_p=15$ ve integral kazancın $K_i=1.3$ olarak ayarlandığı PID kontrol kullanılmıştır. Sürekli durum hatası değişmemiş ve aşırı vurma nadiren değişmiştir. Sonuç olarak PID kontrol kazançları $K_p=15$, $K_i=1.3$, ve $K_d=0.01$ olarak seçilmiştir. Bu değerler için sistem tepkisi % 1.51 aşım ve % 10.6 kalıcı durum hatasına sahip olmuştur. PID kontrol sonuçlarından görüldüğü üzere sistemin her tepkisi, bazı aşım derecesi ve kalıcı durum hatasına sahip olmuştur. Bu yüzden, Kayma Kipli Kontrol (KKK) sıfır kalıcı durum hatasına erişmek için kullanılmıştır. KKK'nin sistem tepkisini kontrol etmek için K ve λ iki parametreye sahiptir. $\lambda=1$ olduğunda K değerleri 0.0587, 0.06, 0.075, 0.1 ve 0.15'dir. Yerleşme zamanı ve aşım arasında bir değiş tokuş vardır. K değeri 0.0587 olduğunda, sistem tepkisi %3.34 aşım üretir fakat kalıcı durum hatası üretmez. Kavrama kuvvetinin kapalı döngü dinamikleri % 5'den fazla aşım ve % 15'i kararlı durum hatasına sahip olduğunda PID ve KKK karşılaştırıldığında; KKK in giriş kontrolünde gürültü etkisinin (chattering effect) kalıcı durum aşamasında istenilen ve elde edilen tutucu gücün sıfır olduğu hata aralığında açıkça görülmektedir. Bununla birlikte PID kontrolör kalıcı durum aşamasında sabit bir çıkışa sahiptir ve kalıcı durum hatası üretmektedir. Bir PID kontrol sistemi ile eyleyici daha yüksek bir tepki süresine sahiptir ancak belirgin bir kararlı durum hatası gözlemlenmiştir. Bununla birlikte KKK daha düşük tepki verir ancak sıfır kararlı durum elde edilmektedir[19].

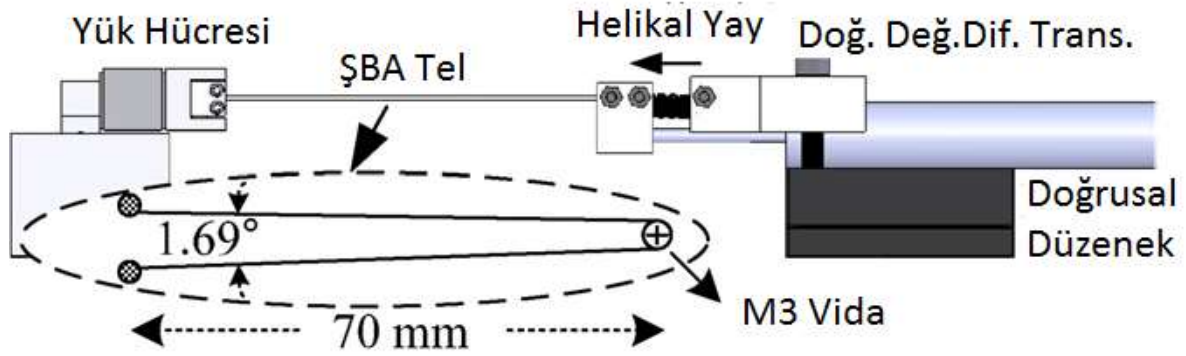
Son zamanlarda teknoloji Kendinden Algılamalı Çalışan (KAÇ) ve kapalı bir döngüde hem algılama hem de çalıştırmayı paylaştıran bir teknik kazandırmıştır. ŞHA'lar şekil bellek etkisi ve süperelastiklik yanında ayrıca eyleyicinin nispeten değişen elektriksel özelliğinden konum bilgisinin çıkarılmasına olanak tanıyan ilginç kendinden-algılama özelliğini de sergilemektedir. Bu özellik bu malzemelerin fiziksel bir konum sensörünün yerini almasını sağlamaktadır. Bu nedenle kendinden algılama kavramı ilave sensörlerin getirdiği donanım, karmaşıklık ve maliyeti azaltmak için yararlıdır. Bu kendinden-algılanan sinyal, geri besleme kontrolü için

kullanıldığında eyleyiciler sağlamlık ve arıza emniyeti bakımından daha güvenilir bir kullanım alanı bulacaktır. Kendinden algılamalı eyleyicilerin kullanımında sinyal işleme teknikleri kullanılmaktadır. Protez el ve robot kateter gibi bazı uygulamalarda doğru konumlama için kinematik ve ters kinematik geliştirilmiştir. Bu genelleştirilmiş koordinatlara dayalı karmaşık kontrol algoritmaların geliştirerek veya maliyeti artıran ilave sensörlerin kullanılması minyatürleştirmeyi kısıtlamaktadır. Bu kısıtlamaların üstesinden gelmek veya minimum donanım / yazılım gereksinimi ile kendini algılayan tasarımın fizibilitesini arttırmak ideal bir seçim olacaktır. İlgili literatür incelendiğinde, ŞHA'nın kendini algılama yeteneğini keşfetmek için önemli miktarda çaba sarf edildiği açıktır. Fakat temel problem ŞHA'nın dönüşümü esnasında oluşan R fazı ve histeresiz aralığının oldukça yüksek olmasıdır. Ruth ve arkadaşları bu temel problemlerin üstesinden gelmek için yeterli miktarda bir ön gerilim üreten bir antagonist bir sistem üstünde çalışmışlardır. Çalışmalarında, elektrik direncinin (algılama sinyali) ölçülmesi için basit bir elektronik devre tasarlayarak doğrudan diferansiyel direnç geribildirim kontrolünü geliştirmişlerdir. Geleneksel çok yönlü yöntemin aksine histerezden bağımsız olan bu teknik ile yüksek mertebeden polinomların belirlenmesinde ve çözülmesindeki yanlışlıkların ve karmaşıklığın azaltıldığını bildirmişlerdir. Önerilen çalışmalarında sistem bağımsız ve ŞHA tarafından tahrik edilen herhangi bir sistemle uyumlu doğrudan geri besleme mekanizması üzerine 1 Hz'lik gelişmiş bir frekansta dinamik sinyalleri izlemek için kendiliğinden algılanan antagonistik ŞHA teller ile harekete geçirilen bağlantı bir manipülatörünün servo kontrolünde sunulan alışılmış bulanık bir PID kontrolünün uygulanmasını çalışmışlardır[42].

Kontrol ile ilgili olarak bahsedilebilecek diğer bir teknik ise kendinden algılayan (Self-Sensing) sistemlerdir. Burada temel prensip bir eyleyicinin kendi elektriksel değişkenlerinden faydalanılarak kendi mekaniksel değişkenlerinin çıkarılmasından faydalanılmaktadır. Geri bildirim kontrolü için kendinden-algılanan sinyal kullanıldığında, eyleyicinin sağlamlığı ve hata güvenliği daha da artacaktır. Ayrıca ek sensör kullanımları ve maliyetler de azalacaktır. Doğru algılama elde etmek için, bir eyleyicinin ölçülen değişkenleri ve kontrol edilen değişkenleri arasında belirleyici ilişkiler olmalıdır. Şekil bellekli alaşımlar düşük sıcaklık fazı (martenzit), yüksek sıcaklık fazı (östenit) olmak üzere iki ve yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa geçerken bazı durumlarda ortaya çıkan R (rombohedral) faz olmak üzere toplam üç faza sahiptir. Ön gerilmeli bir ŞHA ısıtıldığında, gerilim etkili martenzit (detwinned) yapıdan östenit yapıya dönüşerek şekil değiştirmektedir. İnce ŞHA tel için yeterli başlangıç gerginliğinde, %

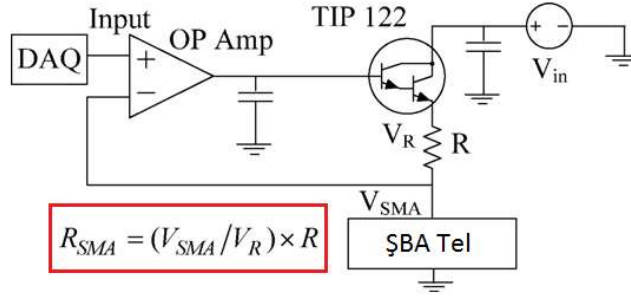
4-5 oranında tel boyutunda bir azalma meydana gelmektedir. Soğuma ile beraber şekilde değişim olmaksızın telin iç yapısı tekrar ikizlenmiş martenzit yapıya dönüşmektedir. Gerilim etkili martenzit yapıyı elde etmek için genellikle bir yüke ihtiyaç vardır. Bunun için gergili bir yay kullanılmaktadır. Bu durum genel olarak tek yönlü şekil bellek etkisi olarak bilinmektedir. Bir döngüde ŞHBA 'da meydana gelen sıcaklık değişimi, faz dönüşümü ve şekil değişimi telin elektriksel değişimlerine büyük ölçüde etki etmektedir. Bu nedenle; gerinim değişimi yani uygulanan gerilime bağlı olarak oluşan deformasyon, direncin değişimi ile çıkarılabilir. ŞHA eyleyiciler, gerinim kaynaklı kısaltmalarını diğer yönler ile iletme ve kuvvetlendirmek için “izolasyon (buffer) amplifikatörü” gibi bir mekanizmaya ihtiyaç duymaktadırlar. Ayrıca geri dönüş kuvvetinin sağlanması için yeterli bir sertlikte gerilim yayına ihtiyaç duymaktadır.

Lan ve Fan ŞHA teli ile yaptıkları kendinden algılama sisteminde Şekil 1.84’de görülen düzeneği kullanarak gerilme-voltaj, gerilme-direnç eğrilerini elde etmişlerdir.



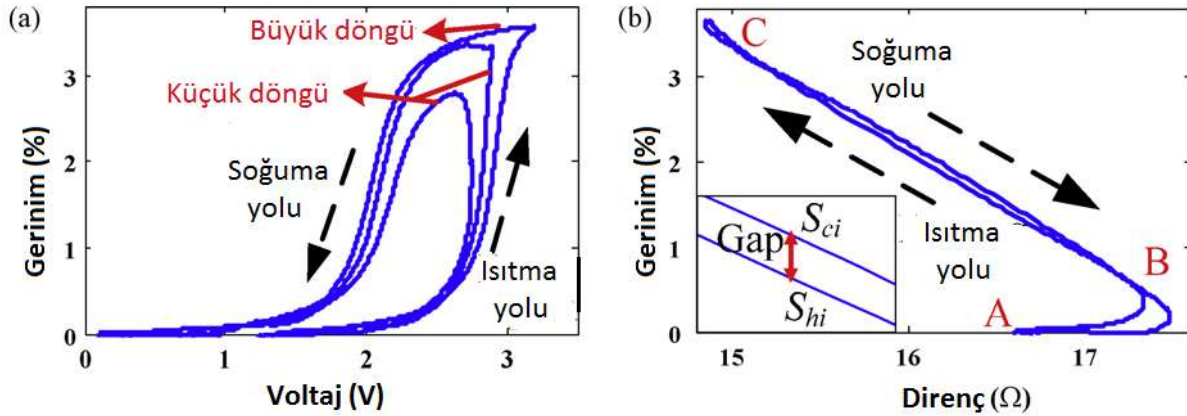
Şekil 1.84: Kendinden Algılayan Kontrol Sistemi verilerini elde etmek için kurgulanan deneysel düzenek.

Eğilme yükü hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla ŞHA tele sertlik katsayısı $k = 5.886 \text{ N/cm}$ olan helikal bir gergi yayı monte edilmiştir. Telin bir ucuna yük hücresi diğer tarafına da doğrusal değişken diferansiyel transformatörü kullanılmıştır. Yay tele bir ön gerilme uygulamaktadır. Doğrusal düzenek tele yay tarafından verilen ön gerilmeyi ayarlamaktadır. Şekil 1.85’de görüldüğü gibi bir devre telin direncini ölçmek ve giriş sinyalini yükseltmek için bir tampon yükseltici devre kullanılmıştır. Sisteme voltaj uygulandığında, Şekil 1.85’de verilen formüle göre hesaplanmıştır. Tel boyunca uygulanan gerçek voltaj V_{SMA} ve tel boyunca söz konusu olan direnç V_R , NI DAQ PCI-6229 kartı ile ölçülerek elde edilmiştir. Burada ölçülen veriler 20 Hz’de örneklenmiş ve 0.35 Hz’de kırılma frekansı kullanılarak dijital olarak filtrelenmiştir. Kullanılacak teli tespit etmek amacıyla 3 farklı teli karakterize etmişlerdir.



Şekil 1.85: Buffer amplifikatör devresi.

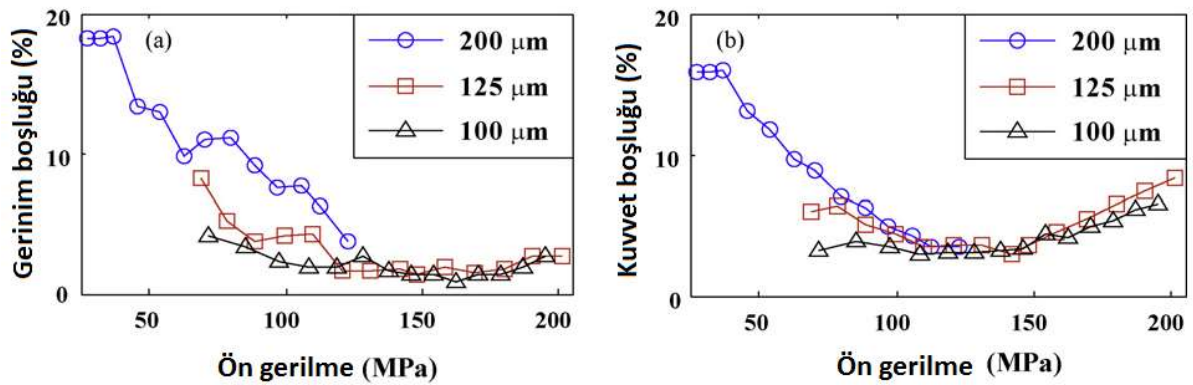
100 μm çapındaki tele 1/90 Hz ve 3.2 V'luk bir genliğe sahip sinüs dalga gerilimi uygulandığında Şekil 1.86 a) ve b)'de görülen gerinim-voltaj ve gerinim direnç eğrileri elde edilmiştir. Şekil 1.86 a)'da görüldüğü gibi gerinim-voltaj eğrileri önemli bir histeresiz boşluğu oluşturmuştur. Histeresiz modeline yaklaşımı ne olursa olsun, ısıtma ve soğutma yolu arasındaki fark, ŞHA'nın hassas kontrolünü olumsuz şekilde etkilemektedir. Aynı şekilde büyük histeresiz döngüsünün içinde 2.9 V ve 2.75 V genliklerinde elde edilen daha düşük histeresiz döngüleri görülmektedir.



Şekil 1.86: a) Gerinim-Voltaj histeresiz döngüsü, b) Gerinim-Direnç histeresiz döngüsü.

Şekil 1.86 b)'de ise gerinim-direnç histeresiz döngüsü görülmektedir. Gerinim-sıcaklık, gerinim-voltaj eğrilerinden elde edilen döngüsel boşluğun aksine gerinim-direnç histeresiz aralığı çok küçüktür. Dolayısıyla ŞBA'nın kendinden algılama yeteneklerini gerçekleştirmek için geri besleme sinyali olarak ŞBA'nın elektrik direncini kullanmak gerekmektedir. Şekilde gerinme AB arasında dirençle orantılıdır ve BC arasında direnç ile ters orantılıdır. AB'deki direnç artışı ısıtmaya bağlıdır. BC arasında yaklaşık % 0.5 gerinim üzerinde doğrusal bir değişim söz konusudur ve burada dirençten gelen gerilim sinyali kullanılabilir. Kendinden algılama sisteminin kullanılabilmesi için histeresiz boşluğunun küçük olması gerekmektedir.

Boşluk ne kadar küçükse, ısıtma ve soğutma yolu arasındaki tutarsızlık o kadar az olur. Bu nedenle, kendinden-algılama modeli oluşturmak için daha doğru bir temel olacaktır. Bu histeresiz boşluklarını küçültebilmek amacıyla çalışmalarında çeşitli ön gerilme kuvvetlerini, farklı çaplarda tellere 3.2 V ve 2.3 V'luk genliğe sahip sinüs dalgaları ile uygulamışlar ve gerinin boşluklarının tel çapına bakılmaksızın artan ön gerilme kuvveti ile azaldığını tespit etmişlerdir. Elde edilen gerinim boşluk-ön gerilim ve kuvvet boşluk- ön gerinim eğrilerinden % 3'ten daha az gerilme boşluğu elde etmek için 130 MPa ön gerilme gerilmesi yeterli olduğu görülmektedir (Şekil 1.87). Aşırı ön gerilme ŞHA'nın yorulma ömrünü azaltacağından dolayı gereksizdir.

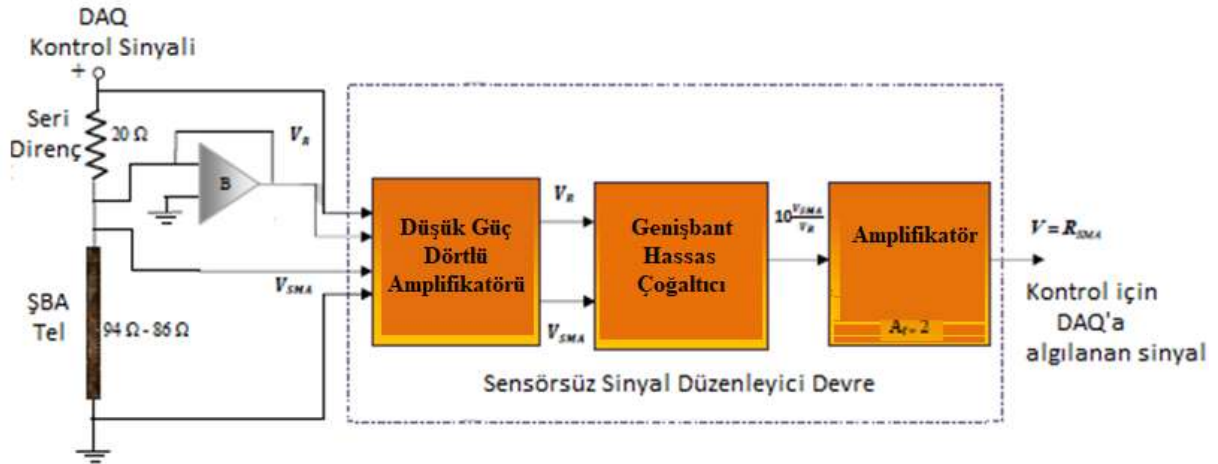


Şekil 1.87: Farklı ön gerilme kuvvetlerinde elde edilen gerinim ve kuvvet boşlukları.

Lan ve Fan çalışmalarında histeresiz boşluklarına sıcaklık ve kullanılan yayın k sabitin etkisini de araştırmışlar ve elde ettikleri eğriler neticesinde yay k sabitindeki değişimlerin etkilerinin küçük ve ihmal edilebilir olduğu sonucuna varmışlardır. 24 C°, 32 C° ve 58 C°' de tekrarladıkları çalışmalarda sıcaklık değişimlerinin de gerinim-direnç eğrilerinde minimal değişim gösterdiklerini tespit etmişlerdir. Kurguladıkları sete bulanık mantık PID kontrol uygulamışlardır[43].

Yukarıda olduğu gibi direnç geribildirimini birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir ve bu çalışmaların çoğu tel-yay veya tel-sabit kuvvet çifti üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bir sistem yeterli sertlikte bir karşı çekme ünitesine gereksinim duyduğunda, kullanılan yayın boyutu daima ŞHA eyleyicinin kurgulanmış konfigürasyonunu sınırlamaktadır. Ayrıca tek bir ŞHA ve pasif bir eleman ile her iki yönde aktif bir kontrol etkili olmamaktadır özellikle yüksek sıcaklık fazından soğuma esnasında oluşan R fazı geniş histeresiz aralığına sahiptir. Alternatif olarak minyatür uygulamalar ve ilave sensörlerin getirdiği karmaşıklık ve maliyetleri indirme açısından, antagonistik ŞHA tel eyleyiciler yada kendinden algılama kabiliyetine sahip çok telli

eyleyiciler kullanılmaktadır. Ruth ve arkadaşları, lineer olmayan kontrol kullanarak histereziyi azaltarak çift yönlü açısıl kontrol için sensörsüz diferansiyel direnç tekniğine odaklanmışlardır. Direncin (algılama sinyali) ölçümü için basit bir elektronik devre kullanarak doğrudan diferansiyel dirençli geri besleme kontrolünü geliştirmişler ve böylece literatürde bildirilen yöntemlerin karşılaştığı kısıtlamaların üstesinden gelmişlerdir. Bu devre aynı anda hem ŞHA tellere akım sağlamak için hem de elektrik direncini ölçmek için algılama devresi olarak çalışmaktadır. Şekil 1.88’de sensörsüz sinyal düzenleyici devreye ait önerilen tasarım gösterilmektedir.



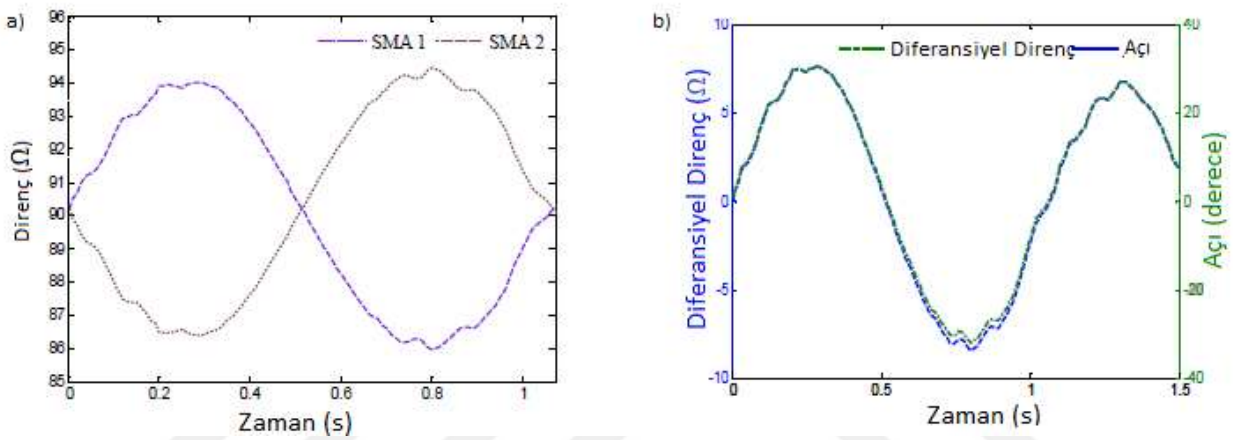
Şekil 1.88: Sensörsüz sinyal düzenleyici devre.

Tellerin büzülmesi ve gerilmesi alternatif olarak hem termik hem de mekanik olarak antagonistik ŞHA tellerin ve eşlik eden mikro yapı değişikliklerinin uğradığı faz geçişlerinin sonucu olarak tetiklenmektedir. Her bir ŞBA tellerdeki direnç değişimi aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$R_{sma} = \frac{V_{sma}}{V_R} \times R = \frac{V_{sma}}{V_R} \times 20 \quad \text{Denklem 21}$$

R_{sma1} ve R_{sma2} arasındaki fark algılanan sinyaldir. Bu dirençlerin değerlerini elde etmek için sensörsüz sinyal düzenleyici devresi kullanılır. Ölçülen voltajlar (V_{sma} , V_R), iki voltajın izole edilmesi için kullanılan bir tampona (buffer) gönderilir ve düşük güçlü bir dörtlü amplifikatör ile güçlendirilir; bu entegre devre her iki ŞHA tel için ortaktır çünkü tek bir devrede (IC) dahili olarak tanzim edilmiş dört tane op-amps'a sahiptir ve bu çift besleme ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Bu voltajlar bölücü olarak yapılandırılmış geniş bant hassas analog çarpıcı/bölücü MPY634 tarafından bölünür ve çıkış $y = 10 \frac{V_{sma}}{V_R}$ ile verilmektedir. Bu çıktı,

ŞHA direncinin değerini vermek için çarpım faktörü x ile güçlendirilir ki bu seri rezistörün çarpanı $10x$ 'dir. Burada, uzaysal düzlemde manipulatörün her bir pozisyonu için ŞHA'ların çıkış voltaj değerlerinin değişken bir direnci, kazancın 5 olduğu diferansiyel bir amplifikatöre verildiğinde aralarında doğrusal bir ilişki vardır. R seri direnci, V_{in} den çok fazla gerilim tüketmeksizin V_R 'nin hassas ölçümünü sağlamak ve aynı anda V_{sma} 'nın kesin değerini ölçmek için seçilmiştir. Karşılanması gereken bir şartta; her durumda V 'nin sıfır olmaması gerektirir. Dolayısıyla daima minimum giriş voltajı kontrol sırasında devrede kullanılabilir. Kontrolsüz ŞHA tellerinin algılama sinyalleri, karşılık gelen diferansiyel güç ve açısal yer değiştirme açısından kalibrasyonu Şekil 1.89 a) ve b)'de gösterilmiştir.



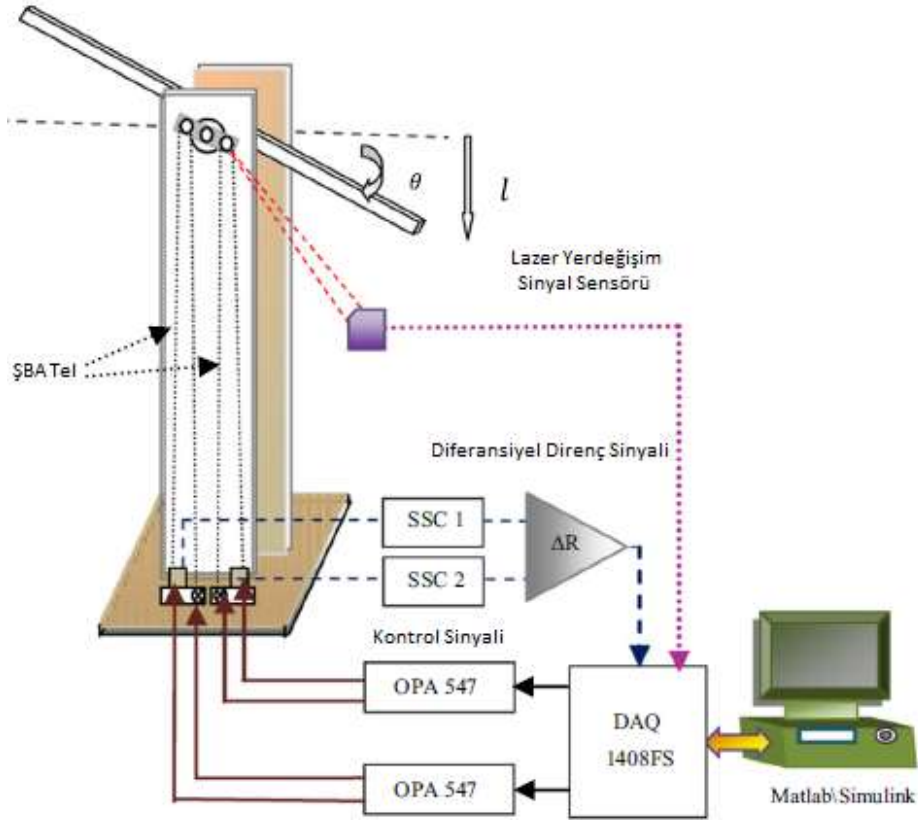
Şekil 1.89: a) ŞHA tellerde elektriksel direnç değişimi, b) Sensör sinyali.

Deneyisel kurgu direk direnç geri bildirim kontrolü ile çalışan antagonistik ŞHA ile hareket ettirilen bir bağlantı kolunun kabiliyetini kanıtlamak için kurulmuştur. Bir ŞHA tel tek yönlü şekil hafıza etkisi sergilediğinden, iki yönlü kontrol eylemi gerçekleştirmek için antagonistik bir tasarım kullanılmıştır. Uzunluğu 60 cm, genişliği 4.5 cm ve kalınlığı 0.3 cm olan yatay bir akrilik kiriş, dönen şaft üzerinde merkezi olarak menteşelenmiştir ve bu şaft, tabandan 50 cm yükseklikte dikey bir yapı üzerinde ŞHA eyleyici ile birlikte monte edilmiştir. Bu yatay akrilik kiriş mil üzerine takıldığından antagonistik ŞHA tel çiftinin harekete geçirme torku tarafından menteşeli nokta çevresinde döndürülmektedir. Yüksek elektrik iletkenliği sağlayan, kolay ısı dağılımı sunan, $90^{\circ}C$ faz geçiş sıcaklığına sahip ticari olarak temin edilebilen Flexinol® (NiTiNOL) 0.010 cm'lik çapa sahip tel uygulama için tercih edilmiştir. Kullanılan tele ait özellikler Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 1.7: Flexinol telin özellikleri.

Uzunluk (cm)	80
Çap (cm)	0.010
Geçiş Sıcaklığı (°C)	90
Histeresiz(°C)	20
Young's modulu Martensit (GPa)	28
Young's modulu Ostenit (GPa)	75
Yogunluk (kg/m ³)	6450
Direnç (ohm/m)	126
Oda sıcaklığında Akım (A)	0.210
Maksimum çekme gücü (kg)	0.143

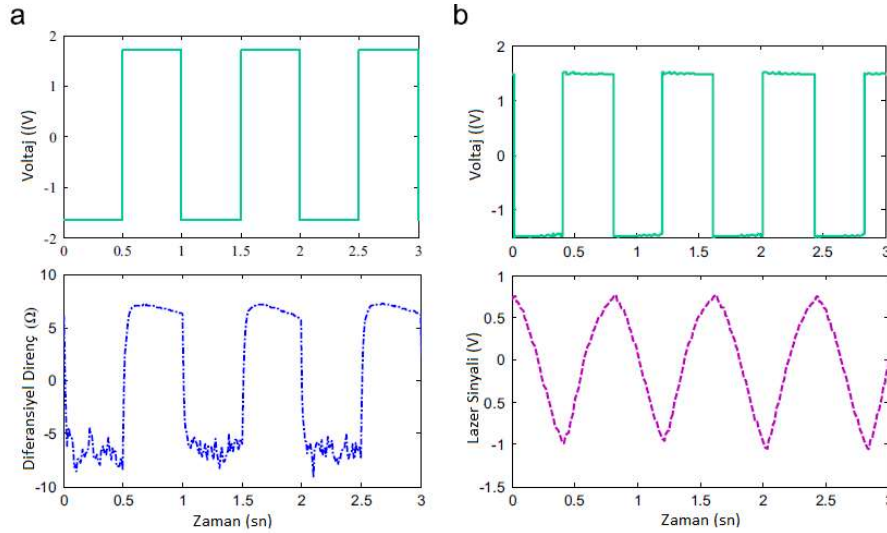
ŞHA'nın uyarılması için yaygın olarak joule ısıtma etkisi kullanılmaktadır. Yukarıda bahsedildiği üzere gerilme-şekil değiştirme davranışındaki değişiklikler ŞHA'nın eyleyici olarak kullanılmasını sağlarken elektriksel direncindeki değişiklikler kendinden algılamalı çalışan bir sistem için olanak tanımaktadır. Şekil 1.90'da, sensörsüz açısal kontrolün performansını değerlendirmek üzere tasarlanan bir manipülatörün şeması gösterilmektedir.



Şekil 1.90: Bir serbestlik derecesine sahip ŞHA eyleyicinin şematik blok diyagramı.

ŞHA eyleyiciye gelen kontrol sinyali OPA547 amplifikatör devreleri (voltaj-akım dönüştürücüleri) vasıtasıyla verilmektedir. OPA547 dahili olarak aşırı sıcaklık ve akım aşırı yüklerine karşı korunmuştur. Ayrıca buna ek olarak kullanıcı tarafından seçilen bir akım sınırını

sağlamak üzere tasarlanmıştır. Çıkış akım hattı ile seri bir güç direnci kullanan diğer tasarımların aksine bu op-amp yükü dolaylı olarak algılamakta ve 0 pA ila 150 pA kontrol sinyaliyle akım sınırının 0 mA'dan 750 mA'ya ayarlanmasını sağlamaktadır. Bu devreler, giriş sinyali izlemek için antagonistik ŞHA eyleyiciye bir tahrik akımı sağlamaktadır ve bağlantı manipülatörünün açısal izlenmesini elde etmektedir. İki minyatür yük hücresi (Futek), ŞHA'nın bağlı olduğu tabana sabitlenmiştir. Akım dönüştürücü (LEM LTS 6-NP), ŞBA üzerinden geçen akımı ölçmektedir. Manipülatörün açısal konumu ŞHA telinin diferansiyel direnci ile algılanmaktadır. Her bir ŞHA telinin direnci kendinden algılamalı sinyal işleme devresi (SSC) aynı anda ölçülmektedir. Çalışmanın doğrulanma ve karşılaştırılması amacıyla geleneksel olarak açısal konumu ölçmek için bir lazer deplasman sensörü monte edilmiştir. Sensör / SSC sinyalleri denetleyiciye beslenmekte ve ŞHA eyleyiciye karşılık gelen kontrol sinyalleri voltaj-dönüştürücü devreler üzerinden verilmektedir. Sensör / SSC ve eyleyiciler, bir veri toplama sistemi-USB 1408 FS kartı aracılığıyla MATLAB Simulink çalıştıran PC ile bir arabirim oluşturmaktadır. Çıkış (sensör sinyali) farklı olduğundan, diferansiyel direnç ve konum sensörünün performansını karşılaştırmak amacıyla sensörsüz ve sensör sistemleri için, manipülatör sisteminin sensörünün ve harekete geçiricisinin dinamikleri de dahil olmak üzere ayrı modeller elde edilmiştir. Sensörsüz teknikte model, her bir ŞHA tel için ayrı olarak tahmin edilip ve genel sistem tanımlama aracı tarafından belirlenmektedir. Giriş ve çıkış sinyalleri Şekil 1.91 a)'da gösterildiği gibidir.



Şekil 1.91: Manipülatör sistemi için model eşleşmeyi gösteren giriş ve çıkış sinyalleri, (a) sensörsüz (b) sensörlü.

Sistem modelini tahmin etmek için model yapısı olarak ARX221 modeli seçilmiştir. Çıktı modeli eğrisinin % 94.22 uyumlu olduğu için model geçerli kabul edilmiştir. Her bir ŞBA telin çıkış ve kontrol girişi ile ilgili transfer fonksiyonu Denklem 22’teki gibidir.

$$G_{ss}(s) = \frac{256.4s + 269.824}{s^2 + 264.5s + 67.647} \quad \text{Denklem 22}$$

Yer değiştirmeyi ölçmek için lazer deplasmanlı sensör (Aquity AR200) kullanılmaktadır. Yüksek doğruluk sunduğu için sensörsüz performans ile karşılaştırma en iyisi olacaktır. Giriş ve çıkış sinyalleri Şekil X b)’de gösterildiği gibidir. Yer değiştirme sensörü tarafından ölçülen çıkış uzaklığı ile ŞBA eyleyiciye gelen kontrol girişi arasındaki ikinci dereceden bir transfer fonksiyonu vardır ve Denklem 23’de verilen eşitlik % 95.3 oranında modeli doğrulamaktadır.

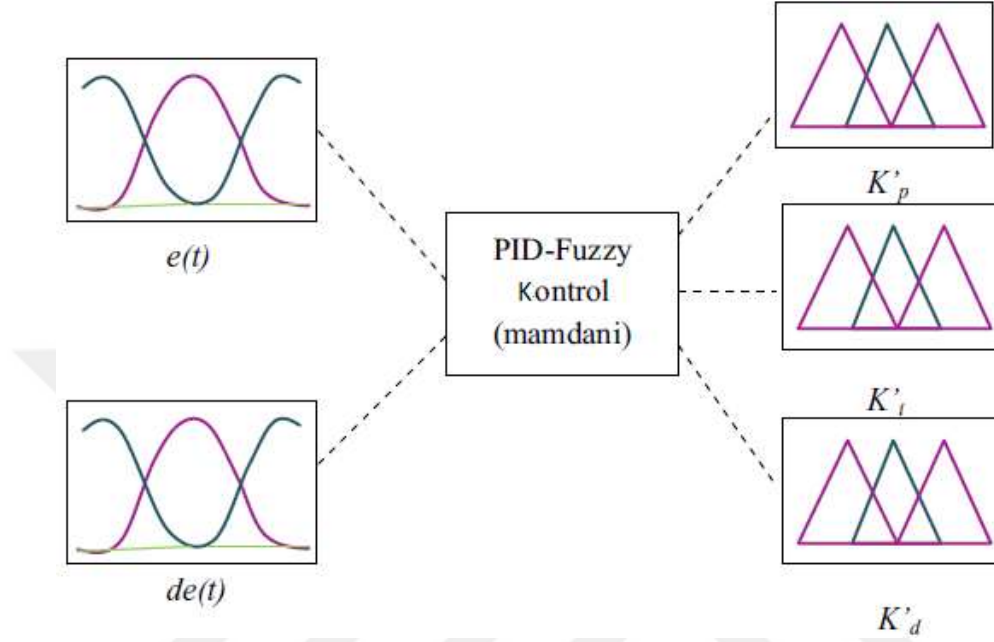
$$G_s(s) = \frac{1.5846s + 42.7412}{s^2 + 13.5807s + 50.3630} \quad \text{Denklem 23}$$

Sistemin kontrol mekanizması için kendinden algılayan antagonistik ŞBA ile çalıştırılan manipülatör sistemi üzerinde yapılan çalışmayı yürüten genel bir PID bulanık kontrol uygulanmıştır. Sistemde pasif bir yay ile ön gergili bir ŞHA tel kullanılmıştır. PID basit kontrol yapısı ve kolay tasarıma sahip temel kontrol şemasıdır. Önceden tahmin edilemeyen parametre değişiklikleri ile doğrusal olmayan sistemler için sıklıkla uygun bir şekilde ayarlanmadıklarından, pratik kontrol sistemlerinde hâlâ sorunlarla karşılaşmaktadır. O yüzden otomatik ayarlama gerekli olacaktır. Öte yandan bulanık kontrol bir sistemi nasıl kontrol altına alacağına ilişkin tecrübelerden elde edilen bir insanın sezgisel bilgisini temsil etmek, manipüle etmek ve uygulamak için kullanışlı ve resmi bir metodoloji sunmaktadır. Bu nedenle yüksek kontrol performansı elde etmek için bulanık ve PID kontrolünün avantajları bir denetleyicide birleştirilebilmektedir. Burada kullanılan denetleyici bulanık kontrol kuralları ile PID denetleyicisinin parametrelerinin ayarlanması için bulanık mantık denetleyicisi kullanılarak tasarlanmıştır. Denetleyici hata ve hatanın değişim oranını girdi olarak kullanır ve e ve é temelinde zamanla değişen istenen ayar parametrelerini karşılamaktadır.

$$y_{PID}(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} + K_i \int_0^t e(t) dt \quad \text{Denklem 24}$$

Bulanık mantık denetleyicisi sürekli olarak e ve é 'yi denetler ve kontrol parametrelerinin daha iyi dinamik kararlı performans elde etmesini sağlamak için bulanık kontrol kurallarıyla online olarak üç parametreyi ayarlamaktadır. PID parametreleri hatadan doğrusal olmayan bir haritalama ve hatanın PID parametrelerinden türetilmesini sağlayan bulanık bir çıkarım

kullanılarak ayarlanmaktadır. Tasarlanan bulanık kurallar manipölatörün dinamik özelliğine dayanmaktadır. Hatanın $e(t)$ ve hatanın türevi $de(t)$ girdiler ve K'_p , K'_i ve K'_d bulanık çıkarım sisteminde kullanılan Mamdani modelinin üç çıkışıdır. Denetleyici tasarımının bulanık çıkarım bloğu Şekil 1.92'de gösterilmiştir.



Şekil 1.92: Bulanık çıkarım bloğu.

PID kontrolörünün K_p , K_i ve K_d parametrelerinin değişken aralıkları sırasıyla bu ŞHA ile çalıştırılan manipölatör için her bir PID parametresinin karşılık gelen aralığı $[K_p \text{ min}, K_p \text{ max}]$, $[K_i \text{ min}, K_i \text{ max}]$ ve $[K_d \text{ min}, K_d \text{ max}]$ deneysel olarak belirlenmiştir. Yüksek çıkarım verimliliğine sahip uygun kural tabanlarını elde etmek için, PID parametreleri Denklem (25 a-c) gösterildiği gibi $[0,1]$ aralığında normalize edilmelidir.

$$K'_p = \frac{K_p - K_{p \text{ min}}}{K_{p \text{ max}} - K_{p \text{ min}}} \quad \text{Denklem 25}$$

$$K'_i = \frac{K_i - K_{i \text{ min}}}{K_{i \text{ max}} - K_{i \text{ min}}} \quad \text{Denklem 26}$$

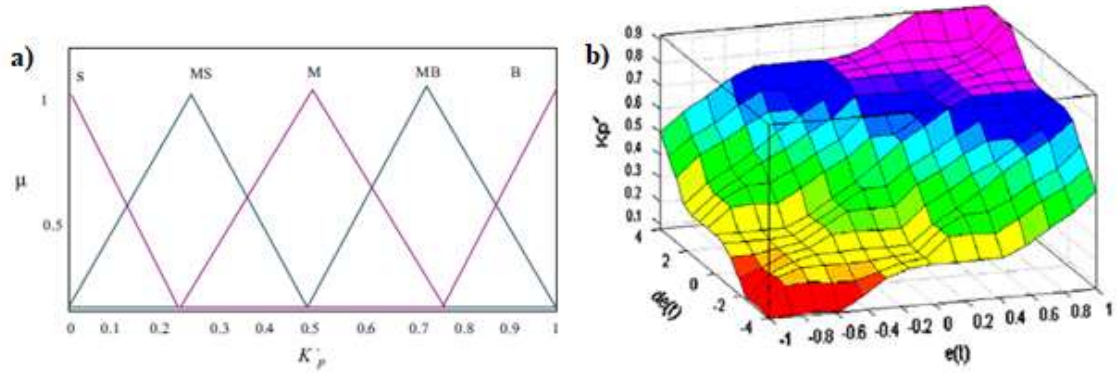
$$K'_d = \frac{K_d - K_{d \text{ min}}}{K_{d \text{ max}} - K_{d \text{ min}}} \quad \text{Denklem 27}$$

Sensörlü ve sensörsüz sistemler için ayar parametrelerinin maksimum değerleri, PID kontrol cihazı için deneysel olarak belirlenmiş ve Tablo 1.8'de sunulmuştur.

Tablo 1.8: PID ayar parametreleri.

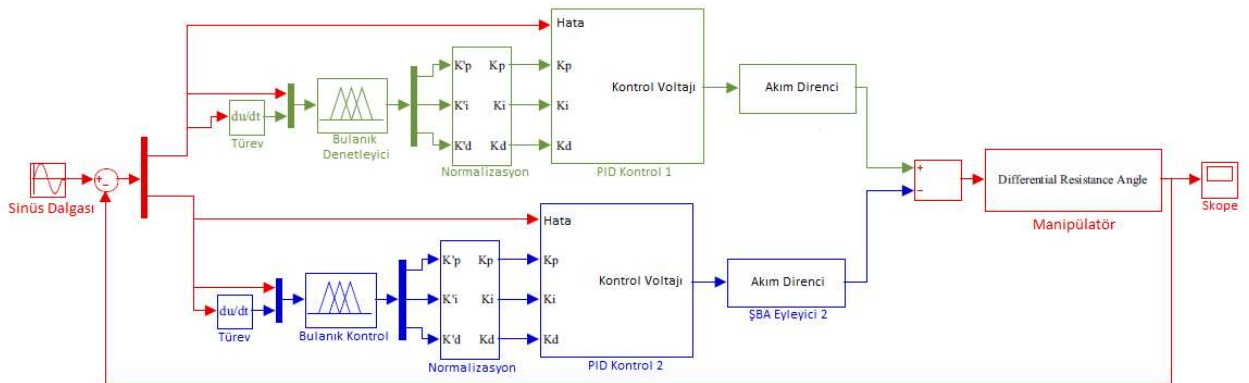
Kontrol Ayar Parametreleri	K_p		K_i		K_d	
	K_p min	K_p max	K_i min	K_i max	K_d min	K_d max
Sensörsüz Kendinden Algılamalı Sistem	1	52.4	0.01	1.8	0.005	0.5
Sensörlü Sistem	0.3	78.4	0.01	1.7	0.005	0.1

Algılama sinyalini ölçebilmek için kendinden algılamalı sinyal konumlandırma devresine (SSC) her zaman güç verilmelidir. Dolayısıyla sensörsüz sisteme K_p min için minimum 1 V gerilim beslenmektedir. Pratik olarak $[-1,1]$ $e(t)$ 'nin ve $[-4,4]$ $de(t)$ 'nin aralıklarıdır ve K_p 'nin bulanık kontrol çıktıları için ilgili üyelik fonksiyonları Şekil 1.93 a) ve b)'de gösterilmiştir.



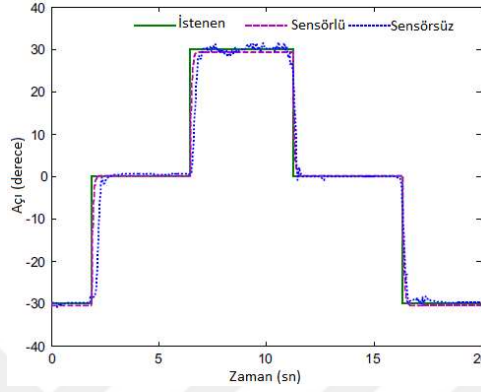
Şekil 1.93: a) K_p , K_i ve K_d 'nin üyelik fonksiyonları, b) K_p , K_i ve K_d 'nin bulanık kontrol kuralları.

Kendi kendini ayarlayan bulanık PID denetleyicisi için Matlab Simulink bloğu Şekil 1.94'de gösterilmektedir.

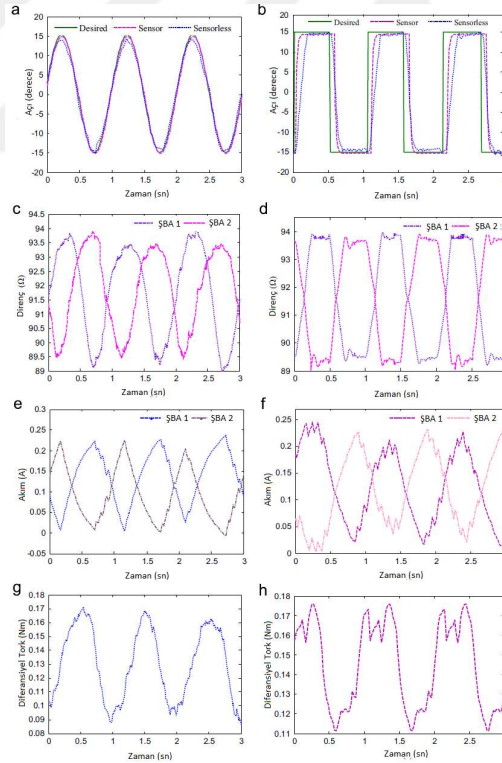


Şekil 1.94: Uyarlamalı Kontrol Yapısı.

Ruth ve arkadaşları sensörsüz diferansiyel direnç geri besleme şemasının performansını incelemek ve fiziksel (pozisyon) bir sensörlü bir sistem ile karşılaştırmak amacıyla gerçek zamanlı deneyler gerçekleştirmiştir. ŞHA eyleyiciyi aşırı ısınmaya karşı korumak için uygulanan akım 210 mA ile sınırlanmıştır. Sistemin çeşitli izleme girdi biçimlerine verdiği yanıtlar elde edilmiştir. Manipülatörün $+30^\circ$ açısal hareketi dahilinde izlenen ve tekrarlayan adım sinyali için elde edilen yanıt Şekil 1.95 ve 1.96’da sergilenmektedir.

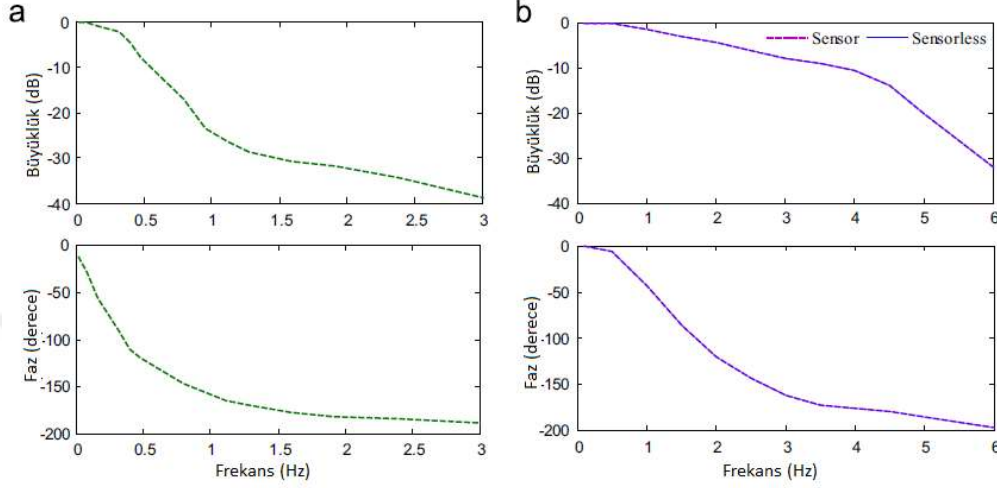


Şekil 1.95: Çoklu izleme.



Şekil 1.96: Deney sonuçları (a) sinüs dalga eğrisi, (b) kare dalga eğrisi. Sensörsüz sistemler için ŞHA tarafından üretilen karşılık gelen (c) algılama sinyali, (e) kontrol sinyali, (g) diferansiyel torku. Sensörlü sistemler için (d) algılama sinyali, (f) kontrol sinyali, (h) diferansiyel torku.

Bu açısal aralık için ŞHA telleri tam faz dönüşümünün bir sonucu olarak tam bir deformasyon değişimine uğramaktadır. Kontrolsüz sistemin bant genişliği 0.43 Hz, kontrollü sistem ise 1.8 Hz olurken bu durum uyarlanabilir PID denetleyicisinin uygulanmasıyla sistemin performansındaki iyileşmeyi kanıtlamaktadır. Kendi kendini algılama sisteminin kapalı döngü yanıtı, Şekil 1.97'de görülen sensör sistemi ile eşdeğerdir.



Şekil 1.97: Manipulatörün frekans tepkisi (a) açık döngü, (b) kapalı döngü.

Ruth ve arkadaşları deneysel bulgular sonucunda basit ve doğru dirençli geri besleme kontrolü kullanılarak hızlı ve doğru izleme sağlandığını ve izlemenin minimum % 0.06 hata ile gerçekleştiği, dahası bunun literatürde önceki çalışmalar ile karşılaştırıldığında daha yüksek operasyon sıklığında gerçekleştiğini bildirmişlerdir. Kendinden algılamalı kontrol devrelerinin (SSC) çok yönlü ölçüm yöntemi üzerindeki hayati rolü, gerinme-direnci (S-R) ilişkisini oluşturmada farklı koşullar için açık döngü deneyinin gerekliliğini dışlamasıdır. Yukarıda da bahsedildiği üzere; bu manipulatör sensörsüz (kendinden algılamalı) harekete geçirme ile kontrol edilebildiğinden ek bir sensöre ihtiyaç duymamaktadır. Bu nedenle sistem kompakttır. Minyatürleşmeye olanak tanımaktadır. Tasarım, maliyet ve kurulum zorluğunu azaltmakta ve genel olarak tüm sistemi optimize etmeye olanak tanımaktadır[28].

İyi geçici tepki, kararlılığın sağlamlığı ve deneysel kurgu parametrelerinin değişimi ve dış etkenlerden az etkileşim, kayma kipli kontrolünün (SMC) başlıca avantajları ŞHA ile çalıştırılan sistemler için uygundur. Bilgisayar kontrol sisteminin gelişimiyle birlikte, kesik zamanlı kayma kip kontrolü (DSMC), sürekli zaman kayma kip kontrolünden (CSMC) daha fazla popülerlik kazanmaktadır. Kesik zamanlı kayma kip kontrolün için istenilen giriş komutu $x(k)$ ve izleme hatası $e(k)$ olarak Denklem 28'de verilmiştir.

$$e(k) = x(k) - xd(k) \quad \text{Denklem 28}$$

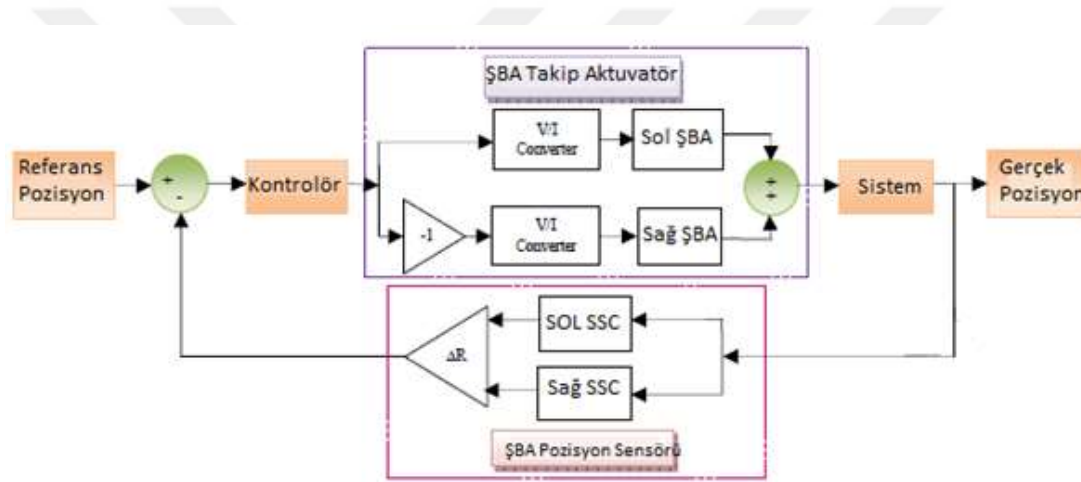
Kayma değişkeni $s(k)$ doğrusal bir anahtarlama fonksiyonu olarak tasarlanmış ve Denklem 29'daki gibidir

$$s(k) = C e(k) \quad \text{burada } C = [c \ 1], \quad c > 0 \quad \text{Denklem 29}$$

Kontrol girişi $u(k)$ Denklem 28'de verilmiştir.

$$u(k) = (C^T B)^{-1} (C^T x_d(k+1) - C^T A x(k) + q s(k) - \eta \operatorname{sgn}(s(k))) \quad \text{Denklem 30}$$

Burada η , q ve c pozitif sabit değerlerdir. C Hurwitz olmalı, $C=[c \ 1]^T$, $0 < q < 1$ kararlılığı garanti etmek için. Şekil 1.98'de geliştirilmiş kendinden-algılamalı kontrol şemasının blok diyagramı gösterilmektedir. Kontrolör parametrelerinin sayısal değerleri Tablo 1.9'da verilmektedir. Kontrol sisteminin detayları için Ref: 28.



Şekil 1.98: Geliştirilmiş kendinden-algılamalı kontrol şemasının blok diyagramı.

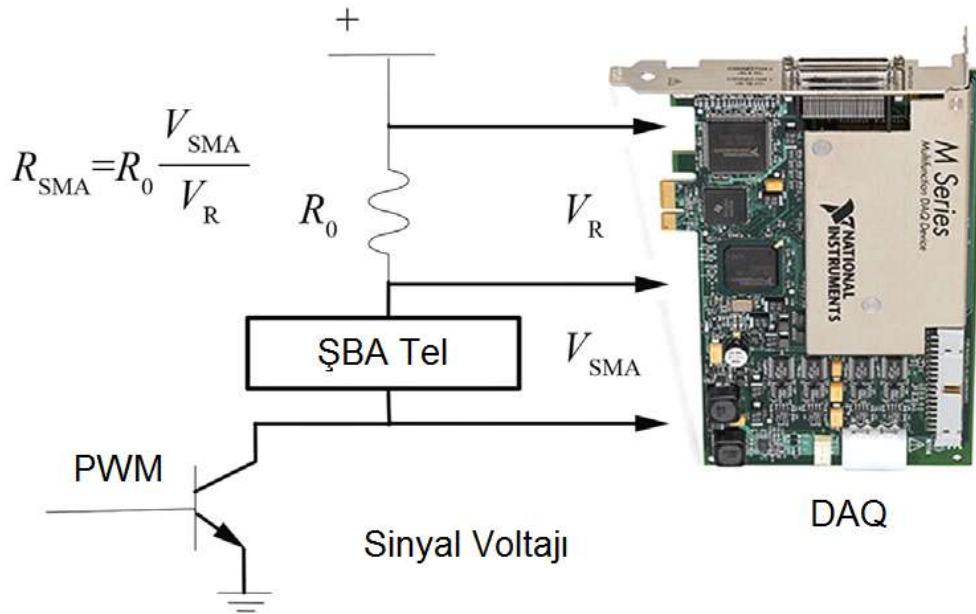
Tablo 1.9: Kontrol Ayar Parametreleri.

Kontrolör	Ayar Parametreleri	
PID	K_p	10.3
	K_i	1.2
	K_D	0.7
SMC	??	0.8
	q	0.25

Yapılan bu çalışmanın sonucunda Ruth ve arkadaşları, antagonistik ŞHA kullanımında histeresiz boşluğunun ŞHA telleri arasındaki ön gerilme ile önemli ölçüde azaldığını,

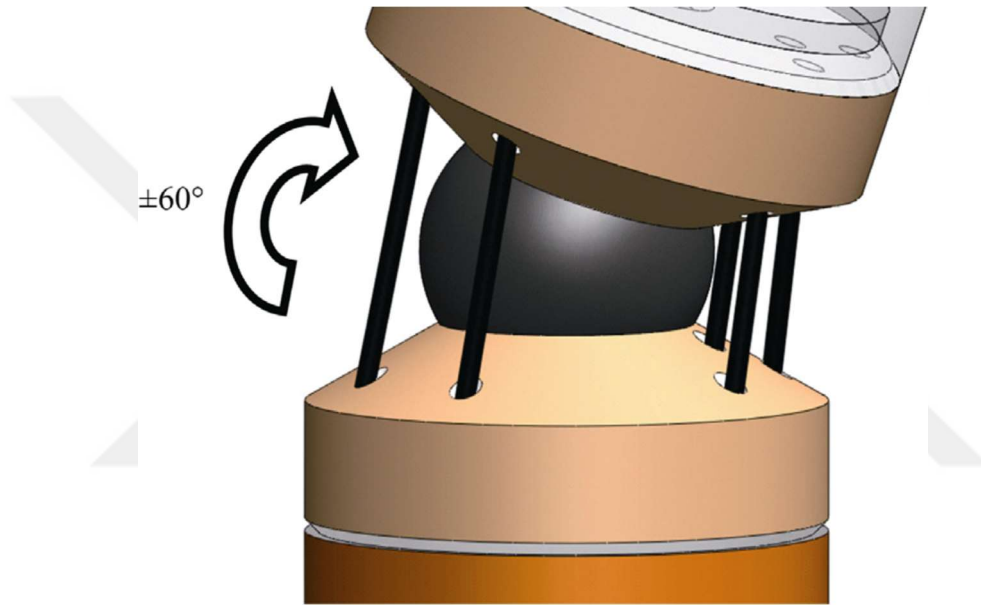
Kendiliğinden algılama izlemenin 2 Hz'lik çalışma bant genişliğinde ihmal edilebilir histerezis ile iyi kontrol özellikleri sağladığı, devre tasarımının uygun ön gerilimle birlikte kullanıldığında, ŞHA tellerinin konfigürasyonuna veya boyutuna bakılmaksızın sistemden bağımsız olduğu, toplam ağırlığı 1 gr'dan az olan ŞHA teller, kontrol işlemi sırasında yaklaşık ağırlığı 200 gramı bulan manipülatörü kontrol ve stabilize ettiğini oysa buna karşın aynı ufak seviyedeki geleneksel bir motorun bu işlem için gerekli tork miktarını sağlayamayacaklarını bildirmişlerdir[28].

Zhenyum ve arkadaşları antagonistik çoklu ŞHA tellere sahip bir eyleyici için bulanık mantık PID kontrol mimarisi üzerine çalışmışlardır. Her ŞHA iki telin histeresiz yollarının polinom fonksiyonları kullanılarak modellendiği ve aşırı stresin azaltılması ve yanıt verme hızının arttırılması için bulanık bir PID denetleyicisi kullanıldığı sensörsüz ŞHA servo kontrol yaklaşımı önermişlerdir. S-R histeresiz eğrilerini ve tüm ŞHA tellerin iç kuvvetini incelemek için 8 mm çapında 2 serbestlik derecesine sahip üç yük hücresi ile kombine edilmiş bir deneysel kurgu hazırlanmıştır. Ortada bir uç elemanı ve eyleyicin alt bölgesine iç kuvvetleri gerçek zamanlı olarak doğrulayacak üç adet simetrik yük hücresi yerleştirilmiştir. 470 mm uzunluğunda, 0.381 mm çapında ticari ismi Flexinol olan düşük sıcaklık geçişli NiTi bazlı üç çift V-şekilli açılı ayarlandığında sürtünmenin test sonuçlarını etkilemesini önlemek için eksen üzerinden yük hücrelerine bağlanmış olan tel eyleyicinin içine monte edilmiştir. Şekil 1.99'da görülen elektrik devresi sisteme eklenmiştir.



Şekil 1.99: Elektriksel devre kartı.

Burada; 18 bit çözünürlüğe sahip PCI-6284, NI +/-10 V tam ölçekli bir multifonksiyonel data kartı, dijital bir çıkış vasıtasıyla dış dirençteki voltajı (V_R) ölçmek ve analog bir giriş ile ŞHA tellerdeki gerçek voltajı (V_{sma}) ölçmek için DGM denen darbe genişlik modülasyon sinyali kullanılmıştır. Ayrıca Darlington sürücüsü, ŞHA eyleyicisinin ısıtma veya soğutma durumunu kontrol etmek için bir anahtarlama elemanı olarak kullanılmıştır. ŞHA eyleyiciye bağlı dış bir direnç (R_0) ŞHA tellerin direnç değerlerini ölçmek amacıyla standart bir direnç olarak kullanılmıştır. Bir sistemi kompakt bir hacim ile her yönde yönlendirmek için Şekil 1.100'de gösterildiği gibi bir bilyeli bağlantı, ilginç bir çözüm olmuştur.



Şekil 1.100: Bilyeli bağlantılı eyleyici sistem.

Eklem mimarisi iki diskten ve bir küreden oluşmaktadır. Dört ŞHA tel (top-mafsal bağlantısı için üç ve kavrama için bir tane), itici gücü tedarik edecek şekilde iki diskin deliklerinden geçerek şekilde yerleştirilmiştir. Ön gerilimi korumak için, tellerin ucuna bir vida ünitesi yerleştirilerek ŞHA tellerine ön gerilme sağlanmıştır. Üçlü tellerin S-R histeresiz eğrilerine ve gerçek zamanlı iç kuvvetlere odaklanıldığında; bilyeli eklem açılma değişimini ölçen binoküler kamera kullanılarak bir kinematik model ile teller için üç set S-R veri elde edilmiştir. Önceki çalışmalarından bildikleri üzere uygun ön gerilme kuvveti ile ısıtma ve soğutma yollarının neredeyse çakışmaktadır. Dolayısıyla geribildirim kontrolünü uygulamak için bir polinom modeli oluşturmak basittir. ŞHA tel eyleyicinin antagonistik çiftleri içinde, yeterli ön gerilme teller arasında yeterli iç gerilimi de sağlayabilir ve aynı prensiple histerezis boşluğunu

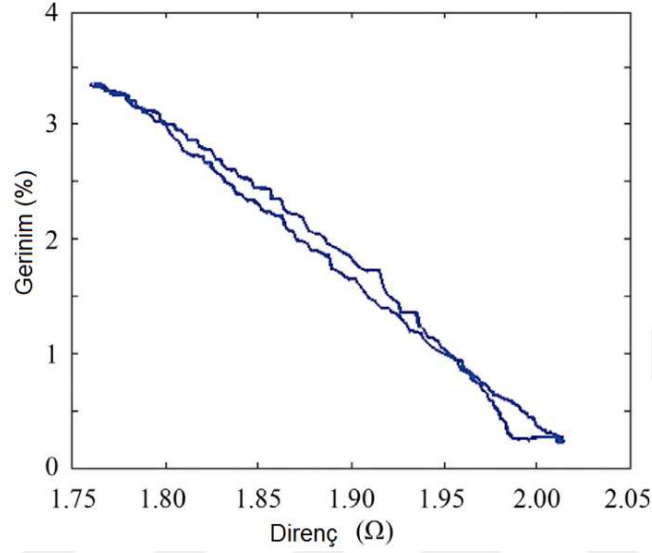
en aza indirgemektedir. Bu sonuçlar ışığında, öncelikle giriş aralığı ve bilye açıları tellerin iki disk arasındaki mesafesinin hedef değerine dönüştürülmüştür. Binoküler kamera veri toplama kartı, bitiş efektörünün gerçek zamanlı döndürme verilerini toplar ve Denklem 31 ve 32 ile üç telin şekil değiştirme değerine dönüştürülür.

$$T_i = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \alpha & \sin \alpha \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \cos \alpha & -\sin \beta \cos \alpha \\ \sin \alpha \cos \alpha \cos \beta - \sin \alpha \cos \alpha & \sin \alpha \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \cos \alpha & -\sin \alpha \sin \beta \\ \sin \beta \cos \alpha & \sin \alpha \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \quad \text{Denklem 31}$$

$$\Delta S_A = |A_i T_i - A_0| \quad \text{Denklem 32}$$

Burada; T_i evrensel dönen homojen dönüşüm matrisi, α üst diskin istenen yönünü tanımlarken a ile X eksenini arasındaki açılar yönünü ($\pm 180^\circ$), β Z eksenini yönünü ($\pm 60^\circ$), A_i kontrol noktası, A_0 kararlı nokta, ΔS_A tellerdeki deformasyon değişimini temsil etmektedir. Direnç geri besleme modülü kurulmadan önce, kapalı çevrim kontrolü elde etmek için görsel geribildirim kullanılmıştır. DGM tahrik sinyali final diske bağlı üç teli harekete geçirir, hedef harekete bağlı olarak devrenin sürülmesi için azami iki tel gereklidir. Üç yük hücresi güç bilgilerini toplamaktadır. Devre sürülmeden önce besleme voltajı 12 V ve ön gerilme % 5 uygulanmıştır. Böylece, yeterli ön gerilme ile ŞHA tellerin ısıtma ve soğutma yolları arasındaki histeresiz boşluğu en aza indirilmektedir. Gerçekte üç telli eyleyici ile yapılan uygulamada, aşırı gerilme esnasında gerilme pozisyonunun ortasında çok daha geniş bir boşluk görülmüştür. ŞHA tellerin iç kuvveti iki kaynaktan gelir: birincisi sürücü ve pasif teller arasındaki antagonistik kuvvet, ikincisi farklı pozisyonlara göre değişebilen disk ve bilye eklemi arasındaki sürtünme kuvvetidir. Histeresiz boşluğunu en aza indirgemek için basit bir yöntem, sürücü ve pasif teller arasındaki antagonistik kuvveti azaltmak için ısıtma hızını düşürmektir. Sonuçta basınca bağlı sürtünme kuvvetini düşmektedir. Stabilize iç kuvvet çok az değişse de, maksimum iç kuvvet önemli ölçüde düşmektedir ve ŞHA telinin rotasyon sırasında stresin kolayca üstesinden gelebileceğini göstermektedir. Aşırı gerilme, ısıtma hızında bir azalma ile basitçe çözülebilir olsa da, bu durumda yanıt frekansı kısıtlanmaktadır. Bulanık mantık kontrolü aynı anda frekansı ve iç kuvveti optimize eder. Bulanık denetleyiciyi kullanarak, döngü yanıt hızı daha hızlı bir hale gelebilir ve aşırı gerilim üst kısımlara doğru sınırlanır. Ancak bulanık mantık denetimi ile doğruluğu sağlamak normalde zordur bir sistem gereksinimi gereklidir. Bununla birlikte bulanık bir PID denetimi, esnek ve uyarlanabilir bulanık mantığı koruyabilir ve PID modülleri ile doğruluğunu sağlar. Bulanık PID denetleyicisini oluşturmadan önce, kapalı döngüsel bir kontrol oluşturmanın gerekli bir bileşeni, elektrik direnci değerini ŞHA

tellerin deformasyon değişimine dönüştürmek için bir S-R histerezis modelinin oluşturulmasıdır. Zheyun ve arkadaşları polinomların katsayılarını elde etmek için MATLAB "polifit" fonksiyonu kullanmışlardır. Testler, altıncı sıra polinomlarının yeterli doğruluğa sahip olduğunu doğrulamıştır. Şekil 1.101'deki S-R eğrisini tanımlamak için iki altıncı polinom uydurma fonksiyonu kullanılmıştır.



Şekil 1.101: S-R eğrisi (azaltılmış iç stres altında).

$$R_h(S) = 0.0027S^6 + 0.0273S^5 - 0.1075S^4 + 0.2049S^3 - 0.1915S^2 - 0.0015S + 2.0207$$

Denklem 33

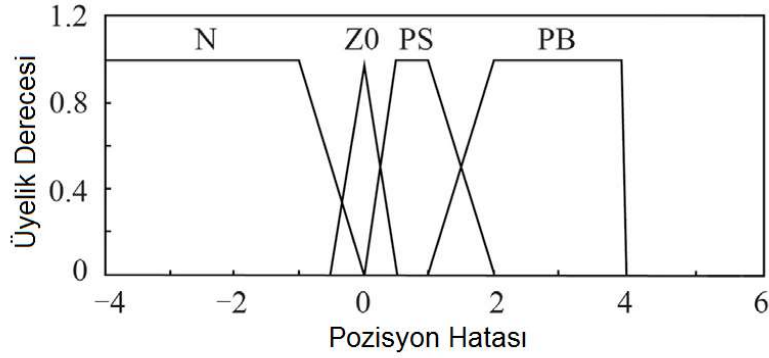
$$R_c(S) = 0.003S^6 - 0.0054S^5 + 0.0319S^4 - 0.0877S^3 + 0.1088S^2 - 0.1106S + 2.0154$$

Denklem 34

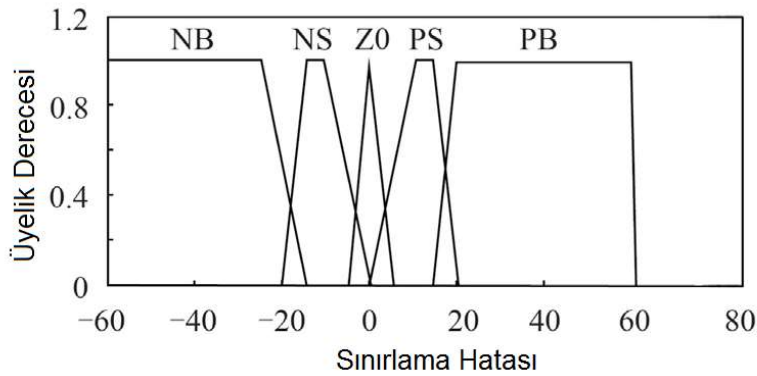
Burada R_c ve R_h , ŞHA tellerinin direncini ve ısıtma ve soğutma eğrilerini gösteren alt simgeler ise "h" ve "c" dir.

Kontrol aşamasında ŞHA eyleyiciyi bir kara kutu olarak düşünülürse, giriş tellere uygulanan elektrik gücü, çıkış ise eklemdeki duruş ve her bir telde üretilen güçtür. Toplam güç kaynakları $V_{şba} \times I_{şba} \times D_r$ 'nın üretimi olarak temsil edilebilir. $I_{şba}$, ŞHA telden geçen elektrik akımı, D_r (Duty Ratio) ısının çalışma oranıdır. Dağıtılmış güç, malzeme özelliklerine (özellik ısı) ve çevresel koşullara (sıcaklık ve konveksiyonel ısı transferinin katsayısı) bağlıdır ve tipik olarak aşırı ısınma koşullarını ortadan kaldırmak için ileri besleme kompansatörünü oluşturmak için kullanılır. Ruth ve arkadaşları, ŞHA telleri tarafından üretilen kuvveti, yük hücreleri tarafından ölçmüşlerdir, bu durum eklemdeki duruş pozisyonuna göre değişkenlik göstermektedir ve aşırı gerilimden kaçınmak için bulanık mantıktan faydalanmışlardır. Denetleyicinin giriş değeri

istenilen gerginliktir (ε), kendinden-algılama ünitesi çıkış değeri ise eşdeğer gerinim (ε^*) haline dönüştürülen eşdeğer direnç değeridir. İki gerinim değeri arasındaki fark, daha sonra oransal kazanç (K_p) ile çarpılan konumlandırma hatasıdır $e(n)$. İntegrali K_i integrali kazancı ile çarpılır, türevi, türev kazanımı K_d yolu ile yükseltilir. Bu sinyallerin toplamı, elektrikli ısıtmayı sağlamak için DGM tarafından işlenen komut görev oranı sinyali D_{out} 'tur. Belirli eksenel pozisyonlarda sürtünme kuvveti azaltılırken, sınırlama hatası, $f(n)$, eşdeğer gerginlik ile önceden belirlenmiş bir sabit gerilme değeri karşılaştırılarak elde edilir. Her iki hata PID bulanık mantık denetleyicisi ile kontrol edilmiştir. Konum hatası ve sınırlama hatası değişkenleri için bir bulanık kontrol belirlenmiş ve dilsel değişkenler kullanılarak 4 ile 5 seviyeye ayrılmışlardır. Negatif büyük (NB), negatif küçük (NS), sıfır (Z0), pozitif küçük (PS), pozitif büyük (PB) olarak adlandırılmıştır. Konum hatasının negatif değişkeni P'ye entegre edilmiştir. Bulanık alt sistem, PID denetleyicisinin K_p , K_i ve K_d parametrelerini kalibre etmek için kullanılmıştır. K_p iç değişkeni dört farklı dil değişkeniyle tanımlanmıştır: sıfır (Z0), düşük (L), orta (M) ve yüksek (H), oysa K_i ve K_d 'yi tanımlamak için M'den başka üç değişken yeterlidir. Şekil 1.102 (a), pozisyon hatası değişkeni için üyelik fonksiyonlarını göstermektedir.



a) Pozisyon-Hata değişkenleri



b) Sınırlama-Hata değişkenleri

Şekil 1.102: a) Pozisyon-Hata değişkenleri, b) Sınırlama-Hata değişkenleri üyelik değerleri.

Eyleyicinin hareketi tellerin orijinal boyutunun %4'ü olduğundan mutlak değer maksimum hatası dördttür. Hesaplama maliyetlerini azaltmak için üçgen ve trapez üyelik fonksiyonları seçilmiştir. Şekil 1.102' b) sınırlama –hata değişkenlerinin üyelik fonksiyonlarını göstermektedir. Üyelik fonksiyon aralığı her bir telin dikey ekseninde dönüş aralığı olan -60° dan $+60^\circ$ seçilmiştir. Şekil 102 üç çıkış değişkenlerinin üyelik fonksiyonlarını göstermektedir. Burada K_p için üç üçgen ve bir tane trapoid (yamuk)'ten oluşan üyelik fonksiyonu vardır ve hiçbir kesişme noktası yoktur. Benzer şekilde K_i için ise iki üçgen ve bir yamuk üyelik fonksiyonu vardır. Negatif (N) konum hatası, eyleyicinin istenilen gerinimi aştığını, tellerin soğutma hızının ekstra soğutma üniteleri olmaksızın çok sınırlı olduğu göz önüne alındığında uygulanan görev oranının sıfıra indirildiğinde daha iyi olacağını ifade etmektedir. PB konum hatasıyla, yanıt frekansını hızlandırmak için yüksek oranlı kazanç gerektiği anlaşılmaktadır. Kararlılığı sürdürebilmek için pozisyon hatası sıfıra indirildiğinde integral kazanımını arttırmak gereklidir. Türevsel kazanç titreşimlerden kaçınmak için ve çeşitli hatalarda yanıt verme frekansını geliştirmek amacıyla çok dikkatli seçilmelidir. Bundan başka sınırlama hatasının mutlak değeri, yüksek sürtünme noktası ile eşdeğer pozisyon arasındaki mesafeyi belirtir. Konuma yaklaştıkça ısıtma frekansı düşmektedir. Bu nitel gözlemler, Tablo 1.10'de gösterilen çıkarım kural setinin temellerini oluşturmaktadır.

Tablo 1.10: Bulanık PID kontrol kural seti.

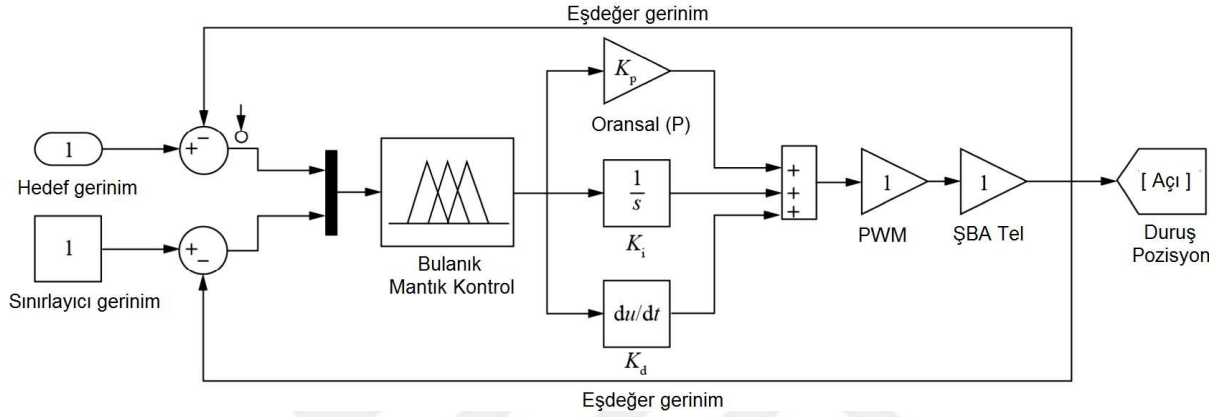
Pozisyon Hatası: e	K_{PID}				
	$f = NB$	$f = NS$	$f = ZO$	$f = PS$	$f = PB$
PB	PB ZO PS	PB ZO PS	PM ZO PB	PB ZO PS	PB ZO PS
PS	PM PS PS	PM PS PS	PM PB PB	PM PS PS	PM PS PS
ZO	PM PB ZO	PM PB ZO	PM PB PS	PM PB ZO	PM PB ZO
N	ZO ZO ZO	ZO ZO ZO	ZO ZO ZO	ZO ZO ZO	ZO ZO ZO

Geribildirim sinyalini elde etmek için Denklem 33, 34 'ün polinom modelini kullandıktan sonra, bulanık PID kontrolü takip işlemini gerçekleştiren DGM sinyalinin görev döngüsü D_{out} 'u üretmek için kullanılmıştır. Uygun görev döngüsünün ifadesi;

$$D(n) = K_p e(n) + K_i \{t_i [e(n) - e(n-1)] + S(n-1)\} + K_d [e(n) - e(n-1)] \quad \text{Denklem 35}$$

Burada, t_i örnekleme zamanıdır. PID denetleyicisinin parametreleri (K_p , K_i ve K_d) bulanık

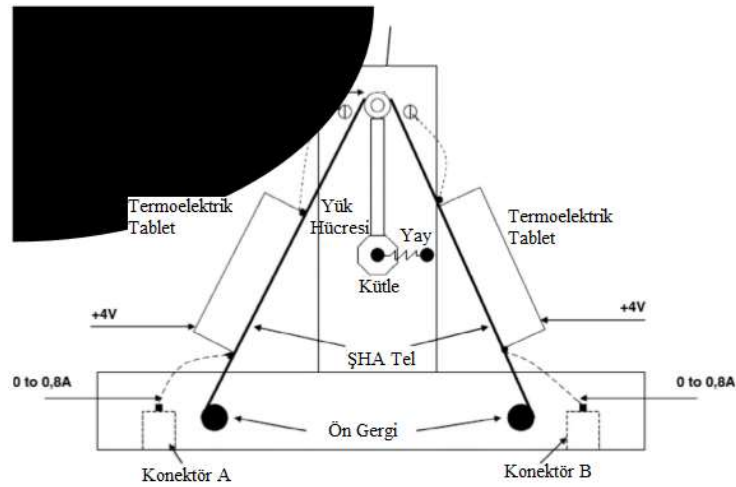
mantık kurallarıyla otomatik olarak ayarlanmıştır. Bulanık bilgi metodunun $e(n)$ ve $f(n)$ değerlerini tespit etmekte kullanılması uygundur. Üç telin simetrik durumunu göz önünde bulundurularak, her üçünde de aynı PID parametreleri kullanılmıştır. Kontrol esnasında üç tel grubuna üç ayrı DGM sinyal gurubu uygulanmıştır. Şekil 1.103’de çalışmalarında kullandıkları PID kontrol diyagramı gösterilmektedir. Doğru kontrol için adımsal cevaplar kullanılmıştır ve yapılan çalışmada bulanık mantık PID kontrol deneysel çalışmaları dönme açısının ortalama mutlak hatasının 3.147° olduğunu göstermiştir[28].



Şekil 1.103: Bulanık PID Kontrol Blok Diyagramı.

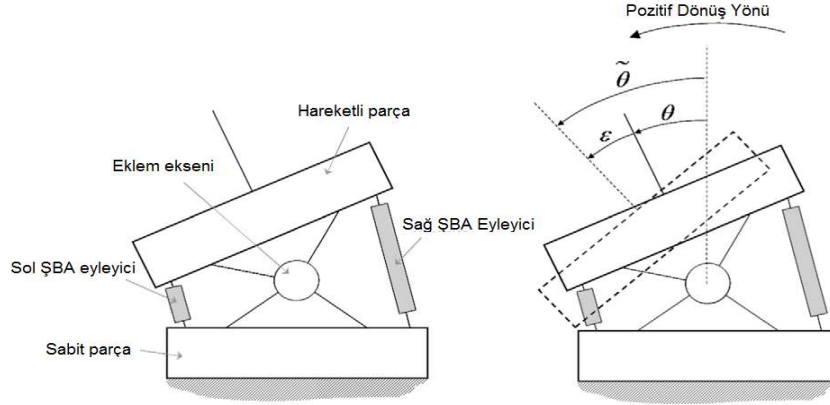
Birçok araştırmacı pozisyon kontrol şematikleri üzerine yoğunlaşırken diğer önemli bir konu ise kuvvet izleme kontrol sistemleridir. Örneğin bir robotik kavramada tutulan objeye hasar vermeden yeterince kuvvet uygulamak önemlidir çünkü av kuvvet uygulanırsa kavrama işi gerçekleşmeyecektir. Hafif ve sessiz eyleyiciler olarak, ŞHA'lar olağan pnömatik veya hidrolik açık çevrimli sistemlerin mekanik sorunlarını ortadan kaldıran bu görev için çok uygundur. Bu konuda H_∞ kontrol kullanılarak 0.48Hz’lik bir bant genişliğinde başarılı robotik kavramalarda iyi bir güç kontrolü elde edilmiştir. Fakat benzer sonuçlar sistemin yüksek derecede doğrusal olmayışı ihmal edilerek PID denetleyicilerin sağlamlığına güvenilerek sabit PID denetleyicileri kullanılarak da elde edilmiştir. Sonuçta, bu tür uygulamalarda geribildirim doğrusallaştırma metodu ile ilişkili bir PID denetleyicisi ve kayma kip modülasyonu kullanılmıştır. Fakat pek çok araştırmacı kullandıkları basit kontrol sistemlerinde ya ŞHA’ nın doğrusal olmayan davranışlarını hesaba katmamışlardır (sadece sistemin sağlamlığına ve yüksek kazançla güvenmişlerdir) ya da ŞHA’nın sıcaklık ölçümlerini kullanmışlardır. ŞHA tel kullanımlarında olduğu gibi sıcaklık ölçümlerini kullanmak geometrik sınırlamalardan her zaman mümkün değildir. Alternatif olarak doğrusal olmayan gözlemciler bu bilgileri tahmin etmek için ve sistemin performansını arttırmak için kullanılabilir. Ianagui ve Tannuri çalışmalarında Peltier

efekti ile soğutulmuş, antagonistik şekil bellekli alaşımlı bir eyleyicinin tam doğrusal olmayan bir modelini sunmuş ve doğrulamışlardır. Yukarıda sözü edilen birçok çalışmadan farklı olarak kayma değişkenlerinin doğrusal olmayan dinamiklerini iptal eden eş kontrol terimlerinin kontrol yasalarına eklendiği tam bir şekil bellek dönüşüm modelini hesaba katmışlardır. Modelleme, iki adımlı optimizasyon tanımlama yöntemlerini kullanarak hem düşük hem de yüksek frekans tepkisini hesaba katmaya çalışmıştır. Önerdikleri tork ve konum kaydırma mod kontrol sisteminde, doğrusal olmayan bir gözlemci uygulanarak sıcaklık ve faz dönüşüm oranı gibi hesaplanması zor olan değişkenleri tahmin etmek için bir model geliştirmişlerdir. Çalışmalarında Şekil 1.104’de gösterilen mekanizmaya tork geribildirimlerini elde edebilmek için 3N kapasiteli ve 1 mV/V hassasiyetinde bir yük hücresi (HBM 1-PW4C3/300G–1) ilave etmişlerdir. Eyleyici olarak 0.2 mm çapında Flexinol tel 5.6 N ve 0.8 A kullanmışlardır. Yük hücresini ve makine yapısını birleştiren, harici bir yükü uygulamak için 0.37 Nm/rad’lık bir yay kullanılmıştır. Yük hücresinden gelen sinyaller ADAM-3016, Advantech yalıtılmış bir yükseltici modül boyunca koşullandırılmıştır. ŞBA teli uyarmak için akım yükseltici kullanılmıştır. Bu yükseltici -4 V ile +4 V arasında değişen voltaj girişlerine sahip diferansiyel bir karşılaştırıcı içermektedir ve her tele 0 ile 0.8 A arasında akım uygulayabilecek akım aralığına sahiptir. Akım sinyal polaritesine göre doğrusal olarak dağıtılmaktadır. Dijital sinyal toplama ve analog/dijital çevrim için Advantech USB modülü kullanmışlardır. Bilgisayar arabirimini Matlab Simulink ile oluşturmuşlardır. Gerçek zamanlı kontrol ve örneklemeye gerçekleştirmek için Gerçek Zamanlı Engelleme Seti kullanmışlardır[6]. Genel sonuçlar, ŞHA kontrol tasarımı için önerilen tekniğin izleme ve frekans tepkisinde iyileştirmeler gösterebileceğini göstermiştir.



Şekil 1.104: Kuvvet algılamalı antagonistik ŞHA aktüatörü.

De Sars ve arkadaşları önceki bölümde tasarımı hakkında bilgi verilen çok yönlü serbestlik derecesine sahip endoskoplarını kontrol etmek için antagonistik konfigürasyonda iki ŞHA elemanı tarafından oluşturulan her türlü eyleyicinin pozisyon kontrolü için uygun birinci dereceden kayma mod kontrolü (SMC-Sliding Mode Control) önermişlerdir. Modelleme için Şekil 1.105’de görülen notasyonlar kullanılmıştır.

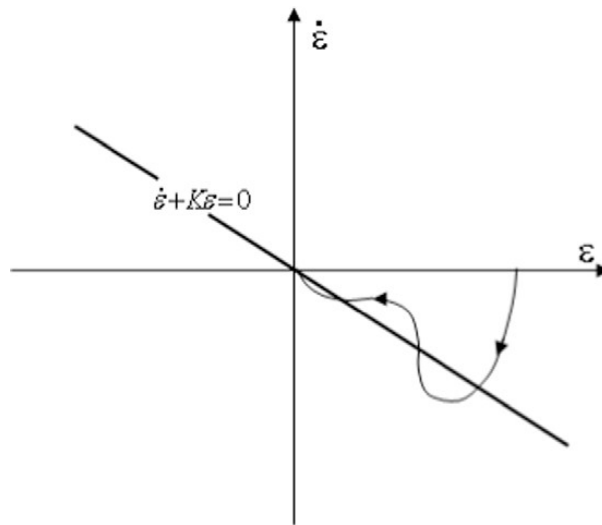


Şekil 1.105: Eyleyici Eklemleri.

Burada; θ gerçek eklem açısı, $\tilde{\theta}$ istenilen eklem açısı, $\varepsilon = \theta - \tilde{\theta}$ eklem hata açısı, $\varepsilon^* = d/dt (\theta - \tilde{\theta})$ eklem açısal hız hatasıdır. Bir kayma eğrisi eşitliği şu şekilde tanımlanabilir; $S(\varepsilon, \varepsilon^*) = 0$, $S(\varepsilon, \varepsilon^*) = \varepsilon^* + K\varepsilon$, K kesinlikle pozitif bir gerçek değerdir. Şekil 1.106 'de gösterildiği gibi eklem açısı hatası ε , ε karşı ε^* düzlemindeki sistem yörüngesi bu kayma hattına yakın olduğu için sıfıra eğilim göstermektedir. İdeal olarak aşağıdaki gibi yazılabilecektir.

$$S(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = \dot{\varepsilon} + K\varepsilon = 0, \quad \forall t \Rightarrow \varepsilon(t) \propto e^{-Kt} \Rightarrow \varepsilon(t) \xrightarrow{t \rightarrow 0} 0$$

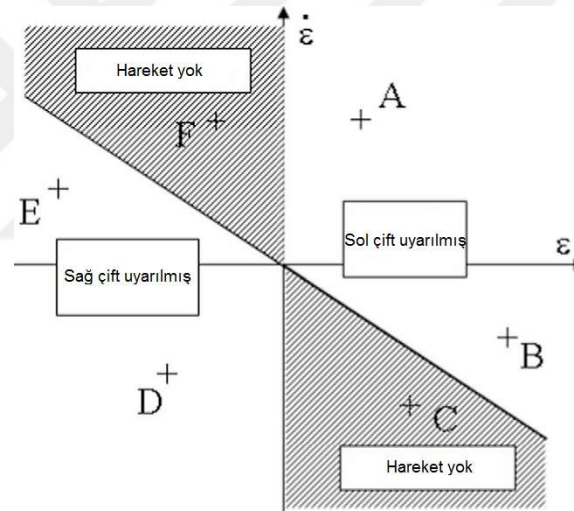
Denklem 36



Şekil 1.106: Kayma mod kontrolü: beklenen eğri.

Buna ek olarak, sistem eğrisini kayma hattına yakınsamaya zorlamak için aşağıdaki kontrol kuralları (Şekil 1.107) uygulanmıştır.

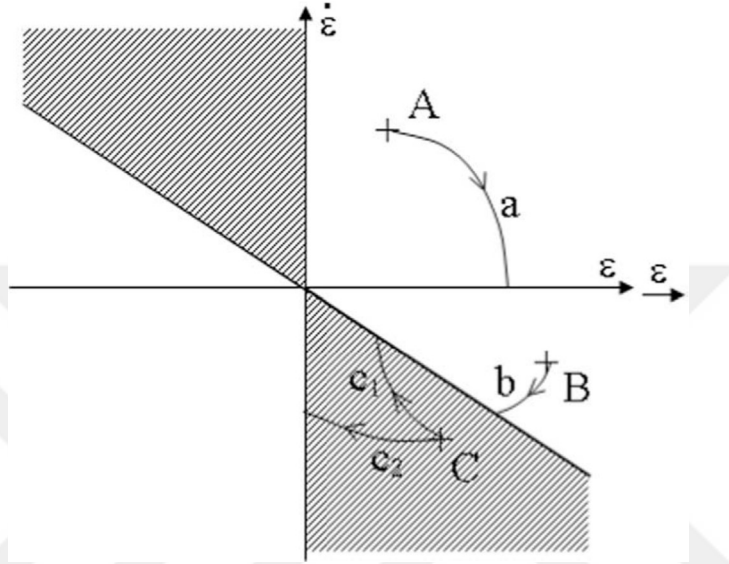
1. Eğer $\varepsilon > 0$ ve $\varepsilon^* > 0$ ise sol ŞHA ısıtılır (Şekil 1.107, A noktası).
2. Eğer $\varepsilon > 0$ ve $\varepsilon^* < 0$ ise
 - a) Eğer $S(\varepsilon, \varepsilon^*) > 0$ ise sol ŞHA ısıtılır (Şekil 1.107, B noktası).
 - b) Eğer $S(\varepsilon, \varepsilon^*) < 0$ ise hiçbirisi (Şekil 1.107, C noktası).
3. Eğer $\varepsilon < 0$ ve $\varepsilon^* < 0$ ise sağ ŞHA ısıtılır (Şekil 1.107, D noktası).
4. Eğer $\varepsilon < 0$ ve $\varepsilon^* > 0$ ise
 - a) Eğer $S(\varepsilon, \varepsilon^*) < 0$ ise sağ ŞHA ısıtılır (Şekil 1.107, E noktası).
 - b) Eğer $S(\varepsilon, \varepsilon^*) > 0$ ise hiçbirisi (Şekil 1.107, C noktası).



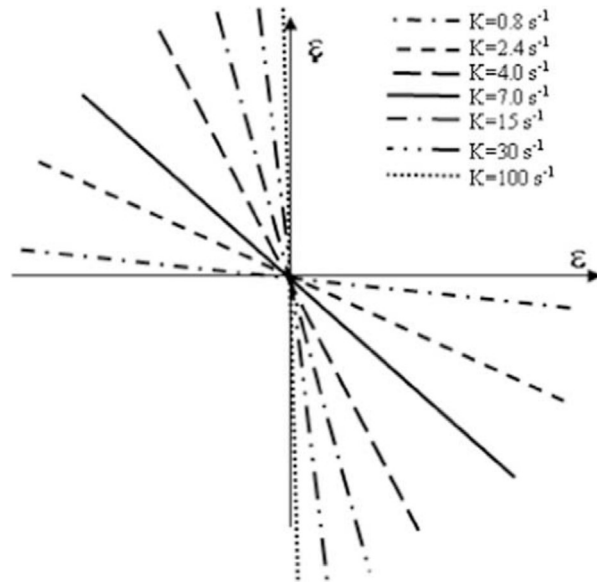
Şekil 1.107: Kayma Mod Kontrolü: ŞHA hareket stratejisi.

A ve B noktalarını içeren bölgede eklem açısı hatası pozitif olmaktadır. Böylece sol ŞHA eyleyici pozitif bir eklem torku ve aynı anda ortak bir hız üretmek üzere harekete geçirilmektedir. Bu ε^* 'ın (alan A olması durumunda) veya ε 'nin (alan B olması durumunda) azalmasını sağlamaktadır (Sırasıyla Şekil 1.108'da a ve b eğrileri). Aynı sebepten dolayı D ve E noktalarının bulunduğu alana yerleştiğinden sağ ŞHA harekete geçirilmektedir. C ve F noktalarına karşılık gelen alanda ε ve ε^* zıt işaretlere sahiptir ve ε 'nin şiddetinde bir düşüşe sebep olmaktadır. Bu alanların kayma çizgisine göre konumu, hız düşürme hatasının hedeflenen dönüşümden daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu parametre istenen eyleyici dinamikleri

ile ilgili olarak sonlu bir zamanda martenzitten ostenite dönüşümün tamamlanmasına kadar sabitlenmiştir. Kayma hattının ε ve ε^* düzlemi arasındaki eğimi K 'dir. Aşağıda bu parametrenin hız, enerji tüketimi ve iç etkiler gibi gereksinimler arasında uyumlu bir düzeltmeye izin veren deneysel metot sunulmuştur. $\theta \approx \pm 15^\circ$ den $\theta \approx \pm 70^\circ$ 'e kadar adım yer değiştirme derecelerinden $k=0.8 \text{ s}^{-1}$ 'den $k=100 \text{ s}^{-1}$ kadar yedi farklı kayma hat eğim değerlerinde çeşitli testler yapılmıştır (Şekil 1.109).



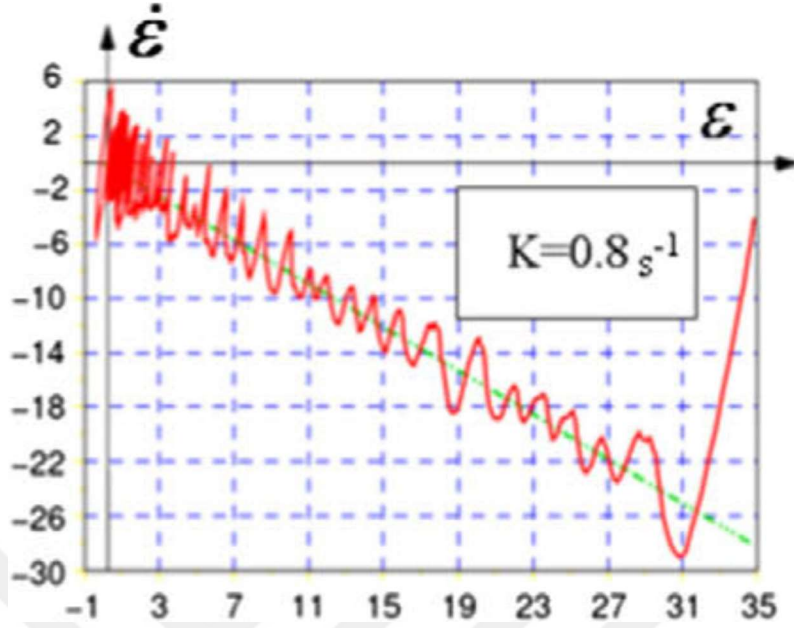
Şekil 1.108: Kayma Mod Kontrolü: Tipik eğriler.



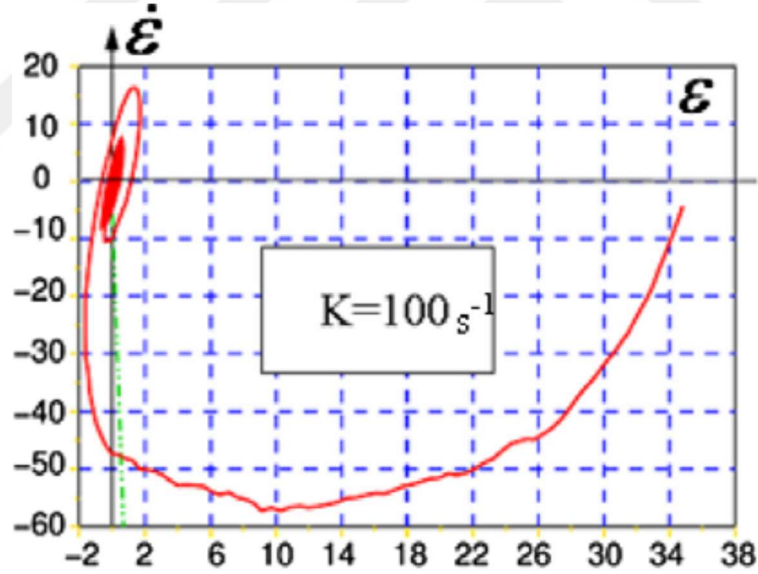
Şekil 1.109: Kayma mod kontrolü: Kayma hatları deneysel seti.

En küçük değer, $k=0.8 \text{ s}^{-1}$ Şekil 1.110'de görüldüğü gibi kayma hattı ile sık kesişen çok yavaş bir eğri izlemektedir. Aksine $k=100 \text{ s}^{-1}$ için ε ve ε^* düzlemindeki eğri hızla sıfıra yakınsanan

bir spiral şeklindedir (Şekil 1.111). Bu eğri istenen konum etrafında büyük salınımlar göstermektedir ($\varepsilon = 0$).

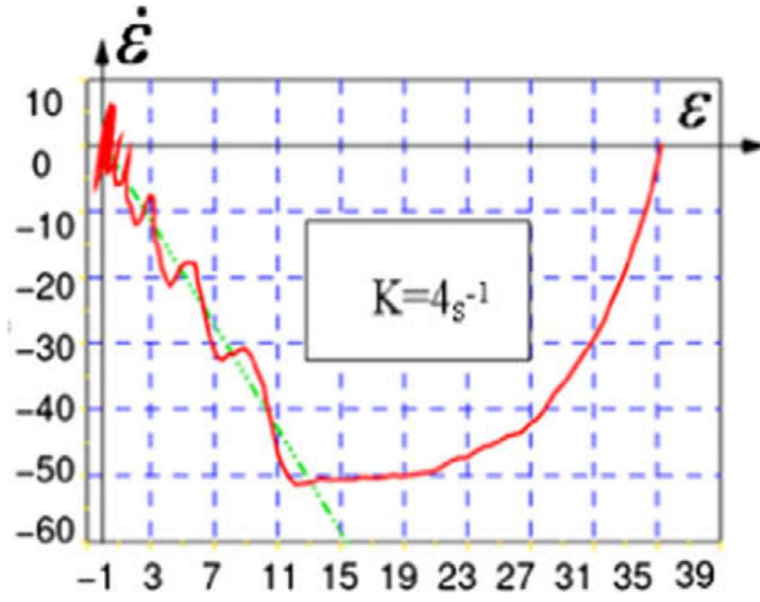


Şekil 1.110: $k=0.8 \text{ s}^{-1}$ değeri için deneysel sonuçlar.



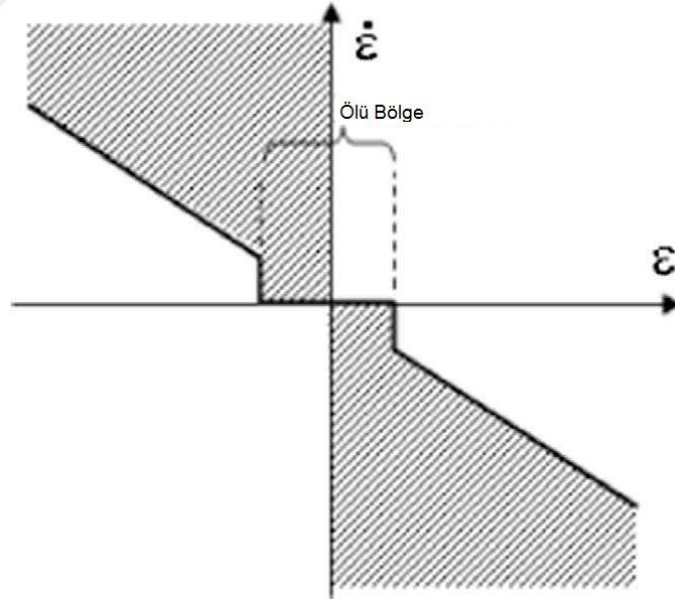
Şekil 1.111: $k=100 \text{ s}^{-1}$ değeri için deneysel sonuçlar.

Bu sonuç K 'nın çok büyük değerleri için ε ve ε^* düzlemindeki C ve F nötr alanlar neredeyse kaybolur ve pozisyon hatası ε 'nin işareti ile ilgili olarak eyleyiciyi sürekli olarak aktive eden temel iki durum denetleyicisine liderlik etmektedir. Şekil 1.112'den de görüldüğü üzere ara bir değer olan $k=100 \text{ s}^{-1}$ için sıfıra doğru yakınsama da direkt olarak gerçekleşmiştir ve ε ve ε^* arasındaki düzlemde elde edilen eğri ilginç bir şekilde sabit kayma hattının yakınındadır.



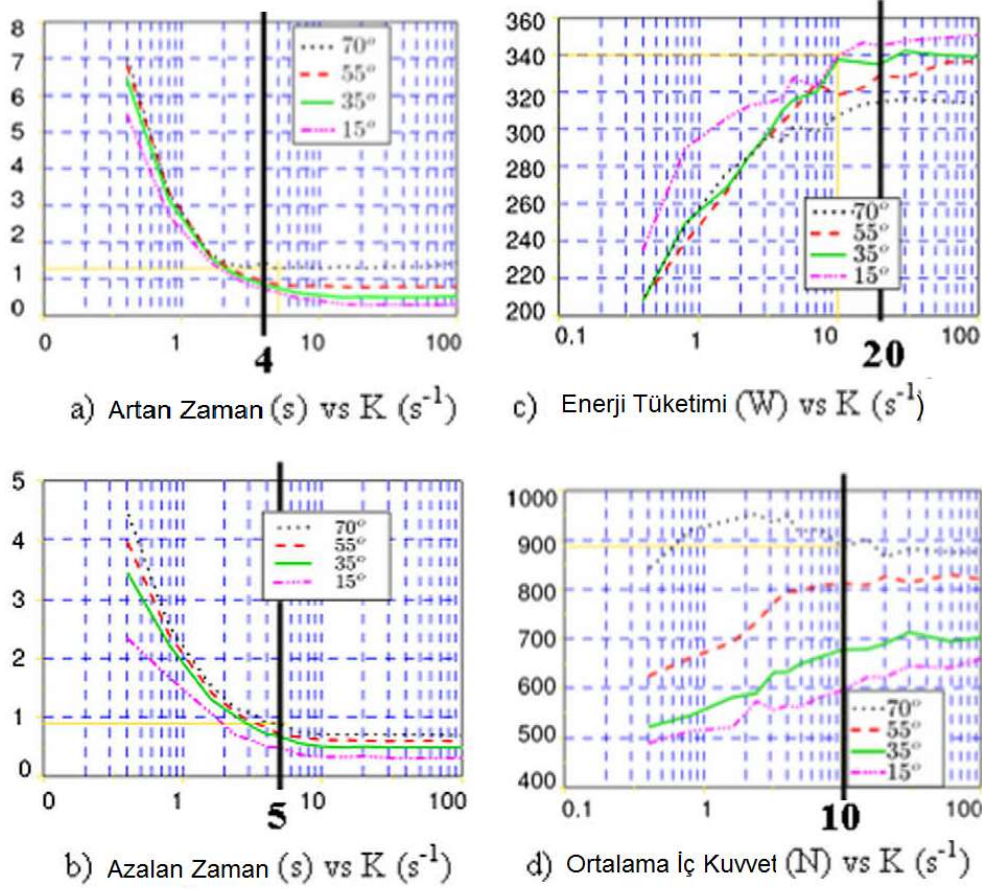
Şekil 1.112: $k=4 \text{ s}^{-1}$ değeri için deneysel sonuçlar.

K 'nın herhangi bir değeri için istenen açısal konum etrafında bir limit çevrimi görünmektedir. Bununla birlikte, büyüklüğü her zaman 1 derecenin altında kalmıştır. Bu sınır çevriminin, Şekil 1.113 'de gösterildiği gibi önerilen kontrol şemasına ölü bir bölge eklenerek neredeyse tamamen bastırılabilir. bulunmuştur.



Şekil 1.113: Ölü bölge ile ŞBA etkinleştirme stratejisi.

K parametresinin etkisi Şekil 1.114'den elde edilen ölçümlerden elde edilmiştir. Artan zamanların, düşen zamanların, enerji tüketiminin ve maksimum iç etkilerin parametre K 'ye göre gelişimi dört farklı kontrollü yer değiştirme adımıyla gösterilmiştir.

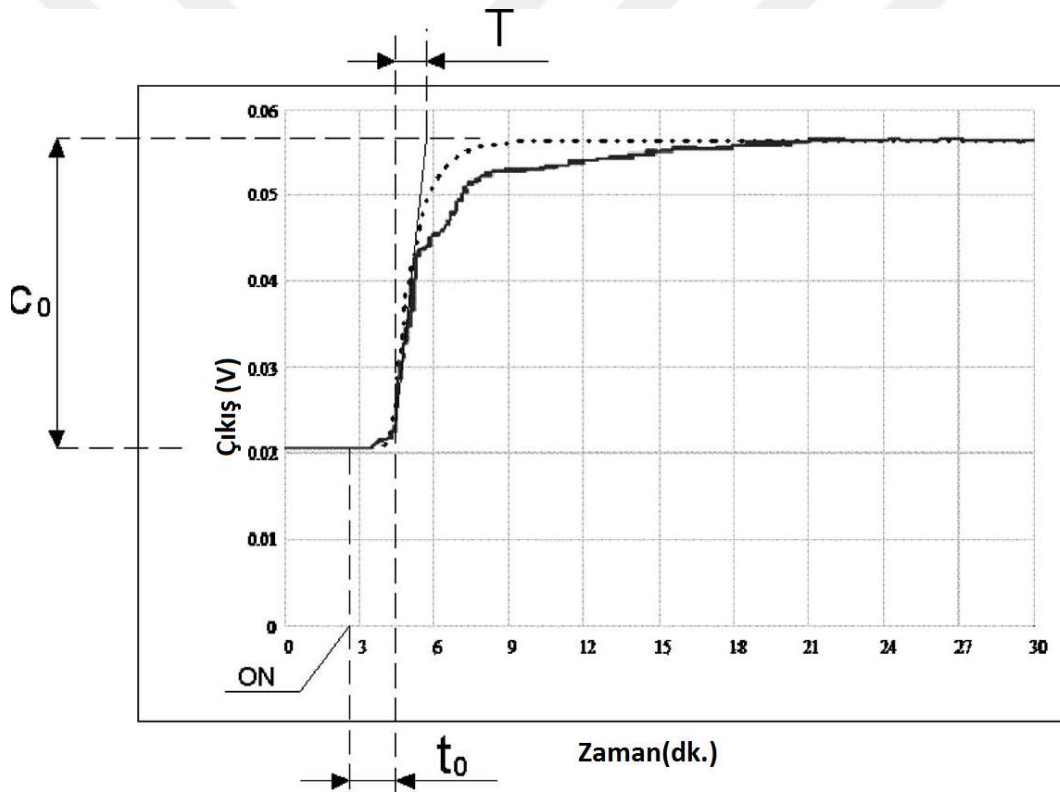


Şekil 1.114: K parametresinin etkileri.

$k=4 s^{-1}$ için artan zamanlar önemli ölçüde artar ve 1 saniyelik bir gecikmeyi hızla aşmaktadır. Azalan zamanlar için $k=5 s^{-1}$ değerinde benzer bir eşik vardır (Şekil 1.114-b). Ayrıca Şekil 1.114 c-d' görüldüğü gibi enerji tüketimi ve iç etkilerin K ile monoton olarak arttığı fark edilebilir fakat sırasıyla $k=10 s^{-1}$ ve $k=20 s^{-1}$ 'değerlerinin ilerisinde neredeyse sabit kalmıştır. Diğer taraftan yatışma sürelerine (settling time) ilişkin sonuçlar makul bir bant genişliğini sağlamak için K'nin eğiminin en az $5 s^{-1}$ 'e eşit tutulması gerektiğini göstermektedir. Öte yandan, enerji tüketimini ve indüklenen stresin en aza indirgenmesi için K eğiminin mümkün olduğunca düşük seçilmesi gerekmektedir[22].

ŞHA Eyleyiciler bölümünde mekanik yapısı hakkında detayı bilgi verilen Carroza ve arkadaşlarının "inchworm" tarzı minyatür valf tabanlı ve NiTi yay ile hareket mekanizması sağlanan cihazlarında valf kapağının oransal olarak açılması ŞHA eyleyici sıcaklığının kontrolüne ve dolayısıyla uzunluğuna bağlıdır. Eyleyiciden bir elektrik akımı geçtiğinde sıcaklık değişimlerini ölçmek amacıyla sistemde bir sıcaklık ölçer kullanılmıştır. ŞBA ile

eyleyici hareketlerin elde edildiği deneysel çalışmalar sıcaklık ile akım arasında dördüncü dereceden polimonal bir bağlantı olduğunu ortaya koymuştur. Dahası ŞHA eyleyicilerin termomekanik yasası, sıcaklığa karşı elektrik akımı ilişkisinin bulunabileceği net bir histerezis etkisini göstermektedir. Diğer taraftan histerezis aralığının kullanılan yaylara uygulanabilecek uygun tavlama sıcaklıkları ve süreleri ile düşürülebileceği literatürde bildirilmiştir[31]. Üçlü bir kontrolör (orantılı, tümlşik ve türev (PID)) uygulamak için, sistemin pnömatik bir yükle (ör. RL = 0.66 bar dak / 1) mevcut adım tepkisini analiz etmesi gerekmektedir. Tepki parametresi minivalanın içinde bulunan minyatür basınç transdüktörü (Kulite Semiconductor Model LQ-080-100A, Leonia, NJ) ile ölçülen çıkış basıncıdır (Basınç dönüştürücünün çıktısı voltur, ancak basınç sinyali ile doğrusal orantılıdır). Önerilen dinamik modele göre, mevcut adım tepkisi Şekil 1.115'de gösterildiği gibi bir birinci dereceden sistemin tipik bir tepkisidir.



Şekil 1.115: Valf adım cevabı: deneysel (düz çizgi) ve teorik (noktalı çizgi). Ziegler Nichols yönteminde deneysel eğriyi karakterize eden geometrik parametreler de gösterilmiştir: Tepki gecikme zamanı (t_0), Artan zaman (T), Genlik (C_0).

Denetleyicinin parametreleri adım tepkisinden geometrik durumlar gözetilerek türetilmektedir.

$$G'_c(s) = K'_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Denklem 37

Denklem 37 PID denetleyicisinin transfer fonksiyonudur.

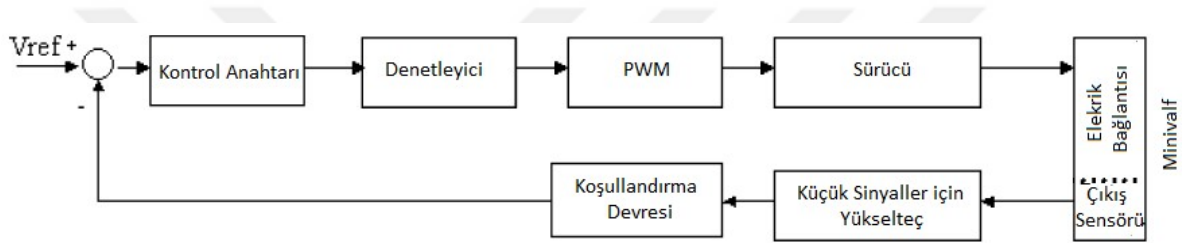
Burada;

$$K_p' = \left(\frac{M_0}{Nt_0} \right) \left(\frac{4}{3} + \frac{R}{4} \right),$$

$$T_i = t_0 \frac{32 + 6R}{13 + 8R},$$

$$T_d = t_0 \frac{4}{11 + 2R}. \quad \text{dir.}$$

Şekil 1.116'da 2 kPa hata (<% 1,5 pin) içindeki bir referans sinyaline eşit bir sistem tepkisi elde etmek için akım kaynağını değiştirmek için akım kaynağını düzenleyen eden bir kontrol döngüsü kullanılmıştır.

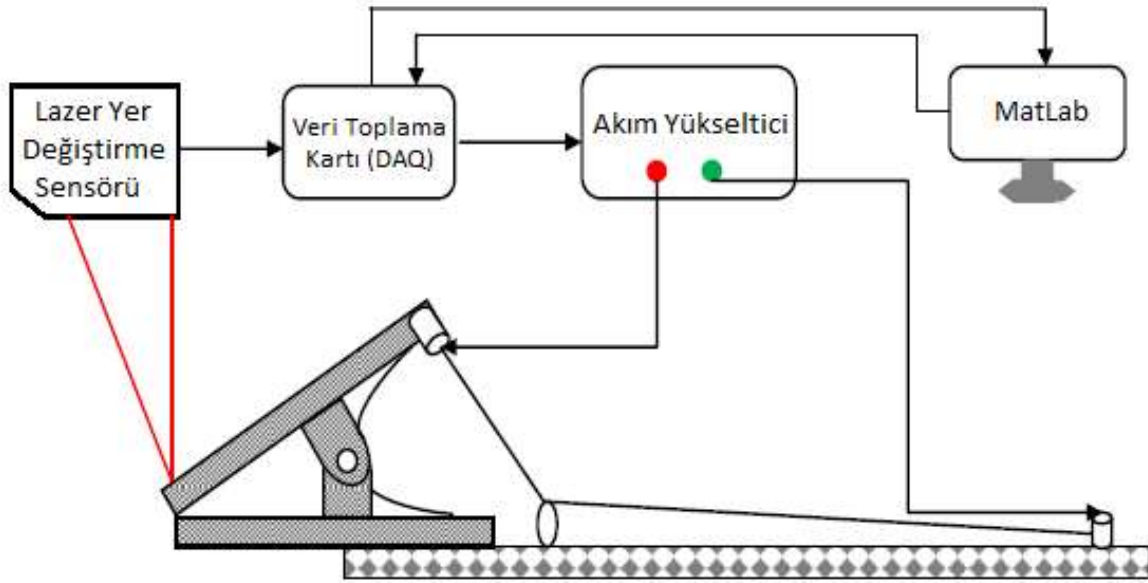


Şekil 1.116: Elektronik kontrol sistemi blok diyagramı.

Kontrol stratejisinden bağımsız olarak eyleyicinin yüksek termal kapasitesinden dolayı sistem doğal olarak yavaştır. Bununla birlikte tepki zamanı uyarlanabilir bir kontrol veya değişken bir yapı kontrolü ile azaltılabilmektedir. Bunlar; her ikisi de antagonistik olarak çalışan birincisi bir açma-kapama kontrolü ve ikincisi üçlü aksiyon kontrolünü içeren kontrol sistemidir. Açma-kapama kontrolü (kaba denetim) çıkış basıncının değeri uygulanan değere çok farklı olduğunda (± 3 kPa'dan daha fazla olduğunda) çalışmaktadır. Oysa çıkış basıncı maruz kalınan basınç değerine yakın olduğunda PID kontrolü devreye girmektedir. Denetleyicinin işlevleri bir mikro denetleyici (PIC16C73) tarafından güncellenmektedir[31].

P, PI, PID gibi doğrusal kontrolörler, özellikle kontrol uygulamalarında iyi bir konumlandırma doğruluğu sağlamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. PID basit ve etkiliyken, sistem belirsizliklerini gidermede yetersizlik gibi dezavantajlara sahiptir. Yukarıda belirtilen belirsizliklerle başa çıkmak için araştırmacıları cezbeden popüler bir kontrol stratejisi DGM dir. Genellikle ŞHA ile harekete geçirilen yapılar, eyleyici (ŞHA elemanı), eğici eleman (pasif yay / aktif-ŞHA elemanı) ve destekleyici yapı olmak üzere üç temel mekanik bileşen gerektirir. Chaitanya ve Dhanalakshmi tasarladıkları tutucunun kontrolü için açık ve kapalı döngüde

tutucu performansını test etmek için bir dizi deneysel çalışma geliştirmişlerdir. ŞHA tel tahrikli kavramanın dinamik modeli açık döngü adım cevabından elde edilmişti ve konum izleme performansları için çeşitli dinamik eğrilerini deneysel olarak değerlendirmişlerdir. Şekil 1.117’de görüldüğü üzere programlanabilir bir güç kaynağı, kavrama sistemine entegre edilmiş ŞHA tel eyleyiciyi tahrik etmek için kullanılmaktadır. Hareketli çenenin yer değiştirme yüksek hassasiyetli bir lazer yer değiştirme sensörü kullanılarak izlenmektedir. PC'ye veri aktarmak için bir Veri Toplama (DAQ) kartı kullanılmaktadır.



Şekil 1.117: Deneysel kurgunun diyagramı.

Eyleyici ŞHA tel ve bükülme yayının özellikleri sırasıyla Tablo 1.11 ve Tablo 1.12’de verilmiştir. Burada 13.5 cm, Ø 0.25 mm çapında ve 2.49 Ω dirençli ŞHA telin eyleyebilmek için 2.6 V'luk sürücü voltaj sinyali (Ohm yasası uygulandığında) gerekmektedir.

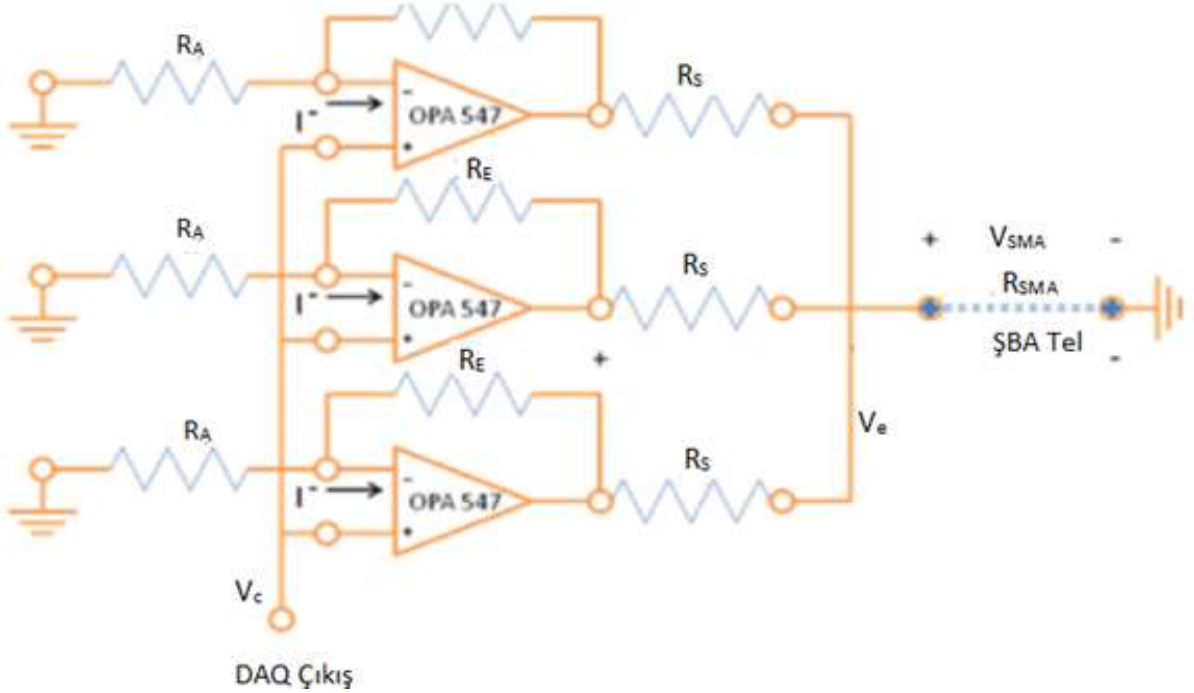
Tablo 1.11: ŞHA tel özellikleri.

Uzunluk (mm)	13.5
Çap (mm)	0.25
Direnç (Ω /mm)	18.5
Oda sıcaklığında yaklaşık olarak güvenli ısıtma akımı (A)	1.05
Maksimum çekme gücü (gr)	891

Tablo 1.12: Gergi yayının özellikleri.

Tel Çapı (mm)	0.97
Yay Çapı (mm)	4.1
Sarım sayısı (Sipir)	3
Young Modülü (GPa)	200

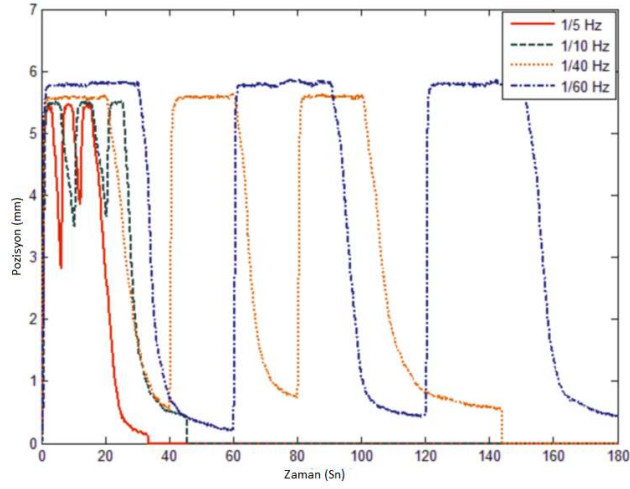
Uygulanan voltaj neticesinde tel boyunca akım geçişinin sebep olduğu joule ısıtması, sıcaklığa bağlı şekli hafıza etkisine dayalı ŞHA'nın harekete geçirilmesini sağlamaktadır. Tel boyunca akım miktarını kontrol etmek için tasarlanmış basit bir akım yükseltici devre Şekil 1.118'de gösterilmektedir. Bu bir voltaj kontrollü bir akım çıkışı devresidir.



Şekil 1.118: ŞHA tel eyleyiciyi çalıştırmak için amplifikatör devresi.

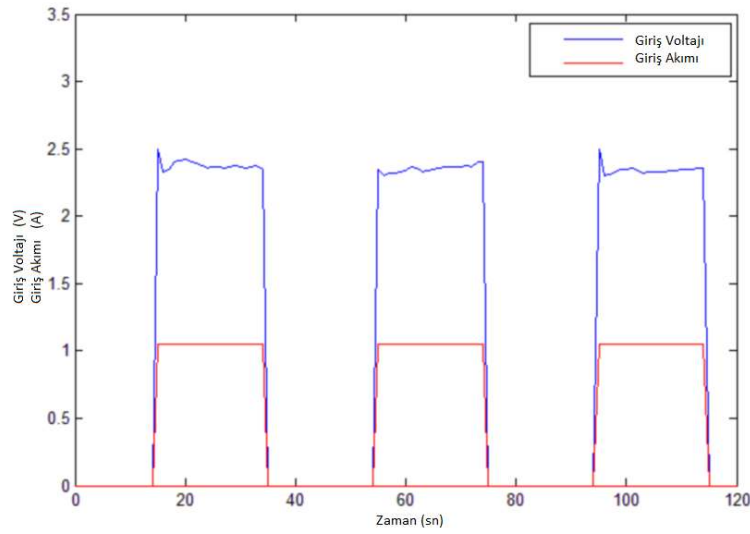
ŞHA telinden geçen akım, seri direnç (ŞHA teline bağlı) boyunca iki noktadaki gerilim değerlerinden kolayca ölçülebilmektedir. Bu analog voltaj V_s 14-bit DAQ kartına bağlıdır. Veriler ŞHA telinin durumu ile ilgili yeterli bilgileri sağlamak üzere işlenmektedir. Özellikle, ŞHA tel girişi ve elektrik direnci modelleme ve kontrol tasarımı amacı için basit devre yasaları kullanılarak ölçülebilmektedir. Açık çevrim testleri, Şekil 1.119'daki gibi etkili kontrol için ŞHA telinin davranışını ve çalışma aralığını anlamak için farklı frekanslarda kare dalga

sinyalleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1.119: Kavrama sisteminin pozisyon tepkisi.

Gözlemler 1/5 Hz sinyalinin doğru soğutma için çok hızlı olduğunu ve bunun da döngüsel işlemlerde büyük farklılıklara neden olduğunu ortaya koymuştur. 1/60 Hz eyleyici özelliklerinin daha da bozulduğu düzgün tepki vermenin üst sınırı olduğu tespit edilmiştir. 1/40 Hz'de bir kare dalga sinyali için uygulanan akım ve gerilim Şekil 1.120'de gösterilmektedir.

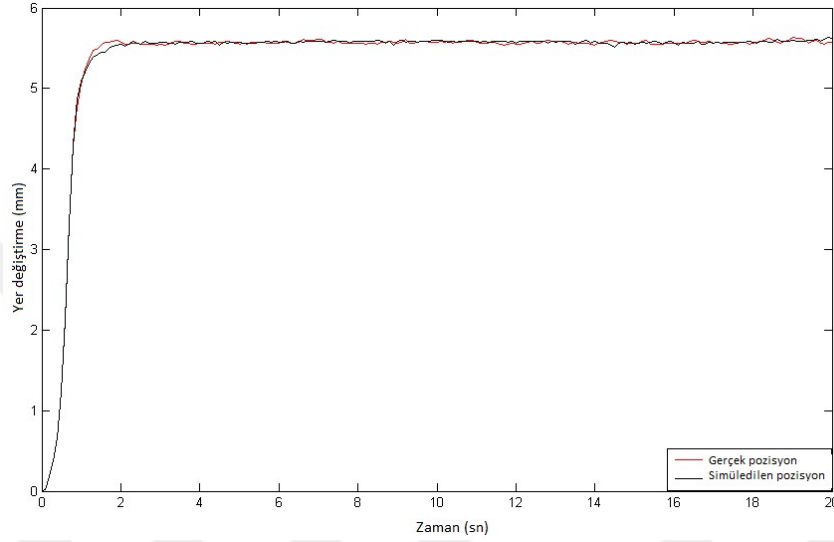


Şekil 1.120: ŞHA eyleyiciye uygulanan akım ve gerilim sinyalleri.

1.05 A'lık sabit akım için, besleme voltajının otomatik olarak 2.5 ila 2.33 V arasındaki değer aralığına ayarlandığı gözlenmiştir. Bu martensitten ostenite faz dönüşümünden dolayı ŞHA telinin elektrik direncindeki azalmaya uygundur.

ŞHA ile harekete geçirilen sistemin modellenmesi gerilme, şekil değiştirme, sıcaklık ve faz

fraksiyonu arasındaki karmaşık matematiksel ilişkileri içermektedir. On yıl boyunca araştırmacılar ŞHA eyleyicilerin karmaşık termo-mekanik ve histerezis davranışlarını ele alan birçok model önermiştir. ŞHA telinin özellikleri ile ilgili kesin bilgiler sistemin modellenmesi için gereklidir. Kompleks doğası gereği ŞHA tellerinin tam bir modelini elde etmek zordur. Sistem tanımlaması daha uygun bir model veren en iyi alternatif modelleme tekniklerinden birisidir. Şekil 119, 20 s süresince ŞHA telin 1.05 A sabit akım ile çalıştırıldığında tutucunun deneysel adım tepkisini göstermektedir.



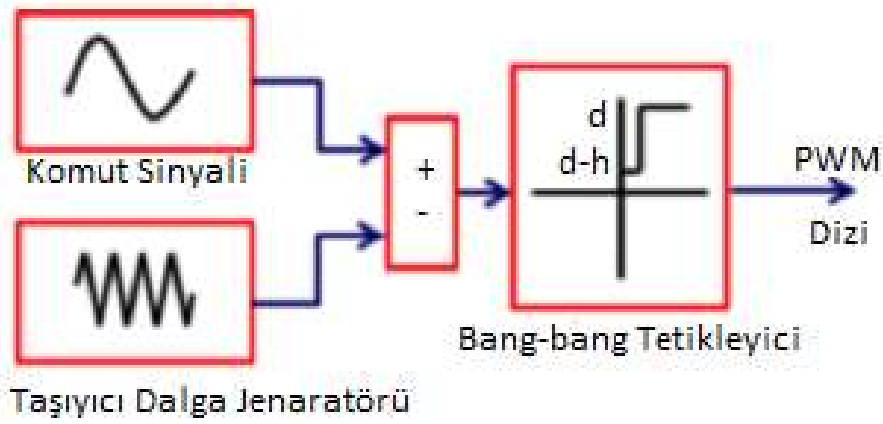
Şekil 1.121: Ölçülen ve simüle edilen çıktılar arasındaki eşleşme.

Adım tepkisi Matlab'daki sistem tanımlama araç kutusu kullanılarak doğrusal birinci dereceden zaman geciktirme sisteminin transfer fonksiyonunu elde etmek için kullanılmaktadır. Sonuçlar ölçülen ve simüle edilen model çıkışı arasında % 97.79 oranında uyum göstermiştir. ŞHA ile çalıştırılan kavrama sistemi $G_p(s)$ 'nin (akım amplifikatörünün kazanımı dahil) transfer fonksiyonu;

$$G_p(s) = \frac{3.0312 \times e^{-0.3s}}{1 + 0.72961s} = \frac{K_c \times e^{-\theta_c s}}{(1 + T_c s)} \quad \text{Denklem 38}$$

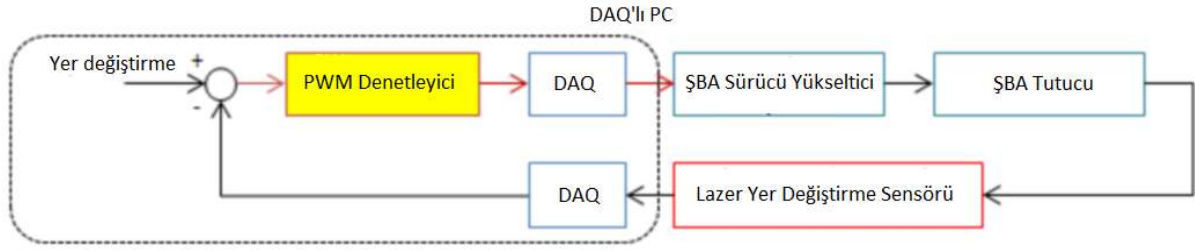
Burada K_c , T_c ve θ_c sırasıyla kavrama sistemi için kazanç, zaman sabiti ve gecikmedir.

Darbe Genişlik Modülatörünün (DGM) bir geri bildirim kontrol sistemine dahil edilmesi, sisteme sağlamlık getirmekte ve sürekli komut sinyallerini ayrı darbe sinyallerine dönüştüren ortalama davranış nedeniyle enerji tüketimini azaltmaktadır. Enerji tüketimindeki azalma, DGM modülasyonlu kontrol sinyallerinin statik anahtarlama büyüklüklerinden kaynaklanmaktadır. DGM mekanizmasının uygulanma planı Şekil 1.122'de gösterildiği gibidir.



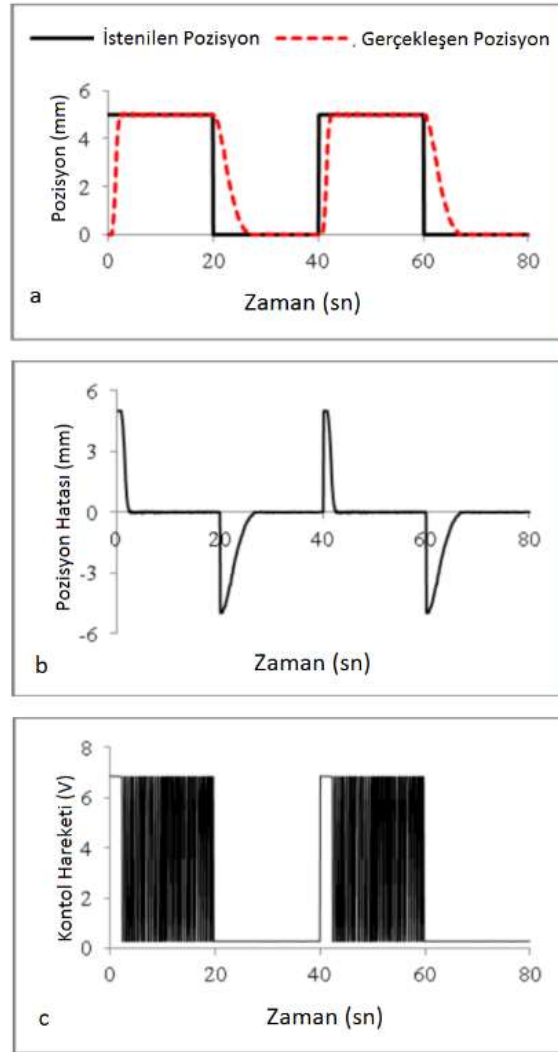
Şekil 1.122: DGM sinyal jeneratörü şeması.

DGM komut sinyalinden daha büyük sabit bir frekansta ve genlikte testere dişi sinyali üreten bir taşıyıcı dalga jeneratöründen oluşmaktadır. Bang-bang tetikleyici komut ve taşıyıcı sinyaller arasındaki farkı almaktadır. Eğer bu fark pozitif ise maksimum kontrol 'd' sistem üzerine etki yapmaktadır ve açık duruma geçmektedir. Aksi halde buna karşılık gelen değer 'd-h' olmakta ve çıktısı kapalı duruma geçmektedir. Elde edilen puls (darbe) dizisi taşıyıcı dalga ile aynı frekanstadır ve genlik eşittir. Komut sinyali ile taşıyıcı dalga arasındaki fark pozitif çıktığında, darbe genişlik modülatörünün çıktısı 0'dan 6,96 V 'a değişmektedir ve ŞHA tel eyleyiciyi harekete geçirmek için gereken ≈ 1.05 A'ya karşılık gelmektedir. Taşıyıcı dalgaının frekansı ve genliği, komut sinyalinin maksimum değerinden daha büyük seçilmelidir. Taşıyıcı dalgaının frekansı yükseldikçe, P darbe genişlik modülatör darbe frekansı daha fazla enerji tüketimi sağlayacaktır. ŞHA tutucu üzerindeki açık döngü testi, sistemin 1/60 Hz'den büyük ve 1/5 Hz'den daha düşük bir frekansta bir girdiye cevap verebildiğini açığa çıkarmaktadır. Bu nedenle darbe genişlik modülatörü darbe dizi frekansı, olası komut sinyalininkinden önemli derecede daha büyük olan 10 Hz'ye ayarlanmaktadır. Görev döngüsü (duty cycle) eş zamanlı olarak yüksek enerji verimliliği ve hızlı tepki elde etmek amacıyla dikkatli bir şekilde seçilmelidir. Yüksek görev döngüsü tutucunun daha hızlı tepki ve daha uzun soğuma süresine sebep olmaktadır. Tabi ki uzun soğuma süreleri istenmemektedir fakat zorunlu durumlarda harici soğutucular kullanılabilir. Şekil 1.123 kavrama sistemi için kapalı çevrim kontrol sisteminin kavramsal diyagramını göstermektedir. Kontrol deneyleri taşıyıcı sinyal frekansı artırılarak yapılmış ve 10 Hz frekansta konum izleme tepkisi, % 99.88 bir doğrulukla istenen eğrilere ulaşmıştır.

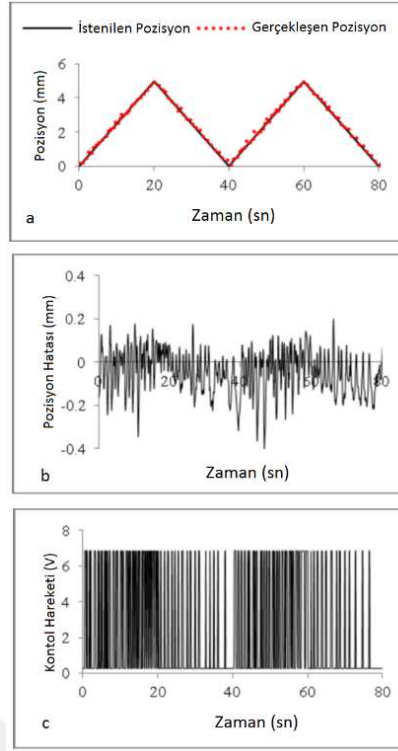


Şekil 1.123: DGM kontrollü ŞHA eyleyicili tutucunun şematik blok diyagramı.

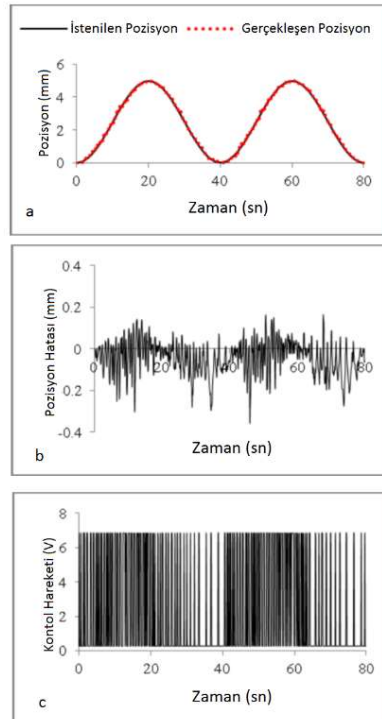
Konum izleme tepkisi ve kontrol eylemi, 60s'lik eylem periyoduna sahip, % 50 görev döngüsü ile 5.48 mm'lik bir genliğe sahip bir komut sinyali Şekil 1.124'de görüldüğü gibi uygulanmıştır.



Şekil 1.124: DGM kontrollü adım eğrisi için konum izleme performansı. a) Pozisyon Tepkisi, b) Pozisyon Hatası, c) Kontrol Hareketi.

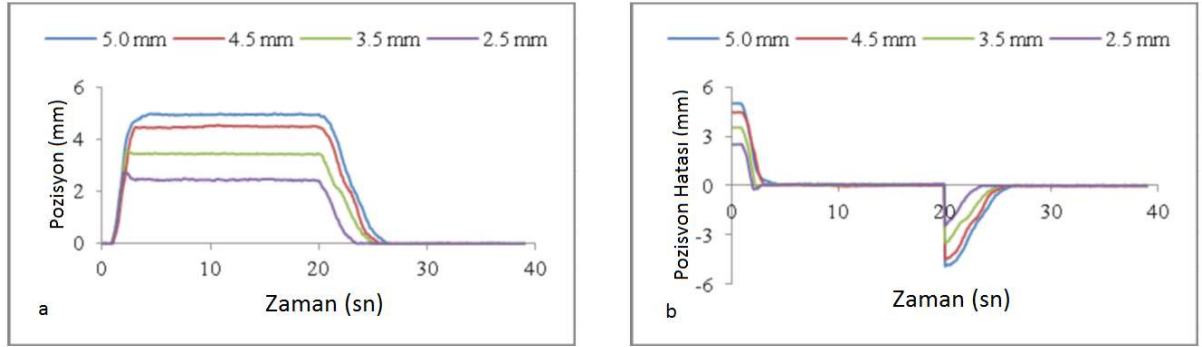


Şekil 1.125: DGM kontrolü ile üçgen yörünge için konum izleme performansı. a) Pozisyon Tepkisi, b) Pozisyon Hatası, c) Kontrol Hareketi.



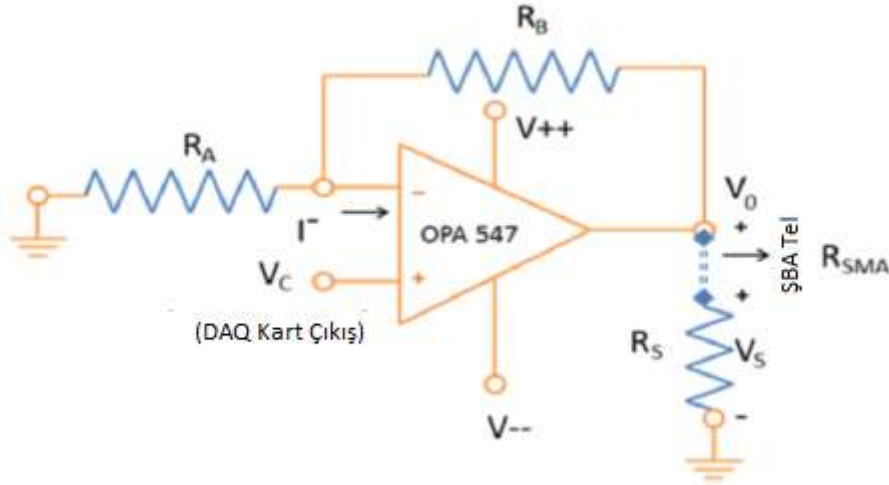
Şekil 1.126: DGM kontrollü sinüs yörüngesi için konum izleme performansı. a) Pozisyon Tepkisi, b) Pozisyon Hatası, c) Kontrol Hareketi.

Şekil 1.125 ve 1.126 sırasıyla 5 mm ve 1/40 Hz genlik ve frekansın üçgen ve sinüsoidal yörüngeleri için izleme tepkisini göstermektedir. Her iki durumda da, konum yörüngesinde izleme performansları, tasarlanan denetleyicinin istenen performansı sağladığını kanıtlayarak, amaçlanan uygulama için yeterli olmuştur. Bir dizi adım yörüngesi için kapalı döngü izleme tepkisi ve buna karşılık gelen konum hataları sırasıyla Şekil 125 (a) ve (b) 'de gösterilmektedir[33].



Şekil 1.127: Farklı adım yörüngeleri için DGM kontrol tepkisi. a)Pozisyon Tepkisi, b) Pozisyon Hatası.

Chaitanya ve Dhanalakshmi yukarıda bahsedilen çalışmalarına benzer olacak şekilde başlangıç pozisyonları hem açık hem kapalı olan ve ŞHA malzemeyi başlangıç pozisyonuna getirme işini bir germe yayının yaptığı bir çalışmada kapalı çevrim kontrolü yapmışlardır. Temassız tip lazer bir sensör ŞHA tahrik edildiğinde hareketli tutucu ağzın yer değiştirme miktarını ölçmek için kullanılmıştır. MATLAB Veri Toplama Araç Kutusu SIMULINK™, DAQ kartını bilgisayara bağlamak için kullanılmıştır. DAQ kartı sensörden yer değiştirme verilerini elde etmektedir. ŞHA tel kombinasyonu (açısal hareket) tek yönlü hareket, ön gerilmeli yay (torsiyon) ise iki yönlü hareketi (açık ve kapalı çalıştırma) sağlamaktadır. Bu çalışmada ŞHA 'nın tahrik edildiğinde elektrik direncinde bir değişiklik olması nedeniyle bir sensör olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. Bir ŞHA tele akım verildiğinde daha önce söylendiği gibi tel ısıtarak orijinal boyutunda bir küçülme meydana gelmektedir. Bu esnada telin elektriksel direncinde bir azalma gerçekleşmektedir. Soğutma sırasında ön gergi yayının kuvveti altında orijinal uzunluğunu korumaktadır. Bu eyleyiciler sistemin hareket ve hareket durumunu tam olarak algılaması çok kolay olduğundan ve sistemin maliyetini ek algılama cihazlarının ortadan kaldırılmasından dolayı çoklu kontrol uygulamalarında yer bulmaktadır. Şekil 1.128 telin içinden geçen akım miktarını kontrol etmek için tasarlanmış basit bir akım yükseltici devresini göstermektedir.



Şekil 1.128: ŞHA eyleyiciyi çalıştırmak için amplifikatör devresi.

ŞHA telindeki elektrik akımı seri direncindeki gerilimden kolaylıkla ölçülebilmektedir. Bu veriler ŞHA telin durumu ile ilgili yeterli bilgiyi sağlamak üzere işlenmektedir. Özellikle ŞHA telinin elektriksel direnci ve ŞHA teline güç girişi modelleme ve kontrol tasarımı amacı için basit devre yasaları kullanılarak ölçülmektedir.

V_C DAQ kartından gelen kontrol sinyali beslemesi (0-3.3 V),

R_A , Op-Amp'ın giriş direncidir (40 Ω),

R_B , geri besleme direnci Op-Amp (100 Ω),

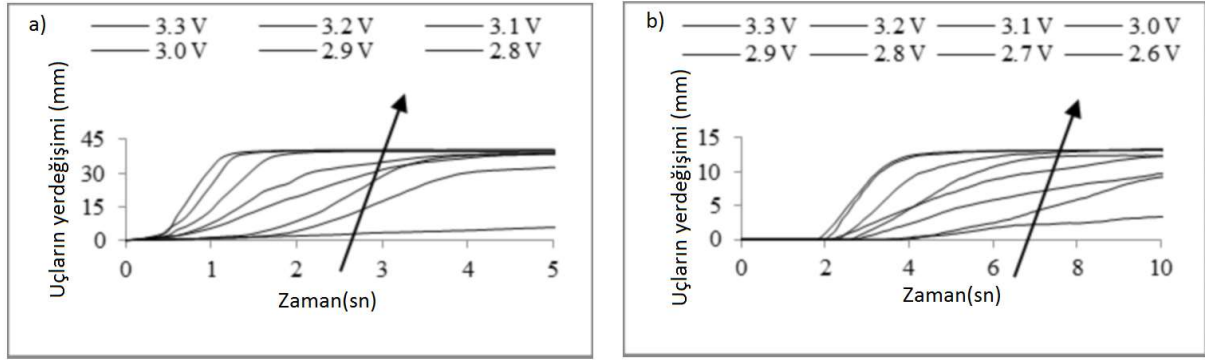
R_{SMA} , ŞHA telinin direnci (Dinamik) (30 Ω),

R_S , ŞHA teliyle (10 Ω) seri bağlanmış dirençtir,

V_0 , ŞHA telinin ve seri direncin üzerindeki gerilimdir,

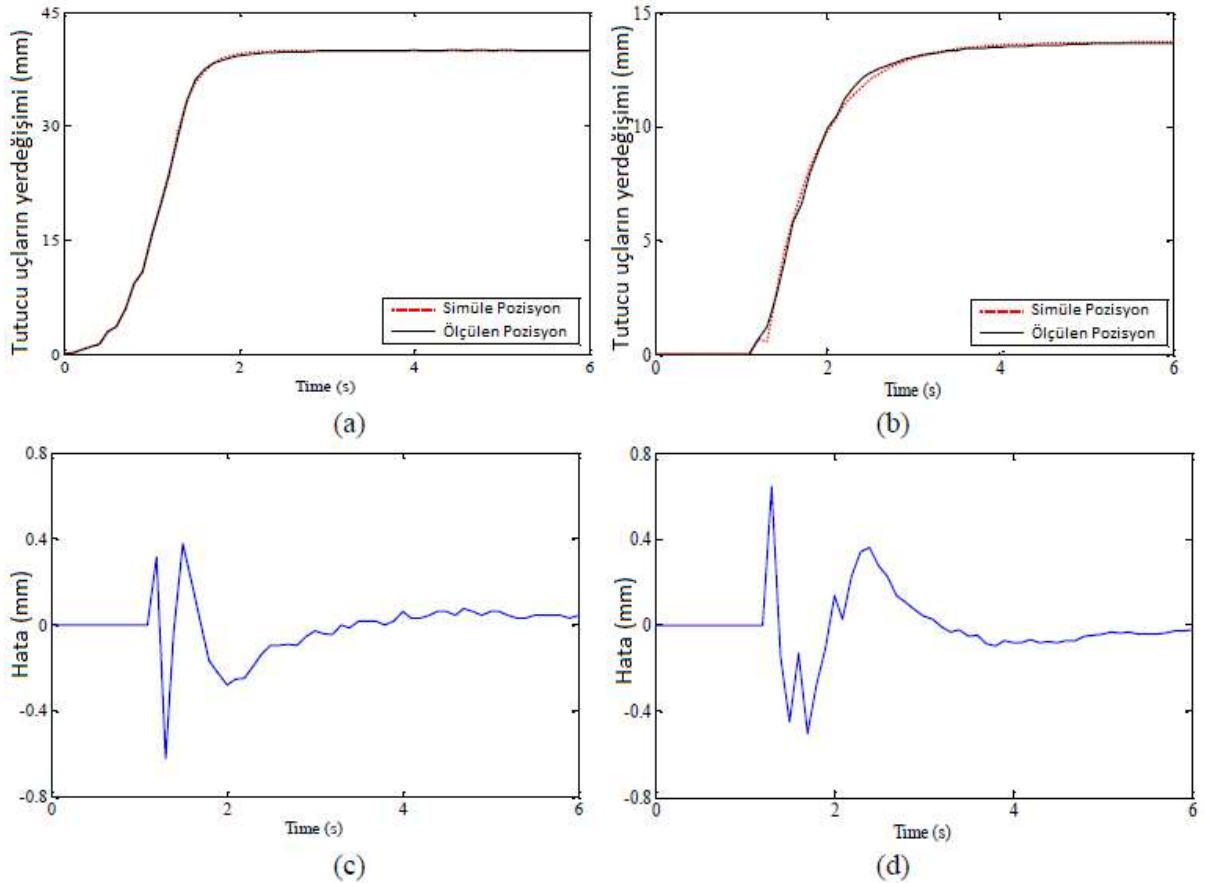
V_S , seri direncinin voltajıdır.

ŞHA tel üzerinden akım, $I_{SMA} \cong$ seri direnç üzerinden akım, $I_S = V_S/R_S$ 'ye neredeyse eşittir. Operasyonel amplifikatörün ideal davranışını varsayarsak, Op-Amp'nin ters terminalindeki akım, $I_- \cong 0$ olmaktadır. ŞHA telinde gerilim, $V_{SMA} = V_0 - V_S$ 'dir. Böylece ŞHA telin direnci, $R_{SMA} = (V_0 - V_S)/I_{SMA}$ elde edilmektedir. Güç tüketimi ise $P_{SMA} = I_{SMA}^2 \times R_{SMA}$ eşitliğinden bulunmaktadır[8]. Çalışmaya ait deneysel performanslar tutucunun açık döngü adım tepkisini elde etmek için kurgulanmış bir düzenek ile elde edilmiştir. ŞHA ile çalışan sistemlerin model yapısı zaman gecikmeli birinci dereceden seçilmiştir. 2.6V den 3.3V 'a 0.1V adımlı değişen giriş voltajı Şekil 1.129'da görüldüğü gibi ŞHA tutucuya uygulanmıştır.



Şekil 1.129: Akıllı tutucuların açık döngü yanıtı a) Kapalı mod tutucu, b) Açık mod tutucu.

Tepkilerin ilk eğimi daha büyük girdi için daha hızlı tepki vermektedir. Ayrıca kapalı mod tutucu, açık mod tutucudan daha hızlıdır. Şekil 1.130 tutucuların deneysel ve tahmini adım tepkilerini ve bunların ilgili konum hatalarını göstermektedir. Bu yanıtlar, Matlab'daki sistem tanımlama araç kutusundan Tahmin-hata minimizasyon tekniği kullanılarak tutucular için birinci dereceden gecikme transfer fonksiyonunu elde etmek için kullanılmaktadır.



Şekil 1.130: Ölçülen ve simüle edilen çıktılar arasındaki uyuma ve uyumsuzluk. (a, c) Kapalı mod tutucu, (b, d) Açık mod tutucu.

Simülasyon sırasıyla kapalı mod ve açık mod tutucular için sırasıyla deneysel konum ve simüle edilmiş model çıktıları arasında % 1 ile % 4'lük uyumsuzluk ve % 96.31 ile % 99.79 arasında yüksek eşleşme göstermiştir. Birinci dereceden zaman geciktirme transfer fonksiyonu,

Kapalı mod tutucu için;

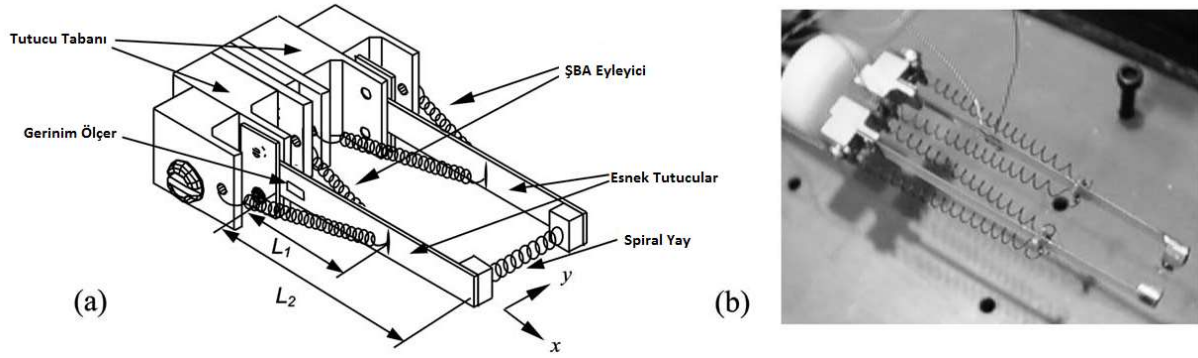
$$G_p(s) = \frac{12.19 \times e^{-0.7s}}{1 + 0.47s} \quad \text{Denklem 39}$$

Açık mod tutucu için;

$$G_p(s) = \frac{4.17 \times e^{-1.1s}}{1 + 0.69s} \quad \text{Denklem 40}$$

Denklem 39, 40'da verilmiştir. Burada $G_p(s)$ sistemin transfer fonksiyonudur, K_c ve T_c sırasıyla kazanç ve zaman sabitidir[8]. Sistemin kontrolü için yukarıda ki çalışmada uygulanmış olan DGM kontrol sistemini kullanmışlardır.

Yukarıda bahsedilen mekanizmaların veya sistemlerin başarılı bir şekilde geliştirilmesinde en önemli sorun ŞHA eyleyicinin yavaş tepki süresi olduğu bu bölümün çeşitli yerlerinde vurgulanmıştır. Özellikle ısıtma ve soğutma aşamalarında ŞHA eyleyicilerin farklı tepki karakteristikleri vardır. Bu nedenle eyleyicinin dinamikleri belirsiz bir sistem olarak ancak zaman sabitinin sınırlı sapması ile ele alınması gerekmektedir. Choi ve arkadaşları ŞHA yaylar ile hareket ettirilen minyatür boyutlu tutucuları için zaman sabitinin belirsiz bir parametre olarak düşünüldüğü bir kuvvet izleme kontrolü üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında H_∞ denetleyicinin hareket belirsizliğine maruz kalmış ŞHA ile sürülen esnek bir tutucu sistemin sağlam kuvvet izleme kontrolü için tatmin edici bir şekilde nasıl kullanılabileceği göstermişlerdir. Esnek tutucu sistemin hareketini düzenleyen kısmi diferansiyel denklem Hamilton ilkesi kullanarak türetilmiştir. Sınırlı sayıda titreşim modu muhafaza edildikten sonra Laplace bölgesinde bir kontrol modeli elde edilmiştir. Kararlılık sınırı ve kalıcı durum hatası spesifikasyonlarını garanti altına almak için H_M tekniğine dayanan iki serbestlik derecesi (TDF) kontrol sistemi sentezlenmiştir. Sekizinci mertebe ön filtre ve geri bildirim kompanseörü tasarlanmış ve deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Adım ve sinüs eğrileri için kuvvet izleme sonuçları önerilen kontrol metodolojisinin etkililiğini ve sağlamlığını göstermek için zaman alanında sunulmuştur. Şekil 131'de görüldüğü gibi esnek tutucu kolonlarının her iki yanına belirli bir (θ) açıyla sabitlenmiştir.



Şekil 1.131: ŞHA yaylar ile harekete geçirilen eyleyici a) şematik görünüm b) gerçek görünüm.

Spiral yaydaki son nokta tutma kuvveti, tutucunun bitiş bölgesinde yüzeye tutturulmuş gerinim ölçer kullanılarak ölçülmüştür. Yukarıdaki şekilde önerilen esnek tutucu sistemde iki kol bulunduğu görülmektedir. Bir kolun dinamik modeli simetrik olarak konumlandırılmış iki kolun özdeş olduğu varsayımları altında formüle edilmiştir. Bernoulli-Euler teorisinden enine yön değiştirme $y(x, t)$ ve ilgili sınır koşulları için hareketin yönetici denklemi aşağıdaki elde edilmiştir.

$$EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} + \rho_d A \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} + \tilde{k}_1 y \delta(x - L_1) + F_a(t) \delta(x - L_1) = 0, \quad \text{Denklem 41}$$

$$\begin{aligned} y(x, t) \Big|_{x=0} &= 0, \\ \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} &= 0, \\ EI \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial x^2} \Big|_{x=L_2} &= 0, \\ EI \frac{\partial^3 y(x, t)}{\partial x^3} \Big|_{x=L_2} &= -M \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t^2} \Big|_{x=L_2} + k_2 y(x, t) \Big|_{x=L_2}. \end{aligned} \quad \text{Denklem 42}$$

Yukarıdaki EI , etkin bükülme sertliği, ρ_d kütle yoğunluğu, A kesit alanı, M sonlanma noktası kütlesi ve $F_a(t)$ ŞHA'nın etkili tahrik kuvvetidir. Değişkenler $\tilde{k}_1$ ve k_2 sırasıyla çalışma sıcaklığında ŞBA eyleyici yay sabiti ve son noktadaki sargı yayının yay sabitini temsil eder. ŞHA yayının yer değiştirme aralığı çok küçük olduğundan, yay sabiti $\tilde{k}_1$ doğrusal yay olarak modellenmiştir. Önerilen tutucu sistemin her modu için ayrılmış adi diferansiyel denklem aşağıdaki Denklem 43'de olduğu gibi türetilmiştir.

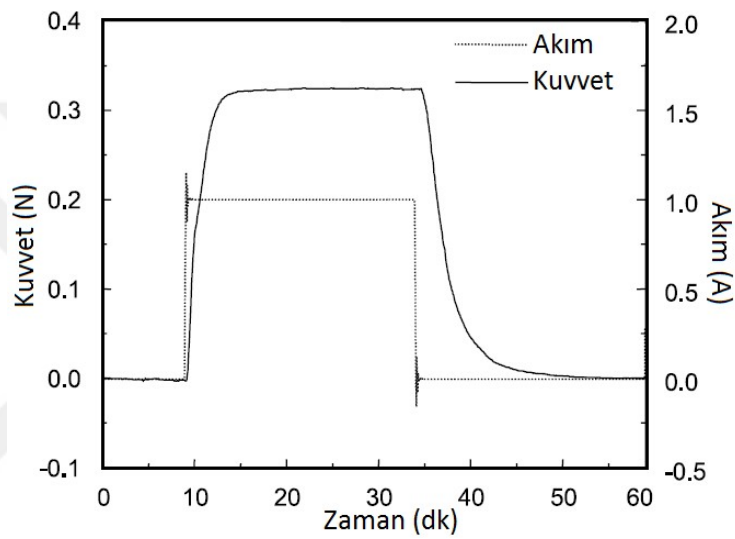
$$\ddot{q}_i(t) + 2\zeta_i \omega_i \dot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = \frac{F_a(t) \phi_i(L_1)}{I_i}, \quad i = 1, \dots, \infty, \quad \text{Denklem 43}$$

Burada ω_i ve ζ_i sırasıyla i th modunun doğal frekansı ve sönümlenme oranıdır ve I_i Denklem 43'de verilen genelleştirilmiş küttedir.

$$I_i = \int_0^{L_2} \rho_d A \phi_i^2(x) dx + M \phi_i^2(L_2).$$

Denklem 44

Denklem 43'de verilen kontrol sistemi modelinde viskoz sönümlenme ($2\zeta_i \omega_i \dot{p}_i$) terimi her ayrıştırılmış modal denklemine sezgisel bir biçimde eklenmiştir. ŞHA eyleyicinin $F_a(t)$ 'nın doğal dinamik özellikleri başarılı bir şekilde uygulanması için ilk önce tanımlanmalıdır. Şekil 1.132 bu çalışmada kullanılan ŞHA eyleyicinin ölçülen basamak tepkisini göstermektedir.



Şekil 1.132: ŞHA eyleyicinin dinamik karakteristikleri.

Isıl genişlemeden kaynaklanan kuvvetin dönüşüm kuvvetine kıyasla önemsiz olduğunu varsayarak eyleyicinin dinamikleri Denklem 45'de şu şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} \tau_h \frac{dF_a(t)}{dt} + F_a(t) &= k_a i(t), \\ \tau_c \frac{dF_a(t)}{dt} + F_a(t) &= k_a i(t), \end{aligned}$$

Denklem 45

Burada $i(t)$ giriş akımı ve k_a giriş etki katsayısıdır. τ_h ve τ_c değişkenleri sırasıyla ısıtma ve soğutma aşamasındaki zaman sabitlerini temsil etmektedir. Şekil 1.132'den açıkça görüyoruz ki, ısıtma aşamasındaki zaman sabiti τ_h soğutma aşamasındaki zaman sabiti τ_c 'den çok farklıdır ve $\tau_h = 1.2$ s ve $\tau_h = 3.52$ s olduğu görülmektedir. Bu zaman sabitini sabit durum değerinin % 63.2'sine ulaşmak için bir zaman olarak tanımlayarak elde edilmiştir. Bu durum kontrol sisteminin iki parçaya bölünmesine neden olur ki bu da deneyin gerçekleştirilmesinde

istenmemektedir. Bu nedenle nominal zaman sabiti olarak $t_0 = (t_h + t_c) / 2$ ortalama değerini kabul edilir ve ortalama değerden olan farkı belirsiz bir parametre olarak aşağıdaki Denklem 46'da olduğu gibi alınabilir:

$$\Delta\tau = \max(|\tau_h - \tau_0|, |\tau_c - \tau_0|). \quad \text{Denklem 46}$$

Böylece, ŞBA eyleyicinin dinamikleri aşağıda görülen Denklem 47'de verildiği gibi olmaktadır.

$$\frac{F_a(s)}{i(s)} = \frac{k_a}{s(\tau_0 + \Delta\tau) + 1}. \quad \text{Denklem 47}$$

Böylece giriş akımı ($i(t)$) ile çıkış son nokta kavrama kuvveti ($F_g(t)$) arasındaki toplam aktarım fonksiyonu aşağıdaki Denklem 48'deki gibi elde edilir:

$$G_A(s) = \frac{F_g(s)}{i(s)} = \frac{k_a}{s(\tau_0 + \Delta\tau) + 1} \frac{\sum_{i=1}^{\infty} \{k_2 \phi_i(L_2) \phi_i(L_1) / I_i\}}{\sum_{i=1}^{\infty} \{s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2\}}. \quad \text{Denklem 48}$$

İki serbestlik derecesi (TDF) kontrol algoritmasını formüle etmek için, $\Delta t=0$ aşağıdaki Denklem 49'deki gibi tanımlanması gerekmektedir.

$$G(s) = \frac{k_a}{s\tau_0 + 1} \frac{\sum_{i=1}^n \{k_2 \phi_i(L_2) \phi_i(L_1) / I_i\}}{\sum_{i=1}^n \{s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2\}} = \tilde{M}^{-1} \tilde{N}. \quad \text{Denklem 49}$$

Kontrol modeli (Denklem 49), esnek modların sınırlı bir sayısını (n) muhafaza ederek, dağıtılmış sistem modelinden (Denklem 48) kesilmektedir. Kontrol edilecek esnek modların sayısı bu bölümde önerilen denetleyiciyi kullanmadan önce ve sonra sistem yanıtlarının incelenmesinden tespit edilmektedir. Bilgisayar simülasyonu sayesinde, sistemin açık döngüsel tepkileri, her esnek modun tepki etkisini araştırarak zaman etki alanında gözlemlenmektedir. Kalıntı modlardan kaynaklanan kapalı döngüsel tepkiler, kontrol yayılma etkisinin bir göstergesi olan uyarılma büyüklüğünün araştırılmasıyla da gözlemlenmektedir. Kalıntı modlardan kaynaklanan kontrol etkisi küçüktür. O yüzden Denklem 48'in de aynı şekilde aşağıdaki Denklem 50'de olduğu gibi tanımlanması gerekmektedir.

$$G_{\Delta}(s) = \frac{k_a}{s(\tau_0 + \Delta\tau) + 1} \frac{\sum_{i=1}^n \{k_2 \phi_i(L_2) \phi_i(L_1) / I_i\}}{\sum_{i=1}^n \{s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + \omega_i^2\}} = \tilde{M}_{\Delta}^{-1} \tilde{N}_{\Delta} \\ = (\tilde{M} - \Delta M)^{-1} (\tilde{N} + \Delta N), \quad \text{Denklem 50}$$

Burada ΔM ve ΔN zaman sabitinin karşılık gelen faktör belirsizliğini temsil etmektedir ($\Delta M, \Delta N \in H_{\infty}^+$ ve $|\Delta M| \vee |\Delta N| \leq \gamma^{-1}$). Değişken γ , H_{∞} optimizasyonu için hedef normdur. Çalışmada

The diagram shows a control system with the following components and signal flow:

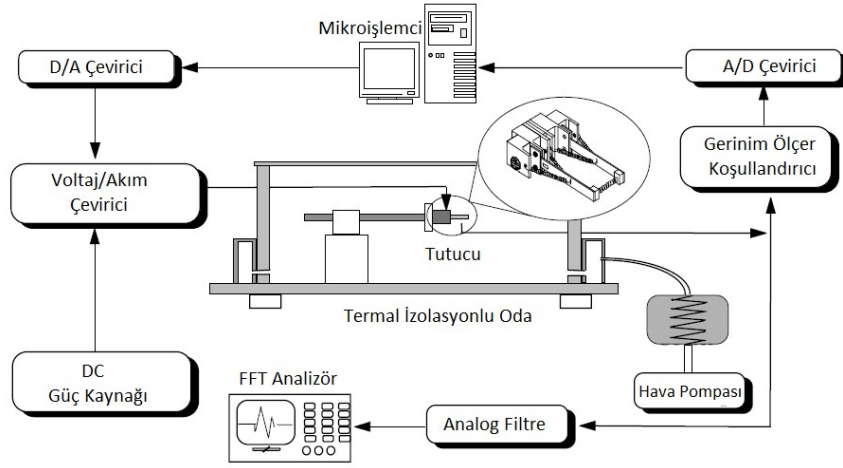
- Reference Input:** A signal r enters a block labeled ρI .
- Feedforward Path:** The output of ρI is labeled β . This signal passes through a block S , then a block K_1 , and is added (+) to the output of the parallel plant.
- Parallel Plant:** A dashed box labeled G_Δ contains two parallel paths:
 - Top Path:** The input u passes through a block Δ_N , is added (+) to the output of the bottom path, and then passes through a block Δ_M .
 - Bottom Path:** The input u passes through a block $\tilde{N}$, is added (+) to the output of the top path, and then passes through a block $\tilde{M}^{-1}$.
 - Internal Feedback:** The output of the top path (before Δ_M) is fed back through a block f and added (+) to the input of the bottom path (before $\tilde{M}^{-1}$).
- Plant Output:** The output of the parallel plant is labeled y .
- Feedback Loop:** The signal y is fed back through a block K_2 and added (+) to the input of the parallel plant. Additionally, y is fed back through a block M_0 and added (-) to the reference input r before it enters the ρI block.
- Final Output:** The output of the parallel plant is added (+) to the output of the ρI block to produce the final output z .

Kontrolün amacı ön filtreyi K_1 ve geri besleme kompansatörünü K_2 sağlam kararlılık ve olumlu kuvvet izleme performansı elde edebilmesi amacıyla tasarlanmıştır. Blok diyagramda W, u girişindeki ağırlıklandırma fonksiyonudur. M_0 sağlam model eşleştirme özelliklerini sağlamak için arzu edilen hedef modeldir. P ölçekleme faktörü ve S ölçekleme matrisidir. Blok diyagramdan aşağıdaki Denklem 51'deki genelleştirilmiş $H_\square$ çerçevesini oluşturabilmektedir.

Dengeleyici ön filtre K1 ve geri besleme kompanseörü K2, aşağıdaki eşitsizliği (Denklem 52) karşılayacak şekilde MATLAB kontrol kutusu kullanılarak tasarlanabilir:

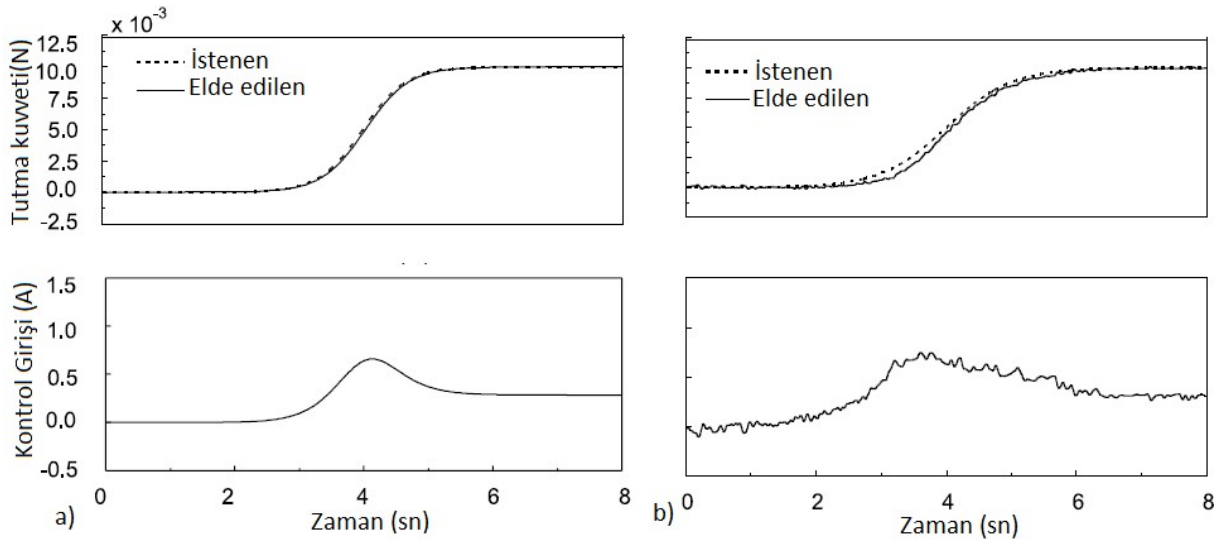
Burada Gs ($=\tilde{M}_S^{-1}\tilde{N}_S$) dir.

118



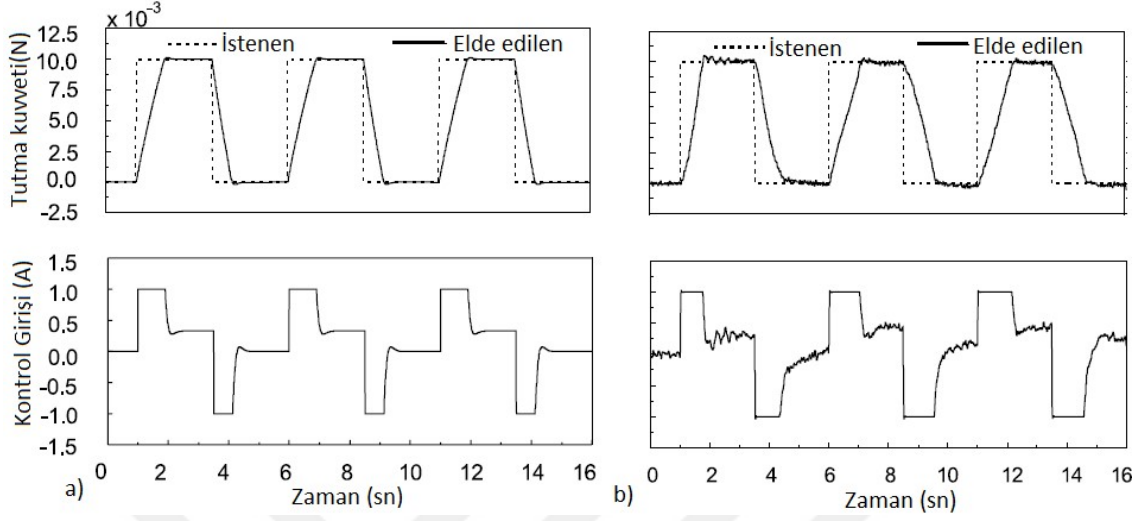
Şekil 1.134: Kuvvet izleme kontrol deneysel düzeneği.

Tutucu sistem ısı yalıtım odasında çalışma sıcaklığı $12 \pm 1^\circ\text{C}$ 'de tutulacak şekilde kontrol edilmiştir. Uç nokta tutma kuvveti bir gerinim ölçer ile ölçülmüştür. Bu gerinme büyüklüğünü (gerilim sinyali) kavrama kuvvetine kalibre ederek elde edilmektedir. Tutma kuvveti gerinim ölçer koşullandırıcı ile güçlendirilir ve analog/dijital (A/D) dönüştürücü aracılığıyla mikroişlemciye geri beslenmektedir. Referans girdi ve çıktı kuvvetine bağlı olarak, H denetleyicisi kontrol giriş akımını hesaplar ve kontrol giriş akımı, D/A dönüştürücü ve voltaj/akım dönüştürücü aracılığıyla ŞBA eyleyiciye beslenmektedir. MetraByte'in DAS-20 I/O kartı hem D/A hem de A/D dönüşümü için 12 bit çözünürlüğe sahiptir ve denetleyici uygulaması için örnekleme hızı 1 kHz ile seçilmiştir. Şekil 1.135 düzgün adım eğrileri için simüle edilen ve ölçülen kuvvet kontrol tepkilerini göstermektedir.



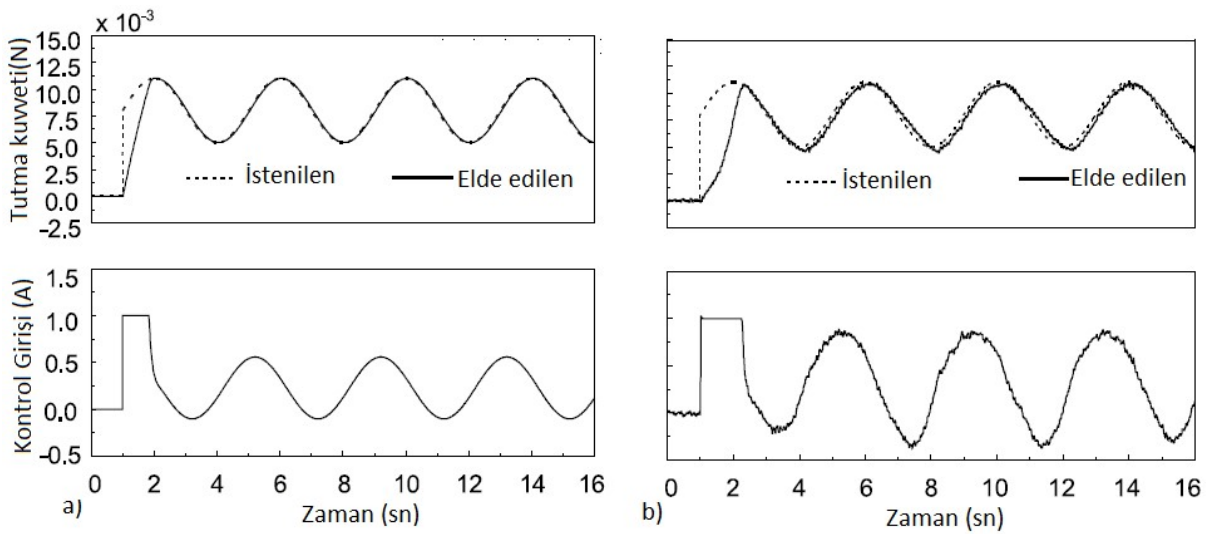
Şekil 1.135: Kuvvet düzenleyici kontrol tepkileri. a) simüle edilen, b) ölçülen.

İzleme performansının olumlu olduğu ve kararlı durum izleme hatası, uygun kontrol giriş akımı ile $\pm \% 2$ 'nin içinde olduğu açıkça görülmektedir. Şekil 1.136'da adım eğri periyodu 5 sn olan izleme tepkileri gösterilmektedir.



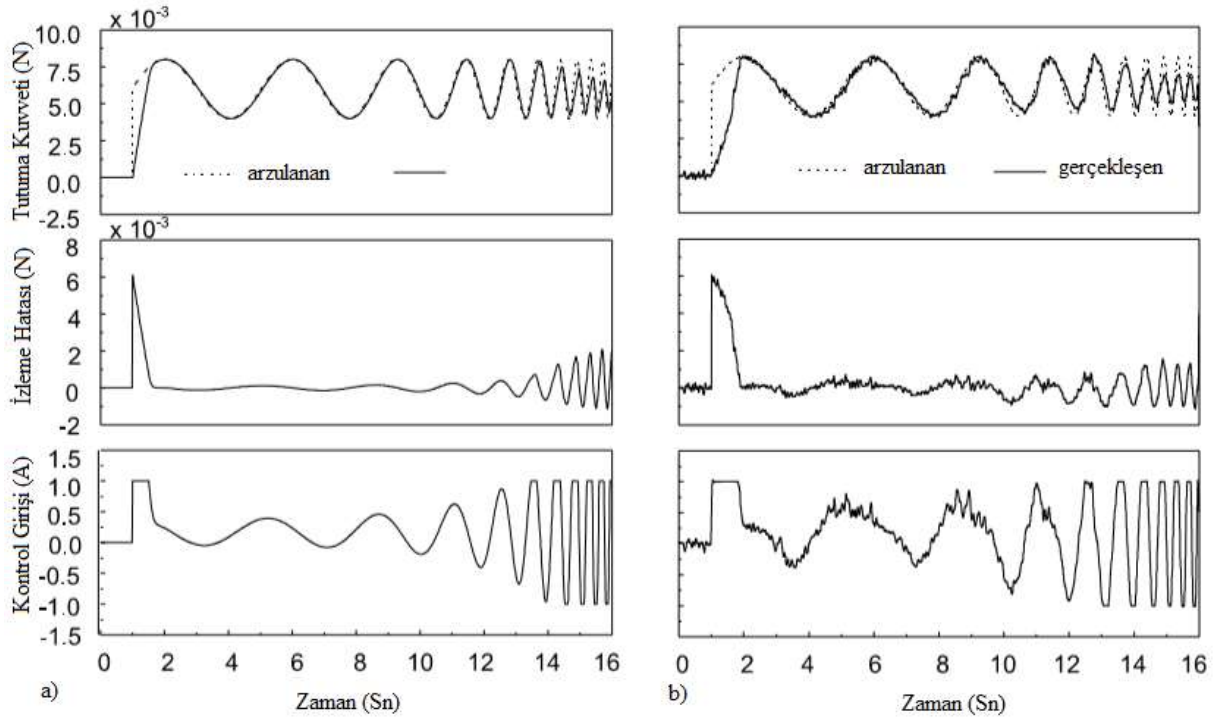
Şekil 1.136: Adım eğri için izleme tepkisi. a) simüle edilen, b) ölçülen.

Kavrama kuvvetinin geçmişinden görüyoruz ki, gerçek kuvvet 0,01 N'lık istenen kuvvetin üstüne çıkmadan kurulmuştur ve simülasyon ile deney sonuçları arasında mükemmel bir anlaşma olduğunu açıkça görülmektedir. Bu durum önerilen mantıksal modelin geçerliliğini ve kontrol mantığını savunmaktadır. Bilgisayar simülasyonunda en küçük zaman sabitini (yükselme zaman sabiti) kullanılması, simülasyondan gelen kontrol cevabının deneysel çalışmadan elde edilenlerden daha iyi olmasını sağlamaktadır. Şekil 1.137, 0.25 Hz frekansa sahip olan sinüzoidal eğri için kuvvet izleme tepkilerini göstermektedir.



Şekil 1.137: Sinüzoidal eğri için kuvvet izleme tepkileri. a) simüle edilen, b) ölçülen.

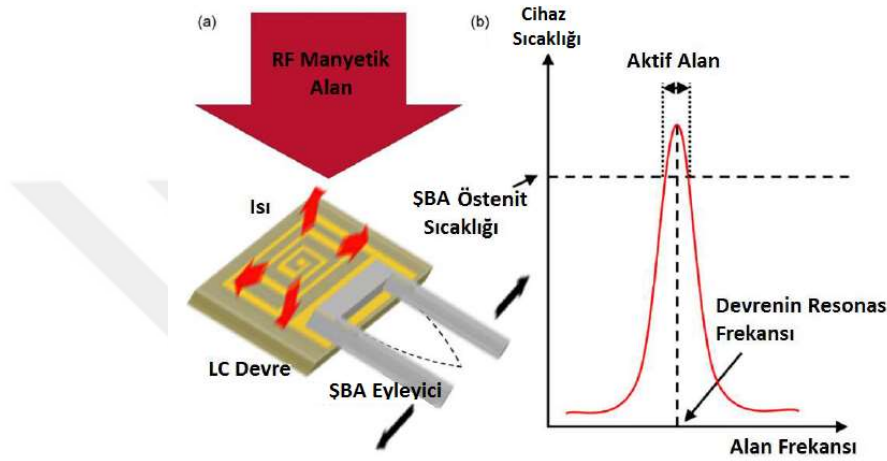
Denetleyiciler etkinleştirdikten sonra elde edilen eğriler 0.9 saniye içinde istenen izi takip etmektedir. Giriş akım geçmişinden ölçülen akımdaki birinin büyüklüğü simüle edilen akımdaki değerden daha yüksek olduğu da bilinmektedir. Buna doğrudan ŞHA eyleyicinin tepki veren kuvvetini temsil eden nispeten yavaş soğutma hızı neden olmaktadır. ŞHA eyleyicinin tepki kuvvetinin diğer akıllı malzeme eyleyicilerine kıyasla nispeten yavaş olduğunu iyi bilinmektedir. Önerilen esnek tutucunun izleme özelliğini tepki karakteristiği açısından değerlendirmek için zamanla değişen frekansa sahip bir sinüzoidal eğri istenilen şekilde seçilmiş ve kontrol sonuçları Şekil 1.138'de sunulmuştur. Frekans 0.08 ila 0.68 Hz arasında değişmektedir. İzleme hata geçmişinden görüldüğü gibi frekans arttıkça izleme performansının bozulduğu görülmektedir. Bu doğrudan ŞHA eyleyicinin geçerli bir sınırlamasını göstermektedir. Özellikle önerilen sistemin kontrol bant genişliği yaklaşık 0.48 Hz'dir. Sistemin kontrol bant genişliğinin yalnızca ŞHA eyleyici dinamik karakteristiğine değil deneysel uygulama için kullanılan sistem parametreleri ve kontrol donanımı/yazılımına bağlı olduğu da belirtilmiştir[44].



Şekil 1.138: Zamanla değişen frekansa sahip sinüzoidal bir yörünge için kuvvet izleme kontrol yanıtı a) sümüle edilen, b) gerçekleşen.

ŞHA'ları geleneksel olarak üzerlerinden akım geçirmek yolu ile kontrol etme çalışmaları haricinde elektron ışını ya da lazer ışını ile ısıtarak şekil değişimi elde etme çalışmalarına literatürde rastlanmaktadır. Bu metotların kendilerine ait kısıtlamaları olsa bile dış bir ısı

kaynağı ile kablosuz bir kontrol sunmaktadır. Ali ve Takahata bulk ŞHA'dan mikro işleme ile elde edilen eyleyici bağladıkları rezonant ısıtıcı devrelerinden Radyo Frekansı (RF) güç aktarımı yaparak pasif kontrol mekanizması üzerine çalışmışlardır. Bu amaç ile geliştirilen mikro işlenmiş ŞHA eyleyici (Şekil 1.139), harici bir RF manyetik alanı tarafından aktive edilen, frekansa duyarlı bir kablosuz ısıtıcı olarak görev yapan bir İndüktör-Kondansatör (İK) rezonant devresiyle çalıştırılmaktadır.



Şekil 1.139: a) Kablosuz kontrollü ŞBA mikro eyleyici b) Çalışma prensibi.

Manyetik alanın neden olduğu elektromotor kuvveti nedeniyle devre bir Alternatif Akım (AA) manyetik alana maruz kaldığında İK devresinde bir AA akımı üretilmektedir. Devrenin güç tüketimi (P) Denklem 53 'de verilen eşitlikten elde edilmektedir.

$$P(\omega) = \frac{Rv^2}{[R + j(\omega L - 1/\omega C)]^2}$$

Denklem 53

Burada V elektromotor kuvvet, L ve C sırasıyla indüktans ve devrenin kapasitansı, R devrenin parazit direnci ve ω AA akımının açısal frekansıdır. Denklem 53'deki reaktans (1) AA akım frekansı veya manyetik alan frekansı devrenin rezonant frekansı ile eşleştğinde elimine edilir ve $\omega_r = 1/\sqrt{LC}$ olur. Bu durumda, devreye güç aktarımı maksimize edilir ve sonuç olarak Denklem 54'deki eşitlik gerçekleşmektedir.

$$P(\omega_r) = \frac{v^2}{R}$$

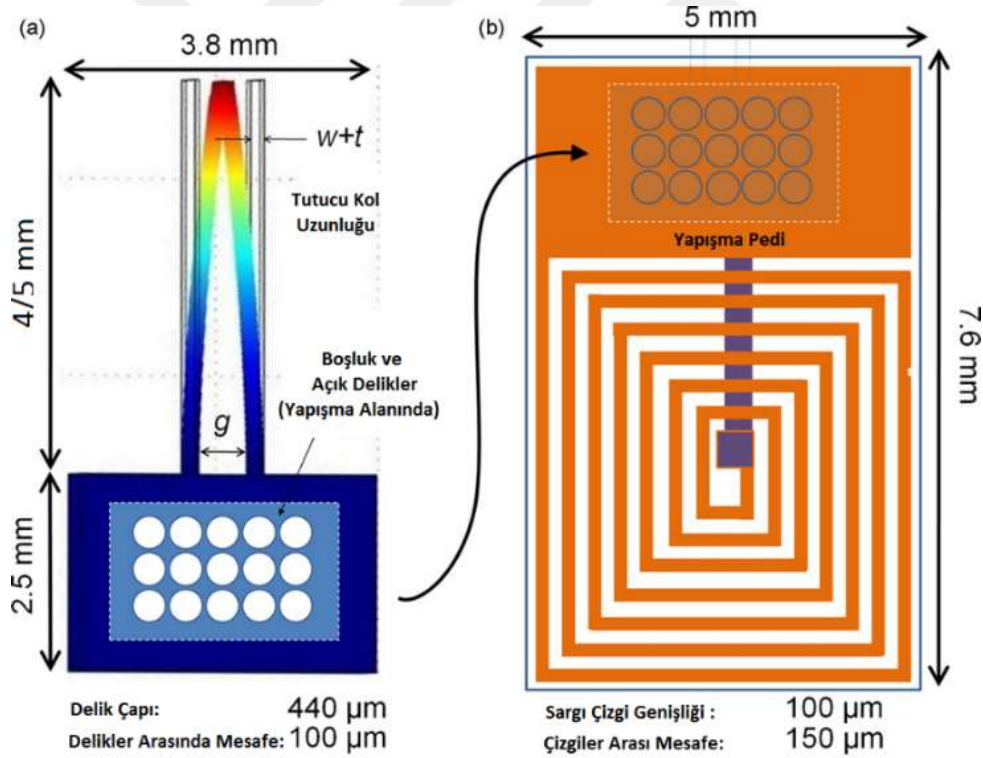
Denklem 54

Böylece alan frekansı İK devresinin rezonant frekansına ayarlandığında alan enerjisi etkin bir şekilde Joule ısıya dönüşmekte yani harekete geçirme, alan yoğunluğu yerine frekans ile

kontrol edilmektedir. İK devresinin kararlı durum sıcaklık (T_{ss}) yükselmesi teorik olarak aşağıdaki Denklem 55 ile ifade edilebilir.

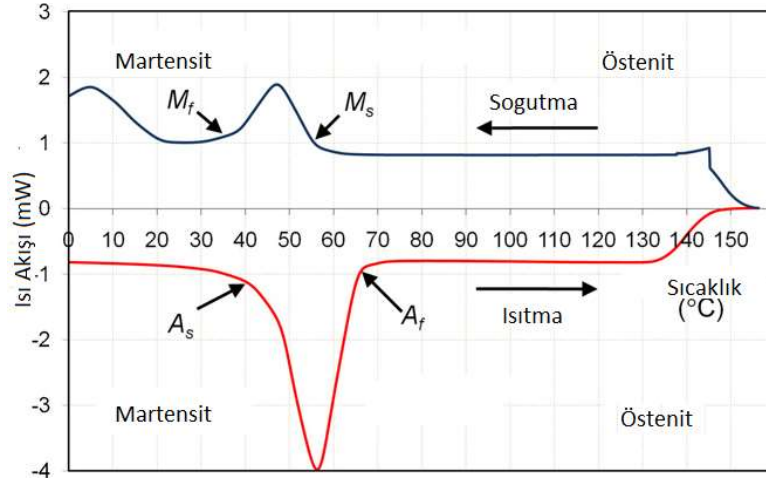
$$T_{ss} = \frac{R_T v^2 / R}{1 + \alpha_R R_T v^2 / R} \quad \text{Denklem 55}$$

Burada R_T devreyi çevreleyen ısıl direncidir ve α_R devrenin direncinin sıcaklık katsayısıdır. Yukarıdaki çizimden de görüleceği üzere tutucu uçları bir birinin aynı dikdörtgen geometriye sahip kollardan oluşmaktadır. Kollarda her birinin bir yüzeyi soğuk hal sıfırlama tabakası ile kaplanmıştır. ŞHA'nın sıcaklığı östenit faz sıcaklığına ulaştığında tutucu harekete geçip ve hafızalandırılmış şekline geri dönmektedir. Isı giderildiğinde sıfırlama tabakası tarafından sağlanan güç nedeniyle, tutacağın şekli, orijinal soğuk hal şekillerine geri dönmektedir. Yaptıkları çalışmada tutma düzenleri 4 mm (cihaz-1) ve 5 mm (cihaz-2) tutucu kol uzunluğuna sahip olarak normalde kapalı bir tasarıma sahiptir. ŞHA tutucu yapısının düzeni Şekil 1.140'da gösterilmektedir.



Şekil 1.140: a) ŞHA tutucu tasarımı, b) İK devre tasarımının örnek düzeni.

Tutucu yapılar Mikro-Elektro Deşarj İşleme (EDİ) ile (östenitik faz sıcaklığı 65 °C olan 300 µm kalınlığında Ti-Ni levhalarla (Alloy M, Memory Metalle GmbH, Almanya) üretilmiştir. Alaşıma ait faz dönüşüm sıcaklıkları Şekil 1.141'de verilmiştir.



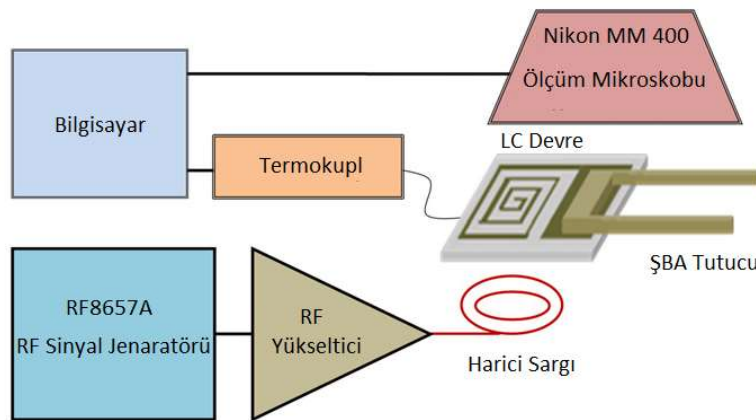
Şekil 1.141: ŞHA malzemenin faz geçiş sıcaklıkları.

Her iki tutucu kolun dış yan çeperi sıkıştırıcı bir SiO₂ tabakası kaplanmıştır. Tutucu yapıların boyutları Tablo 1.13'de özetlenmiştir.

Tablo 1.13: Tutucu yapısının boyutları.

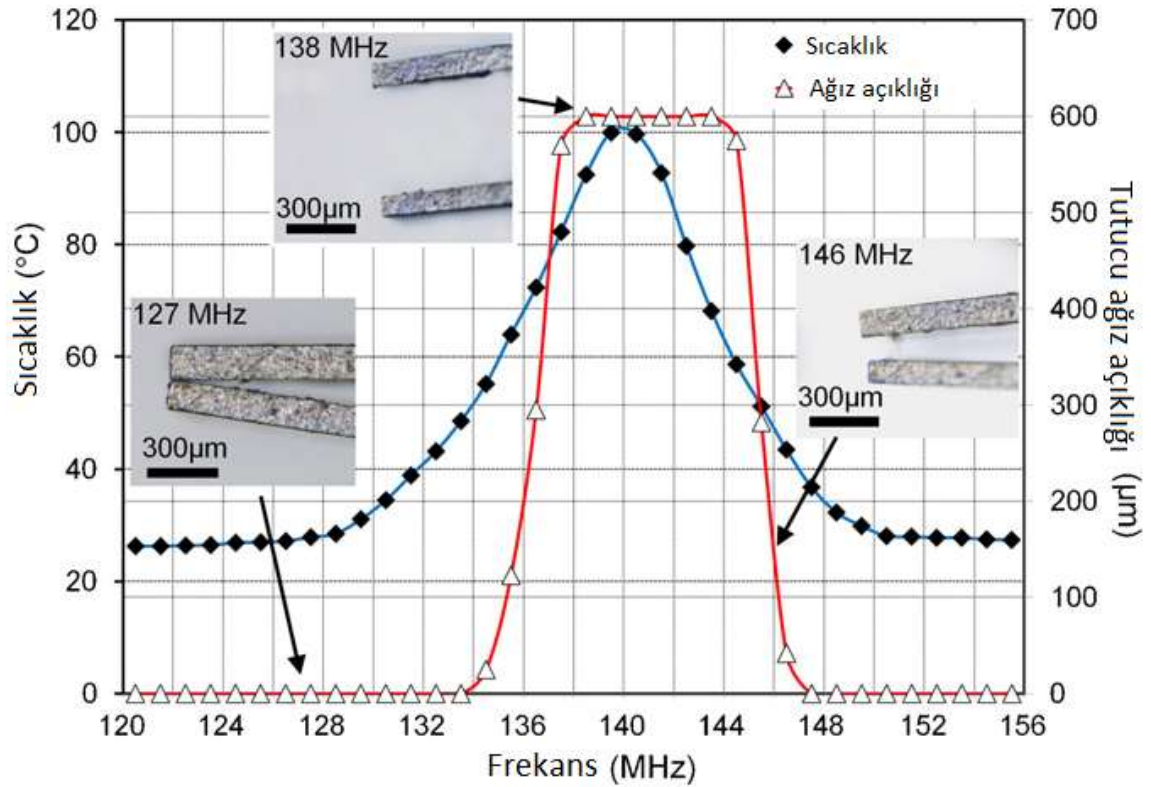
Boyutlar		Tutucu 1	Tutucu 2
Tutucu kol uzunluğu,	l (mm)	4	5
Tutucu kol genişliği,	w (μm)	62	70
Tutucu kol yüksekliği,	h (μm)	300	300
SiO ₂ tabakası kalınlığı,	t (μm)	3	4.2
Kollar arasındaki boşluk aralığı, g (μm)		570	600

ŞHA bileşeni, İK devresinin kapasitör elektrotlarından herhangi birine veya spiral bobinin arka tarafında bulunan ve bakır bölge boyunca ŞHA'ya ısı sağlayan ayrı bir bakır bölgeye bağlanır. Şekil 1.142'de gösterilen kurulum kullanılarak kablosuz testler deneysel olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1.142: Kablosuz çalıştırma testleri için kurulum.

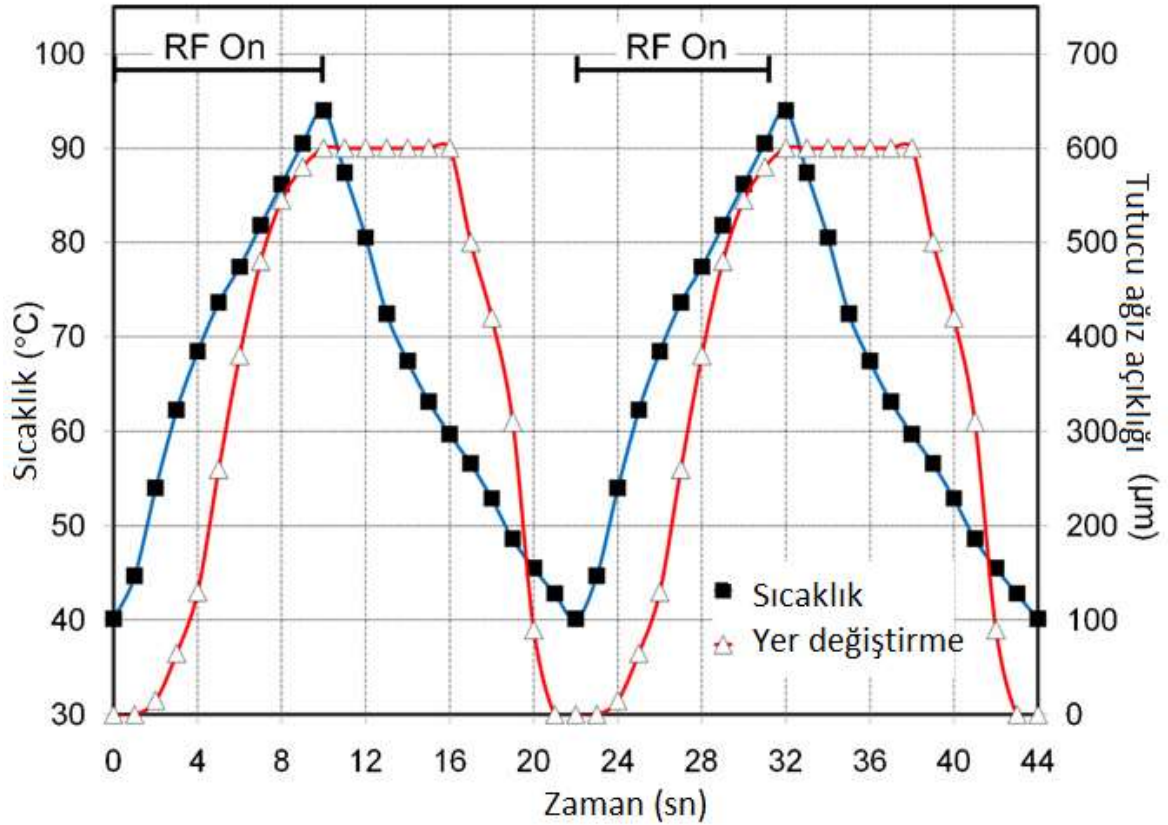
Cihazın İK devresini uyaran bir RF manyetik alanı oluşturmak için harici bir bobine (çap ~ 4mm, 497-nH indüktans) 1 W'a kadar çıktı gücü ile güçlendirilmiş bir RF sinyali gönderilmiştir. Tutucunun termomekanik davranışı, tutucunun yer değişimini karakterize etmek için 0.1 μm çözünürlüğe sahip bir ölçme mikroskopi ve cihaza (SHA'ya bağlı olmayan kapasitör elektrotu üzerinde) bir termokupl kullanılarak karakterize edilmiştir. Şekil 1.143, Tutucu-2'nin (5 mm'lik tutucu) tipik bir tepkisini göstermektedir. Cihazın LC devresinin rezonans frekansı 140 MHz olarak ölçülmüştür ($L = 184\text{nH}$ ve $C = 7\text{ pF}$). Devre sıcaklığı ve kavrama yer değiştirmesi (uç açıklığı) alan frekansı 120 W ile 155 MHz sabit çıkış gücünde 0.2 W taranırken aynı anda ölçülmüştür. Alan frekansı rezonans frekansı ile hizalandığında, ölçüm sonuçları 100 °C'lik güçlü bir sıcaklık zirvesi göstermiştir.



Şekil 1.143: Ölçülen devre sıcaklığı ve kavrama açısının alan frekansına karşı değişimi (Yerleşik resimler, kavramanın ilgili frekanslarda uç açıklıklarını göstermektedir).

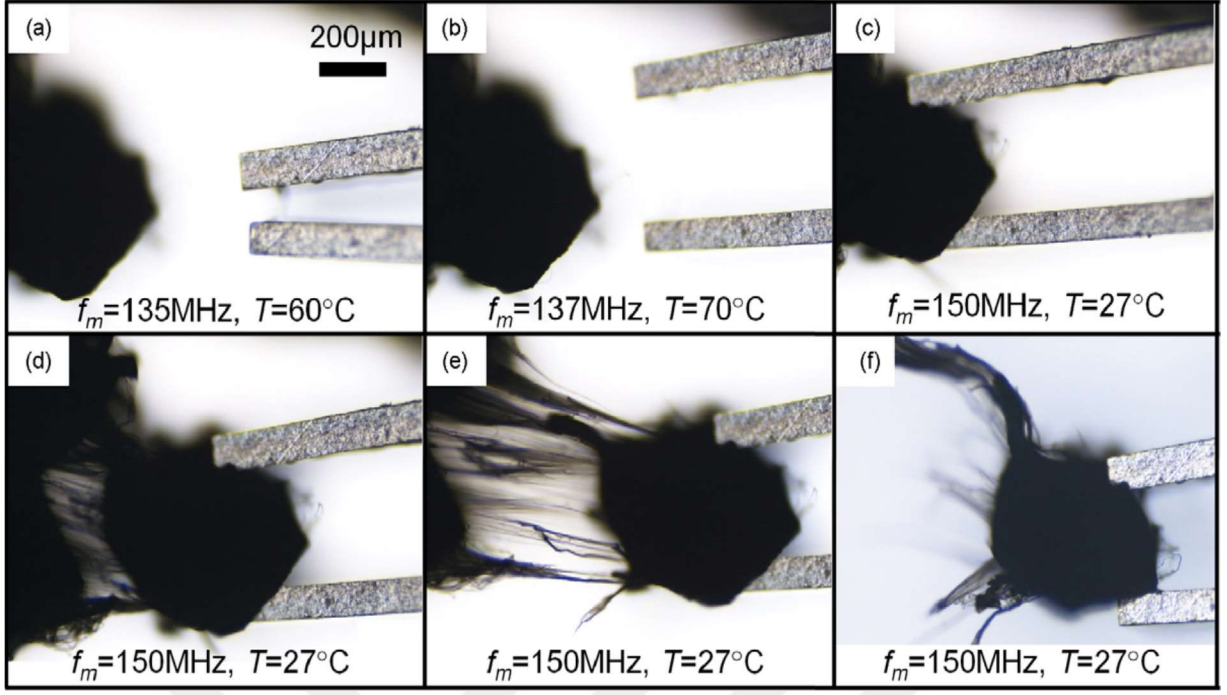
Elde edilen sonuçlar tutucunun sırasıyla yaklaşık 48 ve 37 °C'de aktive ve deaktive edildiğini göstermektedir. Aktif frekans aralığının (bu iki noktadaki alan frekansları arasındaki fark) 13 MHz olduğu ve yaklaşık 92°C'de maksimum 600 mm'lik açılma sağlandığı ve 63°C'de düşmeye başladığı tespit edilmiştir. Sırasıyla A_s , M_f , A_f ve M_s 'ye karşılık gelen bu dört ölçülen sıcaklığın kullanılan malzemenin ölçülen faz geçiş sıcaklıklarından daha yüksek olduğu görülmektedir.

(bkz. Şekil 1.141). Bunun nedeni, sıcaklığın devre üzerinde ŞHA'dan belli bir mesafede ölçülmesidir; tarama yeri ile ŞHA arasındaki ısı kaybı nedeniyle, ŞHA'nın gerçek sıcaklıklarının Şekil 1.143'deki ölçülen değerlerden daha düşük olması öngörülmektedir. Şekil 1.141 ve 1.143'dan gelen sıcaklık değerleri, ısıtıcı devresi ile tutucu arasındaki sıcaklık farkının yaklaşık 27°C (Şekil 1.141'de ölçülen Af ile yukarıda belirtilen Şekil 1.143'deki ilgili sıcaklık arasındaki fark) veya daha düşük olduğu göstermektedir. Şekil 1.144 cihazın tekrarlanan uyarımları, rezonans (140 MHz) 'de 0.2 W çıkış gücü ile harici bir alan kullanılarak gerçekleştirildiğinde tutma uçlarının devrenin sıcaklığını ve açılma mesafesini göstermektedir.



Şekil 1.144: Ölçülen devre sıcaklığı ve tutucu açılma frekansı, devrenin rezonant frekansına hizalanan harici bir RF manyetik alanı ile tekrar eden uyarılarla elde edilmiştir.

Tutucunun RF alanın açılmasından sonra tamamen kapalı olan durumdan (40 °C'de) maksimum 600 mm'lik (94°C'de) açılma zamanını yakalaması yaklaşık 9 saniye sürmüştür. Oysa alan kapatıldıktan sonra tutucunun tam kapalı duruma dönme süresi yaklaşık 5 saniyedir. Eyleyicinin tepki zamanı kullanılan cihazın uyarılması için kullanılan RF çıkış gücüne ve ayrıca kullanılan ŞHA malzemesi (östenitik faz sıcaklığı) de dahil olmak üzere cihaz tasarımı / boyutuna bağlıdır. Şekil 1.145'de tutucu cihazların Karbon Nano Tüp (KNT) orman örnekleri kullanılarak yapılan deneysel çalışmayı göstermektedir.



Şekil 1.145: KNT örnek malzemelere manipülasyon (her görüntüde f_m ve T sırasıyla alan frekansı ve devre sıcaklığıdır). a) KNT malzeme örneğine yaklaşmak, b) f_m 'yi cihazın 140 MHz'lik rezonant frekansına daha yakın ayarlayarak uçları açma, c) Örnek ile temas kurmak ve f_m 'yi 150 MHz'ye kaydırarak eyleyici uçlarını kapatma, d) Örneğin kavranmış kısmını çekme, e) kavranmış örneği çekmeye devam etme, f) Tutucu tarafından kavranarak koparılmış örneğin tutmaya devam edilmesi.

Şekil 1.145 (a) KNT numuneye $\sim 60^\circ\text{C}$ 'lik bir cihaz sıcaklığında 135 MHz'lik bir alan frekansı ile yaklaşan kavrayıcıyı göstermektedir Şekil 1.145 b)'de alan frekansı cihazın rezonant frekansına daha yakın ayarlanarak cihaz sıcaklığı $\sim 70^\circ\text{C}$ 'ye yükseltilir ve tutucu numuneye yaklaştırmaya devam eder. Şekil 1.145 c)'de Tutucu KNT orman örneği ile temas kurmakta ve saha frekansını 150 MHz'ye kaydırarak aygıt sıcaklığını 27°C 'ye düşürerek örneğin bir bölümünü kavramak için uçlar kapanmaktadır. Şekil 1.145 e) ve d) tutucu orman örneğinden bir parça koparmaya devam edene kadar tutmaya devam etmektedir. Şekil 1.145 f) KNT orman örneğinden koparılmış bir parçayı göstermektedir[45].

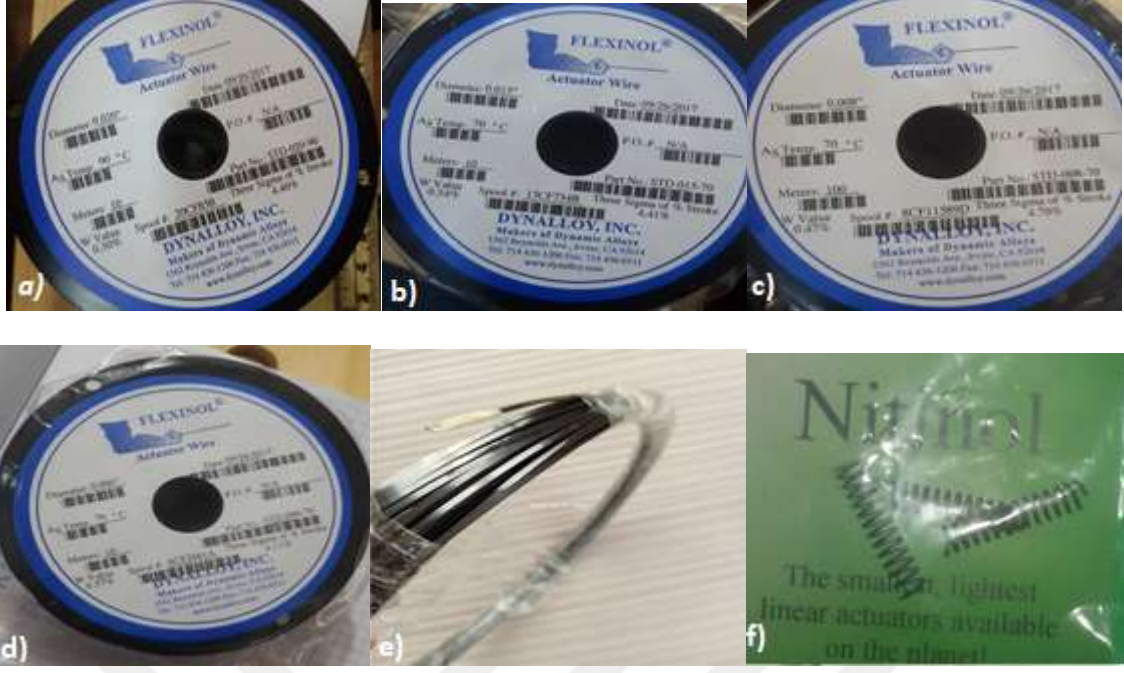
2 Materyal ve Metot

Yapılan literatür araştırmasında ŞHA tabanlı tutucu, kavrayıcı, eyleyici gibi çalışmalar taranmıştır. Bu çalışmalar hem malzeme temininde hem de yapılacak tasarımların çalışma prensipleri ve şekilleri üzerinde etkili olmuştur. Yapılan taramada araştırmacıların bir veya iki tane tutucu üzerinde değişik parametreleri çalıştığı görülmüştür. O nedenle bu tez çalışmasında toplam sekiz tane tutucu hem nikel titanyum malzeme kombinasyonları ile hem de tutucu ağızları açma-kapama yöntemleri açısından çeşitlendirilerek bir araya getirilmiştir. Dolayısı ile hem malzeme seçimi, tasarımı hem de nikel-titanyum malzemeler kullanılarak bu tür eylemlerin çeşitlendirilebileceği umut edilmiştir. Yapılan çalışmalardan başarılı olanlara burada yer verilmiştir. Yapılamayan yada fonksiyonellik açısından yetersiz kalan girişimlerde de sınırlar, kısıtlamalar tespit edilmiş ve gelecek dönem çalışmaları için stratejiler şekillenmiştir.

Tutucuların yerleştirileceği bir kol tasarlanmak istenmiş ve literatürde genellikle soft robotik kısmında yer alan bu çalışmalarda, motorlu, pnomatik tabanlı çalışmalara rastlanmıştır. Nikel-Titanyum Alaşımlar ile kontrol edilen endoskop gibi birden fazla serbestlik derecesine sahip çalışmalara rastlanmıştır. Bu çalışmaların ışığında kontrol açısından farklı bir yaklaşım getirilmek istenmiş ve nitinol teller kablosuz olarak kontrol edilmiştir. Çalışmanın bu kısmında da kısıtlılıklar, sınırlar hakkında bir takım ileri çalışmalara ışık tutacak çıkarımlar elde edilmiştir.

2.1 Malzeme Seçimi

Tasarım ile ilgili çalışmalara başlamak amacı ile Nikel Titanyum alaşımlarından olan ve ticari ismi Nitinol olarak bilinen malzeme formlarından hem şekil hafıza hem de süperelastiklik özelliği olan malzemeler Dynalloy Inc.'dan çapları 0.508 mm, 0.381 mm, 0.2032 mm ve 0.1524 mm çaplarında sırasıyla östenit geçiş sıcaklıkları 90°C, 70°C, 70°C, 70°C olan nikel titanyum teller temin edilmiştir. Kellogg's Research Lab. Şirketinden 0.8x0.16 mm ebatlarında düz nitinol tel ve vücut geçiş sıcaklığına sahip nikel titanyum yaylar temin edilmiştir. Yine aynı firmadan 0.500 mm, 0.750 mm, 1 mm et kalınlıklarında süperelastik ve vücut geçiş sıcaklığına sahip nikel titanyum levhalar satın alınmıştır. İlgili materyaller ile görseller Şekil 2.1' de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 a) 0.508 mm çap, As: 90°C nikel titanyum tel, b) 0.381 mm çap, As: 70°C nikel titanyum tel, c) 0.2032 mm çap, As: 70°C nikel titanyum tel, d) 0.1524 mm çap, As: 70°C nikel titanyum tel, e) 0.8x0.16 mm düz nikel titanyum tel, f) Vücut geçiş sıcaklığına sahip nikel titanyum yaylar.

İmal edilmesi düşünülen tutucular ve tutucu kol gövdesinde kullanılmak üzere et kalınlıkları 1mm olan ve çapları 3 mm, 5 mm, 8 mm olan karbon fiber tüpler temin edilmiştir. Bu malzemenin seçilmesinin nedeni hafif ve mukavemetli olmalarının yanı sıra yalıtkan yüzeye sahip olmasıdır.

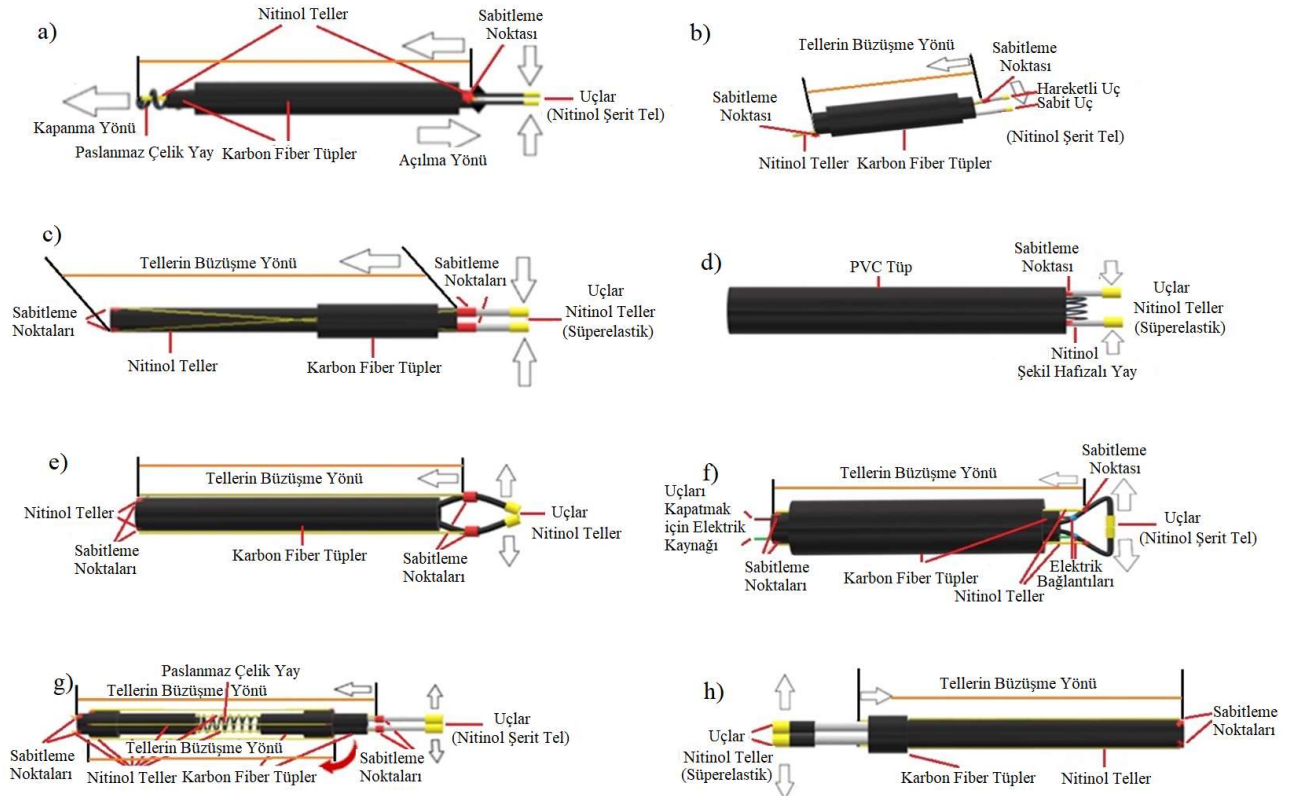
Kontrol devreleri için verici devrede Atmel Atmega 328 8-bit mikro denetleyici, alıcı devrede yine aynı firmanın Atmel Atmega 2560 mikro kontrolörü, haberleşme amacı ile nRF24L01 2.5 GHz. kablosuz haberleşme modülü, nikel-titanyum telleri sürebilmek amacı ile Tip 120, 121, 122, IRF 530 türü MOSFET transistörler, daha kalın çaplı tellerin sürülmesi amacı ile L298N Çift H Köprülü ve IBT2 olarak bilinen 43A'e kadar çıkış akımı sağlayabilen motor sürücüler, kablosuz kontrol amacı ile 2 eksenli joystick temin edilmiştir. Bu malzemelerin kullanımları ile detaylı bilgiler ilerleyen bölümlerde verilecektir.

2.2 Tutucu Tasarımları

Tutucu uçlarının ağız mekanizmaları ve çalıştırma sistemleri, ŞHA tellerinin süper elastik ve şekil hafızası özelliklerini, ayrı ayrı veya birleşik konfigürasyonlarda kullanarak tutma-kavrama ve bırakma görevleri sağlamak için tasarlanmıştır. Küçük nesne kavrama uygulamaları

için 0.18 x 0.80 mm boyutunda nitinol şeritleri kullanılırken, nispeten yüksek kuvvetli kavrama görevleri için 1mm çaplı nitinol telleri kullanılmıştır.

Tasarlanan tutucuların çizimleri ve planlanan çalışma prensipleri Şekil 2.2 (a-h) 'da gösterilmiştir. Şekil 2.2 (a-d)'de görülen tutucular, başlangıç ağız pozisyonları açık olarak tasarlanmıştır. Burada ŞHA malzemeler kullanarak tutucu uçlarını kapatmak, bu kapanma sürelerinin, tekrar başlangıç ağız pozisyonuna dönmek için geçen zaman ve hızların, tutma için üretilen kuvvetin, artan besleme gerilimleri, darbe genişlik modülasyonu görev döngüsü oranları ve frekans sinyallerine göre nasıl bir değişim göstereceğinin tespiti amaçlanmıştır.



Şekil 2.2: Tutucu çizimleri ve çalışma prensipleri. a) Tutucu 1, b) Tutucu 2, c) Tutucu 3, d)

Tutucu 4, e) Tutucu 5, f) Tutucu 6, g) Tutucu 7, h) Tutucu 8.

Şekil 2.2 (e-h)'da gösterildiği gibi, ikinci tutucu grubu, başlangıçta kapalı bir çene konfigürasyonu ile tasarlanmıştır. Bu tutucular tarafından uygulanan tutma kuvveti, kullanılan malzemenin ürettiği kuvvet ile sınırlıdır. Başka bir deyişle, uygulanan kuvvet doğal olarak besleme gerilimi, DGM görev döngüsü oranı ve sinyal frekansından bağımsızdır. Burada amaç kapalı olarak tasarlanan bu tutucu uçlarını ŞHA malzeme veya kombinasyonları kullanarak açmak, açılma zaman ve hızlarını tespit etmek ve bunları birinci grup tutucularda olduğu gibi

artan besleme gerilimleri, darbe genişlik modülasyonu görev döngü oranları ve frekans sinyalleri karşısında nasıl bir değişim gösterdiğini gözlemlemektir.

Tablo 2.1’den görüleceği üzere tüm tutucu tasarımlarında hem gövde hem de tutucu ağızlarının yerleştirildiği bölümlerde karbon fiber malzemeler kullanılmıştır. Bu malzemenin seçim nedeni öncelikle yalıtkan, hafif, sağlam olmaları ve kolay kesilip monte edilebilmeleridir. Tutucu ağızlarını açma-kapama için kullanılan teller Flexinol® LT’dur. Mümkün olan en düşük tel çapı kullanılmak istenmiştir. Tutucu uçları kavrama ve sürtünme kuvveti üreterek daha iyi bir tutunma sağlamaları amacı ile PTFE ile kaplanmıştır.

Tablo 2.1: Tutucu tasarım detayları.

Tutucu No	Gövde Malzemesi	Gövde çapı (mm)	ŞHA Tipi	ŞHA Özellikleri	ŞHA Uzunluğu (mm)	ŞHA Çapı (mm)
1	Karbon Fiber	5	Tel	Flexinol® LT 70°C	150	0.15
2	Karbon Fiber	8	Tel	Flexinol® LT 70°C	100	0.15
3	Karbon Fiber	8	Tel	Flexinol® LT 70°C	400	0.15
4	PVC	12	Yay	Isıl İşlem	5	0.5
5	Karbon Fiber	5	Tel	Flexinol® LT 70°C	100	0.15
6	Karbon Fiber	8	Tel	Flexinol® LT 70°C	50	0.15
7	Karbon Fiber	5	Tel	Flexinol® LT 70°C	150	0.15
8	Karbon Fiber	5	Tel	Flexinol® LT 70°C	100	0.15

Şekil 2.3 a)’da mikro nesneleri tutması için Tutucu 1 tasarlanmıştır. 150 mm boyutlarında ve 5 mm çapındaki karbon fiber tüpün içine 3 mm çapında başka bir karbon fiber tüp yerleştirilmiş bir ucu 0.18 x 0.80 mm nitinol şerit telden uç monte edilmiştir. Diğer ucuna ise bir çelik yay yerleştirilip diğer tüp tabanı ile sabitlenmiştir. İçeride ucun monte edildiği tüpe 150 mm uzunluğunda ve 0.150 mm çapında Flexinol® tel monte edilmiştir. Gerekli elektrik kabloları düzenlenmiştir. Elektrik akımı sayesinde aktivasyon sıcaklığına erişen nitinol telin büzüşme sonucu oluşan hacimsel çekilmenin yarattığı deplasman, tutucu uçlarının monte edildiği 3mm karbon tüpü içeri doğru çekmesi ile kapanma işlemi elde edilmekte ve yayda depolanan enerjinin tellerin soğuması ile beraber tüpü tekrar dışarı doğru itmesi ile birlikte tutucu uçlarının açılma işlemi elde edilmektedir.

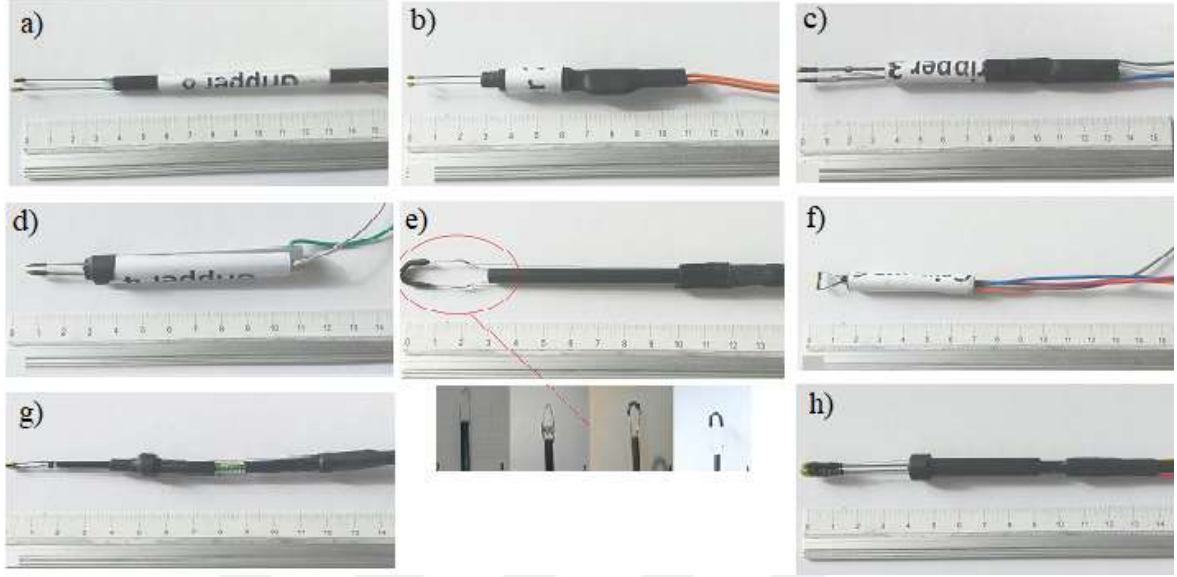
Literatür incelendiğinde tutucuların çalışma prensiplerinde farklı yaklaşımların olduğu görülmüştür. Bunlardan biri de tutucu ağızlarından bir tanesinin sabit olmasıdır. Çalışmanın Tutucular başlıklı kısmından da görüleceği gibi tutulacak nesnenin özelliklerine göre tutucu dizaynı ve tutma stratejisi de değişmektedir. O nedenle; bu çalışmada bir ağız sabit diğer ağız hareketli bu tutucuya yer vermek istenmiştir. Söz konusu tutucu görseli Şekil 2.3 b)’de görülmektedir. Burada 100 mm uzunluğunda ve 0.150 mm çapında Flexinol® süper elastik tel

kullanılmıştır. Dış konstrüksiyon için 8 ve 5 mm çaplarında sırasıyla 25 ve 80 mm uzunluğunda karbon fiber tüpler kullanılmıştır. Uç için U şekline getirilmeden önce 6 mm uzunluğunda şerit süperelastik tel kullanılmıştır. Telin montajı esnasında hareketli ağıza tel bağlantısı tam merkezine yapılamamasından dolayı tutucu ağızı sabit ağızla aynı merkezde buluşamamıştır. Bu sabitleme sorunu nikel titanyum malzemelerin lehim ve kaynak yapılmasının özel gereksinimlere ve metotlara ihtiyaç duyması kadar çalışılan malzemelerin oldukça küçük geometriye sahip olmasından kaynaklanmıştır. Bunun üzerine bu sorunu çözmek için hareketli ağızı tam orta noktadan kavrayan çift kat süperelastik nikel titanyum tel kullanılmıştır. Böylelikle sorun çözülmüştür.

Daha büyük nesneleri tutması amacıyla Tutucu 3 olarak adlandırılan tutucuyu tasarlamak amaçlanmıştır. Uzunlukları 110 mm ve 50 mm ve çapları sırası ile 5 mm ve 8 mm olan karbon fiber tüpler içerisinde 0.150 mm çapında toplam 400 mm uzunluğunda süperelastik Flexinol® teller, 1 mm çapında süperelastik Nitinol telden grinding (taşlama) yolu ile elde edilmiş ağız uçlarına monte edilmiştir. Başlangıç ağız pozisyonu açık olarak tasarlanmıştır. Flexinol® tellerden kontrol devresi ile akım geçirilerek tutucu ağızına bağlı telleri çapraz çektirme yaparak kapalı pozisyona getirmek hedeflenmiştir. Ağız uçlarının başlangıç bölgesinde taşlama ile oldukça inceltelen boyun bölgesi basma esnasında dayanım gösteremediğinden dolayı kuvvet uygulanan yönün tam tersi eksenine esneme yapmıştır. Bu sebep ile hem basma kuvveti üretilmemiş hem de tutulan nesneler iyi kavranamamıştır. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde de deforme olduğundan bu ağız uçlarını kullanmaktan vaz geçilmiş ve yerine yine aynı malzemeden uçları sona doğru konikleşen ve bir yüzeyi düzleştirilmiş bir uç tasarlanmıştır. Uçun ince olması sebebiyle kavrama işlemini daha iyi yapabilmesi amacıyla uçlar diğer mikro tutucu uçlarında olduğu gibi PTFE ile kaplanmıştır. Mikro tutucuya ait görüntü Şekil 2.3 c) 'de paylaşılmıştır.

Çalışmada mikro tutucuların yanında daha makro nesneleri tutabilmek için bu tutucuyu tasarlanmıştır. 80 mm uzunluğunda ve 12 mm çapında plastik boru içine 60 mm uzunluğunda U şekli verilmiş süper elastik tel yerleştirilmiş ve bu telin tam ortasına da çapı 0.5 mm süper elastik nikel titanyum telden 5 mm çapında ve 5 mm uzunluğunda 500 °C 'de 1 saat Ar ortamında ısıl işleme tabi tutularak elde edilen baskı yayı monte edilmiştir. Baskı yayı oda sıcaklığında kapalı olacak şekilde tasarlanmıştır. U şeklinde ağızın ortasına gelecek şekilde plastik tüp borunun içine gömülmüştür. Üzerinden akım geçirildiğinde orijinal şekli olan kapalı pozisyona geçerek tutucu ağızını yani tutucu uçlarını kapatmaktadır. Bu tutucuyu diğer

tutuculardan ayıran fark açma ya da kapama işleminin tel ile değil şekil bellek özelliği kazandırılmış bir yay ile yapılmasıdır. Burada amaç yayın tele göre daha yüksek bir basma kuvveti elde edeceği varsayımıdır. İlgili tutucuya ait görüntü Şekil 2.3 d)'de paylaşılmıştır.



Şekil 2.3: Tutucu görselleri. a) Tutucu 1, b) Tutucu 2, c) Tutucu 3, d) Tutucu 4, e) Tutucu 5, f) Tutucu 6, g) Tutucu 7, h) Tutucu 8.

Tutucu 5’den itibaren bu grup başlangıç ağız uçları kapalı olarak tasarlanmıştır. Uçlar için 0.18 mm x 0.80 mm ebatlarında nikel titanyum alaşımlı şerit tel tercih edilmiştir. Tutucu 5 ait görsel Şekil 2.3 e)’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere kırmızı ile halka ile gösterilen uç çeşitli aşamalardan geçmiştir. İlk resimde tutma, kaldırma ve yeterli basma kuvveti üretmediğinden düzeneğe şekil bellekli yay takılarak basma kuvveti artırılmaya çalışılmıştır. Mikro tutucu ağız yüzeylerinin yeterli büyüklüğe sahip olmamasından ve dolayısıyla kuvvete duyarlı sensör yüzeyine yeterince basmadığı düşünülerek ağız basma yüzeyi arttırılması amacı ile üçüncü resimde gösterildiği gibi mikro tutucu uçlarına Politetrafloretilen (PTFE) kaplanmış bunların içine de 2 mm çapında 3 mm uzunluğunda Neodyum magnetler gömülmüştür. Neodyum magnetler ile yeterli basma kuvveti elde edilmiş fakat bu seferde başlangıç pozisyonları kapalı olan tutucu uçlarını açmak güçleşmiştir. Dolayısı ile magnetler çıkarılarak Şekil 2.3 e)’deki son şekli ile çalışmalara devam edilmiştir. Ağız uçlarının açılmasını sağlamak amacı ile 100 mm uzunluğunda 0.150 mm çapında süperelastik şekil bellek alaşımlı tel kullanılmıştır. Gövde olarak 5 mm çapında karbon fiber tüp kullanılmıştır. Söz konusu mikro tutucunun çalışma prensibi, süperelastik teller üzerinden akım geçirerek ve buna bağlı olarak tellerin belli sıcaklık derecesine (70°) ulaşması ile büzülme (contraction) olarak tabir edilen olayın meydana gelmesi

ile tellerin kısalarak, mikro tutucu ağızlarını çekmesi ve dolayısı ile ağızların açılması üzerine tasarlanmıştır.

Tutucu 6 tasarımında ise nikel titanyum alaşımlarının şekil hafıza ve süper elastiklik özelliklerinin bir arada kullanıldığı bir tutucu üretilmek istenmiştir. Şekil 2.3 f)'de gösterilen tutucu ağız 0.80x0.16 mm ebatlarında, 50 mm uzunlukta şerit süper elastik nitinol şerit telden 500 °C'de 1 saat Ar atmosferinde standart ısıtım işlemi ile aşağıda görünen şekilde tasarlanmıştır. Gövdede 8 mm çapında 50 mm uzunluğunda karbon fiber tüp kullanılmıştır. Oda sıcaklığındaki tutucu uç şekli resimdeki gibi kapalı konumdadır. Tutucunun çalışma prensibini şu şekilde açıklayabilir; kapalı olarak hafızalandırılmış ağız uçları, kendisine monte edilmiş süper elastik Flexinol® tellerden geçen akım yardımı ile açılmaktadır. Tutucu uçlarının kendi üzerinden geçen akım ile ısıtarak yüksek sıcaklık fazındaki hafızalandırılmış şekline geçmeye çalışmakta yani kapanmaktadır.

Tutucu 7 tasarımında, Tutucu 5 ve 6'da olduğu gibi başlangıç ağız pozisyonu kapalı olarak tasarlanıp Flexinol® teller ile açılması planlanmıştır. Fakat diğer iki tasarımdan farklı olarak burada 2.5 mm çapında ve 20 mm uzunluğunda bir yay kullanılmaktadır. Bu yay bir eklem görevi görmekte aynı zamanda hareket ettirilen gövdeyi eski pozisyonuna getirmeye yardımcıdır. Nikel titanyum teller bir birine 120 derece olarak şekilde yerleştirilmiştir. Tellerden akım geçirildiğinde merkezden 3 farklı konuma hareket etmektedir. İlgili görüntü Şekil 2.3 g)'de görülmektedir. Gövde malzemesi diğer tutucu ve mikro tutucularda olduğu gibi karbon fiber tüplerdir. Uzunlukları 40 ve 50 mm ve çapları sırası ile 5 ve 3 mm olan tüpler kullanılmıştır. İnce çaplı tüpe toplam uzunluğu 60 mm olan tutucu uç hazırlanmış ve uçların her iki yanına açmayı sağlayacak 100 mm uzunluğunda 0.150 mm çapında Flexinol® teller yerleştirilmiştir. Özetle nitinol teller tutucu ucunu açarken, 120° açı ile yerleştirilmiş diğer üç nitinol tel tutucu ucunu hareket ettirmeyi amaçlamıştır.

Çalışmada yer alan mikro tutuculara ek olarak daha ağır nesneleri kaldırabilecek ve daha yüksek basma kuvvetine sahip bir tutucu tasarlanmak istenmiştir. Ağız başlangıç pozisyonu Tutucu 5 ve 6'da olduğu gibi kapalı olarak tasarlanmıştır. Çalışma prensibi Tutucu 5'de olduğu gibi 100 mm boyutunda 0.150 mm çapında Flexinol® teller ile ağız uçlarını çektilererek açma üzerine kurgulanmıştır. Yüksek basma kuvveti üretilebilsin diye Tutucu 5'de kullanılan 0.16 mm et kalınlığındaki Nitinol şerit tel yerine 1 mm çapında 50 mm uzunluğunda süperelastik Nitinol tel kullanılmıştır. Bu tellerin uç kısımları PTFE giydirilerek tutucu ağız haline getirilmiştir. Söz konusu Tutucu 8 ait görsel Şekil 2.3 h)'da paylaşılmıştır.

2.3 Kol Tasarımı

Kol tasarımı için hafif ve elektriksel olarak yalıtkan olduğundan dolayı 50 mm çapında ve 1 mm et kalınlığına sahip karbon fiber tüp kullanılmıştır. Kol tasarımının gövde bölgesi 300 mm, baş kısmı ise 100 mm uzunluğunda karbon fiber tüpten oluşmuştur. Kol gövdesi ve baş kısmı arasında 50 mm uzunluğunda bir eklem bölgesi oluşturulmuştur. Bu eklem bölgesi 1 mm çapında et kalınlığına sahip 50 mm çapında, 70 mm uzunluğunda ve 6 sarım sayısına sahip çelik baskı yayı ve bu yayın üzerine giydirilmiş kauçuk körükten oluşmaktadır. Böylelikle robot kol toplamda 450 mm uzunluğa ulaşmıştır. Bu kolun içine 45° aralıklarla dört (4) adet 0.200 mm çapta ve 450 mm uzunluğunda Dynalloy Inc.'dan temin edilen Flexinol® teller boşlukları alınmış şekilde monte edilmiştir. Söz konusu konstrüksiyona ait görüntü Şekil 2.4.'de verilmiştir.



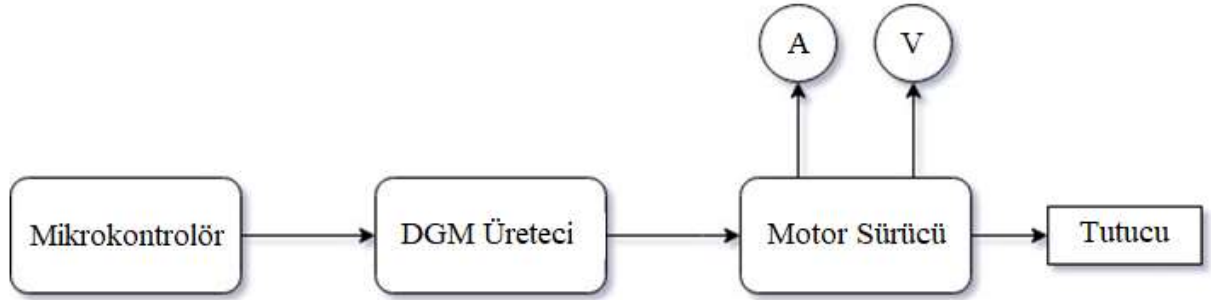
Şekil 2.4: Şekil hafızalı alaşım teller ile kontrol edilen iki serbestlik derecesine sahip kol tasarımı.

Kolun boyun kısmı olarak adlandırılan bölgesine yukarıda bahsedilen tutuculardan bir tanesi yerleştirilmiştir. Çıkarılıp takılabilen bir yapı hedeflenmiştir ancak bu versiyonda boyuna monte edilmiş tutucu sabittir. Tutucu boynunu hareket ettirmek amacı ile detayları aşağıda verilecek alıcı ve verici devreden oluşan bir kontrol devresi kurgulanmıştır. Aynen tutucu uçlarında hareketi sağlayan sistem burada da tutucu boynunu hareket ettirmek ve kontrol etmek amacı ile kullanılmıştır.

2.4 Tutucu Sürücü Devresi

Yukarıda tasarımları hakkında bilgi verilen tüm tutucular aşağıda bahsedilen sürücü devresi ile kontrol edilmeye çalışılmıştır. Şekil bellekli alaşım tellerin zaman içerisinde yorulmasına ve

çevrim sayısının azalmasına yol açan Joule Isıtması yerine kontrollü ısıtma amacı ile Darbe Genişlik Modülasyonu sinyal üretici ile beraber süperelastik tellerin ihtiyaç duyduğu akımı sağlaması amacı ile BTN7960B Mosfet transistörlere sahip 43 Amper (A)' e kadar akım üreten IBT 2 Motor Sürücü kullanılmıştır. Motor sürücü devre TT T-echni-c KXN-3020D ayarlanabilir güç kaynağı ile beslenmiştir. Mikro kontrolör olarak Atmel ATmega328P kullanılmıştır. Mikro kontrolör ve Darbe Genişlik Modülasyonu sinyal üretici 4.5- 12 V ayarlanabilir gerilime sahip 27.4 Watt (W) gücünde ayarlı adaptör ile beslenmiştir. Darbe Genişlik Modülasyonu sinyal üreticiden elde edilen 10 Hertz (Hz) 'den 150 kHz'e kadar olan sinyaller, çeşitli Darbe Genişlik Modülasyonu doluluk oranlarında mikro tutucu üzerinden geçirilmiştir. Mikro tutucu üzerine düşen ortalama gerilim ve ortalama akım değerleri sırası ile voltmetre ve ampermetre ile ölçülmüştür. Çalışmaya ait söz konusu blok diyagramı aşağıda Şekil 2.5'de verilmiştir.

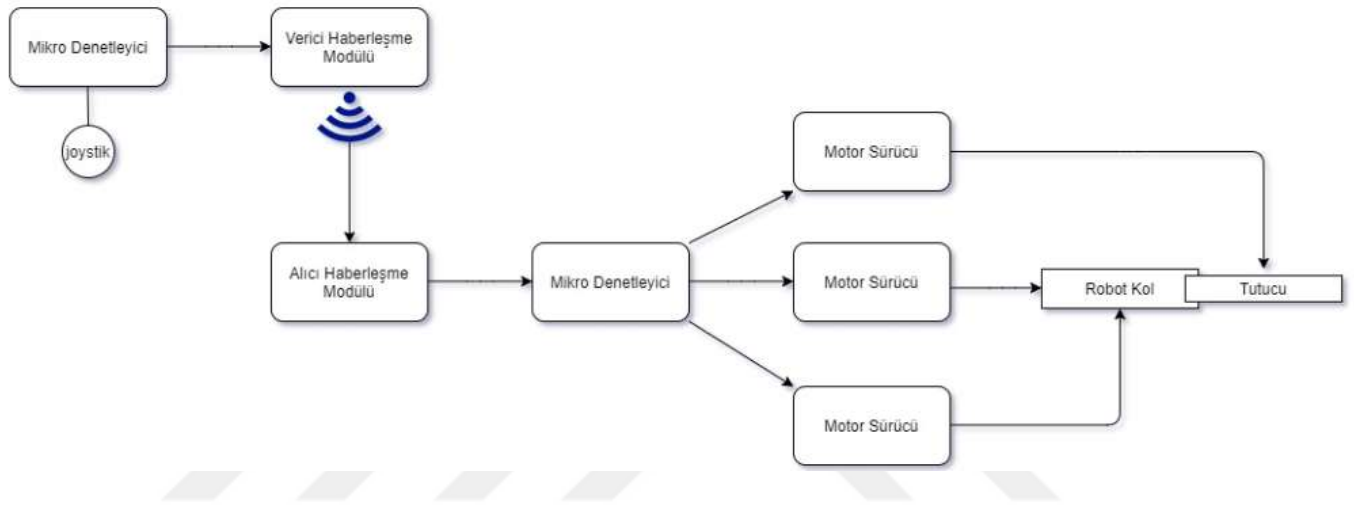


Şekil 2.5: Mikro tutucunun kontrolüne ait blok diyagramı.

2.5 Kol Sürücü Devresi

Kablosuz olarak kontrol edilmesi amaçlanan robotik kol için alıcı ve verici olmak üzere iki devre tasarlanmıştır. Verici devreden gelen bilgileri işleyip tutucu ve kolun temel hareketlerinin alınacağı alıcı devrede Atmel Atmega 2560 mikro kontrolör tercih edilmiştir. Atmega 328 kullanılmamasının sebebi burada daha fazla bileşen olduğundan dolayı daha fazla analog ve dijital pinlere ihtiyaç duyulmasıdır. Nikel titanyum teller harekete geçirmek için yaklaşık olarak 1A ihtiyaç duyulması ve Atmega kontrolörün pin başına 40 mA vermesi sebebiyle mosfet türü transistör kullanma ihtiyacı duyulmuştur. Bu sebeple Tip 120, 121, 122, IRF 530 türü transistörler ile belirli uzunlukta ve çapta teller sürülmüştür. Fakat aynı anda iki farklı teli kontrol etmeye olanak sağlayan L298N Çift H Köprülü motor sürücüler kullanılmıştır. Bu motor sürücüler çıkış başına 2A kadar desteklediklerinden yeterli kontrol akımını sağlamışlardır. Dolayısı ile proje kapsamında yüksek akım değerlerine ihtiyaç duyulabileceği

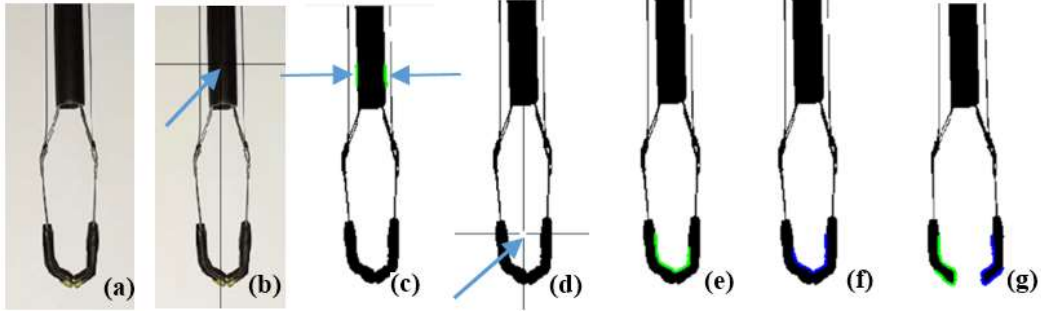
düşünülerek temin edilen IBT2 olarak adlandırılan ve 43 A kadar akım sağlayan motor sürücülere kol tasarımında ihtiyaç duyulmamıştır. Kablosuz haberleşmeyi sağlamak için ise ucuz bir çözüm olan nRF24L01 2.5 GHz kablosuz haberleşme modülü tercih edilmiştir. Bu devrenin kontrol için gerekli olan ve Ek-1’de alıcı devre kod yazılımı mikro kontrole gömülmüş ve alınan komutları yerine getirmiştir. Verici devrede Atmel Atmega 328 8-bit mikro denetleyici, nRF24L01 2.5 GHz. kablosuz haberleşme modülü ve 2 eksenli joystick kullanılmaya karar verilmiştir. Bu devrenin kod komutları Ek-2’de verilen şekli ile mikro denetleyiciye yüklenmiştir. Şekil 2.6’da alıcı ve verici devrenin blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 2.6: Kablosuz robot kolun kontrolüne ait blok diyagramı.

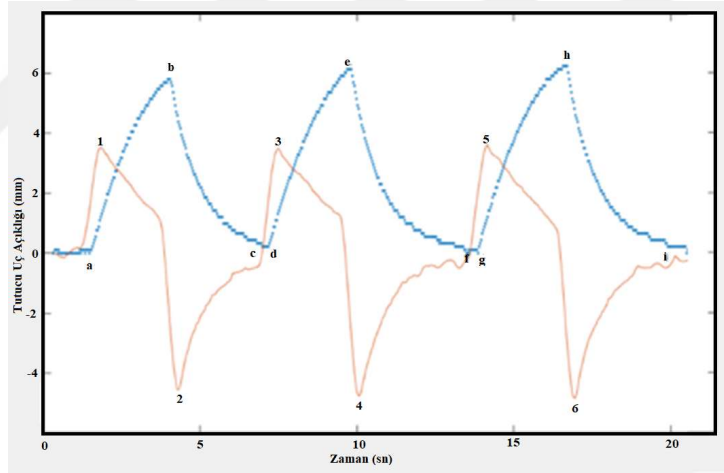
2.6 Tutucu Uçları Açılma Miktarı, Açılma-Kapanma Ortalama ve Anlık Hızlarının Tespiti

Mikro tutucu uçlarının ağız açıklık miktarlarına artan doluluk oranlarının etkisini görmek amacı ile 13 Mega Piksel (MP), 1080p, 30 fps çözünürlüğe, 28 mm lens ve f/1.9 diyafram açıklığına sahip kamera ile mikro tutucu uçlarına farklı besleme gerilimlerinde, frekans değerlerinde ve Darbe Genişlik Modülasyonu sinyal doluluk oranlarında işlem yapılırken 160 mm uzaklıktan video görüntüleri alınmıştır. Alınan bu görüntüler MatLab R2017b ara yüzünde görüntü işleme modülü ile mikro tutucu ağız uçlarının açıklığı (mm), ortalama açılma ve kapanma hızları (mm/sn) ve de anlık açılma kapanma hızları (mm/sn) hesaplanmıştır. Aşağıda Şekil 2.7’de görüldüğü üzere MatLab yazılımı ile tutucu uçlarının sınırları tespit edilmektedir. Buradan elde edilen verilerden ise Şekil 2.8’de görülen eğriler elde edilmiştir.



Şekil 2.7: Görüntü İşleme tabanlı tutucu ağız açıklığı ölçümü a) boyun spesifikasyonu, b) boyun ile kalibrasyon, c) çene spesifikasyonu, d) açık pozisyon için sol-sağ çene sınır izleme, e) sol çene sınır izleme, f) sağ çene sınır izleme - kapalı tutucu pozisyonu için.

Burada mavi renk ile görülen ve köpek balığı yüzgecine benzeyen eğrilerden her biri 1 periyot açma ve kapama çevrimini içermektedir. Çalışmada üç çevrim uygulanmıştır ve tüm hesaplamalarda bu üç çevrimin ortalaması alınmıştır. Burada a ve b noktalarının x eksenindeki verileri açma zamanını, b noktasının y ekseninde elde edilen veri ise maksimum ağız açıklığını vermektedir. Kapanma süresinin tespitinde ise b ve c noktalarının x ekseninde elde edilen verileri kullanılmıştır. Buraya kadar olan kısım 1. çevrimi oluşturmaktadır.



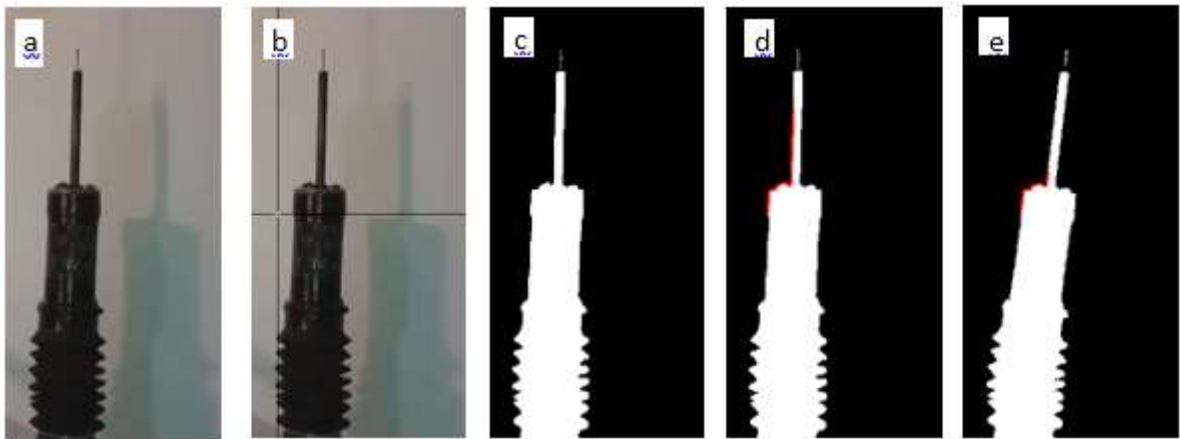
Şekil 2.8: MATLAB Görüntü İşleme ile tutucu uç ağız açıklığı ölçümü.

Grafikte görüldüğü gibi diğer noktalarda geri kalan 2 çevrimi göstermektedir. Buradan açma zamanı için a-b, d-e, g-h kapama zamanı için ise b-c, e-f, h-i noktalarından elde edilen verilerin ortalaması alınmıştır. Maksimum ağız açıklığı için ise köpek balığı yüzgecine benzeyen eğrilerin tepe noktaları olan b, e, h 'ın y ekseninde okunan değerlerin ortalaması alınmıştır. Kırmızı renkle elde edilen eğriler ise açma ve kapama zamanlarına ait anlık hızları göstermektedir. Buna göre; 1, 3, 5 açma anında, 2, 4, 6 ise kapanma işlemi esnasında kayıt edilen maksimum anlık hız değerini vermektedir. Açma ve kapama işlemlerinin ortalama hızını

bulmak için ise açma ve kapama anında kat edilen mesafe ve zaman verilerine sahip olduğu için $V=d/t$ denklemi kullanılmıştır. Üç ayrı çevrimden ayrı ayrı elde edilen açma ve kapama hızlarının ortalaması alınarak bu değerler hesaplanmıştır. İlgili MatLab Kodu Ek-3'de paylaşılmıştır.

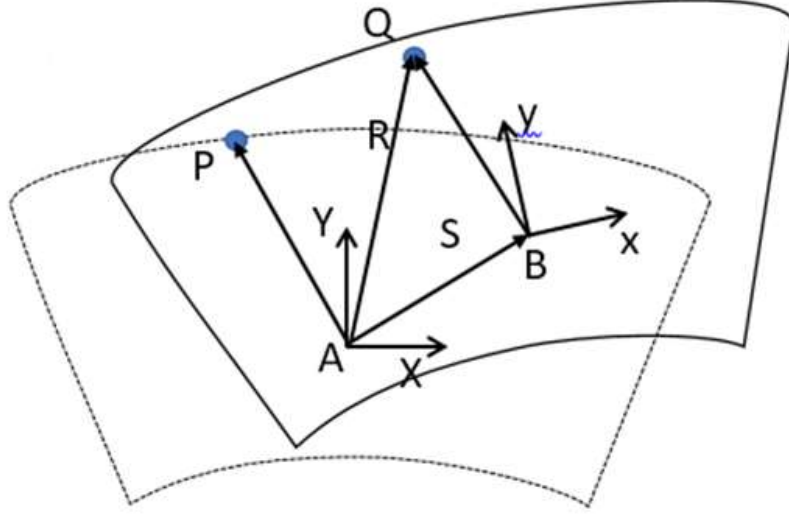
2.7 Robot Kol Boynun Orjin ile Yaptığı Eksenel Açı Miktarlarının Tespiti

Mikro tutucu uçları ile ilgili verilerin tespitinde kullanılan görüntü işleme modelinin kol boynun eksen ile yaptığı açığı hesaplamak amacı ile 13 Mega Piksel (MP), 1080p, 30 fps çözünürlüğe, 28 mm lens ve f/1.9 diyafram açıklığına sahip kamera ile robot kol boynu sırası ile 30, 40, 50 DGM Görev Döngü oranlarında x, -x, y, -y eksenlerinde çalıştırılıp 600mm yükseklikten video görüntüleri alınmıştır. Alınan bu görüntüler MatLab R2017b ara yüzünde görüntü işleme modülü ile her bir eksende yaptıkları açı değerleri ve bunların değişimleri hesaplanmıştır. Şekil 2.9 (a-e)'de Görüntü İşleme prosesinin görüntüsü verilmiştir. Kol videosunda ilk frame okunduktan sonra (Şekil 2.9a) , kullanıcı kol boynuna yakın bir yerden bir başlangıç noktası belirledikten (Şekil 2.9b) sonra matlab algoritması, resmi önce siyah beyaza dönüştürmek üzere önceden ortama göre hazırlanmış maske filtreden geçirmektedir (Şekil 2.9c). Yatay yönde tarama yaparak kol üzerinde siyah beyaz pixel intensity geçişinden istifade ederek bir başlangıç pikseli bulmaktadır. Ardından kullanıcı tarafından belirlenen sayı kadar örnekleme yaparak kol sol bölgesinde 200 adet pikselin koordinat bilgisini çıkarmaktadır (Şekil 2.9d). Ardından matlab algoritması videoyu oluşturan sonraki her frame için önce siyah beyaza dönüştürme ve ilk adımda kullanıcının belirlediği noktadan başlayarak tarama yapıp kol sol bölgesinden $200/2=100$ adet piksel örnekleme yapmaktadır.



Şekil 2.9: a-e) Robot kol boynunun eksen ile yaptığı açının MATLAB Görüntü İşleme ile ölçümü.

Aşağıda S merkezinde A koordinat sistemi bulunan bir obje S vektörü kadar öteleme ve θ açısı kadar dönme hareketi yaptığında merkezi B noktasına kadar kaymış ve koordinat sistemi θ kadar dönmüş olacaktır. Parçanın başlangıç pozisyonunda çevresi üzerinde bulunan bir P noktası, öteleme ve dönme hareketleri sonrasında Q koordinatlarına yerleşmiş olsun.



Şekil 2.10: a) Objeye başlangıç pozisyonu ve öteleme, dönme sonrası konumu, b) Referans ve dönmüş obje kontur noktalarının eşleştirilmesi.

Bu durumda obje üzerinde herhangi bir Q noktasının pozisyonu aşağıdaki denklem ile yazılabilecektir.

$$Q_A = S + Q_B \quad \text{Denklem 56}$$

Burada Q_A , Q noktasının A koordinat sistemine göre konum vektörü, Q_B , Q noktasının B koordinat sistemine göre konum vektörü, S vektörü, B koordinat sistemi merkezinin A ya göre konum vektörünü göstermektedir.

Yukarıdaki vektörel denklem matris formunda yazılırsa;

$$Q_A = {}^A T_B Q_B \quad \text{Denklem 57}$$

Şeklinde olacaktır. Burada ${}^A T_B$, B koordinat sisteminden A koordinat sistemine göre taşıma matrisini göstermektedir.

$${}^A T_B = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & x \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Denklem 58}$$

Denklem daha açık haliyle yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} {}^A Q_x \\ {}^A Q_y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & x \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B Q_x \\ {}^B Q_y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Denklem 59

Burada $\begin{bmatrix} {}^A Q_x \\ {}^A Q_y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, Q noktasının A koordinat sistemine göre koordinatlarını göstermektedir.

$\begin{bmatrix} {}^B Q_x \\ {}^B Q_y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ ise Q noktasının B koordinat sistemine göre koordinatlarını göstermektedir.

Ayrıca şu da bilinmelidir ki aslında $\begin{bmatrix} {}^B Q_x \\ {}^B Q_y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ koordinatları, parçanın merkezine göre koordinat bilgisini göstermekte olur P vektörüne eşdeğerdir.

$$\begin{bmatrix} {}^B Q_x \\ {}^B Q_y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A P_x \\ {}^A P_y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Bu durumda yukarıdaki denklem yeniden yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} {}^A Q_x \\ {}^A Q_y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & x \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^A P_x \\ {}^A P_y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Denklem 60

Burada bilinmeyenler Taşıma matris elemanları θ , x ve y dir. Taşıma matrisini daha sade bir hale getirmek için matris elemanları 4 bilinmeyen şeklinde yeniden yazılabilir.

$$a = \cos \theta$$

$$b = \sin \theta$$

$$c = x$$

$$d = y$$

$$\begin{bmatrix} {}^A Q_x \\ {}^A Q_y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & -b & 0 & c \\ b & a & 0 & d \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^A P_x \\ {}^A P_y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Denklem 61}$$

Yukarıdaki denklem açılırsa;

$${}^A Q_x = a {}^A P_x - b {}^A P_y + c \quad \text{Denklem 62}$$

$${}^A Q_y = b {}^A P_x + a {}^A P_y + d$$

Bu denklemlerde bilinmeyen a,b,c, ve d olduğundan bu bilinmeyenlere göre denklemler yeniden matris formunda yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} {}^A Q_x \\ {}^A Q_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A P_x & -{}^A P_y & 1 & 0 \\ {}^A P_y & {}^A P_x & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} \quad \text{Denklem 63}$$

$$F = \begin{bmatrix} {}^A P_x & -{}^A P_y & 1 & 0 \\ {}^A P_y & {}^A P_x & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Denklem 64}$$

Burada çözüm için kare olmayan katsayı matrisinin tersi

$$F^{-1} = F^T (FF^T)^{-1} \quad \text{Denklem 65}$$

Şeklinde elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A P_x & -{}^A P_y & 1 & 0 \\ {}^A P_y & {}^A P_x & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} {}^A Q_x \\ {}^A Q_y \end{bmatrix} \quad \text{Denklem 66}$$

Bu denklem tek bir nokta için yukarıdaki formda yazılacaktır.

Yukarıdaki denklem pek çok nokta için yazılmak istendiğinde aşağıdaki denklem elde edilecektir. Bu denklemin optimum çözümü least-squares algoritmasıyla elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ({}^A P_x)_1 & -({}^A P_y)_1 & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ ({}^A P_x)_i & -({}^A P_y)_i & 1 & 0 \\ ({}^A P_y)_1 & ({}^A P_x)_1 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ ({}^A P_y)_i & ({}^A P_x)_i & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} ({}^A Q_x)_1 \\ \vdots \\ ({}^A Q_x)_i \\ ({}^A Q_y)_1 \\ \vdots \\ ({}^A Q_y)_i \end{bmatrix} \quad \text{Denklem 67}$$

Son olarak bilinmeyenler aşağıdaki denklem sistemiyle çözülebilecektir.

$$\theta = \arccos(a)$$

$\theta = \arcsin(b)$ (ikinci hesap kontrol amaçlı kullanılabilir veya sin ve cos açı bölgesi belirlemede kullanılarak bölge düzeltilmesi yapılabilir. Böyle bir durum 90° yi geçen dönme durumlarında ortaya çıkacaktır. Böyle bir durumda;

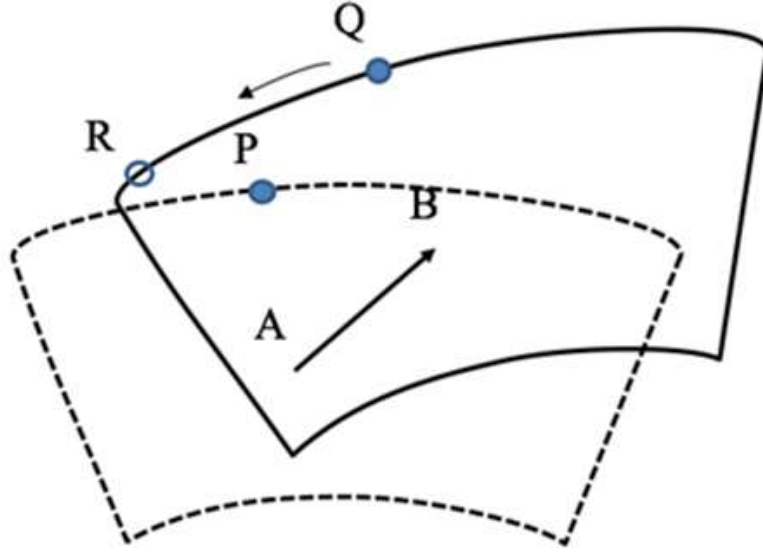
$$\theta = \arctan2(b, a) \text{ şeklinde açı bölgesini dikkate alan bir çözüm ile ilerlenebilir.}$$

Aksi taktirde $0-90^\circ$ arası dönme durumunda böyle bir problem olmayacaktır.

$$x = c$$

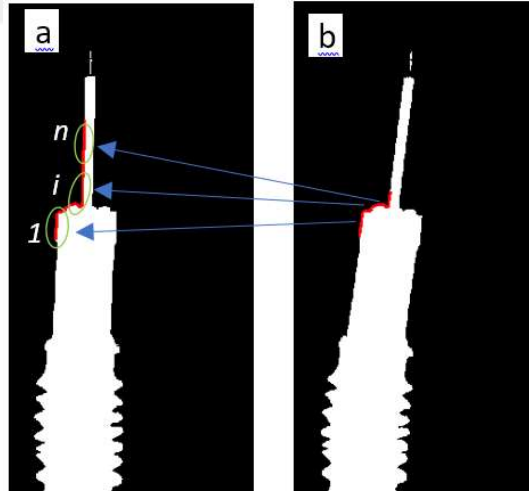
$$y = d$$

Objenin başlangıç pozisyonunda kontur noktalarının koordinat bilgisi $\vec{P}_i$ dizisi ve taşıma işleminden sonra $\vec{Q}_i$ dizisi ile gösterilsin. Ayrıca başlangıç A pozisyonunda kontur üzerindeki P noktasının taşıma sonrası Q noktasına geldiği kabul edilirse bu iki dizi için yukarıdaki denklemler çözüldüğünde x,y ve θ bilinmeyenleri elde edilebilir. Fakat her zaman bu ideal durum söz konusu olmayabilir. Parça görüntü elde edilip kontur dizisi çıkarıldıktan sonra dizi başlangıcı R noktasına kaymış olabilir. Bu durumda başlangıç noktalarını karşılaştırmak gerekmektedir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11: Referans ve dönmüş obje kontur noktalarının eşleştirilmesi.

Dönmüş kol üzerinden örneklenmiş noktalar, referans kol üzerinde aynı sayıda nokta ile dönme algoritmasına tabi tutulmaktadır. Bu işlem referans kontur noktalarında kaydırma yapılarak farklı bölgelerdeki nokta setleri ile iteratif bir şekilde tekrarlanmaktadır. Bu iterasyonlardan minimum taşıma hatasını veren nokta setleri aynı bölgeyi temsil ediyor olarak kabul edilip buna karşı gelen açı en doğru dönme açısı olarak kabul edilmektedir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12: Kol kontur noktalarının eşleştirilmesi.

Bunun için $\min (P_A - {}^A T_B R_B)$ şartını sağlayan R_B dizisinin Q_B dizisine denk olduğu kabul edilerek bir optimizasyon döngüsü kurulmuştur (Şekil 2.13). Böylece minimum hatayı veren durum için açı dönme miktarı olarak kabul edilir. $\min(\delta_i)$ değerini veren $R_B \equiv Q_B$ olarak kabul edilmektedir. Burada k kontur dizi boyutunu göstermektedir.

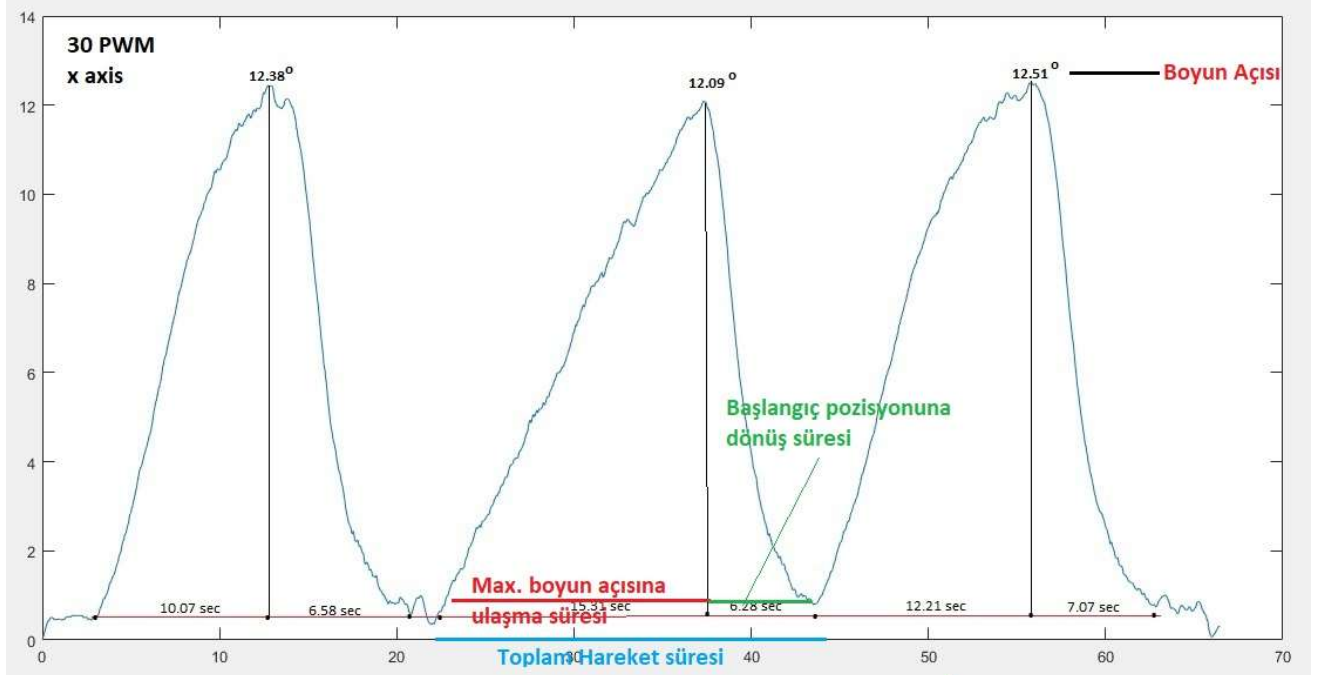
```

k=size(contour)
for i = k
:
θ = atan2(b,a)
x= c
y= d
εi = (PA - ATB RB)
δi = Σ (Σ εi2);
i=i+1
end

```

Şekil 2.13: Kontur nokta eşleştirme algoritması.

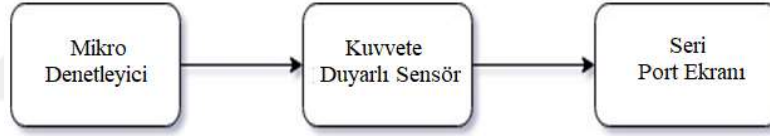
Şekil 2.14’de MatLab algoritması sonucunda tutucu kolun video hareketlerinden elde edilmiş grafik görülmektedir. Bu grafikte; x eksen yönünde %30 DGM görev döngü oranında tutucu kolun bu eksene yaptığı açısal hareket miktarı, açısal harekete erişme zamanı ve tekrar 0° koordinat sistemine dönüş zamanları görülmektedir. Çalışmaya ait MatLab Görüntü İşleme algoritmasına ait yazılım Ek-4’de verilmiştir.



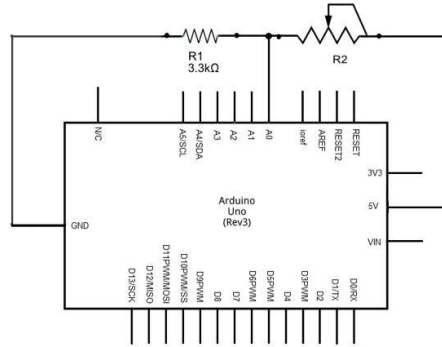
Şekil 2.14: MatLab Görüntü İşleme modülü algoritmasından sonra kolun açısal hareketlerini gösteren grafik

2.8 Tutucuların Ürettiği Basma Kuvvetinin Ölçümü

Tutucuların tutma kabiliyetinin ölçülmesi amacı ile ağırlıkları bilinen nesneler mikro tutucu ile tutulmuştur. Tutma kuvvetini ölçmek amacı ile kuvvete duyarlı direnç sensörü kullanılmıştır. Buradan da mikro tutucunun tuttuğu nesne üzerine uyguladığı kuvvet Newton (N) ve gram (gr) cinsinden büyüklük olarak ölçülmüştür. Mikro tutucu tutma davranışlarının ölçülebilmesi amacıyla Interlink Electronics firmasından edilen 5 mm çapında dairesel kuvvete duyarlı sensör kullanılmıştır. Bu sensöre ne kadar çok kuvvet uygulanırsa o kadar düşük direnç değerleri elde edilmektedir. Kuvvete Duyarlı Sensöre (KDS) hiçbir basınç yani kuvvet uygulanmadığında direnci $1M\Omega$ ’ dan fazla olacaktır. Eğer çok yüksek bir kuvvet uygulandığında bu değer $2.5k\Omega$ düşecektir. KDS ve başka bir direnç gerilim bölücü oluşturularak, mikro denetleyici ADC girişi ile okunabilen değişken bir voltaj çıkışı oluşturulabilmektedir. Bunun için statik bir dirence ihtiyaç duyulmaktadır. Bu direncin değeri ne KDS’nin direncinin üst seviyesinden ne yukarıda ne de altında olması gerekmektedir. O nedenle $3.3k\Omega$. gibi bir statik direnç tercih edilmiştir. Söz konusu devreye ait devre diyagramı ve şematiği Şekil 2.15 ve Şekil 2.16’de ayrı ayrı gösterilmiştir.



Şekil 2.15: Kuvvete Duyarlı Sensöre ait (KDS) blok diyagramı.



Şekil 2.16: Kuvvete Duyarlı Sensöre ile yapılan çalışmanın ait devre şematiği.

Kuvvete duyarlı sensörün dairesel bölgesinin tam ortasına gelecek şekilde mikro tutucu yerleştirilmiş ve yukarıda gösterilen devre diyagramı ile sürülmüştür. Devre on kez açılıp kapatılmış ve mikro kontrolörün seri port ekranından elde edilen değerler okunup ortalaması alınmıştır. Ek-5’de KDS ile yapılan ölçüme ait kod yazılımı paylaşılmıştır.

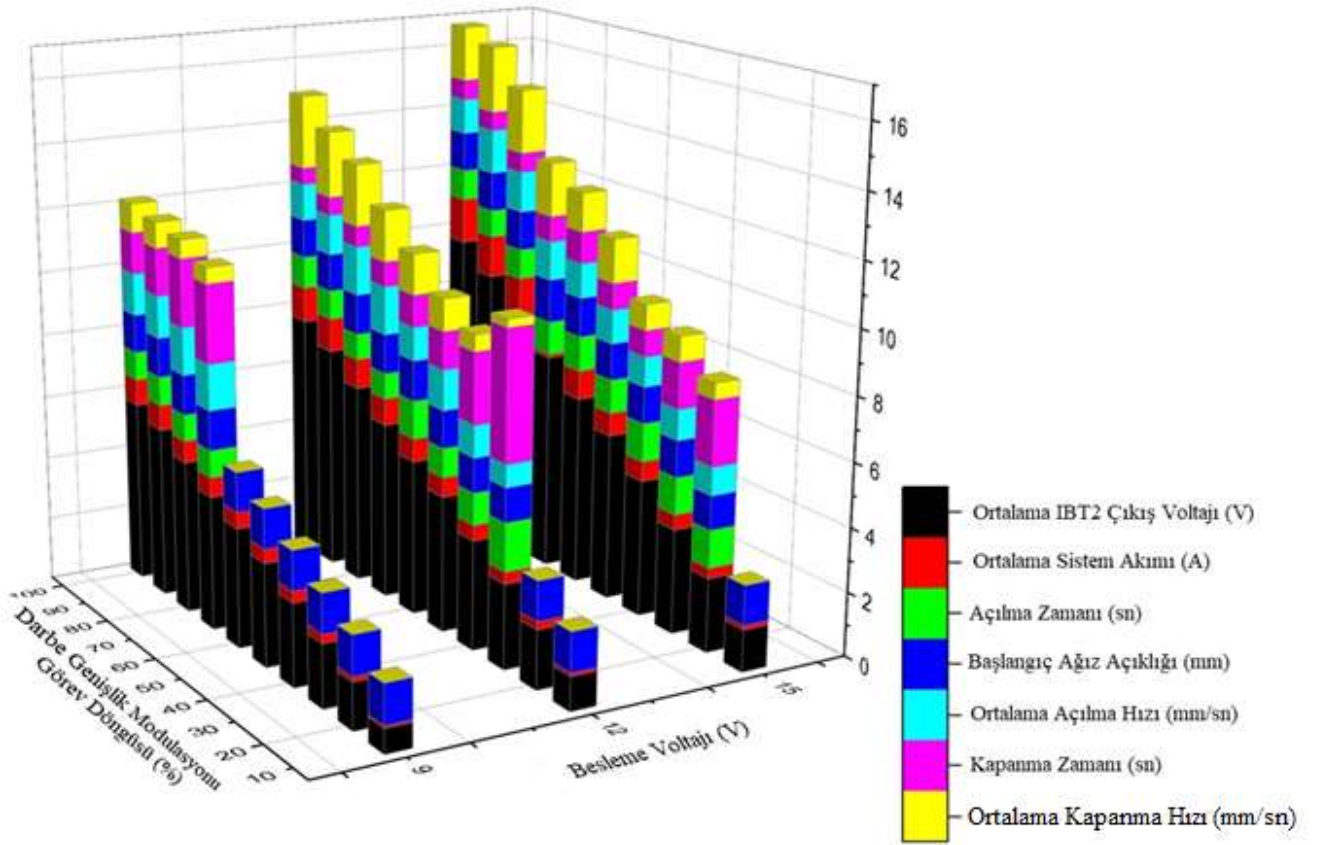
3 Deneysel Çalışmalar

3.1 Artan Besleme Gerilimi ve Darbe Genişlik Modülasyon Doluluk Oranlarının Tutucu Parametrelerine Etkisi

Başlangıç pozisyonu açık ve kapalı olarak tasarlanan mikro tutucuların açılma ve kapanma hızlarına etki edecek parametreler sürücü devre besleme voltajı, dolayısı ile akımı, Darbe Genişlik Modülasyonu doluluk oranları, Darbe Genişlik Modülasyonu sinyal frekansları ve sıcaklık olabileceği düşünülerek deneyler bu parametreler göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Şekil bellekli alaşımların faz dönüşümleri sıcaklığın bir fonksiyonu olduğundan dolayı çalışmalar 22° C sabit oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Böylelikle değişkenlerden en önemli parametre olan sıcaklık sabit tutularak diğer değişkenleri etkileme potansiyeli en aza indirilmeye çalışılmıştır. Sürücü devre beslemesi 6, 9, 12, 15 ve 18 V olarak belirlenmiştir. Bu besleme gerilim değerinde önce Darbe Genişlik Modülasyonu sinyal üreticiden elde edilen frekans sabit tutularak %10 Darbe Genişlik Modülasyonu doluluk oranından başlayarak 10'nun katları olacak şekilde tam doluluk oranına kadar olan doluluklar çalışılmıştır. Daha sonra her bir doluluk oranında Darbe Genişlik Modülasyonu sinyal jeneratöründen elde edilen 10 Hz frekans değerinden, sinyal jeneratörünün en yüksek frekans değeri olan 150 kHz frekans değerinde mikro tutucu uçlarının açılma ve kapanma performanslarını tespit edebilmek amacı ile gerilim ve akım değerleri ölçülmüştür. Aynı zamanda MatLab Görüntü İşleme Modülünde mikro tutucu uçlarının açılma ve kapanma ortalama hızlarının hesaplanabilmesi ve de ağız açıklığının ölçülmesi için görüntüler kayıt edilmiştir. Videoların işlenip elde edilen grafiklerden elde edilen çıkarımlar tüm tutucular için aşağıda sıralanmıştır.

Başlangıç ağız pozisyonu açık olarak tasarlanan Tutucu 1 için 9, 12, 15V besleme gerilimi çalışılmıştır. Bu besleme gerilimlerinde sırası ile %70, 30, 20 DGM doluluk oranlarından sonra tutucu uçlarında hareket görülmüştür. Artan besleme gerilimi ile sürücü çıkışı ortalama akım ve gerilim değerleri artmıştır. Artan besleme gerilimi ve DGM doluluk oranlarında tutucu uçlarının kapanma süreleri azalmıştır. Tutucu uçların açılma süreleri 9 ve 12V besleme geriliminde artan doluluk oranları ile değişmemiştir. Genellikle 1 sn. civarında gerçekleşmiştir. 15V besleme geriliminde bu süre 1 saniyenin biraz üzerinde seyretmiştir. 9V besleme geriliminde kapanma süresi açılma süresinden uzun sürmüştür. 12 ve 15V besleme geriliminde ise sırası ile %50 ve 30 DGM doluluk oranlarından sonra tutucu uçlarının kapanma süreleri

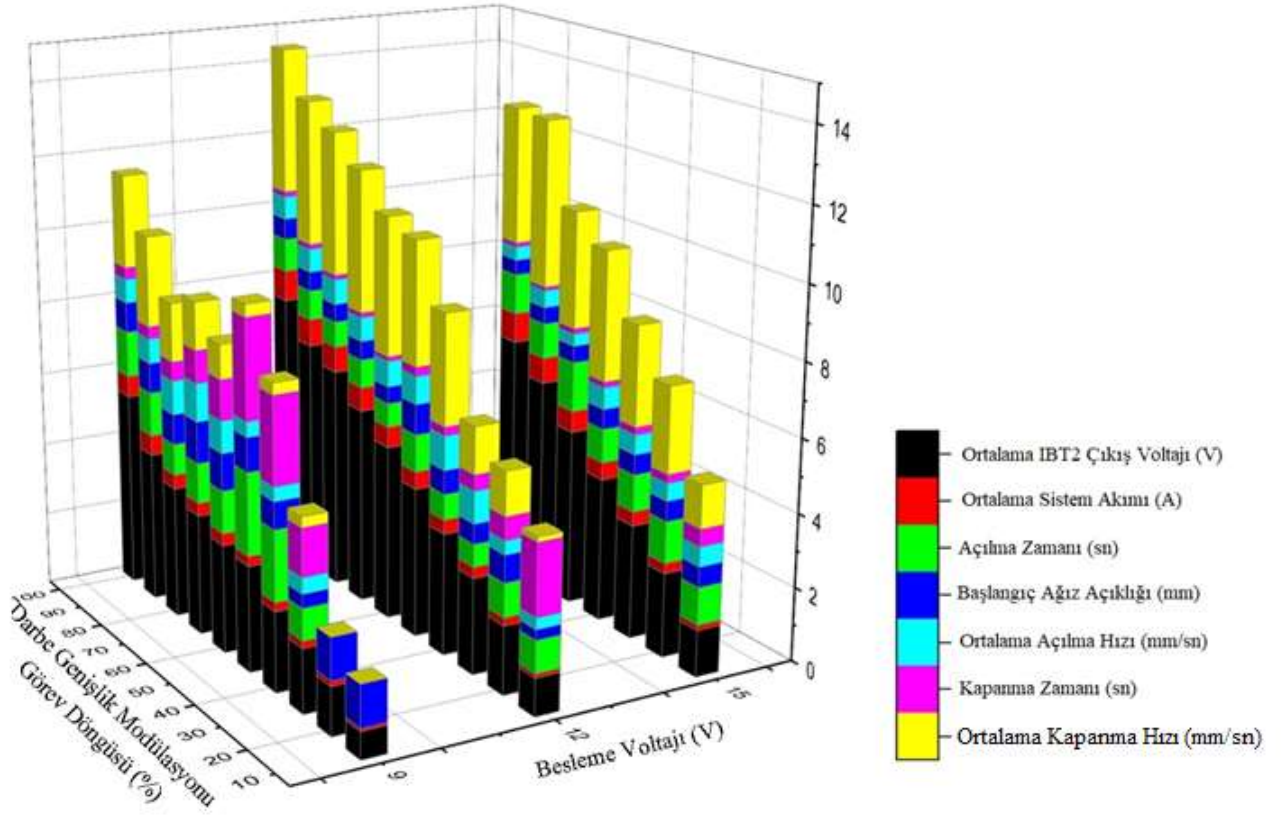
açılma sürelerinin altına inmiştir. Artan besleme gerilimleri ve DGM doluluk oranları ile beraber tutucu uçların kapanma ortalama hızları artmıştır. 9V besleme geriliminde kapanma ortalama hızları açılma hızlarından yavaş seyretmiştir. Diğer iki besleme geriliminde %50 DGM doluluk oranından sonra kapanma ortalama hızları açılma hızlarının önüne geçmiştir. Açılma ortalama hızları 9V besleme geriliminde 1.5 mm/sn. altında gerçekleşmiştir. 12 ve 15V besleme geriliminde açılma ortalama hızları başlangıç doluluk oranlarında daha yavaş gerçekleşip artan doluluk oranları ile beraber 1.5 mm/sn. hızlarına ulaşmıştır. Tutucu 1'e ait veriler Şekil 3.1'de verilmiştir. Ayrıca tutucuya ait 9, 12, 15V besleme geriliminde ortalama çıkış gerilim-akım, ağız kapanma süresi, ortalama ağız kapanma- açılma hızlarına ait detayları gösteren tablo ve grafikler Ek-6'da verilmiştir.



Şekil 3.1: Tutucu 1'e ait 9, 12 ve 15V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.

Tutucu 2 için deneysel çalışmalar sırası ile 9, 12, 15V besleme gerilimlerinde yapılmıştır. Bu besleme gerilimlerinde ağız hareketleri, 9 V'da %30 DGM doluluk oranından sonra, 12V'da tüm doluluk oranlarında, 15V'da ise %80 DGM doluluk oranına kadar görülmüştür. Bu oranın üstünde yüksek akım yoğunluğundan dolayı tutucu uçlarını kontrol etmek mümkün olmamıştır. Sürücü devrenin çıkış ortalama gerilim ve akım değerleri artan besleme gerilimleri ve DGM

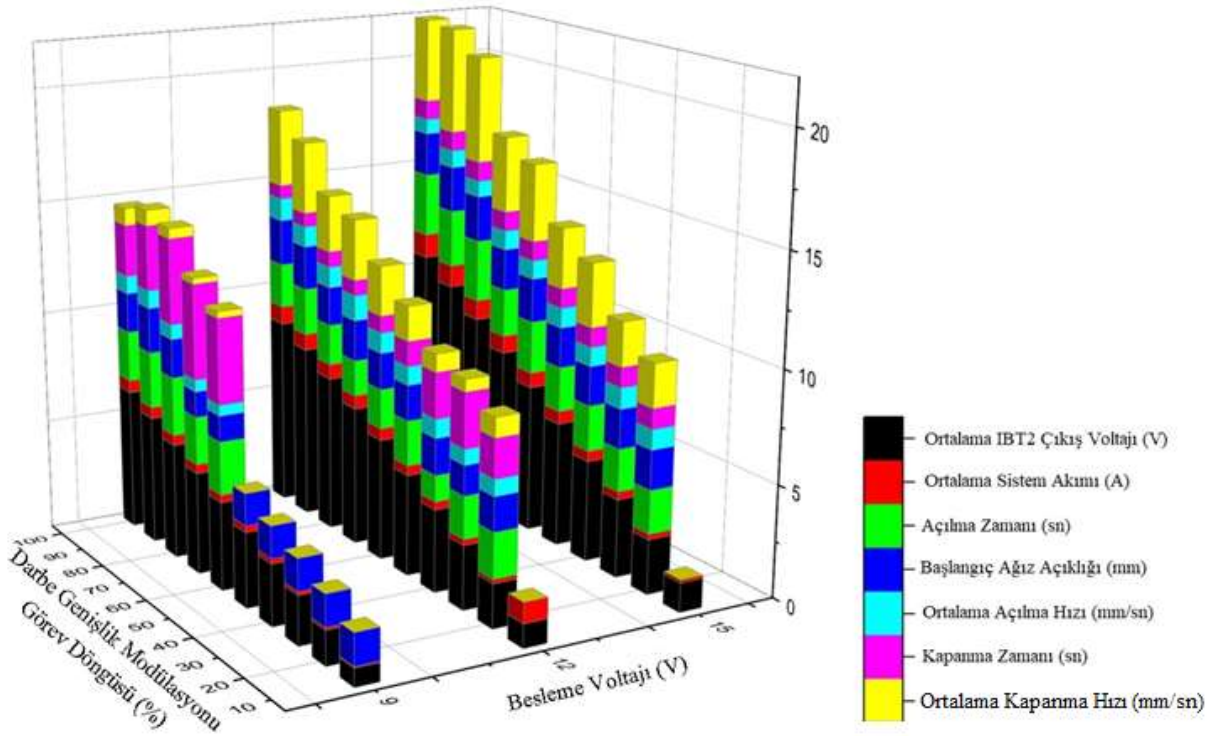
doluluk oranlarında artmıştır. Başlangıç ağız pozisyonu açık olarak tasarlanan Tutucu 2'nin kapama işlemini yapacak olan telden geçen akımın yoğunluk miktarı, 9V besleme geriliminde artan darbe genişlik modülasyon oranları ile artmasıyla ağız uçlarının kapanma süreleri %50 doluluk oranından sonra giderek kısalmıştır. 12 ve 15V besleme geriliminde ise kapanma süresi aynı şekilde azalmış %60 DGM doluluk oranından sonra en kısa süresine erişip, sonraki doluluk oranlarında çok az değişen lineer bir davranış göstermiştir. Tutucu uçlarının açılma süresi akım yoğunluğu ile ısınan telin doğal soğuma süresine ve kendisi de süper elastik bir şerit tel olan tutucu gövdesi üzerinde kapanma esnasında biriken potansiyel enerjinin miktarına bağlıdır. O nedenle; 9 V besleme geriliminde %50 doluluk oranına kadar uzayan açılma süreleri bu doluluk oranından sonra giderek azalmıştır. 12 ve 15V besleme geriliminde artan doluluk oranlarında belirli bir doluluk oranından sonra aşağı yukarı 1 sn civarlarında değişen bir açılma süresi elde edilmiştir. Ayrıca 9 ve 12V besleme geriliminde başlangıç doluluk oranlarında kapanma süresi açılma süresine göre daha uzun sürede gerçekleşirken bu süre, 9V besleme geriliminde %60 doluluk oranında birbirine çok yakın seyretmiş ve bu orandan sonra yüksek doluluk oranlarının sağladığı yüksek akım yoğunluğu ve hızlı ısınmadan dolayı kapanma süresi, açılma süresine göre oldukça kısalmıştır. 15V besleme geriliminde çalışılan tüm doluluk oranlarında kapanma süresi açılma süresinden çok kısa zamanda gerçekleşmiştir. Kapanma ortalama hızları 9, 12, 15 V besleme gerilimlerinde artan doluluk oranları ile artmıştır. 9 ve 12V besleme gerilimlerinde başlangıç doluluk oranlarında kapanma ortalama hızına göre biraz daha hızlı gerçekleşen açılma hızları, artan doluluk oranları ile beraber kapanma hızlarının altında kalmıştır. Artan besleme gerilimleri ile beraber tutucu uçlarının ortalama açılma hızları çok az da olsa daha yavaş seyretmiştir. Bu da artan besleme gerilimlerine bağlı olarak artan akım yoğunlukları ile hızlı ısınma ve daha yavaş soğuma hızları ile açıklanabilmektedir. Tutucu 2'e ait veriler Şekil 3.2'de verilmiştir. Ayrıca tutucuya ait 9, 12, 15V besleme geriliminde ortalama çıkış gerilim-akım, ağız kapanma süresi, ortalama ağız kapanma- açılma hızlarına ait detayları gösteren tablo ve grafikler Ek-7'da verilmiştir.



Şekil 3.2: Tutucu 2’ye ait 9, 12 ve 15V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.

Mikro Tutucu 3 9, 12, 15V besleme gerilimlerinde çalışılmıştır. Diğer tutucularda olduğu gibi hem artan besleme gerilimlerinde hem de artan DGM oranlarında sürücü devre ortalama çıkış gerilim ve akımlarında artış meydana gelmiştir. 9, 12, 15V besleme gerilimlerinde sırası ile %50, 10 ve 10 DGM doluluk oranlarından sonra tutucu uçlarında hareket görülmüştür. Başlangıç ağız pozisyonu açık olarak tasarlanan bu tutucu uçlarının kapanma süreleri artan besleme gerilimleri ve doluluk oranları ile beraber azalmıştır. Kapanma süreleri, düşük besleme gerilimlerinde 2-2.5 sn. civarında seyrederken 15V besleme geriliminde 0.5 sn’nin altına inmiştir. Tutucu uçlarının açılma süreleri tüm besleme gerilimlerinde yaklaşık 2 sn’ler civarında gerçekleşirken 15V besleme geriliminin yüksek doluluk oranlarına doğru bu süre biraz daha uzamıştır. 9V besleme gerilimlerinde kapanma süresi son doluluk oranına kadar açılma sürelerinden daha uzun gerçekleşirken, 12V besleme geriliminde %50 DGM doluluk oranı ile beraber kapanma süreleri kısalarak açılma süresinde kısa sürmüştür. 15V besleme geriliminde ise çalışılan tüm doluluk oranlarında kapanma süresi, açılma sürelerinden daha kısa zamanda gerçekleşmiştir.

Artan besleme gerilimleri ve bu besleme gerilimlerinde artan DGM doluluk oranlarında kapanma ortalama hızları artmıştır. Tutucu uçlarının açılma ortalama hızları 9 ve 12V besleme geriliminde artan DGM doluluk oranı ile birlikte az da olsa artmıştır. 15V besleme geriliminde ise artan doluluk oranı ile az miktarda azalmıştır. Artan besleme gerilimleri ile açılma ortalama hızları 1 mm/sn altında gerçekleşmiştir. Tutucu 3'e ait veriler Şekil 3.3'de verilmiştir. Ayrıca tutucuya ait 9, 12, 15V besleme geriliminde ortalama çıkış gerilim-akım, ağız kapanma süresi, ortalama ağız kapanma- açılma hızlarına ait detayları gösteren tablo ve grafikler Ek-8'da verilmiştir.

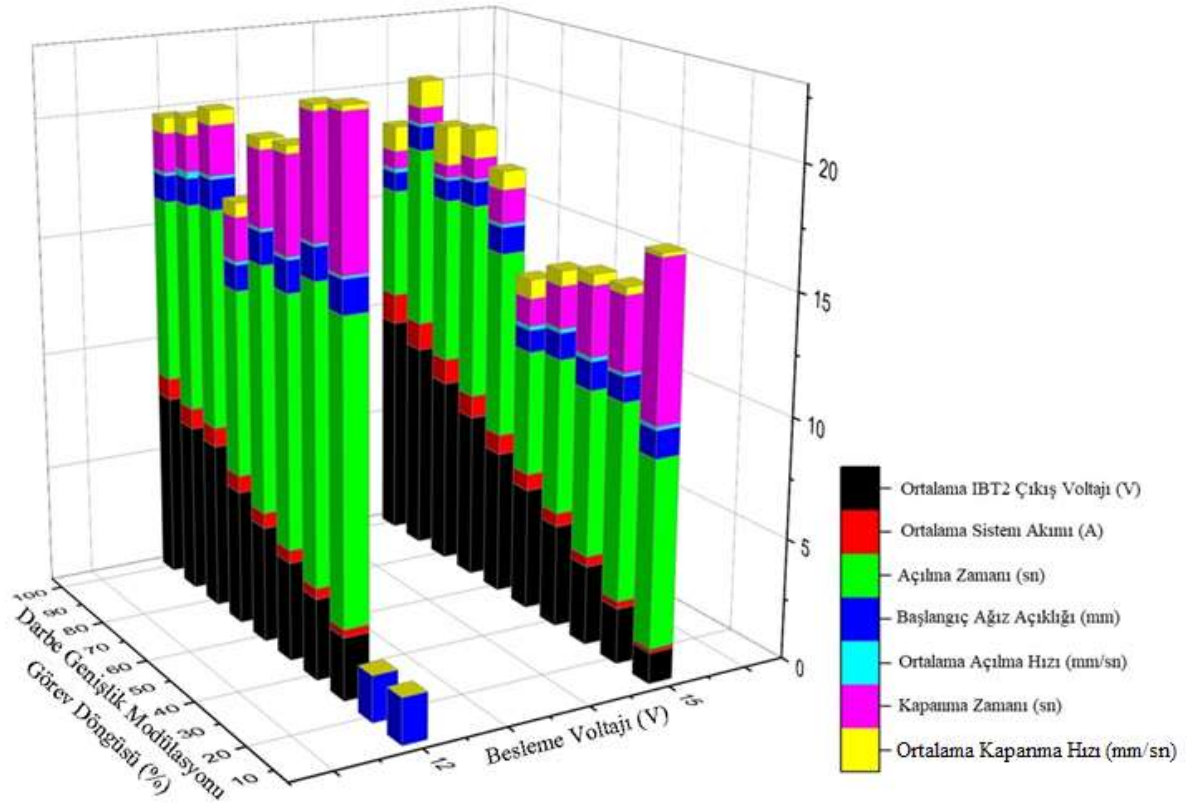


Şekil 3.3: Tutucu 3'e ait 9, 12 ve 15V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.

Tutucu 4'de kapama işlemini yapacak yayın yüksek sıcaklık formuna geçebilmesi için gerekli olan akımın doğal olarak daha yüksek olmasından dolayı besleme gerilimi 6 ve 9V'larda tutucu uçlarında hareket gözlemlenmemiştir. 12 V besleme geriliminde %30 darbe genişlik modülasyon oranlarından sonra tutucu uçlarında kapanma hareketi görülmüştür. Kapanma ve açılma süresi artan doluluk oranları ile kısalmıştır. Kapanma süresi nispeten açılma süresine göre daha kısa sürmüştür. Kapanma ortalama hızları artan doluluk oranları ile artmıştır. Fakat açılma hızları neredeyse 0,1 mm/sn hızla çok düşük seviyede seyretmiştir. Kapanma ortalama hızları, açılma ortalama hızlarından çalışmanın

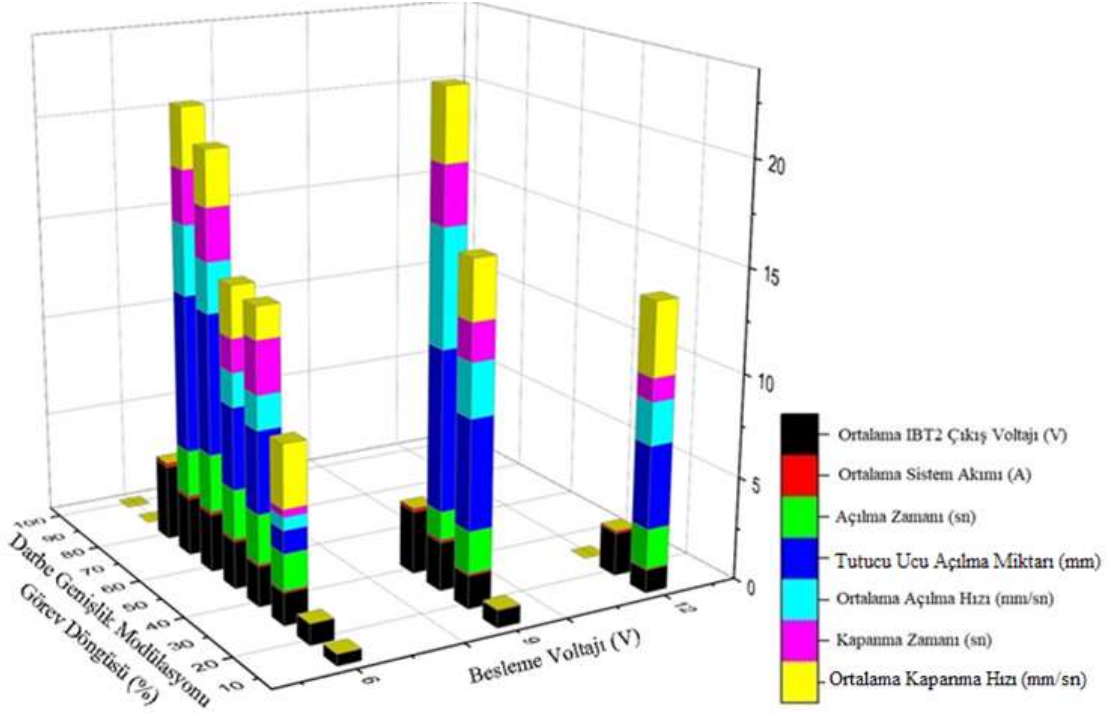
tüm evresinde hızlı seyretmiştir. 15 V besleme geriliminde, artan doluluk oranları ile azalan kapanma sürelerine karşın açılma sürelerinde hiyerarşik bir değişim görünmemiştir. Açılma süreleri tüm doluluk oranlarında kapanma süresine göre daha geç gerçekleşmiştir. Tutucun uçlarının kapanma hızları artan doluluk oranları ile artış gösterirken, açılma hızları 0.2 mm/sn civarında neredeyse çok az değişen oranlarda gerçekleşmiştir. Kapanma ortalama hızları, açılma ortalama hızlarında tüm doluluk oranlarında daha hızlı gerçekleşmiştir. Besleme geriliminin 12 V'dan 15 V'a çıkması ile beraber açılma ve kapanma süreleri kısalmıştır. Fakat diğer tutucuların açılma-kapanma süreleri ile kıyasladığımızda bu süreler oldukça yüksektir. Bunun nedeni diğer tutucularda kapama işlemi neredeyse 2-3 kat daha ince bir tel ile yapılırken burada 0.5 mm telden imal edilmiş bir yay ile yapılmaktadır. Yayın kapama işlemini yapabilmek için şekil değiştireceği sıcaklığa ulaşması daha yüksek akım değeri ve aynı zamanda daha uzun süreye ihtiyaç duymaktadır. Şekil değiştirme sıcaklığına nispeten daha kısa sürede ulaşmasına rağmen açılma için gerekli soğuma süresi daha uzun olduğundan kapanma süreleri 5-6 saniyelerden 1 saniyenin altına düşerken, açılma süresi 7-8 saniye civarı sürmektedir. Uçların kapanma ve açılma süreleri arasındaki fark artan besleme gerilimleri ve DGM doluluk oranları ile arttığından dolayı ve de kapanma-açılma senkronizasyonu daha da bozulacağından 18 V besleme gerilimi çalışılmamıştır. Tutucu 4'e ait veriler Şekil 3.4'de verilmiştir. Ayrıca tutucuya ait 12, 15V besleme geriliminde ortalama çıkış gerilim-akım, ağız kapanma süresi, ortalama ağız kapanma- açılma hızlarına ait detayları gösteren tablo ve grafikler Ek-9'da verilmiştir.

Tutucu 5 ile yapılan 100 Hz sabit frekans ve 6V besleme geriliminde %30 doluluk oranı altı ve %70 doluluk oranı üstlerinde veri elde edilmemiştir. Tutucu uçları açılma süresi artan doluluk oranları ile genel olarak azalmıştır. Kapanma süreleri %30 doluluk oranı haricinde genelde 2,5 saniye civarında gerçekleşmiştir. Tutucu uçların açılma hızları artan doluluk oranı ile beraber artmıştır. Kapanma hızları %50 doluluk oranından sonra hafif bir artış göstermiştir. Tutucu uçları açılma miktarı artan doluluk oranları ile artmıştır. 1.09 mm ile 7.591 mm civarında bir hareket elde edilmiştir.



Şekil 3.4: Tutucu 4’e ait 12 ve 15V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.

Besleme gerilimi 9V çıkartılıp 100 Hz. sabit frekans değerinde aynı işlemler ilk doluluk oranında açma ve kapama süreleri birbirine yakın gerçekleşmiştir. Artan doluluk oranı ile kapanma süresi artmış açılma süresi azalmıştır. Ortalama açılma ve kapanma hızları her iki doluluk oranında artmıştır. Ayrıca tutucu uçlarının açılma miktarı artan doluluk oranı ile beraber 5.0292 mm’den 7.701 mm’ye çıkmıştır. 12 V besleme gerilimi ve 100 Hz. frekans değerinde yapılan çalışmada sadece %10 doluluk oranı çalışılabilmektedir. Dolayısı ile artan doluluk oranlarında tutucu uçlarının açılma-kapanma süreleri, ortalama hızları ve ağız açılma miktarları hakkında bilgi sahibi olunamamıştır. %10 doluluk oranında tutucu uçlarının açılma süresi kapanma süresinden uzun sürmüştür. Dolayısı ile açılma ortalama hızı da daha düşük ölçülmüştür. Tutucu ağız açılma oranı 4.014 mm Gerçekleşmiştir. Tutucu 5’e ait veriler Şekil 3.5’de verilmiştir. Ayrıca tutucuya ait 6, 9, 12V besleme geriliminde ortalama çıkış gerilim-akım, ağız kapanma süresi, ortalama ağız kapanma- açılma hızlarına ait detayları gösteren tablo ve grafikler Ek-10’da verilmiştir.

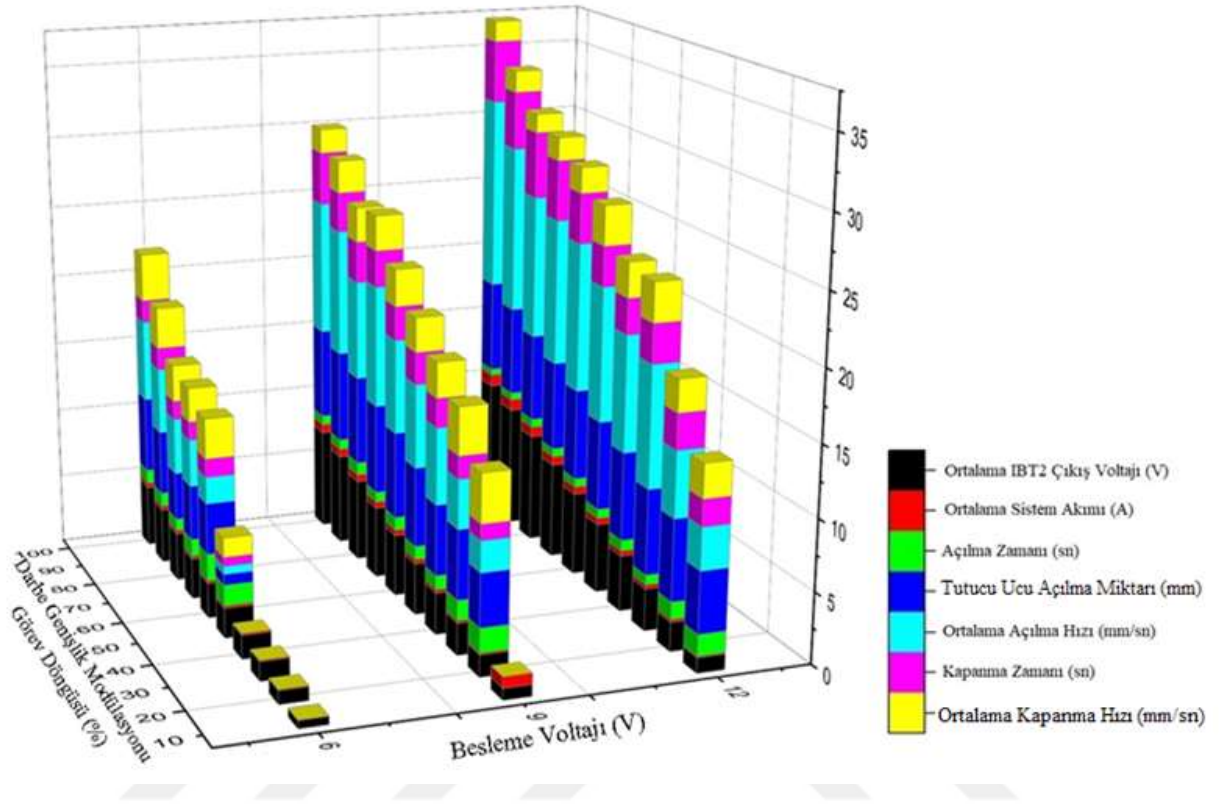


Şekil 3.5: Tutucu 5'e ait 6, 9 ve 12V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.

Tutucu 6'ya ait 6 V besleme gerilimi ve 100 Hz. sabit frekans değerlerinde ağız uçlarında hareket %50 PWM doluluk oranlarından sonra gözlenmiştir. İlk doluluk oranında açılma süreleri uzun gerçekleşirken üst doluluk oranlarında bu süre azalmıştır. Kapanma süreleri artan doluluk oranları ile beraber artış göstermiştir. İlk doluluk oranlarında açılma süresi kapanma süresine göre düşük gerçekleşirken %70 doluluk oranından sonra açılma süreleri daha aşağıya inmiştir.. Tutucu uçlarının açılma ve kapanma hızları genel olarak artan doluluk oranı ile artmıştır. Başlangıç doluluk oranlarında daha yavaş gerçekleşen ortalama açılma hızları % 70 doluluk oranından sonra açılma ortalama hızları, kapanma hızından daha hızlı gerçekleşmiştir. Artan doluluk oranları ile beraber tutucu uçlarında açılma miktarı genel olarak artmıştır. Bu verilere göre genel olarak artan doluluk oranları tutucu uçlarının açılma süresi kısalmış, açılma süresi artmıştır. Açılma ve kapanma ortalama hızları genel olarak artış eğilimi göstermiştir. Tutucu uçlarının açılma miktarı doluluk oranlarının artışı ile artmıştır. 9V besleme geriliminde 6V besleme geriliminin aksine %10 PWM doluluk oranından sonra ağız hareketleri görülmüştür. Tutucu uçlarının açılma süresi artan doluluk oranları ile beraber kısalırken, kapanma süresi giderek uzamıştır. Başlangıç açılma süresi kapanma süresinden daha uzun sürerken artan doluluk oranı ile beraber Kapanma süreleri ile arasında olan fark gittikçe artmıştır. Tutucu

uçlarının açılma ortalama hızları artan doluluk oranı ile artarken, kapanma hızları azda olsa düşüş eğilimi göstermiştir. Başlangıçta daha hızlı olan kapanma ortalama hızı artan doluluk oranları ile açılma ortalama hızlarının altında kalmış ve iki hız arasındaki fark giderek artmıştır. Tutucu uçlarının açılma miktarının artan doluluk oranları ile artarak 3.722 mm başlayan ağız açıklığı %70 doluluk oranından sonra çok az değişerek 6.46 mm açıklık miktarına ulaşmıştır. Bu çalışmada bir önceki besleme geriliminde olduğu gibi Artan doluluk oranları ile beraber tutucu uçları açılma süresi azalmış, kapanma süresi artmıştır. Tutucu uçlarının açılma ortalama hızları artarken, 6 V besleme geriliminin aksine tutucu uçları kapanma ortalama hızları az da olsa azalmıştır. En belirgin değişikli tutucu uçlarının açılma miktarında kayıt edilmiştir. Benzer doluluk oranlarında 9 V besleme geriliminde daha fazla tutucu uç açıklık miktarı elde edilmiştir. 12V besleme geriliminde tüm doluluk oranlarında ağız hareketleri görülmüştür. Bu tutucuda tasarımdan kaynaklanan maksimum ağız açıklığı miktarı söz konusudur. Yani artan değişkenler ile ağzın açıklık miktarı belli bir milimetreye kadar sınırlıdır. Dolayısı ile artan gerilim ve doluluk oranlarında benzer prensiple çalışan diğer tutucularda olduğu gibi ağızda aşırı açılmadan kaynaklanan geçici deformasyonlarla karşılaşmamıştır. Açma işlemini yapan Flexinol® tellerin özelliğinin bozulmasını zorlamamak amacı ile üst gerilim değerleri zorlanmamıştır. Artan doluluk oranları ile beraber bu besleme geriliminde tutucu uçlarının açılma süreleri oldukça azalarak 0.5 saniyenin altına inmiştir. Kapanma süreleri ise giderek uzamıştır. Açılma süreleri tüm doluluk oranlarında kapanma sürelerinin altın da kalmıştır. Artan doluluk oranları ile beraber açılma ortalama hızları yükselmiştir. Kapanma ortalama hızları azda olsa düşüş göstermiştir. Açılma ve kapanma ortalama hızları arasındaki fark artan doluluk oranları fazlalaşmıştır.. Artan doluluk oranları ile beraber tutucu uçları açıklık miktarı artmıştır. Yüksek doluluk oranlarına ulaştıkça tutucu uçları açılma miktarı hemen hemen benzer değerle göstermiştir. Tutucuya ait diğer besleme gerilimlerinden farklı olarak bu besleme geriliminde tüm doluluk oranlarında veri elde edilmiştir. Besleme gerilimi arttıkça tutucu uçları açılma süresi azalmıştır. Kapanma süreleri ise uzamıştır. Tutucu uçlarının açılma ortalama hızları artan besleme gerilimi ile artmıştır. Kapanma ortalama hızları azalmıştır. Tutucu uçlarının açılma miktarı besleme geriliminin artması ile artmıştır. Daha erken doluluk oranlarında en üst ağız açıklık miktarlarına erişmiştir. Tutucu 6'ya ait veriler Şekil 3.6'de verilmiştir. Ayrıca tutucuya ait 6, 9, 12V besleme geriliminde ortalama çıkış

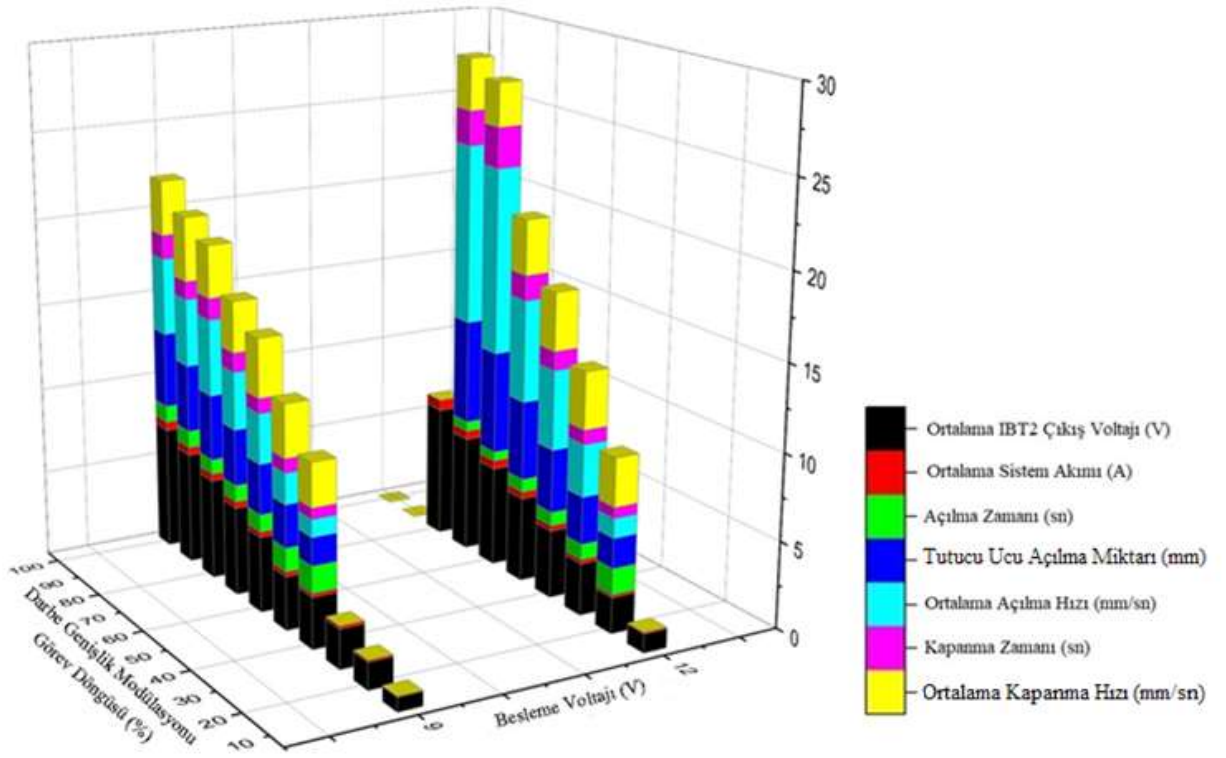
gerilim-akım, ağız kapanma süresi, ortalama ağız kapanma- açılma hızlarına ait detayları gösteren tablo ve grafikler Ek-11’da verilmiştir.



Şekil 3.6: Tutucu 6'ya ait 6, 9, ve 12V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.

Mikro Tutucu 7 uçlarının açma ve kapama performanslarını ölçmek için kurgulanan deneysel çalışma 6V besleme geriliminde başlanmıştır. Fakat 6V besleme geriliminde ağız hareketi gözlemlenmemiştir. Besleme gerilimi 9V'ta çıkarıldığında ağız hareketleri %30 PWM değerlerinden sonra başlamıştır. Açılma süresi artan doluluk oranı ile beraber azalmıştır. Kapanma süresi ise artmıştır. Açılma süresi %70 doluluk oranına kadar kapanma süresinden daha uzun süre sürerken, bu doluluk oranından sonra kapanma süresinin altına düşmüştür. Tutucu uçları açılma ortalama hızları artan doluluk oranları ile artarken kapanma ortalama hızları genelde belli bir aralıkta seyretmiştir. İlk doluluk oranlarında daha düşük olan ortalama açılma hızı %70 doluluk oranından sonra artarak kapanma hızının üstüne çıkmıştır. Tutucu uçlarının açılma miktarı artan doluluk oranları ile başlangıç ağız pozisyonu kapalı olan tutucu ağızlarındaki açılma miktarı giderek artmıştır. 9 V besleme geriliminde bu tutucu ile yapılan çalışma sonucu artan doluluk oranları ile beraber tutucu uçlarının açılma süresi ve ortalama hızları artmıştır. Kapanma

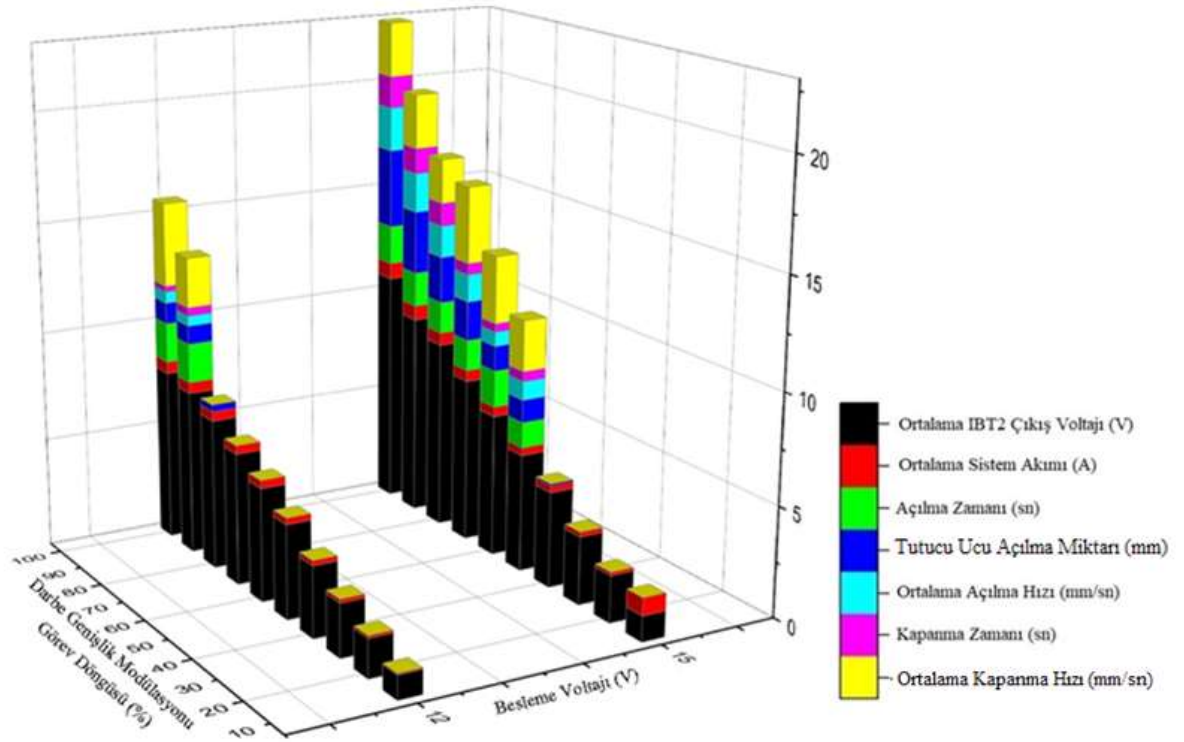
süreleri artmıştır. Kapanma ortalama hızları da belirli bir aralık seviyesinde seyretmiştir. Tutucu uçlarında açılma miktarı artan doluluk oranı ile artmıştır. Besleme gerilimi 12 V' da %80 PWM değerinden sonrası ağız deformasyonu gerçekleşme olasılığı göz önünde bulundurularak çalışılmamıştır. Bu değerde ağız hareketini sınırlayan plastik halka deforme olup kopmuştur. Önceki besleme geriliminin aksine daha düşük doluluk oranlarında tutucu uçlarında hareket elde edilmiştir. Artan doluluk oranı ile beraber tutucu ucu açılma süresinde kısalma kapanma süresinde artış görülmüştür. %30 doluluk oranından sonra açılma süresi, kapanma süresinden daha hızlı gerçekleşmiştir. Artan doluluk miktarı ile açılma ve kapanma süreleri arasındaki fark artmıştır. Tutucu uçlarının açılma ve kapanma ortalama hızları artan doluluk oranları ile tutucu uçları açılma ortalama hızı artarken, kapanma hızı ortalama hızı belirli bir aralık değerinde ve çok az da olsa düşme yönünde bir eğilim göstermiştir. Açılma ortalama hızları kapanma ortalama hızlarından çok daha yüksek seyretmiştir. Tutucu uçlarının açılma miktarları verilmiştir. Buna göre artan doluluk oranları ile beraber tutucu uçları 1.714 mm'den 5.974 mm'ye kadar artan bir eğilim sergilemiştir. Bu tutucuya ait çalışmaları özetlemek gerekirse; artan besleme gerilimleri ile beraber tutucu uçlarının açılma süreleri kısalmış, ortalama açılma hızları artmıştır. Kapanma süresi ve hızı için tam tersini söylemek mümkündür. Tutucu uçlarının açılma miktarı ise besleme gerilimleri ile beraber artmıştır. Artan besleme geriliminde aynı doluluk oranlarında daha yüksek tutucu uç ağız açıklığı elde edilmiştir. Tutucu 7'ye ait veriler Şekil 3.7'de verilmiştir. Ayrıca tutucuya ait 9, 12V besleme geriliminde ortalama çıkış gerilim-akım, ağız kapanma süresi, ortalama ağız kapanma- açılma hızlarına ait detayları gösteren tablo ve grafikler Ek-12'de verilmiştir.



Şekil 3.7: Tutucu 7'ye ait 9 ve 12V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.

Tutucu 8 ağız açıklık miktarı, hızları ve benzer parametreler hakkında bilgi sahibi olabilmek amacı ile tutucu 12 ve 15 V besleme geriliminde 100 Hz sabit frekansta çeşitli DGM doluluk oranlarında çalışılmıştır. Diğer mikro tutucuların bazılarında olduğu gibi 6 ve 9 V besleme gerilimlerinde tutucu ağızlarında hareket gözlemlenmemiştir. 12 V besleme geriliminde 70 PWM doluluk oranına kadar tutucu uçlarında bir hareket gözlemlenmemiştir. Bu besleme geriliminde tutucu ağızında maksimum 0,9524 mm'lik bir açılma elde edilmiştir. 15 V besleme geriliminde %40 darbe genişlik modülasyon oranlarından sonra tutucu uçlarında hareket görülmüştür. Tam doluluk oranında maksimum ağız açıklık oranı olan 3,614 mm'ye ulaşılmıştır. Bu miktar artan doluluk oranı ile beraber artmıştır. Benzer olarak ortalama tutucu uçlarının açılma-kapanma süreleri kat ettikleri mesafenin artmasından dolayı artmıştır. Tutucu uçlarının açılma süresi çalışılan her doluluk oranında kapanma süresinden daha uzun sürmüştür. Fakat artan doluluk oranları ile bu süreler arasındaki fark giderek kısalmıştır. Tutucu uçlarının ortalama açılma hızlarında genel olarak bir artış eğilimi olsa da benzer bir şeyi kapanma hızları için söylemek mümkün olmamıştır. Kapanma hızları, çalışılan tüm doluluk oranlarında açılma hızına göre daha hızlı gerçekleşmiştir ve artan doluluk oranlarında

kapama ve açılma hızları arasındaki fark giderek azalmıştır.. Besleme geriliminin artması ile daha düşük darbe genişlik modülasyon oranlarında Tutucu 1 uçlarında hareket elde edilmiştir. 15 V üzeri besleme gerilimlerine açma işlemini yapan Flexinol® tellerin deformasyona uğrama ihtimalinden dolayı kaçınılmıştır. Tutucu 8'e ait veriler Şekil 3.8'de verilmiştir. Ayrıca tutucuya ait 12, 15V besleme geriliminde ortalama çıkış gerilim-akım, ağız kapanma süresi, ortalama ağız kapanma- açılma hızlarına ait detayları gösteren tablo ve grafikler Ek-13'de verilmiştir.



Şekil 3.8: Tutucu 8'e ait 12, ve 15V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.

3.2 Artan Darbe Genişlik Modülasyon Doluluk Oranlarının Tutucu Kol Parametrelerine Etkisi

Sabit besleme gerilimi altında değişen DGM Görev döngü oranlarında kol sisteminin boyun bölgesi koordinat sistemi göz önüne alındığında x, -y, -x, y eksenlerinde hareket ettirilmiştir. Materyal ve Metot 2.9 Bölümünde açıklandığı üzere bu eksenlere yaptığı açısal hareketlerin değerleri ölçülmüştür. Elde edilen değerler Tablo 3.1'de paylaşılmıştır. Tablodan da izlenebileceği üzere kol boyunu eksenlere yaptığı açısı miktarları artan DGM görev döngü oranlarında artmıştır. Yani her ekseninde daha fazla açısal yer değiştirme elde

edilmiştir. Artan DGM görev döngüleri ile her eksende maksimum açı değerlerine ulaşma süresi kısalmış fakat boynun başlangıç yanı 0 (sıfır) pozisyonuna ulaşma süreleri az miktarda artmıştır. Bir periyodu oluşturan maksimum açı değerine ulaşp, tekrar başlangıç pozisyonuna dönme süreleri azalmıştır. %10 ve 20 DGM görev döngü oranlarında tutucu kol boynunda çok yavaş hareketler görülüp burada hesaba katılmamıştır. Normal bir operasyon hızına tabloda görülen DGM oranlarında ulaşılmıştır. %60 ve üzeri DGM görev döngü oranlarında çok hızlı ve zorlayıcı hareketler elde edilip tel bağlantılarını zorlama hatta tel bağlantılarında gevşemeye sebep olmuştur. O nedenle normal şartlar altında tüm eksenlerde 12 ile 15° arasında gerçekleşmesi gereken bu açısal hareketler özellikle -x ve y yönünde bu sebepten dolayı arzulanan değere ulaşamamıştır. O neden ile ileri çalışmalarda belirli operasyon çevrimlerinden sonra oluşabilecek tel gevşekliklerini giderebilecek bir düzenek kurulması ve tutucu kolun kalibre edilmesine ihtiyaç duyacağı görülmüştür.

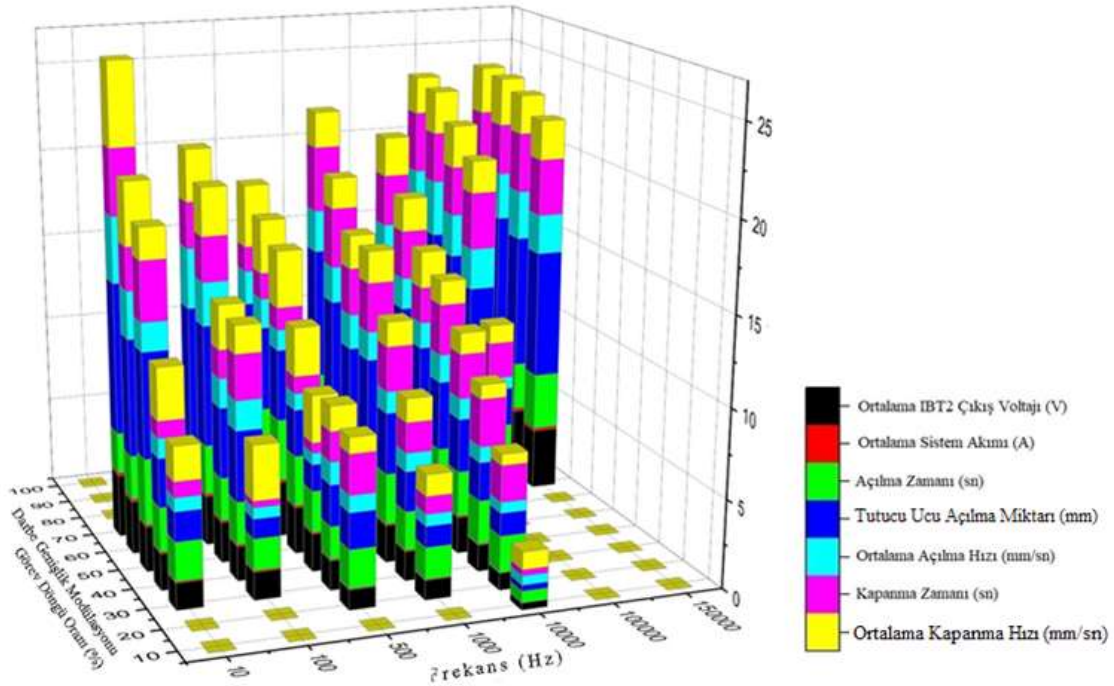
Tablo 3.1: Artan DGM görev döngü oranlarında tutucu kol eksen parametrelerinin değişimi.

DGM Görev Döngüsü (%)	Eksen	Boyun Açısı (°)	Max. Boyun Açısına Ulaşma Süresi (Sn)	Başlangıç Pozisyonuna Dönüş Süresi (Sn)	Toplam Hareket Süresi (Sn)	Basma Kuvveti (gr)
30	x yönü	12.32	12.53	6.64	19.17	52.33
	- x yönü	3.85	8.89	5.36	14.25	72.00
	y yönü	8.42	7.45	4.22	11.67	70.00
	-y yönü	13.26	14.11	7.82	21.93	92.33
40	x yönü	14.27	11.14	6.78	17.92	61.25
	- x yönü	4.25	7.85	5.56	13.41	78.41
	y yönü	9.63	7.02	4.74	11.76	84.12
	-y yönü	14.57	13.25	7.88	21.13	99.24
50	x yönü	15.10	11.02	6.88	17.90	63.25
	- x yönü	5.20	7.52	5.74	13.26	78.23
	y yönü	11.03	6.52	4.80	11.32	88.25
	-y yönü	15.23	12.89	8.20	21.09	98.45

3.3 Artan Frekans Değerlerinin Tutucu Parametrelerine Etkisi

Artan sinyal frekans değerinin tutucu parametrelerinde değişimlerini görebilmek için

Tutucu 5 diğer tutucuların aksine 100 Hz. frekans değeri haricinde darbe genişlik modülasyon sinyal üreticinin en üst frekans değeri olan 150 kHz. frekans değerine ulaşınca kadar 10, 100, 500, 1000, 10000 ve 150000 Hz. frekans değerlerine çıkartılmıştır. Bu değerlerde tutucu uçlarının açılma-kapanma süreleri, ortalama hızları ve tutucu uçlarının açılma miktarlarının değişimi artan darbe genişlik modülasyon doluluk oranlarında olduğu gibi ölçülmüştür. Çalışmaya ait veriler Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9: Tutucu 5’e ait 6V Besleme gerilimi ve farklı frekans sinyalleri altında operasyonel parametreler.

10 Hz. frekans değeri ve 6V besleme gerilimi ile yapılan çalışmada, %30 doluluk oranından önce tutucu uçlarında hareket görülmemiştir. %80 ve üzeri doluluk oranlarında ise aşırı akım yoğunluğundan kaynaklanan hızlı ısınma ile tutucu uçları aşırı açılarak kontrol edilememiştir. Tutucu uçlarının açma süreleri 2.5 saniye civarlarında gerçekleşmiş olup açılma süreleri %60 doluluk oranına kadar daha geç devam ederken bu süre % 60 doluluk oranında birbirine çok yaklaşmıştır. %70 doluluk oranında ise kapanma süresi açılma süresine göre daha uzun sürmüştür. Tutucu uçlarının açılma hızları artan doluluk oranları ile artmıştır. Kapanma hızları da tüm doluluk oranlarında olmasa da genel olarak artış eğilimi göstermiştir. Kapanma hızları tüm doluluk oranlarında açılma

hızlarına göre daha yüksek seyretmiştir. Tutucu uçlarının artan doluluk oranlarında değişiminde 1.64 mm'den 8.54 mm'ye kadar değişen açılma miktarları elde edilmiştir.

100 Hz. frekansta aynı çalışma yapıldığında 10 Hz. frekans değerinde olduğu gibi %30 doluluk oranı altı ve % 70 doluluk oranı üstlerinde veri elde dilmemiştir. Tutucu uçları açılma süresi artan doluluk oranları ile genel olarak artmıştır. Kapanma süreleri %30 doluluk oranı haricinde genelde 2,5 saniye civarında gerçekleşmiştir. Tutucu uçların açılma hızları artan doluluk oranı ile beraber artmıştır. Kapanma hızları %50 doluluk oranından sonra hafif bir artış göstermiştir. Tutucu uçları açılma miktarı artan doluluk oranları ile artmıştır. 1.09 mm ile 7.591 mm civarında bir hareket elde edilmiştir.

500 Hz sabit frekans değerinde diğer iki çalışmadan farklı olarak %20 ve 80 doluluk oranlarında veri elde edilmiştir. Açılma süresi genel olarak artan doluluk oranları ile artmıştır. Kapanma süresi ise %40 doluluk oranına kadar azalma ardından hafif bir artış ile genelde 1.5 sn. ve civarında olmuştur. Genel olarak açılma zamanı kapanma süresinden uzun sürmüştür. Ortalama açılma hızı artan doluluk oranları ile beraber %40 doluluk oranından sonra artmıştır. Kapanma ortalama hızları açılma hızlarından daha yüksek seyretmiştir ve artan doluluk oranları ile lineer bir artış eğilimi göstermiştir. Tutucu uçlarının açılma miktarları 2.007 mm ile 5.07 mm aralıklarında elde edilmiştir. Yükselen doluluk oranları ile artan ağız açıklıkları artmıştır.

10 kHz sabit frekans değerinde açılma süreleri hafifte olsa artma eğilimi göstermiştir. %60 doluluk oranından sonra açma süreleri kapanma sürelerinden daha uzun sürmüştür. Önceki doluluk oranlarında açma ve kapanma süreleri birbirine çok yakın seyretmiştir. Tutucu uçlarının açılma hızları artan doluluk oranları ile beraber artmıştır. Benzer durum kapanma ortalama hızları için de geçerlidir. %60 doluluk oranından sonra birbirine çok yakın seyreden açma-kapanma ortalama hızları, ortalama açılma hızının daha yüksek seyretmesi ile sonuçlanmıştır. Tutucu uçlarında açılma miktarı artan doluluk oranları ile beraber 0.3285 mm'den 6.35 mm'ye kadar artmıştır.

100 kHz frekans değerlerinde %60 darbe genişlik modülasyon oranlarına kadar tutucu uçlarında hareket görülmemiştir. Açılma süreleri artan doluluk oranları ile çok fazla bir değişim göstermemiştir. Yaklaşık 3 sn. civarında bir sürede tutucu açlarında açılma hareketi görülmüştür. %80 doluluk oranında açılma ve kapanma süresi bir birine çok yakın seyretmiştir. Kapanma süreleri artan doluluk oranı ile artış göstermiştir. Tutucu

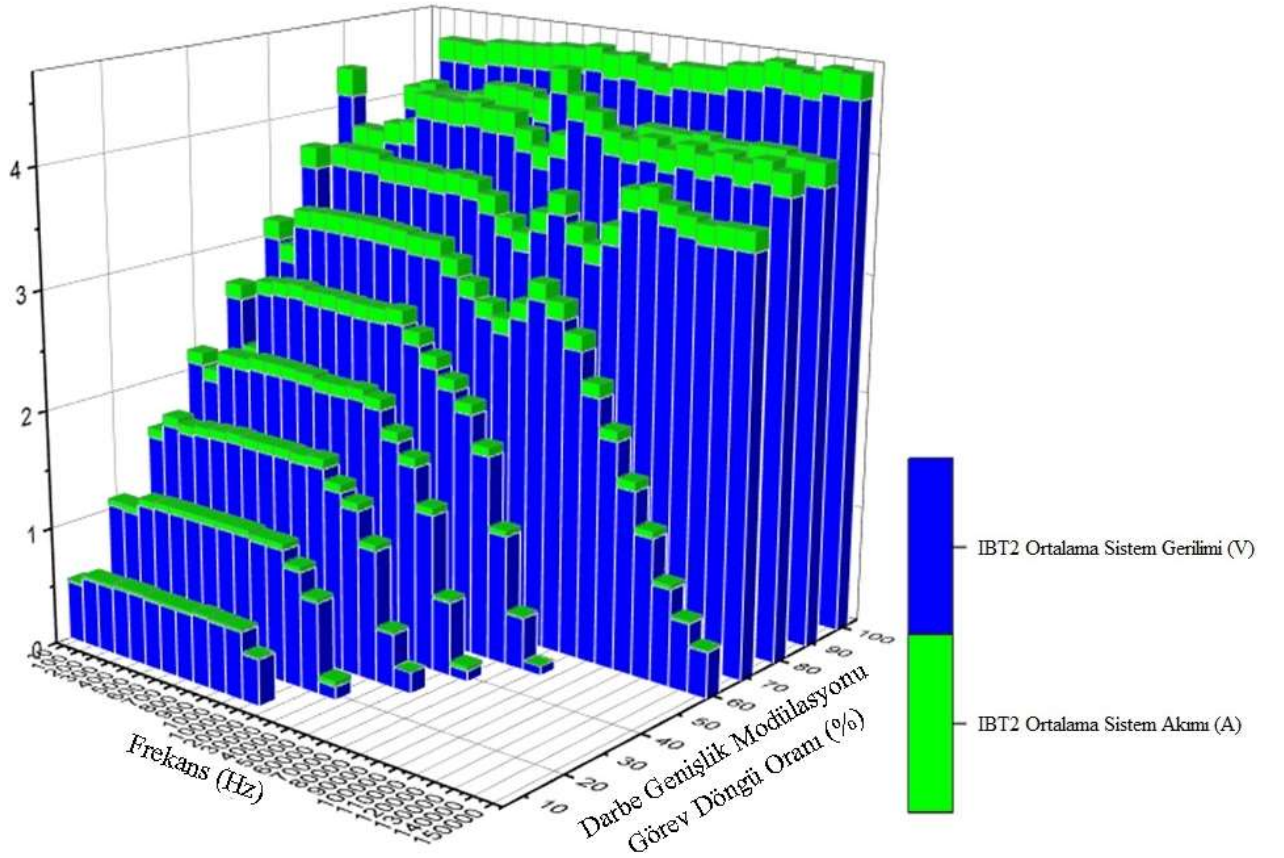
uçlarının açılma ortalama hızları artan doluluk oranı ile son doluluk oranı haricinde artmıştır. Kapanma ortalama hızları da benzer bir eğilim göstermiştir. Tutucu uçlarında açılma miktarı artan doluluk oranları ile artmış tam doluluk oranında 7.518 mm ulaşmıştır.

Sinyal üreticinin en son değeri olan 150 kHz sabit frekans değerinde %70 doluluk oranlarında ağız hareketleri görülmüştür. Tutucu ucu açılma süreleri yaklaşık 3 saniye civarında gerçekleşmiştir. Artan doluluk oranı ile %70 doluluk oranı dışında hafif bir yükseliş eğilimi göstermiştir. Kapanma süresi ise %70 doluluk oranında birbirine çok yakın seyretmiştir. Çok hafifte olsa kapanma süreleri artan doluluk oranı ile düşüş yaşanmıştır. Açılma ve kapanma ortalama hızları %70 ve 90 doluluk oranlarında birbirine çok yakın seyretmiştir. Kapanma ortalama hızı artan doluluk oranı ile çok az da olsa artmıştır. Açılma ortalama hızı içinde benzer şeyleri söylemek mümkündür. Tutucu uçlarında açılma miktarı son doluluk oranı haricinde giderek artmış ve en yüksek 8.0663 mm değeri elde edilmiştir.

6V besleme geriliminde 10, 100, 500, 1000 ve 10000 Hz frekans değerlerinde ve %10 DGM doluluk oranından başlayarak onar onar artacak şekilde 10 değişik doluluk oranlarında mikro tutucu ucunun açma ve kapanma hızları ile miktarları ölçülmeye çalışılmıştır. %10 DGM doluluk oranlarında 10 kHz frekans değeri dışında ya açma tepkisi görülmemiş ya da tutucu uçlarında titreşimden dolayı milimetrik seviyelerde açılmaları tespit etmek mümkün olmamıştır. Aynı şekilde %20 DGM doluluk oranında 10 ve 100 Hz frekans aralıkları çalışılmamış diğer frekans aralıklarında veri elde edilebilmiştir. %80 DGM doluluk oranında 10 ve 100 Hz frekans aralıklarında, %90 ve 100 DGM doluluk oranlarında ise 10 kHz'e kadar olan frekans değerlerinde mikro tutucu uçlarında oluşan aşırı açılmaya bağlı geçici deformasyondan dolayı çalışılmamıştır. Ancak %80, 90, 100 DGM gibi yüksek doluluk oranlarında 100 ve 150 kHz frekans değerleri ve ara değerlerinde geçici deformasyona uğramadan açma ve kapanma işlevleri elde edilmiştir. Bu besleme geriliminde elde edilen verileri özetlemek gerekirse; çalışılan tüm frekans değerlerinde (10-10 kHz) artan DGM doluluk oranları ile beraber mikro tutucu ağız uçlarının ağız açılma miktarı artmıştır. Elde edilen maksimum ağız açıklığı 10Hz frekans değerinde %70 DGM doluluk oranında 8.54 mm ölçülmüştür. Ölçülebilen minimum ağız açıklık oranı ise 10 Hz frekans değerinde ve %10 DGM doluluk oranında

0.3285 mm olmuştur.

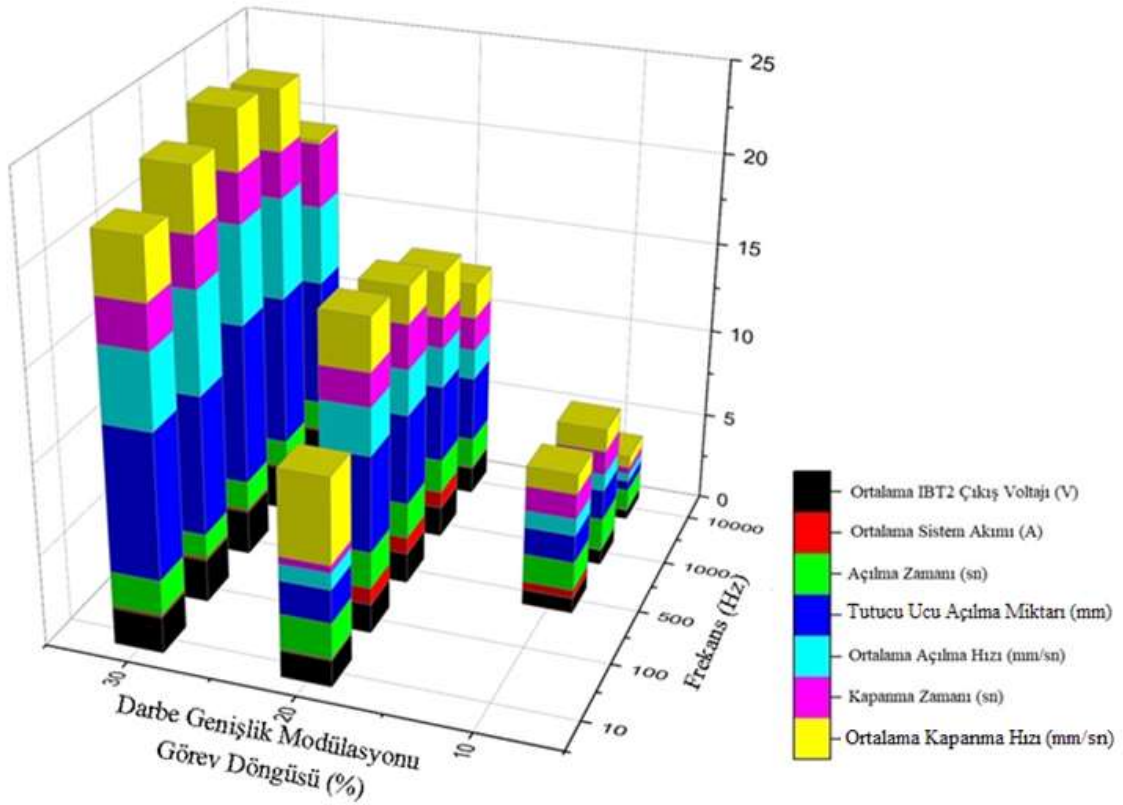
6 V besleme geriliminde %10, 20, 30 doluluk oranlarında 2 kHz'den başlayan frekans değerlerinde mikro tutucu üzerine düşen ve geçen ortalama gerilim ve akım değerleri sırası ile 17.4 kHz, 35.5 kHz ve 55.3 kHz frekans değerlerine erişinceye kadar giderek azalmış ve bu frekanslarda sıfır değerine ulaşmıştır. Bir önceki bölümde belirtildiği gibi mikro tutucu uçlarında %10 DGM doluluk oranında hareket gözlemlenmediği gibi artan frekans değerlerinde de hareket gözlemlenmemiştir. %20 DGM doluluk oranında 10 Hz'in altı ve 30 kHz üstü frekans değerleri arasında mikro tutucu uçlarında hareket gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak tutma bırakma hareketi yapılabilmektedir. %30 DGM doluluk oranında artan frekans değerlerinde özellikle 1kHz değerlerinden sonra artan frekans değerlerinde ortalama akım ve gerilim değerlerinin düşmesi ile beraber mikro tutucu ağız açılma ve kapanma hızlarında azalma meydana gelmiştir. Bu frekans değerleri altındaki tüm frekans değerlerinde mikro tutucu ağız açılma-kapanma ortalama hız ve miktarlarında değişim gözlenmemiştir. %40, 50, 60 doluluk oranlarında 10 kHz frekans değerlerine kadar ortalama akım ve gerilim değerlerinde değişim gerçekleşmemiştir. Buna bağlı olarak mikro tutucu ortalama açma-kapama hız, zaman ve miktarlarında değişim çok küçük olmuştur. Bu doluluk oranlarında 10 kHz'den sonra sırasıyla 66.8 kHz, 87.5 kHz frekans değerlerinde ortalama akım ve gerilim değerleri sıfıra inmiştir. %60 doluluk oranında DGM sinyal üreticinin 150 kHz olan üst değerinde 19 mA ortalama akım ve 0,39 V ortalama gerilimi elde edilmiştir. %70 DGM doluluk oranından tam doluluk oranına kadar 10 Hz'den başlayıp 150 kHz'e kadar olan frekans değişimlerinde ortalama akım ve gerilim değerlerinde değişim görülmemiştir. Artan frekans sinyalleri karşısında ortalama motor çıkış gerilimleri ve sistem akımının nasıl değiştiği Şekil 3.10'da verilmiştir Ayrıca Çalışmaya ait 6V besleme geriliminde ortalama çıkış gerilim-akım, ağız kapanma süresi, ortalama ağız kapanma- açılma hızlarına ait detayları gösteren tablo ve grafikler Ek-14'de verilmiştir.



Şekil 3.10: Tutucu 5'e ait 6V Besleme gerilimi ve artan frekans sinyallerine karşın sistem ortalama akım ve gerilim değişimleri.

Besleme gerilimi 9V ile yapılan çalışmada 10 Hz. ile 10kHz. frekans değerleri arasında veriler Şekil 3.11'de görüldüğü gibi grafik çubukları şeklinde verilmiştir. 10 Hz. frekans değerinde %30 doluluk oranı üzeri değerlerde akım yoğunluğundan dolayı tutucu uçlarında hızlı ve aşırı açılma meydana geldiğinden kontrol edilememiştir. %20 doluluk oranında uzun süren açılma hızı artan doluluk oranında değişmemiştir fakat kapanma süresi uzamıştır. İlk doluluk oranında tutucu ucu açılma süresi kapanma süresinden uzun sürerken bir üst doluluk değerinde kapanma süresi daha uzun sürmüştür. İlk doluluk oranında 1.824 mm olan ağız açıklığı %30 doluluk oranında 8.02 mm'ye çıkmıştır.

Frekans değeri 100 Hz'e çıkartılıp aynı işlemler yapıldığında ilk doluluk oranında açma ve kapama süreleri birbirine yakın gerçekleşmiştir. Artan doluluk oranı ile kapanma süresi artmış açılma süresi azalmıştır. Ortalama açılma ve kapanma hızları her iki doluluk oranında artmıştır. Tutucu uçlarının açılma miktarı artan doluluk oranı ile beraber 5.0292 mm'den 7.701 mm'ye çıkmıştır.



Şekil 3.11: Tutucu 5'e ait 9V Besleme gerilimi ve farklı frekans sinyalleri altında operasyonel parametreler.

500Hz frekans değerinde önceki çalışmalarda olduğundan farklı olarak %10 doluluk oranında da tutucu uçlarda hareket görülmüştür. Tutucu uçların kapanma süresi artan doluluk oranı ile artmıştır. Açılma süresi son doluluk oranı hariç çok az yükselmiştir. Başlangıçta kapanma süresine göre uzun süren açılma süresi üst doluluk oranlarında kapanma süresinin altına inmiştir. Açma ve kapanma ortalama hızları artan doluluk oranları ile artmıştır. Açılma ortalama hızı kapanma ortalama hızından daha yüksek seyretmiştir. Artan doluluk oranlarında tutucu uçlarının ağız açıklığı 1.533 mm'den 8.905 mm'ye çıkmıştır.

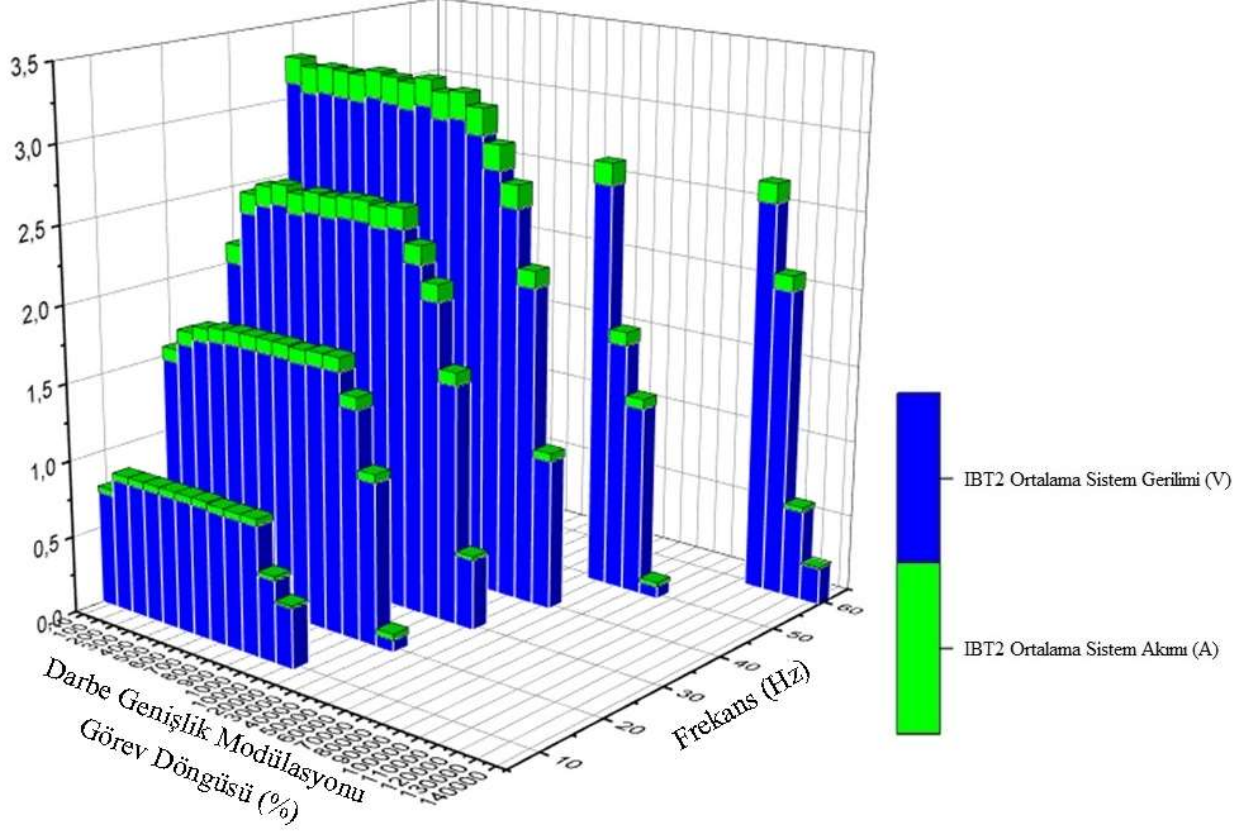
1kHz frekans değerinde kapanma süresi artan doluluk oranı ile artarken, açılma süresi son doluluk oranı haricinde çok fazla değişmemiştir. Başlangıçta daha uzun süren açılma süreleri son doluluk oranında kapanma süresinin altına düşmüştür. Artan doluluk oranları ile beraber ortalama açılma ve kapanma ortalama hızları artmıştır. Başlangıçta açılma ortalama hızları kapanma hızına göre daha yavaş gerçekleşirken son doluluk oranında açılma hızı yüksek seyretmiştir. Artan doluluk oranları ile beraber tutucu ucu ağız açıklığı

1.678 mm'den 8.358 mm çıkmıştır.

10 kHz frekans değerinde açılma süresi artan doluluk oranı ile son doluluk oranı haricinde çok az yükselmiştir. Kapanma süresi belirgin olarak artmıştır. Başlangıçta açılma süresinden kısa süren kapanma süresi artan doluluk oranı ile beraber artmıştır. Ortalama açılma ve kapanma hızları artan doluluk oranı ile beraber artmıştır. Son doluluk oranı haricinde açılma ortalama hızı kapanma hızından düşük seyretmiştir. Bir üst doluluk oranında açılma ortalama hızı kapanma hızından çok yüksek gerçekleşmiştir. Artan doluluk oranı ile beraber tutucu uçlarının açılma miktarı 0,5475 mm'den 7,226 mm çıkmıştır.

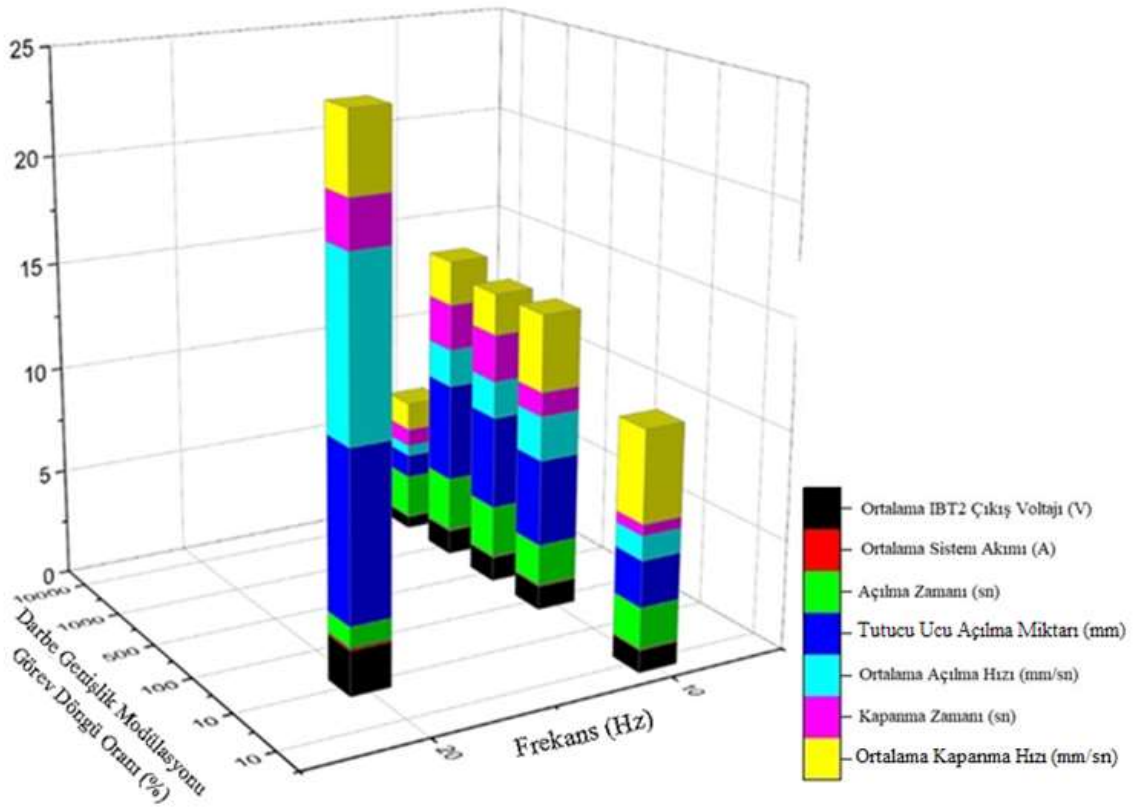
6 V besleme geriliminin aksine bu besleme geriliminde 30 DGM doluluk oranı üstündeki oranlar mikro tutucu uçları aşırı açılmaya bağlı olarak gerçekleşen geçici deformasyondan dolayı çalışamamıştır. Ayrıca 10 ve 100 Hz. frekans değerinde 10 DGM doluluk oranında mikro tutucu uçlarında hareket gözlemlenmemiştir. 9V besleme geriliminde %10, 20, 30 DGM doluluk oranlarında 10 Hz ve 1 kHz frekans değerleri arasında ortalama akım ve gerilim değerlerinde bir değişim görülmemiştir. 1 kHz frekans değerinden sonra sırası ile 16.7 kHz, 33.7 kHz ve 51.2 kHz frekans değerlerine ulaşıncaya kadar ortalama akım ve gerilim değerleri giderek azalmış ve sıfır değerine ulaşılmıştır. %40 DGM doluluk oranında ise bu akım ve gerilim değerleri 10Hz ile 10 kHz arası neredeyse hiç değişmemiştir. 10 kHz frekans değerinden sonra 68,3 kHz frekans değerine kadar bu değerler azalarak sıfır değerine ulaşmıştır. Çalışmaya ait verilerden elde edilmiş grafik çubukları Şekil 3.12'de verilmiştir. Bir önceki bölümde de değinildiği üzere %40 DGM doluluk oranı üzerindeki değerlerde tutucu üzerinde geçen akım değerlerinin, tutucuyu kontrol etmemizi sağlayan akım aralığından yüksek olması sebebi ile geçici ağız deformasyonu sebebi ile tutucuyu kontrol etmek mümkün olmamış ve bu doluluk oranları çalışmamıştır. Fakat artan frekans değerlerinde ortalama akım ve gerilim değerlerinin düşmesi sebebi ile 6 ve 9V besleme geriliminde yüksek doluluk oranlarında çalışamayan aralıkları çalışmak mümkün olmuştur. Örnek vermek gerekirse; 9 V 50 DGM doluluk oranları sonrası artan oranlarda ve 50 kHz frekans değerleri altında mikro tutucuyu kontrol etmek mümkün olmamışken 60, 70, 80 kHz frekans değerlerinde kontrol etmek mümkün olmuştur. Benzer bir şekilde %60 DGM doluluk oranında 110 ve 120 kHz frekans aralıklarında mikro tutucu ile çalışılabilmektedir. Üst doluluk oranlarında ise

çalışmamıştır. Ayrıca Çalışmaya ait 9V besleme geriliminde ortalama çıkış gerilim-akım, ağız kapanma süresi, ortalama ağız kapanma- açılma hızlarına ait detayları gösteren tablo ve grafikler Ek-15’de verilmiştir.



Şekil 3.12: Tutucu 5’e ait 9V Besleme gerilimi ve artan frekans sinyallerine karşın sistem ortalama akım ve gerilim değişimleri.

12 V besleme geriliminde 10 Hz frekans değeri haricinde %20 DGM doluluk oranını çalışmak mümkün olmamıştır. Dolayısı ile sinyal üreticinin en üst değeri olan 150 kHz frekans değerlerine kadar yapılan ölçümlerden yukarıda olduğu gibi 10, 100, 500, 1000 ve 10000 Hz frekans değerlerinden elde edilen değişkenler Şekil 3.13’deki grafikte verilmiştir.



Şekil 3.13: Tutucu 5'e ait 12V Besleme gerilimi ve farklı frekans sinyalleri altında operasyonel parametreler.

12 V besleme geriliminde 10 Hz. frekans değerinde %20 darbe genişlik modülasyon oranı üst değerlerinde tutucu uçları kontrol edilemediğinden dolayı veri elde edilememiştir. % 10 doluluk oranından % 20 doluluk oranına çıkıldığında tutucu uçları açılma süresi azalmıştır. Kapanma süresi için ise söz konusu durumun tam tersi gerçekleşmiştir. İlk doluluk oranında açılma süresi kapanma süresine göre daha yavaş gerçekleşirken %20 doluluk oranına çıkıldığında açılma süresi kapanma süresinin çok altı sürelerden gerçekleşmiştir. %10 doluluk oranında tutucu uçlarının açılma hızının çok düşük olduğu artan doluluk oranı ile artarak kapanma ortalama hızının üstüne çıktığı görülmektedir. Kapanma ortalama hızı artan doluluk oranı ile beraber azalmıştır. Tutucu uçlarının açılma miktarı hakkında bilgi vermektedir. Görüldüğü üzere iki doluluk oranı arasında tutucu ucu açılma miktarı 2.12 mm'den 7,81 mm'ye çıkmıştır.

100 Hz frekans değerinde yapılan çalışmada sadece % 10 doluluk oranı çalışılabilmiştir. Dolayısı ile artan doluluk oranlarında tutucu uçlarının açılma-kapanma süreleri, ortalama hızları ve ağız açılma miktarları hakkında bilgi sahibi olunamamıştır. % 10 doluluk

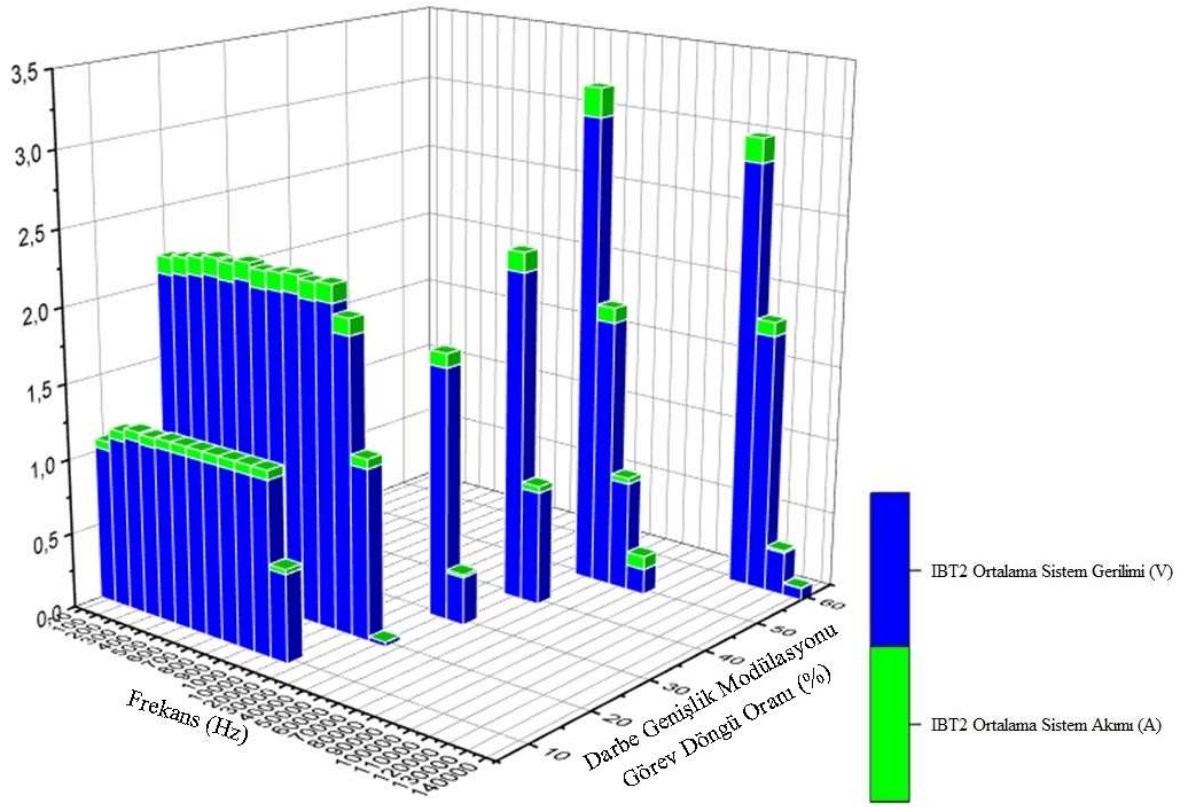
oranında tutucu uçlarının açılma süresi kapanma süresinden uzun sürmüştür. Dolayısı ile açılma ortalama hızı da daha düşük ölçülmüştür. Tutucu ağız açılma oranı 4,014 mm ölçülmüştür.

500 Hz frekans değeri ve % 10 doluluk oranında açılma süresi kapanma süresinde daha uzun sürmüştür. Tutucu ucu açılma ortalama hızı aynı şekilde kapanma hızı ile kıyaslandığında düşük gerçekleşmiştir. Tutucu uçlarının açılma miktarı tespit edilmiştir. Bu miktar 4.343 mm'dir.

1 kHz frekans değeri ve % 10 doluluk oranında önceki frekans değerlerindeki benzer sonuçlar elde edilmiştir. Söz konu grafiklerden sonuncusunda tutucu uçlarında elde edilen açılma miktarı yer almaktadır. Bu miktar 4.63 mm'dir.

12 V besleme gerilimi, 10 kHz frekans değerinde yapılan son ölçümde tutucu uçları açılma-kapanma süreleri ve ortalama hızlarında benzer davranışlar elde edilmiştir. Diğer frekans değerlerinden farklı olarak tutucu uçlarında elde edilen açılma miktarı 1,095 mm olarak gerçekleşmiştir.

% 10 DGM doluluk oranında 100, 500 ve 1000 Hz frekans değerlerinde yaklaşık 4 mm civarı ağız açıklıkları elde edilmiştir. 10 Hz % 10 DGM doluluk oranında 2.12 mm olan ağız açıklığı %20 DGM doluluk oranında 7.81 mm ye çıkmıştır. Artan DGM doluluk oranlarında ağız açıklığının arttığına dair yapılabilen tek ölçüm budur. Bu doluluk oranının üstündeki tüm değerlerde mikro tutucu ağızları 6 ve 9 V besleme geriliminde olduğu gibi aşırı açılma sonucu ağız uçları başlangıçtaki kapalı pozisyonlarına dönememişlerdir. 12 V Besleme geriliminde %10 ve 20 DGM doluluk oranlarında 10 Hz ve 1 kHz frekans değerlerinde ortalama akım ve gerilim değerlerinde değişim görülmemiştir. Her iki doluluk oranında da 1 kHz frekans değerinden sonra ortalama akım ve gerilim değerleri düşmeye başlayıp sırası ile 15,8 kHz ve 31,8 kHz değerlerinde sıfır değerine ulaşmıştır. %10 doluluk oranlarının üzerinde mikro tutucuyu kontrol etmek mümkün olmadığından daha önce bahsedilmişti. Artan frekans değerleri karşısında tutucu sistemini besleyen ortalama çıkış akım ve gerilim değerlerinin değişimi Şekil 3.14'de görülmektedir.



Şekil 3.14: Tutucu 5'e ait 12V Besleme gerilimi ve artan frekans sinyallerine karşın sistem ortalama akım ve gerilim değişimleri.

6 V besleme geriliminde %90 ve 100 DGM doluluk oranlarını 10- 10kHz frekans aralığında çalışmak mümkün olmamıştır. Aynı şekilde %80 DGM doluluk oranı da 500 Hz frekans değerinden sonra çalışılamamıştır. Sinyal üreticinin en yüksek değeri olan 150 kHz frekans değerlerinde %80, 90 ve 100 DGM doluluk oranlarında sırası ile 7,701, 8,063, 7,5058 mm ağız açıklık mesafesi elde edilmiştir. Artan frekans değerleri ile (10-10kHz) ağız açıklığına etki hususunda hiyerarşik bir etki gözlemlenmiştir. Ağız açıklık mesafesi ile direk ilişkisi bulunan açma ve kapanma zamanlarının süresinde de artan frekans değerleri (10-10kHz) arasında bir ilişki gözlemlenmemiştir. Yine benzer şekilde artan frekans değerleri (10-10kHz) arasında ortalama ve anlık maksimum açma- kapama hızları arasında bir ilişki görülmemiştir. Ancak her farklı DGM doluluk oranında kritik bir frekans değerinden sonra yukarıdaki değişkenler frekans ile değişmiştir. 9 V besleme geriliminde %30 DGM doluluk oranlarının üstü çalışılamamıştır. Fakat artan frekans değerleri ile üst doluluk oranlarını çalışmak mümkün olmuştur. Örneğin 40–68.5 kHz değerleri arasında %40 DGM, 60–90.9 kHz frekans değer aralığında % 50 DGM, 110–

120 kHz frekans değerleri arasında % 60 DGM doluluk oranlarını çalışmak mümkün olmuştur. Bu besleme geriliminde ve frekans aralıklarında mikro tutucu uçlarının ağız açıklığında artan frekans değerlerinde giderek azalma rastlanmıştır. Ama 10- 10 kHz frekans aralığında benzer şeyden bahsetmek mümkün olmamıştır. Artan frekans değerleri ile (10- 10 kHz) açma ve kapama sürelerinde belirgin bir artış ya da azalış kaydedilmeyip genelde birbirlerine yakın değerler arasında seyretmiştir. Benzer bir şekilde ortalama açma ve kapanma ve anlık maksimum hızları da yakın bir hız aralığında kaydedilmiştir. 12 V besleme geriliminde tüm frekans değerlerinde açılma süresi, kapanma süresinden daha uzun sürmüştür. Dolayısıyla ortalama kapanma hızları da daha hızlı kayıt edilmiştir. Aynı şekilde anlık maksimum kapanma hızı daha yüksek ölçülmüştür. Fakat artan frekans değerlerinde ortalama ya da anlık hız değişimlerinde 10 kHz'e kadar olan değerlerde artan ya da azalan bir bağıntı kurulamamıştır. Ancak belirli bir frekans değerinden sonra %30 DGM ve üzeri doluluk oranlarında mikro tutucu uçlarını kontrol etmek mümkün olabilmıştır. Zira 12 V besleme geriliminde bu doluluk oranları ve üzerine çıkılamamıştı. Örneğin %30 DGM doluluk oranı 30 kHz frekans değerinde 6.85 mm, %40 DGM doluluk oranı 40kHz frekans değerinde 6,205 mm, % 50 DGM doluluk oranı 60 kHz frekans değerinde 6,095 mm mikro tutucu ağız açıklıkları elde edilmiştir. Bu ağız açıklık miktarı 150 kHz gibi yükselen frekans değerlerinde giderek azalmıştır. 150 kHz'e kadar artan frekans değerlerinde de örneklemelerin az olması sebebi ile açma-kapama süreleri, ortalama ve anlık hızların değişimleri hakkında bir bilgiye ulaşılamamıştır. Ayrıca çalışmaya ait 12V besleme geriliminde ortalama çıkış gerilim-akım, ağız kapanma süresi, ortalama ağız kapanma- açılma hızlarına ait detayları gösteren tablo ve grafikler Ek-16'da verilmiştir.

4 Tutucuların Ürettikleri Basma Kuvvetleri

Tutucun 1'in basma kuvvetini ölçmek amacı ile kuvvete duyarlı sensör ile ilgili ölçümlerde ise sonuç alınamamıştır. Bunun nedeni; kuvvete duyarlı sensörün elektriksel direnç değişimini ölçeceği yüzeye mikro tutucu uç yüzeyinin baskı yapacağı esnada, tutucu ucunun yapılmış olduğu süperelastik şerit telin bel vermesi ile sensör yüzeyine tam bir baskı yapamamıştır.

Tutucu 2 uçlarının basma kuvvetini ölçmek için diğer tutucularda kullanılan Kuvvete Duyarlı Sensör düzeneği kullanılmıştır. Fakat seri port ekranında herhangi bir değer okunamamıştır. Basma kuvvetine ait videolar yavaşlatılarak izlendiğinde tek uç hareketli olduğundan artan kapama kuvveti ile beraber Resim 4,1'de görüldüğü üzere sabit tutucu ucuna okla gösterilen noktadan basınç yaparak sensör pedine baskı yapacak tutucu ağzını, basma kuvvetinin tersi yöne doğru itmektedir. Dolayısı ile basma kuvveti okunamamaktadır.



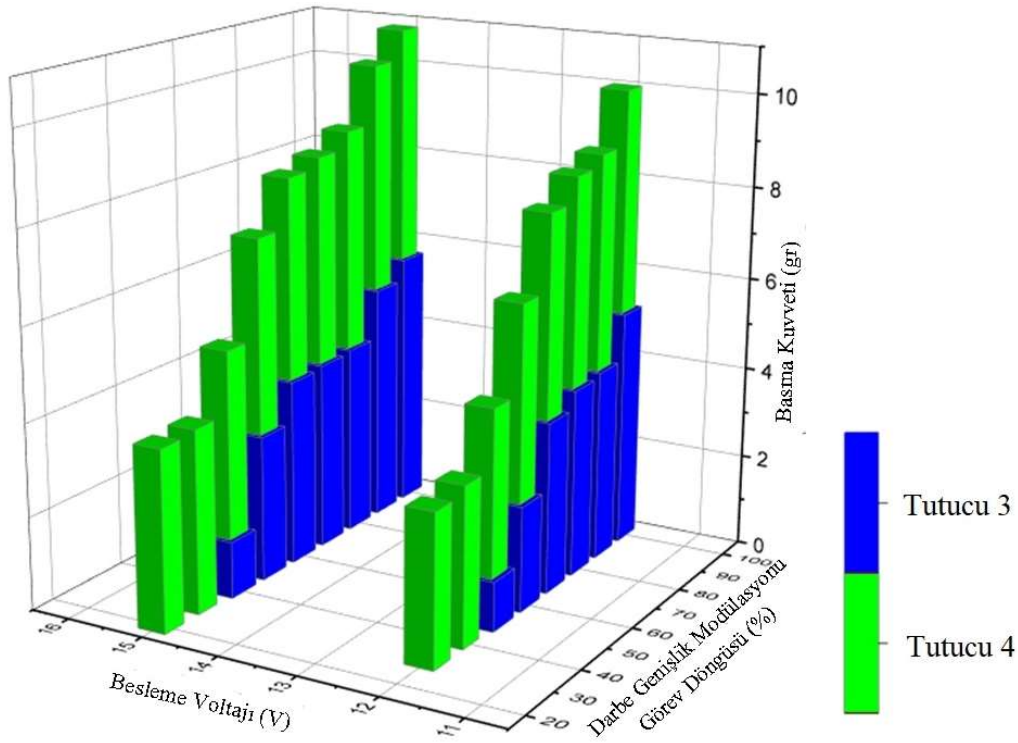
Şekil 4.1: Tutucu 2'ye ait basma kuvveti ölçüm görseli.



Şekil 4.2: Tutucu 3 uçlarının Kuvvete Duyarlı Sensor (KDS) yardımı ile basma kuvveti ölçümü.

Tutucu 3 uçlarının tutma kabiliyeti hakkında fikir sahibi olmak amacıyla Resim 4,1'de paylaşılan düzeneğe ile tutucu uçlarının ürettiği basma kuvveti ölçülmüştür. Her bir DGM doluluk oranında 10 ölçüm alınıp seri port ekranından okunan değerlerin ortalaması alınmıştır. 9V besleme geriliminde tüm doluluk oranlarında basma kuvveti elde edilememiştir. 12V besleme geriliminde %50 doluluk oranından itibaren basma kuvveti elde edilmiştir ve artan DGM doluluk oranları ile bu basma kuvveti artmıştır. Elde edilen en yüksek basma miktarı tam doluluk oranında 5.171 gr olarak ölçülmüştür. 15V besleme geriliminde %40 DGM doluluk oranından itibaren basma kuvvetine ait veriler elde edilmeye başlanmıştır. Tam doluluk oranında 5.67 gr olarak ölçülmüştür. Aynı şekilde artan doluluk oranlarında basma kuvveti artmıştır. Artan besleme gerilimleri ile elde edilen basma kuvvetinin de arttığından bahsedebiliriz zira % 90 doluluk oranı üzerinden örnek vermek gerekirse 12 V besleme geriliminde tutucu uçlarından 4.172 gr'lık bir kuvvet elde edilirken, bu oran 15 V besleme geriliminde 5.67gr'a çıkmıştır.

Tutucu 4'ün tutma kabiliyeti hakkında bilgi sahibi olabilmek amacı ile diğer tutucularda olduğu gibi basma değerleri ölçülmüştür. Başlangıç ağız pozisyonu açık olarak tasarlanan ve kapanma işleminin ŞHA yay ile yapılan bu tutucuda artan doluluk oranları ile elde edilen basma kuvvetinde bir artış olmuştur. 12 ve 15 V besleme gerilimlerinde artan darbe genişlik modülasyon oranlarında her iki besleme geriliminde de elde edilen basma kuvvetleri artış göstermiştir. Elde edilen minimum basma kuvveti 12V, 100Hz, 30 DGM doluluk oranında 3.26 gr (0,0319 N)'dur. En yüksek basma kuvveti ise 15V, 100Hz, 100DGM doluluk oranında 5.19 gr (0,050 N) olarak ölçülmüştür. Her iki tutucunun Tablo 4.1'de görülen verileri tek bir grafikte toplanarak Şekil 4.3'de verilmiştir.



Şekil 4.3: Besleme Voltajı, DGM Görev Döngü Oranlarında Tutucu 3 ve 4'ün Basma Kuvveti Değişimi.

Tablo 4.1: Artan DGM Görev Döngüsünde Tutucu 3 ve 4'ün basma kuvveti değişimi

DGM Görev Döngüsü (%)	Tutucu 3		Tutucu 4	
	12 V	15 V	12 V	15 V
10	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.00	3.90
30	0.00	0.00	3.26	3.96
40	0.00	1.23	3.42	4.06
50	1.07	3.16	3.58	4.22
60	2.28	4.04	4.22	4.38
70	3.72	4.10	4.38	4.54
80	4.09	4.15	4.54	4.84
90	4.17	5.22	4.70	5.02
100	5.17	5.67	4.86	5.19

Kuvvete duyarlı sensörün dairesel bölgesinin tam ortasına gelecek şekilde yerleştirilmiş Tutucu 5'in basma kuvveti ölçülmüştür. Başlangıç ağız pozisyonu kapalı olduğu için tutucunun ürettiği basma kuvveti tamamen tasarımdan kaynaklanan basma kuvvetidir.

Dolayısı ile besleme voltajı, DGM görev döngü oranlarından bağımsız üretilen bir basma kuvvetidir. Ölçüm eldesi için devre on kez açılıp kapatılmış ve mikro kontrolörün seri port ekranından elde edilen değerler okunmuştur. Söz konusu değerler Tablo. 4.2’de yer verilmiştir.

Tablo 4.2: Tutucu 5’in basma kuvveti.

Çevrim	Tutma Kuvveti (gr)	Tutma Kuvveti (N)
1	1.42	0.012
2	2.37	0.022
3	1.42	0.013
4	1.42	0.013
5	2.84	0.027
6	0.94	0.009
7	2.37	0.022
8	1.89	0.018
9	2.84	0.027
10	1.42	0.013

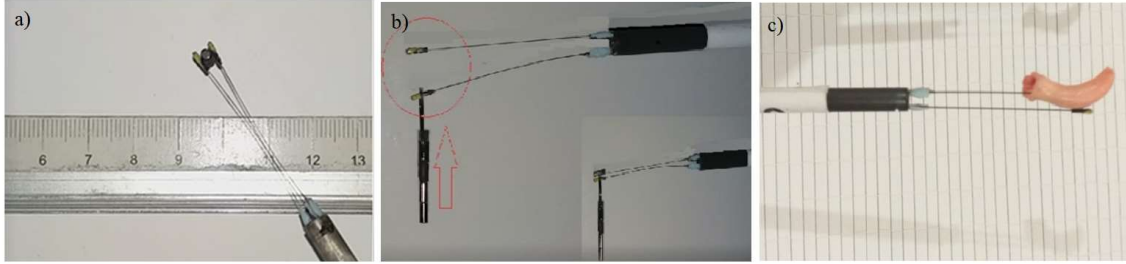
Tablo 4.2’de verilen değerlerin ortalaması alındığında mikro tutucunun kuvvete duyarlı sensöre 1.893 gr’lık yük uyguladığı, bunun da yaklaşık olarak 0.01856 N’luk kuvvete denk geldiği hesaplanmıştır.

Tutucu 6 ve 7 başlangıç ağız kapalı olarak üretilmiştir. Doğal bir basma kuvvetine sahip olmasına rağmen bu kuvvetin çok düşük olduğu düşünüldüğünden mevcut düzenek ile herhangi bir basma kuvveti elde edilememiştir.

Tutucu 8 ağız kapalı pozisyonda tasarlandığı için gerilim ya da diğer değişkenler ile etkilenebilecek bir basma kuvveti söz konusu değildir. 22.95 gr ağızlığında (0.225 N) bir basma kuvveti elde edilmiştir.

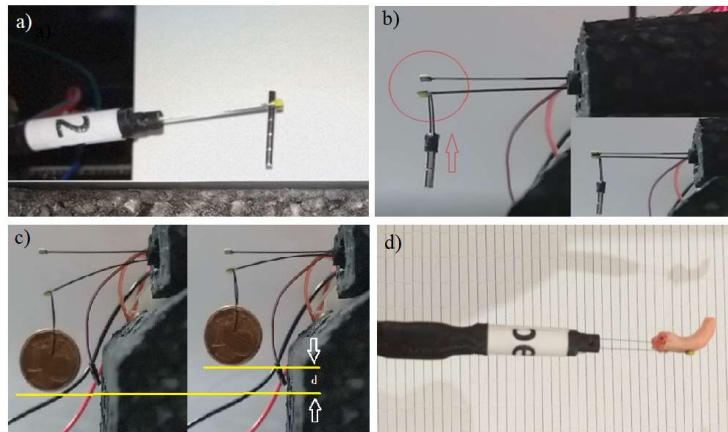
5 Tutucuların Kavrama ve Kaldırma Potansiyelleri

Tutucu 1'in tutma kabiliyeti hakkında bilgi sahibi olmak amacıyla 2 mm çapında ve 3 mm uzunluğunda yüzeyi nikel kaplı, oldukça kaygan yüzeye sahip elle tutulması ve kavranması oldukça güç, silindirik nesneler kullanılmıştır. Tutucu 1 Resim 5.1 (a-c) sırası ile metalik nesneleri ve tavuk aort damarını tutma, kaldırma işlemlerini yapabilmektedir.



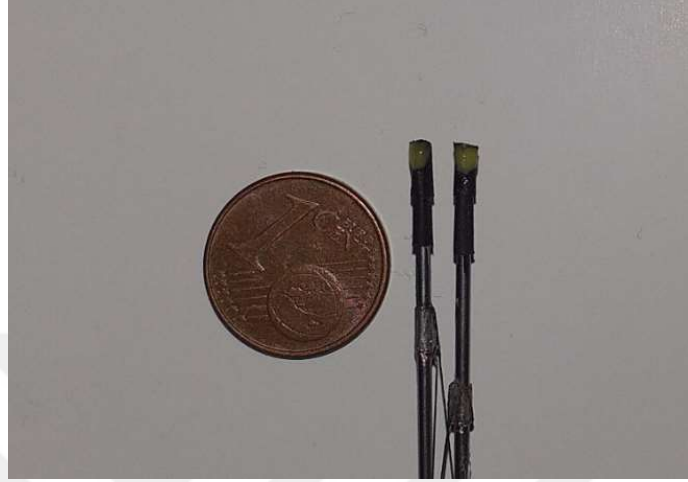
Şekil 5.1: Tutucu 1'in tutma performansı. a) nesne tutma (0.2104 gr), b) nesne kaldırma (0.526 gr), aorta damarının tutulması (0.25gr).

Tutucu 2'nin basma kuvvetini seri port ekranında okunamamasına rağmen tutucunun ürettiği tutma-kavrama işlemini görebilmek amacı ile 2 mm çapında 3 mm uzunluğunda her biri 0.1052 gr olan ağırlıklar yerçekimi ekseninde düz bir zemine dik olarak yerleştirilip tutma işlemi yapılmıştır. Tutucunun kaldırma kuvvetini test edebilmek için 12 V besleme gerilimi tercih edilmiştir. Darbe genişlik modülasyon görev döngü oranı olarak düşük, orta, yüksek sınıflamasına giren 30, 50, 100 DGM oranları seçilmiştir. Tüm bu oranlarda Şekil 5.2 (a-d) nesneleri tutma, kavrama ve kaldırma işleri başarı ile yapılabilmektedir.



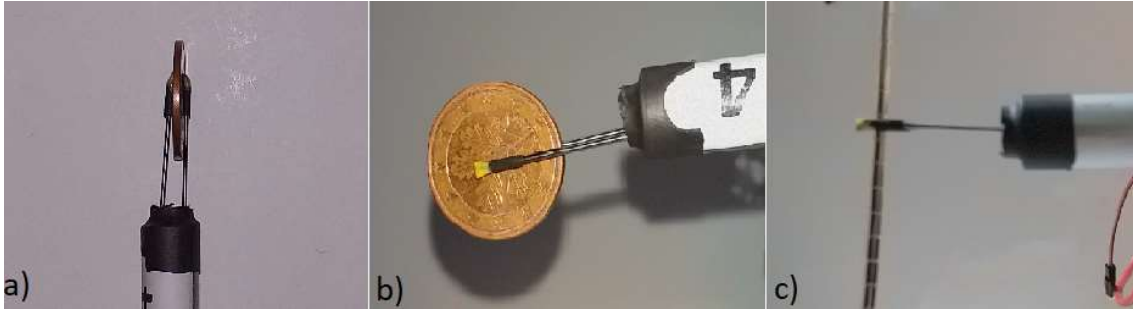
Şekil 5.2: Tutucu 2 tutma- kaldırma performansı : a) nesne kavrama(0.2104 g), b) nesne kaldırma (0.3156 g), c) 1 sent madeni para kaldırma (2.3 g), d) Aorta veni tutma (0.250 g).

Tutucu 3'ün tutma ve kaldırma kabiliyeti hakkında bilgi sahibi olabilmek için ağırlığı bilinen 1 euro/cent'lik madeni para ile çalışılmıştır. 2.30 gr ağırlığındaki parayı tutup kavrama, kaldırma ve serbest bırakma hususunda bir problem ile karşılaşılmamıştır (Şekil 5.3).



Şekil 5.3: Tutucu 3 kavrama, tutuma, kaldırma ve serbest bırakma eyleminin gerçekleştirildiği 2.30 gr ağırlığındaki madeni para.

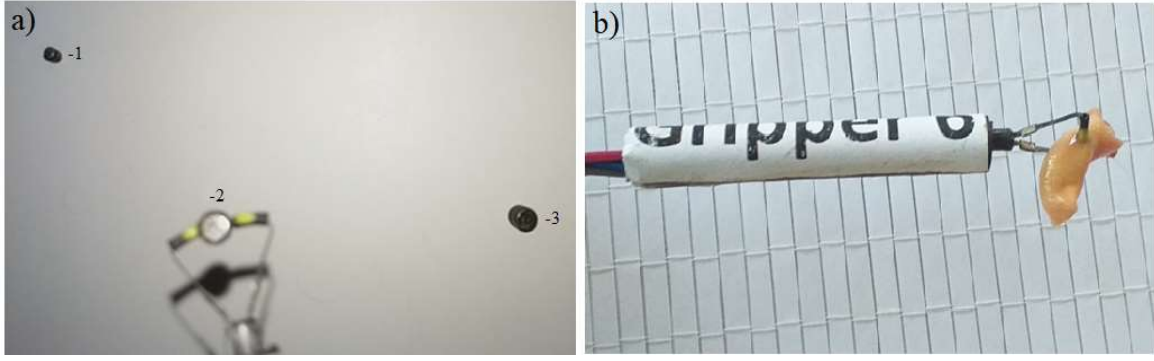
Tutucu 4'un tutma kabiliyeti hakkında bilgi sahibi olmak amacı ile Resim 5.4 a-c)'de 2.3 gr ağırlığında bozuk para ve bir dizi silindirik nesneyi tutup tutamayacağı hususunda bilgi sahibi olmak amacı ile testler yapılmıştır. Bu nesneler rahatlıkla kavranıp tutulabilmektedir.



Şekil 5.4: Tutucu 4'e ait tutma ve kavrama görüntüleri. a-b) 2.3gr metalik para, c) uç uca eklenmiş silindirik nesneler.

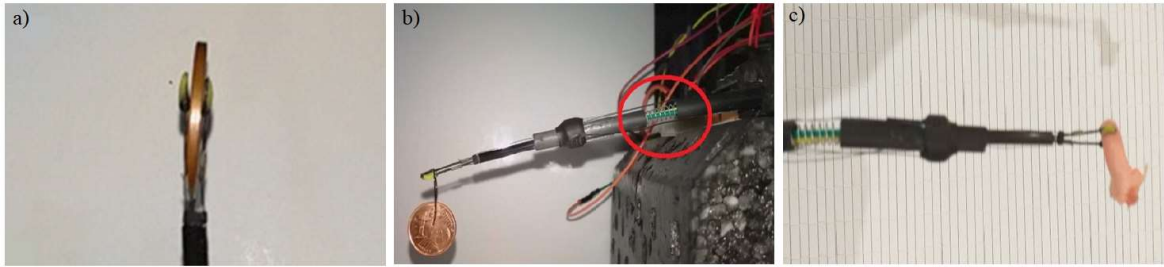
Tutucu uçları kapalı olarak tasarlanmış ve bu pozisyonda 1.83gr basma kuvveti üreten Tutucu 5 ile ağırlıkları 2 gramı geçen nesneler tutulup kaldırılabilmiştir.

Tutucu 6 için 6V 100 Hz 70 DGM doluluk oranında, ağırlıkları 0.1052, 0.2105 ve 0.75 gr olan silindirik nesneler için tutma ve taşıma işlemi yapılmıştır. Bu malzemeleri rahatlıkla tutup bırakmıştır. Söz konusu çalışmaya ait Resim 5.5'de görülmektedir.



Şekil 5.5: Tutucu 6'nın kaldırma, tutma performansı: **a)** Ağırlıkları farklı nesneleri kaldırma (1) 0.1052 gr , (2) 0.2105 gr , (3) 0.75 gr, **b)** Tavuk aort venini tutma (0.25 gr).

Tutucu 7'nin tek yönde kaldırma kuvvetini ölçmek amacı ile tutucu gövdesine 2.30 gr ağırlığında metal para bağlanarak kaldırma işlemi yapılmıştır. Kaldırma kuvveti ile ilgili olarak üst sınır çalışılmamıştır. Tutucunun tutma ve taşıma kabiliyeti hakkında bilgi sahibi olabilmek amacı ile 0.1052, 0.2105 ve 0.75 gr ağırlığındaki sırası ile 2, 3, 5 mm çaplarında silindirik nesneler tutularak kaldırılmıştır. Çalışma ile ilgili görüntüler Resim 5.6 a-c)'de verilmiştir.



Şekil 5.6: Tutucu 7'nin tutma, kavrama, kaldırma performansı **a)** Metal parayı tutma (2.3gr), **b)** Metal parayı kaldırma (2.3gr), **c)** Tavuk aorta venini kavrama (0.250 gr).

Tutucu 8'in tutma ve kavrama yeteneği hakkında bilgi sahip olmak amacı ile 3.92 gr ağırlığındaki 5 cent madeni para tutma ve kaldırma işlemi yapılmıştır. Bu ağırlık Şekil 5.7'de görüldüğü gibi kolaylıkla kavranıp kaldırılmıştır.



Şekil 5.7: Tutucu 8'in tutma kaldırma performansı (3.92gr).

6 Mikro Tutucu Dayanımı ve Enerji Tüketimi

Mikro tutucuların dayanımı hakkında bilgi sahibi olabilmek amacıyla içlerinde en fazla deneysel işleme tabii tutulan Tutucu 5 sinyal jeneratöründen elde edilen 100 Hz frekans altında %50 DGM doluluk oranında 1 saat aralıksız çalıştırılmıştır. Buradan elde edilen verilere göre 1 saatte harcadığı güç 0.334 Watt (W) olarak hesaplanmıştır. Bir saatlik çalışma sonucunda mikro tutucu tellerde herhangi bir deformasyon gerçekleşmemiştir. Ayrıca deneysel işlemler esnasında bu mikro tutucu 1000 çevrimin üzerinde açma ve kapama işlemine tabii tutulmuştur. Yüksek akım yoğunluklarında tutucu uçların aşırı açılmasından kaynaklanan geçici ağız deformasyonuna rağmen çalışmaya devam etmiştir.

7 Tartışma

ŞHA tabanlı eyleyici uygulamalarında, elektrik akımının yarattığı joule ısıtmasından dolayı faz değişimleri ile gerçekleşen hacimsel büzüşme ve de elde edilen deplasman (yer değiştirme) miktarları uzun vadede manipülasyonu yapan tel yada hafızalı malzemenin fiziksel özelliklerinin olumsuz etkilenmesinden dolayı değişir. Yani ŞHA ile yapılan eyleme işleminde bir takım kayıplar yaşanabilir. Testere ağzı (rampa) ve adım darbe besleme, girişleri ile döngüsel davranışta nispeten elverişli stabilite ve ŞHA tel mekanizmalarında daha az plastik gerinim sağlayan alternatif çalıştırma yöntemleri olmuştur[29]. Bu çalışmada tutucu eyleme ve hareket mekanizmasında sinyal frekansı ayarlarına izin veren ekonomik ve kolay bir yöntem olarak DGM sinyal üretici tercih edilmiştir. ŞHA malzemeler ile yapılan tutucu uçların açma ve kapama işlemlerinde bu malzemelerin şekil bellek ve süperelastik özellikleri tek tek ve bir arada kombine edilerek kullanılmıştır. Tutucu uçları ağız açıklığı, anlık ve ortalama açma ve kapama hızları video görüntü işleme yöntemleri ile ölçülmüştür ve literatürde benzer işlemler elektronik sensörler ve probalar yardımı ile yapıldığı görülmüştür. Artan besleme gerilimi ve DGM görev döngüsü oranları ile tüm tutucu tasarımları için açma ve kapama tepki süreleri ve bu tepkilere verdiği hızlar artmıştır. Genel olarak; voltaj beslemesi ve görev döngüsü oranlarındaki artış, açma ve kapama işlemlerinde tutucu uçlarında hızlı açılma ancak daha yavaş kapanma hızları ile sonuçlanmıştır. Bu da tutucu uçlarının açılma ve kapanma periyotları arasındaki farkın artması anlamına gelmektedir. Farklı besleme gerilimi ve görev döngü oranları incelenerek, açma ve kapama işlemleri arasındaki senkronizasyonu sağlamak için çalışma parametrelerini belirlemek mümkün olmuştur. Tutucu uçlarının kontrol etme ve açma-kapama hareketi sağlamak için kullanılan malzemenin çapı arttıkça daha uzun tepki süresi ve de daha yüksek akımlara ihtiyaç duyulmuştur.

Tutucu uçlarında elde edilen hareket mekanizmasının ardında atomik yer değiştirmelerle meydana gelen malzemenin faz dönüşümü ve dolayısıyla malzeme geometrisinde meydana gelen hacimsel daralma yada büzülmedir. Bu boyutsal değişiklik makroskopik olarak gözlemlenebilir ve ŞHA malzemenin geometrisinin bir fonksiyonudur. Örneğin; ŞHA tel ne kadar uzun olursa daha yüksek yer değiştirme dereceleri elde edilmektedir[26]. 34mm uzunluğunda bir telin kullanılması 1.5mm yer değiştirmeye izin vermektedir. Bu çalışmada, başlangıç pozisyonları kapalı yapılandırılmış Tutucu 5 ve 8

için 100 mm uzunluğunda SMA telleri kullanılmış ve maksimum 3.614mm ve 2.790 mm tutucu uç açıklığı ölçümleri elde edilmiştir. Tutucu 6 ve 7 tasarımların sırasıyla 50mm ve 150mm uzunluğunda teller ve 6.469 mm ve 5.976 mm tutucu uç açıklık değerleri ölçülmüştür. Tutucu 6'da daha kısa bir ŞHA teli kullanılarak, çene mekanizmasının özel tasarımına atfedilebilecek diğer kıskaçlara kıyasla daha yüksek çene yer değiştirme değerleri elde etmek mümkün olmuştur. ŞHA tabanlı tutucu çalışmalarında tel çapının tutma parametrelerini yakından etkilediğinden bahsedilmiştir. Literatürde, 0.076 mm² ve 0.1mm² çaplı tellerin montaj zorluğu ve kırılğan davranışı ile ilgili bazı zorluklardan bahsedilmiştir[33]. Yine aynı çalışmada 0,25 mm² tel kullanımının akım gereksinimini ve soğutma sürelerini arttırırken, aynı miktarda akım kaynağı ile 0,15mm² aktivasyonu, teldeki akım yoğunluğunu arttırmıştır, bu da mekanizmanın daha hızlı açılma-kapanma tepkisine neden olduğu bahsedilmektedir. İlgili çalışmalarda, tutucu uçlarda 4.5 mm'lik döngüsel yer değiştirmeyi üreten 200-325 mA akım dereceleriyle gerçekleştiği görülmüştür. . Monoblok başlangıç ağız açıklığı 1 mm olan bir mikro tutucu 0.13 mm² sahip bir nitinol tel ile 100 mA akım değerlerinden başlayarak ağız hareketleri elde edilmiştir. Çenelerin kapanmasını gerçekleştirmek için 200-320 mA arasında değişen bir akım girişi kullanılmıştır. Düşük akım girişleri, çene mekanizmasında yavaş bir harekete ve daha az açıklığa neden olmuştur. 200 mA girişi ile 0,6 mm çene açıklığına ve 1.7 sn kapanma süresine ulaşılmıştır. Artan akım miktarları ile beraber hem ağız kapanma miktarları hem de süreleri belirgin olarak azalmıştır[46]. Bir başka çalışmada 0,10 mm çapında ŞHA tel ile tutucu ağız açma ve bir yay ile kapatma mekanizmasına sahip tutucu tasarımında aktivasyon için gerekli akım 150-200 mA arasında gerçekleşmiştir[34]. Çapları 1 mm² olan ŞHA yayı ile üretilen bir makro tutucu ile kavrama ve bırakma deneyleri yüksek akım değerlerine ihtiyacı doğurduğundan harici bir soğutma sistemine ihtiyaç doğurmuştur. Düşük akımlarda açma hareketi, kapanma hareketinden daha uzun sürerken, yüksek akım hızlarında her iki işlem de benzer zaman aralıklarında gerçekleşmiştir[47]. Bizim çalışmamızda da besleme voltajı ve DGM görev döngü oranlarındaki artışın, başlangıçta açık bir konfigürasyonla tasarlanan tutucular için kapanma sürelerini azalttığını ortaya koymuştur. Tutucu mekanizmalarının yapısına bağlı olarak, kapanma hareketleri 2-12 saniye içinde sonlanırken, tutucu ağızlarının orijinal konumlarına geri dönmesi 1-12 saniye sürmüştür. Tutucu uçlarının açılma ve kapanma periyotları ŞHA malzemesinin çapı ile önemli ölçüde ilişkilidir. Tepki yada geri dönüş

süresi uzayan malzemeler yay formunda ve büyük çapa sahiplerdir. Tutucu uçlarının en kısa sürede kapanması 1.2 sn ile Tutucu 2’de gerçekleşmiştir. Başlangıç ağız pozisyonları kapalı olarak tasarlanmış tutucular, tutma işleminin devamı için doğal ürettikleri kuvveti kullanırken enerji tasarrufu sağlamak ve tutma için sürekli teller aktive edilmediğinden tellerin yüksek akımdan dolayı deformasyona uğrama riskleri yoktur. Kapalı tutucu uçlarını açma miktarı ve hızı doğrudan akım yoğunluğu ile bağlantılıdır. Yüksek akım yoğunluklarında daha hızlı bir tepki alınmaktadır. Diğer bir değişle genel olarak çalışmamızda bu tutucularda artan besleme gerilimleri ve DGM görev döngü oranlarında tutucu ağızlarının ortalama açılma hızı artmıştır. Öte yandan, tutucu kapanma süresi ise artan DGM oranları ile beraber uzamıştır. Literatür incelendiğinde, farklı uzunluklardaki ŞHA telleri, 90-1430 mA arasında değişen akım besleme koşulları kullanılarak çalıştırıldığı görülmüştür. Tel çapına bağlı olarak yüksek akımlarda nitinol tellerin akkor haline geldiği ve soğuma çevrimleri ile özelliklerini kaybettikleri belirtilmektedir. Çalışmamızda Tutucu 4 haricinde 0.150 mm^2 çapında teller kullanılmıştır. Tutucu kol boynunu hareket ettiren mekanizmada ise daha yüksek yük miktarlarına çıkılacağı düşünülerek 0.200 mm^2 çapında teller kullanılmıştır. Tutucu 4 tutucu ağızını kapatmak için 0.5 mm^2 çapa sahip bir yay ile kontrol edilmiştir ve 0.15 mm^2 çapa sahip benzer tutucu parametreleri ile kıyaslandığında artan besleme gerilimi ve sistem akımlarında daha uzun tepki zamanları verdiği görülmüştür. Başlangıç ağız uçları açık olan tutucularda artan akım değerleri ile uçların kapanma süreleri azalmıştır. Öte yandan uçların başlangıç açık pozisyonlarına gelmeleri kapanma süreleri ile kıyaslandığında daha uzun sürede gerçekleşmiştir. Bunun nedeni yüksek akım yoğunluğunun sebep olduğu hızlı ve yüksek ısınmanın daha geç soğumasıdır.

Besleme voltajı ve görev döngüsü oranlarının artırılması, daha yüksek kavrama kuvvetlerinin elde edilmesini sağlamaktadır. Bazı tutucuların ürettiği tutma kuvvetini ölçmek mümkün olmuşken, bazılarının tasarımdan kaynaklanan sebepler ile ürettikleri kuvveti ölçmek mümkün olmamıştır. Tutucu uçlarında üretilen kuvvet tasarıma bağlı olduğu kadar kullanılan ŞHA’nın cinsine ve özelliklerine de bağlıdır. Literatürde 200 mA akım beslemeli 0.1 mm^2 ŞHA teli kullanılarak 0.0748 N kavrama kuvveti elde edildiği[17], 0.15 mm^2 ŞHA tel ve 5mm başlangıç çene açıklığına sahip bir mikro tutucu tasarımı paralel ve çapraz çekirme ile iki farklı şekilde çalıştırılarak sırası ile 2.4 ve 4.6 N kuvvetler üretildiği[36], 0.1 mm^2 ŞHA teli ile kontrol edilen ve tutma-bırakma

periyodunun 2 sn. civarında tamamlandığı bir mikro tutucu için 0.49N tutma kuvveti üretildiği [48], 2.8 A'lık bir sistem akımı ile çalışılan bir tutucu mekanizmasında 1.5-6 N arasında bir kuvvetin kayıt edildiğine rastlanmıştır[47]. Çalışmamızda, başlangıçta açık konfigürasyona sahip Tutucu 1 ve 2 dışında, Tutucu 3 ve 4 artan besleme voltajı ve görev döngüsü oranları ile basma kuvveti üretmişlerdir. 12V, 100 Hz, % 40 görev döngüsü besleme koşullarında Tutucu 3 ile tespit edilebilir minimum tutma kuvveti 1.07 g (0.0104 N) elde edilmiştir. Diğer yandan, 9V, 100 Hz ve % 30 görev döngüsü koşulları altında Tutucu 5 ile maksimum 6.051g (0.0593N) tutma kuvveti elde edilmiştir. Tutucu 2 tarafından üretilen tutma kuvveti ölçülebilir olmasa da, yakalayıcının bir dizi kavrama ve tutma görevini başarıyla yerine getirdiği deneysel ortamda tespit edilmiştir. Başlangıç tutucu uçları kapalı (Tutucu 5, 6, 7 ve 8) olarak tasarlanan ve uç tasarımının kendisinden kaynaklanan tutma kuvveti sadece Tutucu 8'de ölçülebilmıştır.

Artan frekans değerleri tutucu sistemlerini besleyen ortalama akım ve gerilim değerleri 10 kHz sinyal frekans değerine kadar hem besleme gerilimlerinde hem de artan DGM görev döngüsü oranlarında belirli bir değer aralığında kalmış genelde çok az bir değişim göstermiştir. Ancak besleme gerilimi ve daha yüksek DGM görev döngü oranlarında bu ortalama çıkış gerilim ve akımları belirli bir frekans değerinden sonra düşüş eğilimine girmiş ve bazı frekans değerlerinde sıfır değerine ulaşmıştır.

8 Sonuçlar

Tutucu uçlarını hareket elde etmede, görev döngü oranlarının ayarlarına izin veren ekonomik ve kolay bir yöntem olarak DGM sinyal reteci tercih edilerek elektrik akımının uzun dönem malzeme özelliklerine ters etkisinin önüne geçilmiştir. Tutucu kolda ise Atmel Atmega 2560 denetleyici kartının DGM ıkışı kullanılarak benzer yarar elde edilmiştir.

Çalışmada kullanılan şHA malzemeler (tel, yay, şerit) ile hem makro hem de mikro hareketler elde edilebilmiştir ve bu hareketlerin miktarı ve hızı kontrol edilebilmiştir.

şHA'lara özgü şekil hafıza ve süperelastiklik özelliği bir arada kullanılabilmiiştir. Ayrıca farklı malze gruplarına ait yay ve tel gibi malzemeler ile hibrit bir uygulama olanağı elde edilmiştir.

Tutucu uçlarını hareket ettirmede farklı uzunluklardaki teller kullanılmıştır. Bu teller ile asgari elde edilmesi gereken ağız açıklıkları ve tutucu ağzını kapama işlevleri yerine getirilebilmiştir.

Tutucu uçlarını kapama amacı ile daha kalın bir şHA tel formunun kullanılması açma kapama operasyonunun bir çevrim zamanını oldukça uzatmıştır. Buradan yola çıkarak bu hareketleri elde etmede mümkün olan en düşük tel çaplarının kullanılmasının açma ve kapama çevrimlerini kısaltacağı sonucu çıkarılmıştır.

Tutucu uçları ve kol başını hareket ettirmek için gerekli olan akım mA mertebelerinde yeterli olmuştur. Nadiren 1A seviyelerine çıkılmıştır. Bu ve daha st akım yoğunlukları tutucu uç ve kol mekanizmasının kontrolünü zorlaştırmıştır. Bazı tutucu uçlarında nispeten yüksek sayılacak akım yoğunlukları tutucu uçlarında geçici deformasyona yol açmıştır.

Tutucu uçlarının başlangıç pozisyonu açık ve kapalı olarak iki grup halinde tasarlanan mikro tutucular farklı geometrileri, ağırlıkları, canlı olmayan dokuları tutma, kavrama, kaldırma ve bırakma işlevlerini yerine getirmiştir. Tutucu uçlarının üretikleri tutma kuvveti kuvvete duyarlı direnç sensörleri ile ölçülebilmiştir. Bazı tutucular ise pratikçe tutma, kavrama, bırakma işlevlerini yapsa da daha hassas bir lme yöntemine ihtiyaç duyduklarından kullandığımız yöntem ile ölçmek mümkün olmamıştır. Benzer şekilde

tutucu kol başının 4 yönde ne kadar kuvvet ürettikleri yük hücresi kullanılarak ölçülebilmektedir.

Tutucu uçlarında ve tutucu kol başında üretilen basma kuvveti miktarı akım yoğunluğuna bağlı olarak artmıştır. Yani yüksek akım yoğunlukları ile basma kuvvetinin de kontrol edilebileceği düşünülmektedir.

DGM görev döngü oranları ile oynanarak istenen tutucu uç açıklığı, açma-kapama süreleri ve hızlarını kontrol etmek mümkün olmuştur. Böylelikle hassas tutma, kavrama yada tam tersi hızlı tutma-bırakma gibi işlemler yapılabilmiştir. Benzer bir şekilde tutucu kol başının hareket miktarı ve hızları da kontrol edilebilmiştir.

Düşük frekans yada belirli frekans değerleri tutucu sistemini kontrol etmeye olanak tanıyan ortalama çıkış gerilim ve akım değerlerini değiştirmemiştir. Fakat normal koşullarda bazı besleme gerilimleri ve yüksek sayılabilecek görev döngü oranlarında tutucu uçlarını harekete geçiren tellerin ani ve hızlı ısınmasından dolayı kontrol edilemeyen tutucu uçları nispeten yüksek sayılabilecek bazı frekans değerlerinde düşen ortalama çıkış gerilim ve akımları sayesinde kontrol edilebilmiştir. Fakat genel olarak söylemek gerekirse; besleme gerilimi ve DGM girişleri tutucu mekanizmalarının kontrolünde daha etkili olmuştur.

Radyo Frekansı (RF) ile aktive edilen nikel titanyum eyleyici sistemleri dışında haberleşme modülü kullanılarak kablosuz olarak aktive edilmesi bakımından yeni bir yaklaşım sunulmaya çalışılmıştır.

Deneyisel çalışmalarda kullanılan uçlardan bir tanesi tutucu kol başına monte edilmiştir. Tutma, kavrama, kaldırma, serbest bırakma çevrimleri tutucu kolda olduğu gibi kablosuz olarak aktive edilebilmiştir.

Tutucu kolun her ekseninde homojen bir çalışma aralığına ulaşması için geliştirilmeye ihtiyacı vardır. Zamanla kullanılan telin gevşemesi veya hacisel büzüşme ile meydana gelen değişimi orijinal duruma getirecek bir geri yükleme yada bir kalibrasyon mekanizmasına ihtiyaç duyduğu görülmüştür.

Tutucu uçlarının hareket miktarı ve kolun yaptığı açısal yer değiştirme, reaksiyon hızları, ortalama çevrim zamanları gibi değişkenler MatLab Görüntü İşleme araç kutusunun verdiği olanaklar ile hesaplanabilmiştir.

Bu çalışma, düşük bütçeli bir tutucu ve kol sisteminin şekil hafızalı alaşım malzemeler ile yapılabileceğini ortaya koymuştur.

Bu malzemeler ile yapılacak bir tutucu ve hareket sistemlerinin seri üretime uygun olacağı yada her bir üretim grubunun belirli bir kararlılık aralığında çalışacağı tartışmaya açıktır.

Gelecek çalışmalar kalp damar cerrahisinde hassas tutma işlemleri gerektiren ve şu an klasik yöntemlerle tutulan ve operasyonda ‘LİMA tutma’ olarak adlandırılan işlemlerin bu elektronik düzenek kullanılarak hassas tutma işlemi yapılması düşünülmektedir.





Kaynakça

- [1] K. Otsuka and X. Ren, "Recent developments in the research of $\text{\text{S}}\text{H}\text{Ape}$ memory alloys," *Intermetallics*, vol. 7, pp. 511-528, 1999.
- [2] G. Lange, A. Lachmann, A. H. A. Rahim, M. H. Ismail, and C. Y. Low, " $\text{\text{S}}\text{H}\text{Ape}$ Memory Alloys as Linear Drives in Robot Hand Actuation," *Procedia Computer Science*, vol. 76, pp. 168-173, 2015.
- [3] A. Suleman and C. Crawford, "Design and testing of a biomimetic tuna using $\text{\text{S}}\text{H}\text{Ape}$ memory alloy induced propulsion," *Computers & structures*, vol. 86, pp. 491-499, 2008.
- [4] M. Sreekumar, M. Singaperumal, T. Nagarajan, M. Zoppi, and R. Molfino, "Recent advances in nonlinear control technologies for $\text{\text{S}}\text{H}\text{Ape}$ memory alloy actuators," *Journal of Zhejiang University-Science A*, vol. 8, pp. 818-829, 2007.
- [5] S.-y. Yang, S.-w. Kang, Y.-M. Lim, Y.-j. Lee, J.-i. Kim, and T.-h. Nam, "Temperature profiles in a Ti-45Ni-5Cu (at%) $\text{\text{S}}\text{H}\text{Ape}$ memory alloy developed by the Joule heating," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 490, pp. L28-L32, 2010.
- [6] A. Ianagui and E. A. Tannuri, "A sliding mode torque and position controller for an antagonistic SMA actuator," *Mechatronics*, vol. 30, pp. 126-139, 2015.
- [7] J. Mohd Jani, M. Leary, A. Subic, and M. A. Gibson, "A review of $\text{\text{S}}\text{H}\text{Ape}$ memory alloy research, applications and opportunities," *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 56, pp. 1078-1113, 2014/04/01/ 2014.
- [8] S. K. Chaitanya and K. Dhanalakshmi, "Design and control of $\text{\text{S}}\text{H}\text{Ape}$ memory alloy actuated grippers," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, pp. 400-407, 2014.
- [9] M. Gauthier and S. Régnier, *Robotic microassembly*: John Wiley & Sons, 2011.
- [10] M. Kohl, *$\text{\text{S}}\text{H}\text{Ape}$ memory microactuators*: Springer Science & Business Media, 2013.
- [11] H. Demaghshi, H. Mirzajani, and H. B. Ghavifekr, "A novel electrostatic based microgripper (cellgripper) integrated with contact sensor and equipped with vibrating system to release particles actively," *Microsystem technologies*, vol. 20, pp. 2191-2202, 2014.
- [12] W. Rong, Z. Fan, L. Wang, H. Xie, and L. Sun, "A vacuum microgripping tool with integrated vibration releasing capability," *Review of Scientific Instruments*, vol. 85, p. 085002, 2014.
- [13] M. Kohl, B. Krevet, and E. Just, "SMA microgripper system," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 97, pp. 646-652, 2002.
- [14] M. Mertmann and E. Hornbogen, "Grippers for the micro assembly containing $\text{\text{S}}\text{H}\text{Ape}$ memory actuators and sensors," *Le Journal de Physique IV*, vol. 7, pp. C5-621-C5-626, 1997.
- [15] V. R. C. Kode and M. C. Cavusoglu, "Design and characterization of a novel

- hybrid actuator using SHape memory alloy and dc micromotor for minimally invasive surgery applications," *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, vol. 12, pp. 455-464, 2007.
- [16] D. Avirovik, R. Kishore, D. Vuckovic, and S. J. Priya, *Miniature SHape Memory Alloy Heat Engine for Powering Wireless Sensor Nodes* vol. 1, 2014.
 - [17] Z. Zhong and C. Yeong, "Development of a gripper using SMA wire," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 126, pp. 375-381, 2006.
 - [18] L. Riccardi, D. Naso, H. Janocha, and B. Turchiano, "A precise positioning actuator based on feedback-controlled magnetic SHape memory alloys," *Mechatronics*, vol. 22, pp. 568-576, 2012.
 - [19] İ. M. Koç, T. Eray, B. Sümer, and N. Çerçi, "An active force controlled laparoscopic grasper by using a smart material actuation," *Tribology International*, 2016.
 - [20] M. Jin, J. Lee, and K. K. Ahn, "Continuous nonsingular terminal sliding-mode control of SHape memory alloy actuators using time delay estimation," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 20, pp. 899-909, 2014.
 - [21] S. Nak SH atharan and K. Dhanalakshmi, "Differential resistance feedback control of a self-sensing SHape memory alloy actuated system," *ISA transactions*, vol. 53, pp. 289-297, 2014.
 - [22] V. De Sars, S. Haliyo, and J. Szewczyk, "A practical approach to the design and control of active endoscopes," *Mechatronics*, vol. 20, pp. 251-264, 2010.
 - [23] K. Ikuta, "Micro/miniature SHape memory alloy actuator," in *Robotics and Automation, 1990. Proceedings., 1990 IEEE International Conference on*, 1990, pp. 2156-2161.
 - [24] S. Derby, M. Sreekumar, T. Nagarajan, M. Singaperumal, M. Zoppi, and R. Molfino, "Critical review of current trends in SHape memory alloy actuators for intelligent robots," *Industrial Robot: An International Journal*, 2007.
 - [25] Y. K. G. Chenglin, "Design Of A Novel Sma-Actuated Anthropomorphic Gripper," *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING*, vol. 53, pp. 250-255, 2002.
 - [26] J. Kyung, B. Ko, Y. Ha, and G. Chung, "Design of a microgripper for micromanipulation of microcomponents using SMA wires and flexible hinges," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 141, pp. 144-150, 2008.
 - [27] L. An, W. M. Huang, Y. Q. Fu, and N. Guo, "A note on size effect in actuating NiTi SHape memory alloys by electrical current," *Materials & Design*, vol. 29, pp. 1432-1437, 2008.
 - [28] D. J. S. Ruth, K. Dhanalakshmi, and S. S. Nak SH atharan, "Bidirectional angular control of an integrated sensor/actuator SHape memory alloy based system," *Measurement*, vol. 69, pp. 210-221, 2015.
 - [29] R. Casati, F. Passaretti, and A. Tuissi, "Effect of electrical heating conditions on functional fatigue of thin NiTi wire for SHape memory actuators," *Procedia Engineering*, vol. 10, pp. 3423-3428, 2011.

- [30] Z. Guo, Y. Pan, L. B. Wee, and H. Yu, "Design and control of a novel compliant differential ŞHApe memory alloy actuator," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 225, pp. 71-80, 2015.
- [31] M. C. Carrozza, A. Arena, D. Accoto, A. Menciassi, and P. Dario, "A SMA-actuated miniature pressure regulator for a miniature robot for colonoscopy," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 105, pp. 119-131, 2003.
- [32] A. Nikoobin and M. H. Niaki, "Deriving and analyzing the effective parameters in microgrippers performance," *Scientia Iranica*, vol. 19, pp. 1554-1563, 2012.
- [33] S. K. Chaitanya and K. Dhanalakshmi, "Control of ŞHApe Memory Alloy Actuated Gripper using Pulse-Width Modulation," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 47, pp. 408-413, 2014.
- [34] Z. Zhong and S. Chan, "Investigation of a gripping device actuated by SMA wire," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 136, pp. 335-340, 2007.
- [35] R. A. Russell, "A robotic system for performing sub-millemetre grasping and manipulation tasks," *Robotics and autonomous systems*, vol. 13, pp. 209-218, 1994.
- [36] A. M. Bertetto and M. Ruggiu, "A two degree of freedom gripper actuated by SMA with flexure hinges," *Journal of Field Robotics*, vol. 20, pp. 649-657, 2003.
- [37] V. S. I. Sundara Sathiyar KS, Rajesh V., "Gripper Actuator Using ŞHApe Memory Alloy Spring," *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. Volume 5, p. 1, February 2015
- [38] W. Huang, X. Gao, B. Loo, L. He, and B. Ngoi, "Micro Gripper Using Two-Way NiTi ŞHApe Memory Alloy Thin Sheet," in *Materials Science Forum*, 2002, pp. 87-90.
- [39] M. A. Zainal, S. Sahlan, and M. S. M. Ali, "Micromachined ŞHApe-Memory-Alloy Microactuators and Their Application in Biomedical Devices," *Micromachines*, vol. 6, pp. 879-901, 2015.
- [40] H. Fischer, B. Vogel, W. Pfleging, and H. Besser, "Flexible distal tip made of nitinol (NiTi) for a steerable endoscopic camera system," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 273, pp. 780-783, 1999.
- [41] K. Ikuta, M. Tsukamoto, and S. Hirose, "Mathematical model and experimental verification of ŞHApe memory alloy for designing micro actuator," in *[1991] Proceedings. IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, 1991, pp. 103-108.
- [42] K. Dhanalakshmi, "Differential resistance feedback control of a self-sensing ŞHApe memory alloy actuated system," *ISA transactions*, vol. 53, pp. 289-297, 2014.
- [43] C.-C. Lan and C.-H. Fan, "An accurate self-sensing method for the control of ŞHApe memory alloy actuated flexures," *Sensors and Actuators A: physical*, vol. 163, pp. 323-332, 2010.
- [44] S. Choi, Y. Han, J. Kim, and C. Cheong, "Force tracking control of a flexible gripper featuring ŞHApe memory alloy actuators," *Mechatronics*, vol. 11, pp.

677-690, 2001.

- [45] M. M. Ali and K. Takahata, "Frequency-controlled wireless ŞHApe-memory-alloy microactuators integrated using an electroplating bonding process," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 163, pp. 363-372, 2010.
- [46] H. Llewellyn-Evans, C. Griffiths, and A. Fahmy, "An experimental study into displacement of a ŞHApe memory alloy actuated robotic microgripper," *Engineering Research Express*, vol. 2, p. 015027, 2020.
- [47] S. Yan, X. Liu, F. Xu, and J. Wang, "A gripper actuated by a pair of differential SMA springs," *Journal of intelligent material systems and structures*, vol. 18, pp. 459-466, 2007.
- [48] C.-C. Lan, C.-M. Lin, and C.-H. Fan, "A self-sensing microgripper module with wide handling ranges," *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, vol. 16, pp. 141-150, 2010.



9 Ekler

9.1 Ek 1-Alıcı Devre Kod Yazılımı

```
#include <SPI.h>
#include "nRF24L01.h"
#include "RF24.h"
int msg[3];
const uint64_t pipe = 0xE8E8F0F0E1LL;
RF24 radio(11, 12); // CE, CSN
const int in1=7;
const int in2=6;
const int in3=5;
const int in4=4;
const int ena = 8;
const int enb = 9;
const int in1_y=42;
const int in2_y=44;
const int in3_y=46;
const int in4_y=48;
const int ena_y = 2;
const int enb_y = 3;
const int in1_b=28;
const int in2_b=30;
const int in3_b=32;
const int in4_b=34;
const int ena_b = 13;
const int enb_b = 10;
char receivedData[32] = "";
int xAxis=512;
int yAxis=512;
int motorSpeedA = 0;
int motorSpeedB = 0;
int motorSpeedA_y = 0;
int motorSpeedB_y = 0;
int button_sutitution=0;
int button_SW=0;
void setup() {
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
  // birinci motor sürücü
  pinMode(in1, OUTPUT);
  pinMode(in2, OUTPUT);
  pinMode(in3, OUTPUT);
  pinMode(in4, OUTPUT);
  pinMode(ena, OUTPUT);
  pinMode(enb, OUTPUT);
  //ikinci motor sürücü
  pinMode(in1_y, OUTPUT);
  pinMode(in2_y, OUTPUT);
  pinMode(in3_y, OUTPUT);
  pinMode(in4_y, OUTPUT);
  pinMode(ena_y, OUTPUT);
  pinMode(enb_y, OUTPUT);
  // 1. motor sürücü devresi
  digitalWrite(in1, HIGH);
  digitalWrite(in2, LOW);
```

```

        digitalWrite(in3, HIGH);
        digitalWrite(in4, LOW);
// 2. motor sürücü devresi
        digitalWrite(in1_y, HIGH);
        digitalWrite(in2_y, LOW);
        digitalWrite(in3_y, HIGH);
        digitalWrite(in4_y, LOW);
// 3. motor sürücü devresi
        digitalWrite(in1_b, HIGH);
        digitalWrite(in2_b, LOW);
        digitalWrite(in3_b, HIGH);
        digitalWrite(in4_b, LOW);
if (yAxis < 470) {
motorSpeedA_y = map(yAxis, 0, 470, 90, 10);
    delay(10);
    Serial.print("asağı:");
    Serial.println(motorSpeedA_y);
}
    else if (yAxis > 550) {
motorSpeedB_y = map(yAxis, 550, 1023, 10, 90);
    delay(10);
    Serial.print("yukarı:");
    Serial.println(motorSpeedB_y);
}
//griper sıkıştırma kontrol ve değeri
    if (button_sutitution <= 1 ) {
        button_SW = 250;
        button_sutitution=0;
    }
    else
    {
        button_SW = 0;
    }
    delay(100);
    analogWrite(ena, motorSpeedA); // Send PWM signal to motor A
    analogWrite(enb, motorSpeedB); // Send PWM signal to motor B
    analogWrite(ena_y, motorSpeedA_y); // Send PWM signal to motor A_y
    analogWrite(enb_y, motorSpeedB_y); // Send PWM signal to motor B_y
    analogWrite(enb_b, button_SW);
}

```

9.2 Ek 2-Verici Devre Kod Yazılımı

```
#include <SPI.h>
#include "nRF24L01.h"
#include "RF24.h"
int datos[3];
RF24 radio(7, 8);
const uint64_t address = 0xE8E8F0F0E1LL;
int pinButton = 6;
int buttonState = 0;
int RPWM_Output = 0;
void setup()
{
  radio.begin();
  radio.openWritingPipe(address);
  pinMode(pinButton, INPUT_PULLUP);
  pinMode(RPWM_Output, OUTPUT);
}
void loop(void) {
  buttonState = digitalRead(pinButton);
  datos[0] = analogRead(A0);
  datos[1] = analogRead(A1);
  if(buttonState > 0)
  {
    RPWM_Output = 5;
  } else
  {
    RPWM_Output = 0;
  }
  datos[2] = RPWM_Output;
  radio.write(&datos, sizeof(datos));
}
```

9.3 Ek 3-Tutucu Uçlarının Açılma Miktarı, Ortalama Açılma-Kapanma Hızlarının MATLAB Kod Yazılımı ile Hesaplanması

```
clear all;
mov=VideoReader('6V100kHz70PWM.mp4');
nFrames=mov.NumberOfFrames;
duration = mov.Duration;
frame_rate = mov.FrameRate;
total_frames = duration .* frame_rate;
tm = 0:1/frame_rate:(nFrames-1)/frame_rate;
k=1;
RGB2=read(mov,1);
%imwrite(RGB2,'newimg.jpg','jpg')
imshow(RGB2)
hold on
% Arm neck diameter based calibration
%[xx1,yy1]=ginput(1)
% x1=round(xx1);
% y1=round(yy1);
BW1 = createMask1(RGB2);
BW2=bwareaopen(BW1,10);
imshow(BW2)
% rowL=BW2(y1,1:x1);
% rowR=BW2(y1,x1:end);
% idxL=max(find(rowL))
% idxR=min(find(rowR))
% Left border
% colL = idxL;
% rowL = y1;
% Right border
% rowR = y1;
% colR = x1+idxR-1;
%
% boundaryL = bwtraceboundary(BW2, [rowL, colL], 'E', 8, 50);
%
% boundaryR = bwtraceboundary(BW2, [rowR, colR], 'E', 8,
50,'counter');
%
% abL = polyfit(boundaryL(:,2), boundaryL(:,1), 1);
% abR = polyfit(boundaryR(:,2), boundaryR(:,1), 1);

% m=(abL(1)+abR(1))/2; % take average of the slopes for error
smoothing
% dN =abs(abR(2)-abL(2))/sqrt(1+m^2)
% plot(boundaryL(:,2),boundaryL(:,1),'g','LineWidth',2);
% plot(boundaryR(:,2),boundaryR(:,1),'g','LineWidth',2);
dN=45.6635;
% Fingers detection
[xxx1,yyy1]=ginput(1)
BW3 = ~BW2;
xFL=round(xxx1);
yFL=round(yyy1);
rowFL=BW3(yFL,1:xFL);
rowFR=BW3(yFL,xFL:end);
idxFL=max(find(rowFL))
idxFR=min(find(rowFR))
```

```

% Left border
colFL = idxFL;
rowFL = yFL;
% Right border
rowFR = yFL;
colFR = xFL+idxFR-1;
boundaryFL = bwtraceboundary(BW3, [rowFL, colFL], 'E', 8, 150);
boundaryFR = bwtraceboundary(BW3, [rowFR, colFR], 'E', 8,
150,'counter');
% average of the distance between left-right sample points on the
finger
%dF = mean(sqrt(sum(((boundaryFR - boundaryFL).^2),2)));
dF = min(abs(boundaryFR(:,2) - boundaryFL(:,2)))
plot(boundaryFL(:,2),boundaryFL(:,1),'g','LineWidth',2);
plot(boundaryFR(:,2),boundaryFR(:,1),'g','LineWidth',2);
for i=1:nFrames
RGB3=read(mov,i);
BW3 = createMask1(RGB3);
BW4=bwareaopen(BW3,10);
BW5 = ~BW4;
% xFL and yFL already determined after finger center selection by the
user
rowFL=BW5(yFL,1:xFL);
rowFR=BW5(yFL,xFL:end);
idxFL=max(find(rowFL));
idxFR=min(find(rowFR));
% Left border
colFL = idxFL;
rowFL = yFL;
% Right border
rowFR = yFL;
colFR = xFL+idxFR-1;

boundaryFL = bwtraceboundary(BW5, [rowFL, colFL], 'E', 8, 150);
boundaryFR = bwtraceboundary(BW5, [rowFR, colFR], 'E', 8,
150,'counter');
% average of the distance between left-right sample points on the
finger
%dF = mean(sqrt(sum(((boundaryFR - boundaryFL).^2),2)));
DltPx1(i) = min(abs(boundaryFR(:,2) - boundaryFL(:,2)));
%plot(boundaryFL(:,2),boundaryFL(:,1),'g','LineWidth',2);
%plot(boundaryFR(:,2),boundaryFR(:,1),'g','LineWidth',2);
end
Dlt = DltPx1*5/dN; % convert pixel grip distance using d == 5mm
h= 1/frame_rate;
szz = size(Dlt,2);
rng=20; %choose range even
for k=1:(szz-rng)
    crv = polyfit(tm(1,(k:(k+rng-1))),Dlt(1,(k:(k+rng-1))),1);
    DFDlt(1,k)= crv(1);
end
wrtdata=[tm' Dlt'];
xlswrite('6V100kHz70PWM.xlsx',wrtdata);
figure(2)
plot(tm(1,rng/2:size(Dlt,2)-rng/2-1),Dlt(1,rng/2:size(Dlt,2)-rng/2-
1),'.',tm(1,rng/2:size(Dlt,2)-rng/2-1),DFDlt,'-')
xlabel('time [sec]');
ylabel('gripping velocity [mm/sec]');

```

9.4 Ek 4-Robot Kol Boynunun Eksene Yaptığı Açının MATLAB Kod Yazılımı ile Hesaplanması

```
clear all;
neck=5; %neck dimention [mm]
mov=VideoReader('-y_ekseni_aci_1.mp4');
nFrames=mov.NumberOfFrames;
duration = mov.Duration;
frame_rate = mov.FrameRate;
total_frames = duration .* frame_rate;
tm = 0:1/frame_rate:(nFrames-1)/frame_rate;
k=1;
RGB1=read(mov,1);
%imwrite(RGB2,'newimg.jpg','jpg')
RGB2=RGB1(100:800,1000:1350,:);
BW = createMask10(RGB2);
BW2=bwareaopen(BW,20);
BW3 = imfill(BW2,'holes');
imshow(RGB2)
hold on
%
% for q=1:30:nFrames
% RGB1=read(mov,q);
% RGB2=RGB1(100:800,1000:1350,:);
% %imwrite(RGB2,'newimg.jpg','jpg')
% imshow(RGB2)
% pause
% end

% Arm neck diameter based calibration
[xx1,yy1]=ginput(1)
%[xx2,yy2]=ginput(1)
x1=round(xx1);
y1=round(yy1);
%x2=round(xx2);
%y2=round(yy2);
% I2 = rgb2gray(RGB2);
% threshold2 = graythresh(I2);
%BW3 = ~BW2;
row=BW3(y1,x1:end);
idxL=min(find(row));
idxR=max(find(row));
% Left border
colL = x1+idxL-1;
rowL = y1;
% Right border
rowR = y1;
colR = x1+idxR-1;
psmpl = 200; %please choose divisible by 2
boundaryL = bwtraceboundary(BW3, [rowL, colL], 'NW', 8, psmpl);
boundaryR = bwtraceboundary(BW3, [rowR, colR], 'NE', 8, psmpl, 'counter');
plot(boundaryL(:,2),boundaryL(:,1),'g','LineWidth',2);
plot(boundaryR(:,2),boundaryR(:,1),'g','LineWidth',2);
Lrow = boundaryL(:,1)';
Rrow = boundaryR(:,1)';
```

```

Lcol = boundaryL(:,2)';
Rcol = boundaryR(:,2)';
% Find distance between neck's each left pixel and each right pixel
row coordinates
% all possible double combinations and their differences considered
[gLrow, gRrow] = ndgrid(Lrow(psmpl/2:end), Rrow(psmpl/2:end));
Drow = abs(gLrow-gRrow);
% Find distance between neck's each left pixel and each right pixel
column coordinates
% all possible double combinations and their differences considered
[gLcol, gRcol] = ndgrid(Lcol(psmpl/2:end), Rcol(psmpl/2:end));
Dcol = abs(gLcol-gRcol);
%How ndgrid works
% A=[2 5 3]
% B=[9 7]
% [Ap,Bp] = ndgrid(A,B)
% Ap =
%      2      2
%      5      5
%      3      3
% Bp =
%      9      7
%      9      7
%      9      7
%Find the hypotenus distance and take the minimum for each left
boundary
%pixel
DLR= sqrt(Drow.^2 + Dcol.^2);
minDLR = min(DLR, [], 2);
% Average the distances to obtain a better estimate for dimension
neckDim = mean(minDLR);
Q = [boundaryL(:,2), -boundaryL(:,1), zeros(psmpl,1), ones(psmpl,1)]; %
1st term is X and the 2nd term is Y
%rowS = boundaryL(psmpl/2+1,1); %starting pixel for gripper left
border search
%colS = boundaryL(psmpl/2+1,2);
for (k=2:nFrames)
    deltaMin = 10000;
    clear RGB1 RGB2 BW BW2 BW3 row2;
    RGB1=read(mov,k);
    RGB2=RGB1(100:800,1000:1350,:);
    BW = createMask10(RGB2);
    BW2=bwareaopen(BW,20);
    BW3 = imfill(BW2,'holes');
    row2=BW3(y1,x1:end);
    idxL2=min(find(row2));
    % Left border
    colL2 = x1+idxL2-1;
    rowL2 = y1;
    clear boundaryP P;
    boundaryP = bwtraceboundary(BW3, [rowL2, colL2], 'NW', 8, psmpl/2);
    P = [boundaryP(:,2), -boundaryP(:,1), zeros(psmpl/2,1), ones(psmpl/2,1)];
    % 1st term is X and the 2nd term is Y
    % Now given P and Q determine th, x and y
    % a =cos(th)
    % b = sin(th)
    % c= x

```

```

% d= y
% T_BA=[a -b 0 c;b a 0 d;0 0 1 0;0 0 0 1];
% Q = T*P
% [Px -Py 1 0] [a] =[Qx]
% [Py Px 0 1] [b] =[Qy]
% [c]
% [d]
% AA [a] = BB
% [b]
% [c]
% [d]
for (n=1:psmpl/2+1)

    QQ = Q(n:(n+psmpl/2-1),:);

    AA = [P(:,1) -P(:,2) ones(psmpl/2,1) zeros(psmpl/2,1);
          P(:,2) P(:,1) zeros(psmpl/2,1) ones(psmpl/2,1)];
    BB = [QQ(:,1);
          QQ(:,2)];
    Soln_new = AA\BB; % Least squares solution

    th_check1_new = acos(Soln_new(1))*180/pi;
    th_check2_new = asin(Soln_new(2))*180/pi;

    th_check3_new = atan2(Soln_new(2),Soln_new(1))*180/pi;
    x=Soln_new(3);
    y=Soln_new(4);
    % complete T again
    a = Soln_new(1);
    b = Soln_new(2);
    c= Soln_new(3);
    d= Soln_new(4);
    T_new=[a -b 0 c;b a 0 d;0 0 1 0;0 0 0 1];
    err = QQ' - T_new*P';

    cost = sum(sqrt(sum(err.^2,2)));
    if cost<deltaMin
        deltaMin = cost
        theta(k-1) = th_check3_new;
    end
end
end
close
figure(1)
plot(tm(1:(k-1)),theta)
[tmFLT,thFLT]=dataFLT(tm(1:(k-1)),theta)
figure(2)
plot(tmFLT,thFLT)

```

9.5 EK-5 Kuvvete Duyarlı Sensör ile Tutucu Uçlarında Basma Kuvveti Ölçme Kod Yazılımı

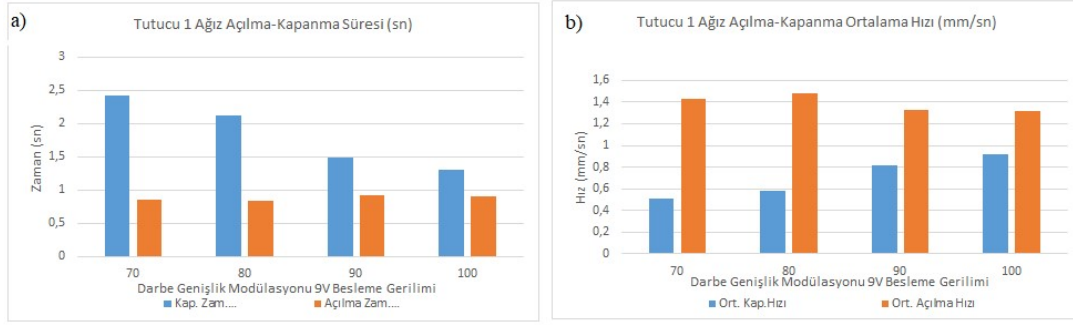
```
const int FSR_PIN = A0; // Pin connected to FSR/resistor divider
// Measure the Voltaj at 5V and resistance of your 3.3k resistor, and
enter
// their value's below:
const float VCC = 4.98; // Measured Voltaj of Ardunio 5V line
const float R_DIV = 3230.0; // Measured resistance of 3.3k resistor
void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(FSR_PIN, INPUT);
}
void loop()
{
  int fsrADC = analogRead(FSR_PIN);
  // If the FSR has no pressure, the resistance will be
  // near infinite. So the Voltaj should be near 0.
  if (fsrADC != 0) // If the analog reading is non-zero
  {
    // Use ADC reading to calculate Voltaj:
    float fsrV = fsrADC * VCC / 1023.0;
    // Use Voltaj and static resistor value to
    // calculate FSR resistance:
    float fsrR = R_DIV * (VCC / fsrV - 1.0);
    Serial.println("Resistance: " + String(fsrR) + " ohms");
    // Guesstimate force based on slopes in figure 3 of
    // FSR datasheet:
    float force;
    float fsrG = 1.0 / fsrR; // Calculate conductance
    // Break parabolic curve down into two linear slopes:
    if (fsrR <= 600)
      force = (fsrG - 0.00075) / 0.00000032639;
    else
      force = fsrG / 0.000000642857;
    Serial.println("Force: " + String(force) + " g");
    Serial.println();

    delay(3000);
  }
  else
  {
    // No pressure detected
  }
}
Force_Sensitive_Resistor_Example.ino
Example sketch for SparkFun's force sensitive resistors
(https://www.sparkfun.com/products/9375)
```

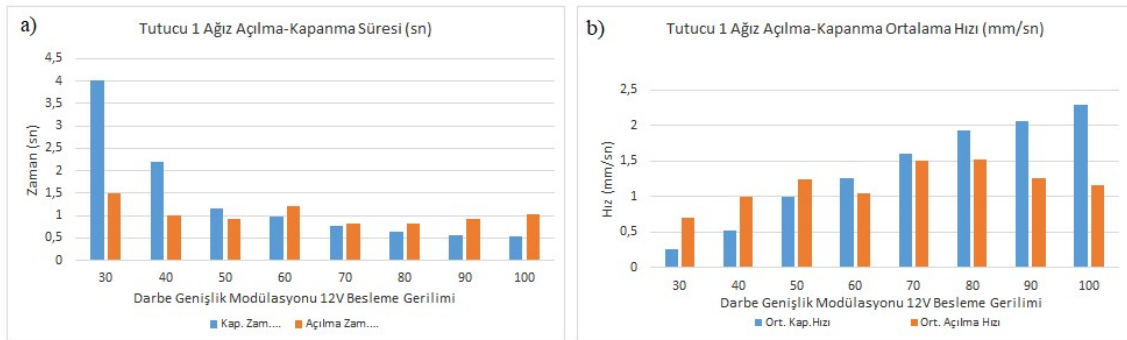
9.6 EK-6 Tutucu 1'e Ait Tablo ve Grafikler

Tablo1: Tutucu 1'e ait 9, 12 ve 15V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.

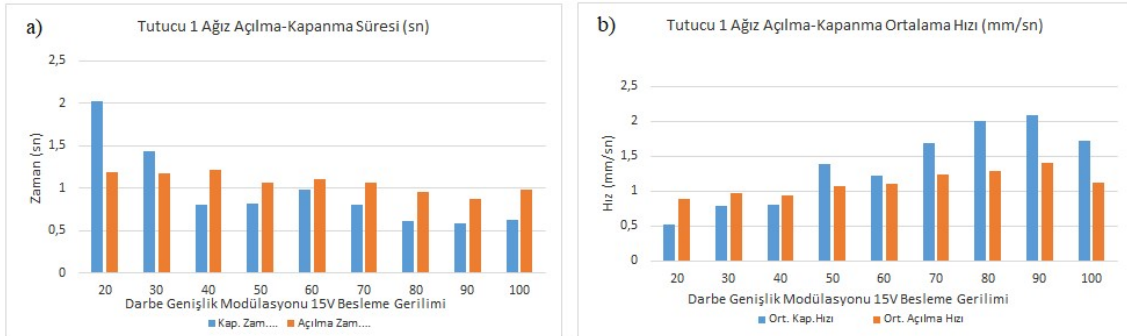
Besleme Voltajı (V)	DGM Görev Döngüsü (%)	Ortalama IBT2 Sürücü Devre Çıkış Voltajı (V)	Ortalama Sistem Akımı (A)	Açılma Zamanı (sn)	Başlangıç Ağız Açıklığı (mm)	Ortalama Açılma Hızı (mm/sn)	Kapanma Zamanı (sn)	Ortalama Kapanma Hızı (mm/sn)
9	10	0.76	0.08	0.00	1.23	0.00	0.00	0.00
9	20	1.46	0.16	0.00	1.23	0.00	0.00	0.00
9	30	1.97	0.28	0.00	1.23	0.00	0.00	0.00
9	40	2.59	0.36	0.00	1.23	0.00	0.00	0.00
9	50	3.22	0.44	0.00	1.23	0.00	0.00	0.00
9	60	3.74	0.51	0.00	1.23	0.00	0.00	0.00
9	70	4.20	0.61	0.85	1.23	1.43	2.42	0.51
9	80	4.79	0.68	0.84	1.24	1.48	2.12	0.58
9	90	5.35	0.79	0.91	1.23	1.33	1.49	0.81
9	100	5.70	0.82	0.90	1.19	1.32	1.30	0.92
12	10	1.06	0.11	0.00	1.23	0.00	0.00	0.00
12	20	1.85	0.25	0.00	1.23	0.00	0.00	0.00
12	30	2.65	0.37	1.50	1.05	0.70	4.02	0.26
12	40	3.43	0.48	1.00	1.07	1.00	2.20	0.52
12	50	4.27	0.60	0.92	1.16	1.25	1.17	1.00
12	60	4.88	0.72	1.20	1.25	1.04	0.99	1.27
12	70	5.57	0.84	0.82	1.23	1.50	0.77	1.60
12	80	6.31	0.93	0.82	1.25	1.52	0.65	1.93
12	90	7.09	1.05	0.92	1.17	1.27	0.57	2.06
12	100	7.66	1.11	1.02	1.20	1.17	0.52	2.30
15	10	1.31	0.14	0.00	1.23	0.00	0.00	0.00
15	20	2.32	0.32	1.19	1.05	0.88	2.03	0.52
15	30	3.30	0.47	1.18	1.14	0.97	1.44	0.79
15	40	4.32	0.62	1.21	1.14	0.94	0.81	0.81
15	50	5.29	0.72	1.07	1.14	1.07	0.82	1.38
15	60	6.01	0.91	1.11	1.23	1.10	0.99	1.23
15	70	6.93	0.11	1.07	1.36	1.24	0.80	1.70
15	80	7.93	1.20	0.96	1.23	1.28	0.61	2.01
15	90	8.83	1.32	0.88	1.23	1.40	0.59	2.08
15	100	9.63	1.43	0.98	1.23	1.12	0.63	1.73



Şekil 1: 100 Hz sabit frekans değeri, 9V Besleme geriliminde Tutucu 1'e ait tutucu uçların a) açılma ve kapanma süreleri, b) açılma ve kapanma ortalama hızları.



Şekil 2: 100 Hz sabit frekans değeri, 12V Besleme geriliminde Tutucu 1'e ait tutucu uçların a) açılma ve kapanma süreleri, b) açılma ve kapanma ortalama hızları.

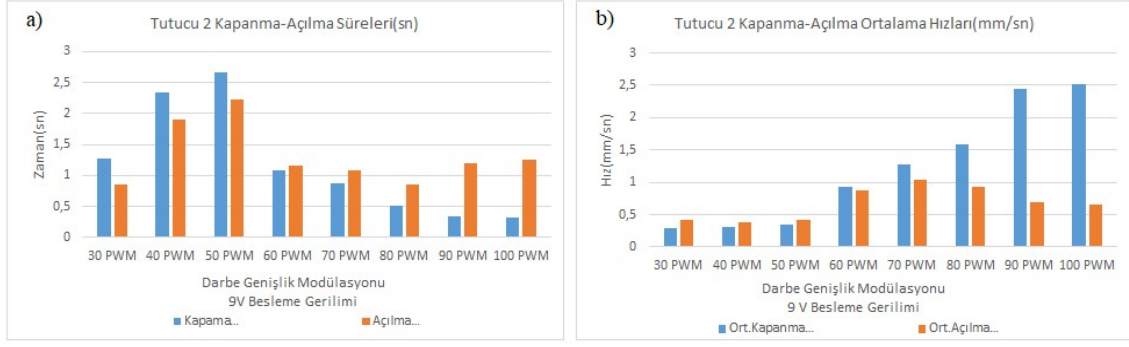


Şekil 3: 100 Hz sabit frekans değeri, 15V Besleme geriliminde Tutucu 1'e ait tutucu uçların a) açılma ve kapanma süreleri, b) açılma ve kapanma ortalama hızları.

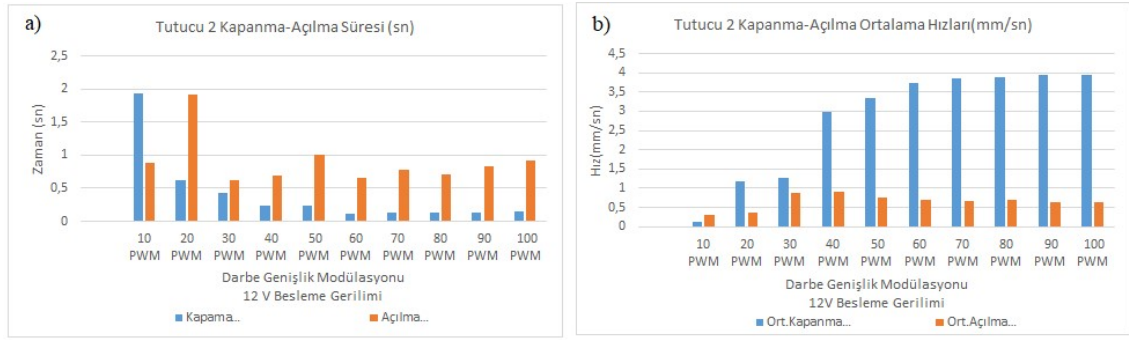
9.7 EK-7 Tutucu 2'e Ait Tablo ve Grafikler

Tablo 2: Tutucu 2'e ait 9, 12 ve 15V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.

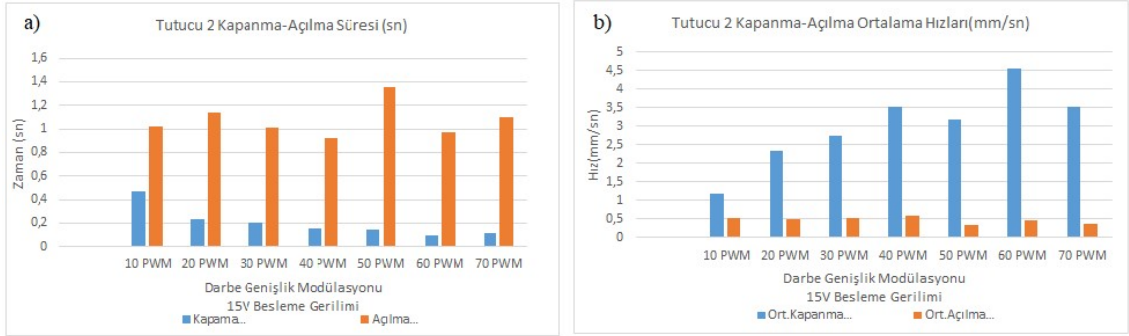
Besleme Voltajı (V)	DGM Görev Döngüsü (%)	Ortalama IBT2 Sürücü Devre Çıkış Voltajı (V)	Ortalama Sistem Akımı (A)	Açılma Zamanı (sn)	Başlangıç Ağız Açıklığı (mm)	Ortalama Açılma Hızı (mm/sn)	Kapanma Zamanı (sn)	Ortalama Kapanma Hızı (mm/sn)
9	10	0.73	0.08	0.00	1.12	0.00	0.00	0.00
9	20	1.30	0.14	0.00	1.12	0.00	0.00	0.00
9	30	1.73	0.19	0.85	0.36	0.43	1.27	0.29
9	40	2.16	0.24	1.91	0.73	0.38	2.33	0.31
9	50	2.86	0.26	2.22	0.91	0.41	2.67	0.34
9	60	2.93	0.33	1.15	1.00	0.87	1.08	0.93
9	70	3.27	0.35	1.09	1.12	1.03	0.88	1.28
9	80	3.57	0.38	0.85	0.82	0.93	0.52	1.58
9	90	4.08	0.54	1.20	0.82	0.68	0.33	2.45
9	100	5.32	0.58	1.25	0.82	0.65	0.32	2.52
12	10	1.02	0.11	0.88	0.27	0.31	1.93	0.14
12	20	1.85	0.21	0.92	0.73	0.38	0.62	1.18
12	30	2.60	0.29	0.62	0.54	0.87	0.42	1.26
12	40	3.30	0.38	0.69	0.64	0.92	0.23	2.98
12	50	4.06	0.47	1.01	0.82	0.75	0.24	3.35
12	60	4.77	0.56	0.65	0.45	0.70	0.12	3.75
12	70	5.37	0.65	0.78	0.51	0.65	0.13	3.85
12	80	6.07	0.71	0.71	0.49	0.69	0.13	3.89
12	90	6.44	0.75	0.82	0.53	0.64	0.13	3.95
12	100	7.39	0.85	0.91	0.58	0.63	0.15	3.95
15	10	1.26	0.14	1.02	0.55	0.54	0.47	1.17
15	20	2.29	0.27	1.13	0.55	0.48	0.23	2.34
15	30	3.11	0.39	1.01	0.55	0.54	0.20	2.73
15	40	3.93	0.48	0.92	0.55	0.59	0.15	3.54
15	50	4.83	0.58	1.36	0.45	0.34	0.14	3.17
15	60	5.81	0.70	0.97	0.45	0.47	0.10	4.55
15	70	6.60	0.81	1.10	0.41	0.37	0.12	3.71



Şekil 4: 100 Hz sabit frekans değeri, 9V Besleme geriliminde Tutucu 2'e ait tutucu uçların a) açılma ve kapanma süreleri, b) açılma ve kapanma ortalama hızları.



Şekil 5: 100 Hz sabit frekans değeri, 12V Besleme geriliminde Tutucu 2'e ait tutucu uçların a) açılma ve kapanma süreleri, b) açılma ve kapanma ortalama hızları.

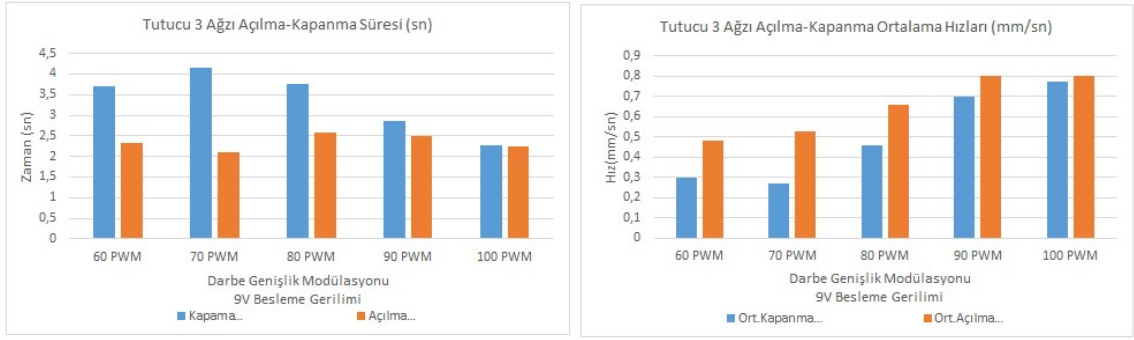


Şekil 6: 100 Hz sabit frekans değeri, 15V Besleme geriliminde Tutucu 2'e ait tutucu uçların a) açılma ve kapanma süreleri, b) açılma ve kapanma ortalama hızları.

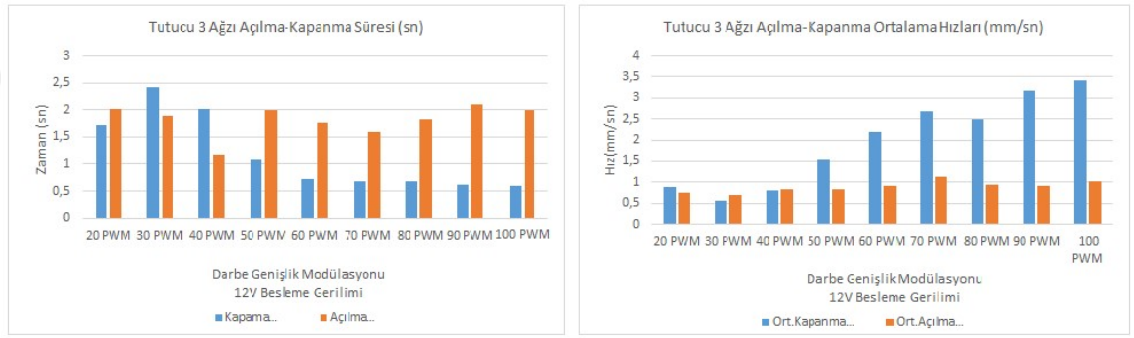
9.8 EK-8 Tutucu 3'e Ait Tablo ve Grafikler

Tablo 3: Tutucu 3'e ait 9, 12 ve 15V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.

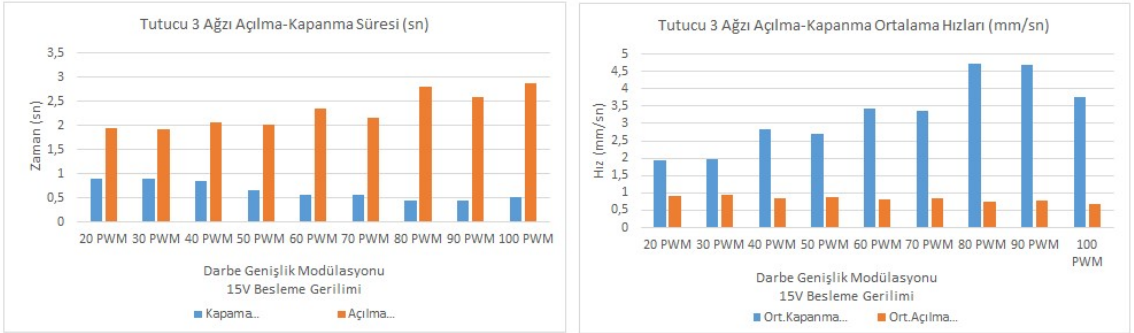
Besleme Voltajı (V)	DGM Görev Döngüsü (%)	Ortalama IBT2 Sürücü Devre Çıkış Voltajı (V)	Ortalama Sistem Akımı (A)	Açılma Zamanı (sn)	Başlangıç Ağız Açıklığı (mm)	Ortalama Açılma Hızı (mm/sn)	Kapanma Zamanı (sn)	Ortalama Kapanma Hızı (mm/sn)
9	10	0.81	0.06	0.00	1.40	0.00	0.00	0.00
9	20	1.53	0.12	0.00	1.40	0.00	0.00	0.00
9	30	2.18	0.16	0.00	1.40	0.00	0.00	0.00
9	40	2.73	0.23	0.00	1.40	0.00	0.00	0.00
9	50	3.34	0.29	0.00	1.40	0.00	0.00	0.00
9	60	3.92	0.34	2.33	1.12	0.48	3.71	0.30
9	70	4.52	0.40	2.11	1.11	0.53	4.14	0.27
9	80	5.12	0.46	2.59	1.71	0.66	3.75	0.46
9	90	5.70	0.50	2.50	2.00	0.80	2.87	0.70
9	100	6.28	0.56	2.25	1.76	0.80	2.28	0.77
12	10	1.06	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	20	1.97	0.18	2.03	1.51	0.74	1.72	0.88
12	30	2.86	0.26	1.89	1.32	0.70	2.42	0.55
12	40	3.69	0.35	1.17	1.61	0.84	2.01	0.80
12	50	4.52	0.43	2.00	1.56	0.83	1.09	1.53
12	60	5.43	0.52	1.77	1.61	0.91	0.74	2.19
12	70	6.22	0.60	1.60	1.80	1.13	0.67	2.68
12	80	6.99	0.67	1.82	1.71	0.94	0.68	2.50
12	90	7.76	0.73	2.11	1.95	0.92	0.62	3.16
12	100	8.44	0.81	2.00	2.05	1.02	0.60	3.41
15	10	1.31	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	20	2.45	0.24	1.95	1.76	0.90	0.90	1.95
15	30	3.51	0.35	1.92	1.76	0.95	0.88	1.99
15	40	4.55	0.46	2.05	1.76	0.86	0.86	2.84
15	50	5.61	0.57	2.00	1.79	0.89	0.86	2.69
15	60	6.67	0.67	2.35	1.95	0.83	0.86	3.44
15	70	7.70	0.78	2.15	1.85	0.86	0.86	3.37
15	80	8.72	0.89	2.80	2.05	0.73	0.86	4.71
15	90	9.76	1.00	2.59	2.05	0.79	0.86	4.69
15	100	10.68	1.09	2.87	1.95	0.68	0.86	3.75



Şekil 7: 100 Hz sabit frekans değeri, 9V Besleme geriliminde Tutucu 3'e ait tutucu uçların a) açılma ve kapanma süreleri, b) açılma ve kapanma ortalama hızları.



Şekil 8: 100 Hz sabit frekans değeri, 12V Besleme geriliminde Tutucu 3'e ait tutucu uçların a) açılma ve kapanma süreleri, b) açılma ve kapanma ortalama hızları.

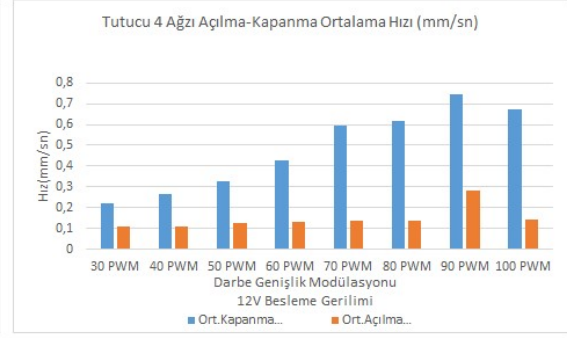
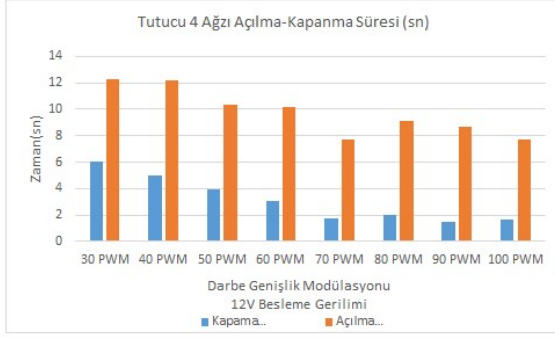


Şekil 9: 100 Hz sabit frekans değeri, 15V Besleme geriliminde Tutucu 3'e ait tutucu uçların a) açılma ve kapanma süreleri, b) açılma ve kapanma ortalama hızları.

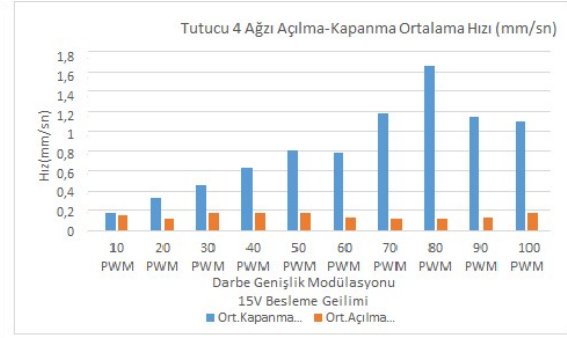
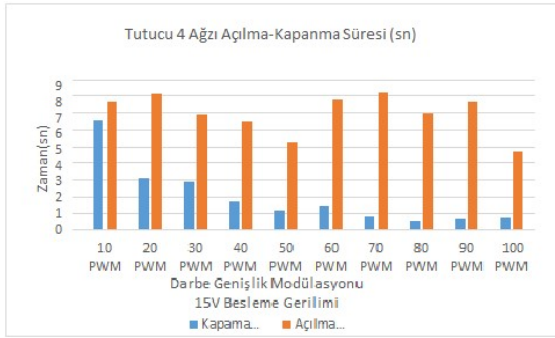
9.9 EK-9 Tutucu 4'e Ait Tablo ve Grafikler

Tablo 4: Tutucu 4'e ait 12 ve 15V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.

Besleme Voltajı (V)	DGM Görev Döngüsü (%)	Ortalama IBT2 Sürücü Devre Çıkış Voltajı (V)	Ortalama Sistem Akımı (A)	Açılma Zamanı (sn)	Başlangıç Ağız Açıklığı (mm)	Ortalama Açılma Hızı (mm/sn)	Kapanma Zamanı (sn)	Ortalama Kapanma Hızı (mm/sn)
12	10	0	0	0	1.90	0	0	0
12	20	0	0	0	1.90	0	0	0
12	30	2.58	0.32	12.28	1.37	0.11	6.06	0.22
12	40	3.35	0.43	12.17	1.33	0.11	4.96	0.27
12	50	4.07	0.52	10.38	1.30	0.13	3.96	0.33
12	60	4.80	0.62	10.15	1.32	0.13	3.09	0.43
12	70	5.60	0.70	7.72	1.06	0.14	1.79	0.59
12	80	6.90	0.79	9.15	1.26	0.14	2.05	0.62
12	90	7.04	0.85	8.70	1.12	0.28	1.50	0.74
12	100	7.70	0.90	7.69	1.10	0.14	1.64	0.67
15	10	1.27	0.16	7.71	1.13	0.15	6.56	0.17
15	20	2.30	0.30	8.16	1.03	0.13	3.09	0.34
15	30	3.30	0.42	6.91	1.17	0.17	2.89	0.47
15	40	4.28	0.55	6.47	1.10	0.17	1.75	0.63
15	50	5.13	0.69	5.22	0.92	0.18	1.14	0.81
15	60	6.04	0.83	7.79	1.11	0.14	1.42	0.79
15	70	7.01	0.96	8.24	1.03	0.12	0.87	1.19
15	80	7.93	1.06	6.99	0.88	0.13	0.53	1.66
15	90	8.88	1.18	7.68	1.03	0.13	0.69	1.15
15	100	9.54	1.30	4.69	0.84	0.18	0.76	1.10



Şekil 10: 100 Hz sabit frekans değeri, 12V Besleme geriliminde Tutucu 4'e ait tutucu uçların a) açılma ve kapanma süreleri, b) açılma ve kapanma ortalama hızları.

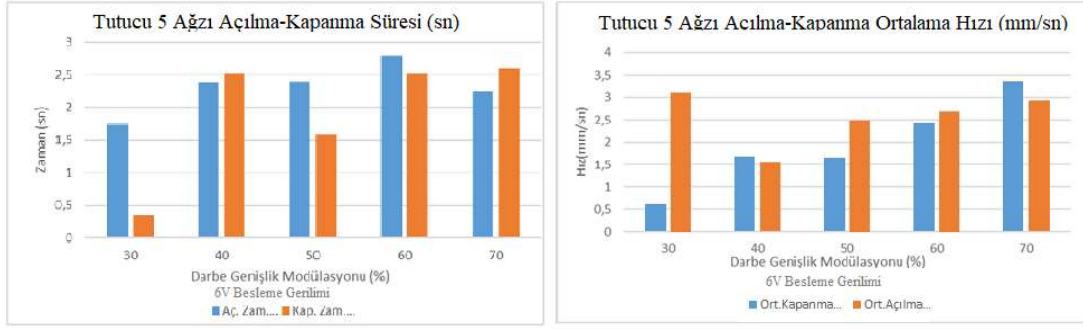


Şekil 11: 100 Hz sabit frekans değeri, 15V Besleme geriliminde Tutucu 4'e ait tutucu uçların a) açılma ve kapanma süreleri, b) açılma ve kapanma ortalama hızları.

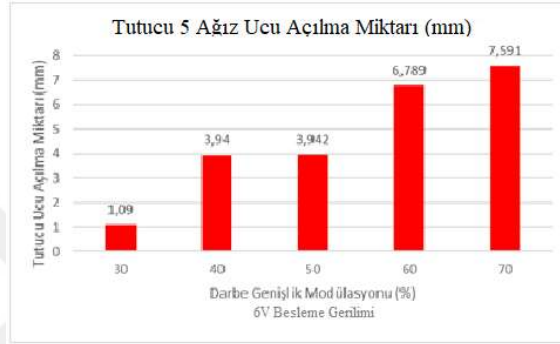
9.10 EK-10 Tutucu 5'e Ait Tablo ve Grafikler

Tablo 5: Tutucu 5'e ait 6, 9 ve 12V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.

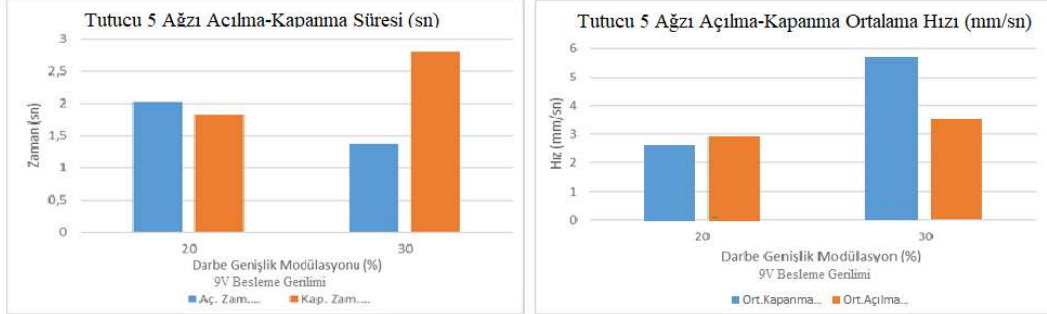
Besleme Voltajı (V)	DGM Görev Döngüsü (%)	Ortalama IBT2 Sürücü Devre Çıkış Voltajı (V)	Ortalama Sistem Akımı (A)	Açılma Zamanı (sn)	Başlangıç Ağız Açıklığı (mm)	Ortalama Açılma Hızı (mm/sn)	Kapanma Zamanı (sn)	Ortalama Kapanma Hızı (mm/sn)
6	10	0.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	20	1.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	30	1.57	0.09	1.75	1.09	0.62	0.36	3.04
6	40	1.95	0.11	2.38	3.94	1.65	2.52	1.56
6	50	2.30	0.13	2.40	3.94	1.64	1.59	2.49
6	60	2.81	0.154	2.79	6.79	2.43	2.52	2.69
6	70	2.81	0.15	2.25	7.59	3.38	2.60	2.92
6	80	3.66	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	10	0.84	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	20	1.61	0.09	2.03	5.29	2.61	1.82	2.90
9	30	2.36	0.14	1.37	7.70	5.64	2.82	3.48
9	40	3.06	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	10	1.12	0.06	1.92	4.01	2.09	1.11	3.60
12	20	2.09	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



Şekil 12: 100 Hz sabit frekans değeri, 6V Besleme geriliminde Tutucu 5'e ait tutucu uçların a) açılma ve kapanma süreleri, b) açılma ve kapanma ortalama hızları.



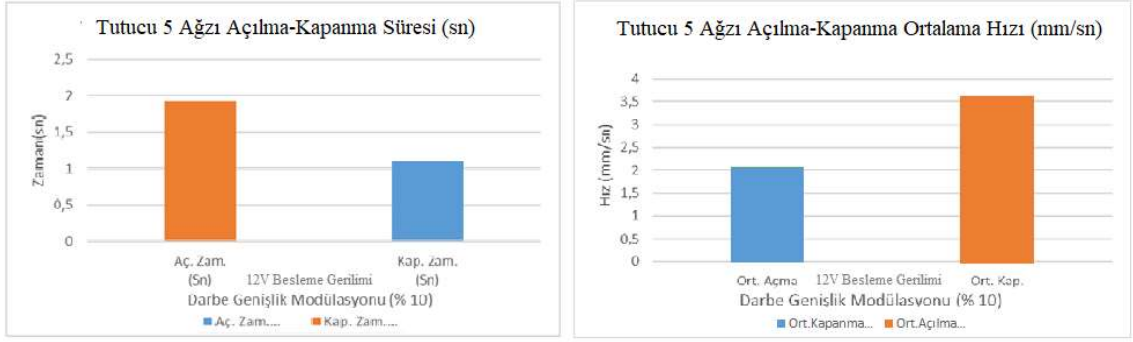
Şekil 13: 100 Hz sabit frekans değeri, 6V Besleme geriliminde Tutucu 5'e ait tutucu uçların açılma miktarı.



Şekil 14: 100 Hz sabit frekans değeri, 9V Besleme geriliminde Tutucu 5'e ait tutucu uçların a) açılma ve kapanma süreleri, b) açılma ve kapanma ortalama hızları.



Şekil 15: 100 Hz sabit frekans değeri, 9V Besleme geriliminde Tutucu 5'e ait tutucu uçların açılma miktarı.



Şekil 16: 100 Hz sabit frekans değeri, 12V Besleme geriliminde Tutucu 5'e ait tutucu uçların a) açılma ve kapanma süreleri, b) açılma ve kapanma ortalama hızları.

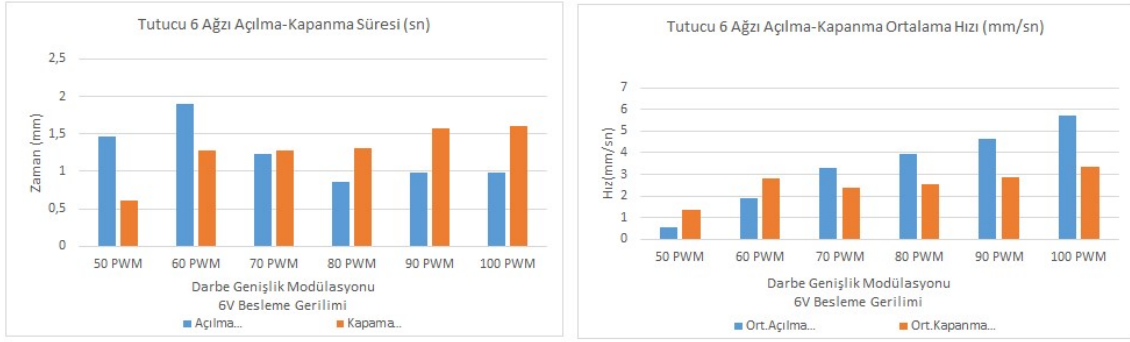


Şekil 17: 100 Hz sabit frekans değeri, 12V Besleme geriliminde Tutucu 5'e ait tutucu uçların açılma miktarı.

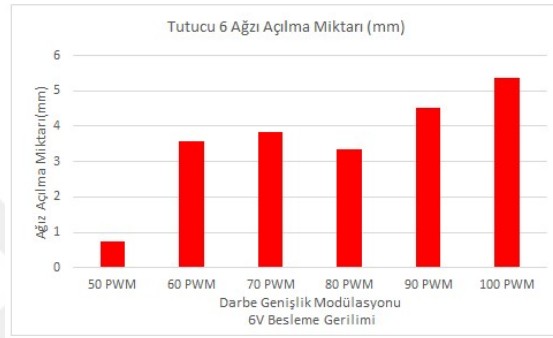
9.11 EK-11 Tutucu 6'ya Ait Tablo ve Grafikler

Tablo 6: Tutucu 6'ya ait 6, 9 ve 12V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.

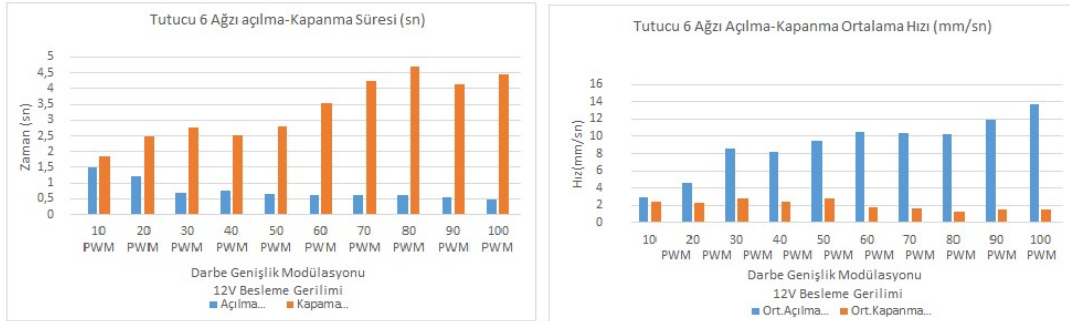
Besleme Voltajı (V)	DGM Görev Döngüsü (%)	Ortalama IBT2 Sürücü Devre Çıkış Voltajı (V)	Ortalama Sistem Akımı (A)	Açılma Zamanı (sn)	Başlangıç Ağız Açıklığı (mm)	Ortalama Açılma Hızı (mm/sn)	Kapanma Zamanı (sn)	Ortalama Kapanma Hızı (mm/sn)
6	10	0.55	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	20	0.95	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	30	1.36	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	40	1.67	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	50	2.11	0.17	1.47	0.75	0.57	0.62	1.37
6	60	2.47	0.19	1.91	3.58	1.88	1.28	2.80
6	70	2.86	0.23	1.22	3.83	3.31	1.28	2.39
6	80	3.39	0.26	0.85	3.36	3.93	1.31	2.56
6	90	3.89	0.30	0.98	4.53	4.63	1.57	2.89
6	100	4.35	0.34	0.98	5.37	5.74	1.60	3.35
9	10	0.81	0.78	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	20	1.54	0.13	1.71	3.72	2.17	1.09	3.41
9	30	2.24	0.19	1.42	4.85	3.43	1.55	3.31
9	40	2.93	0.25	0.99	4.93	5.32	2.01	2.45
9	50	3.63	0.32	0.95	5.55	5.84	2.20	2.40
9	60	4.36	0.40	0.92	6.06	6.57	2.35	2.58
9	70	5.09	0.45	0.73	6.28	8.53	2.55	2.46
9	80	5.82	0.51	0.90	6.28	6.97	2.90	2.46
9	90	6.50	0.58	0.72	6.50	8.98	2.81	2.31
9	100	7.18	0.63	0.68	6.46	9.53	3.76	1.72
12	10	1.08	0.11	1.50	4.31	2.97	1.86	2.40
12	20	2.05	0.19	1.23	5.73	4.65	2.50	2.30
12	30	2.98	0.29	0.70	6.00	8.58	2.75	2.79
12	40	3.96	0.37	0.78	6.20	8.22	2.50	2.48
12	50	4.93	0.47	0.66	6.28	9.54	2.82	2.82
12	60	5.90	0.54	0.61	6.42	10.51	3.53	1.82
12	70	6.86	0.63	0.61	6.32	10.36	4.26	1.64
12	80	7.84	0.72	0.61	6.24	10.20	4.70	1.33
12	90	8.75	0.80	0.53	6.38	11.96	4.13	1.55
12	100	9.55	0.85	0.48	6.57	13.74	4.44	1.48



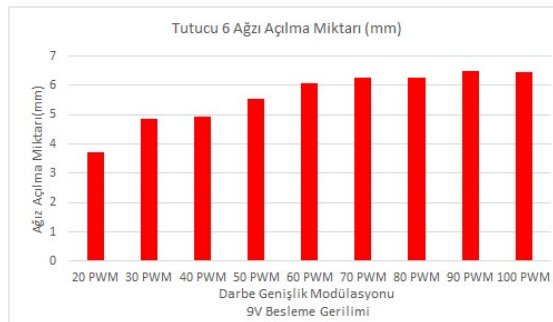
Şekil 18: 100 Hz sabit frekans değeri, 6V Besleme geriliminde Tutucu 6'ya ait tutucu uçların a) açılma ve kapanma süreleri, b) açılma ve kapanma ortalama hızları.



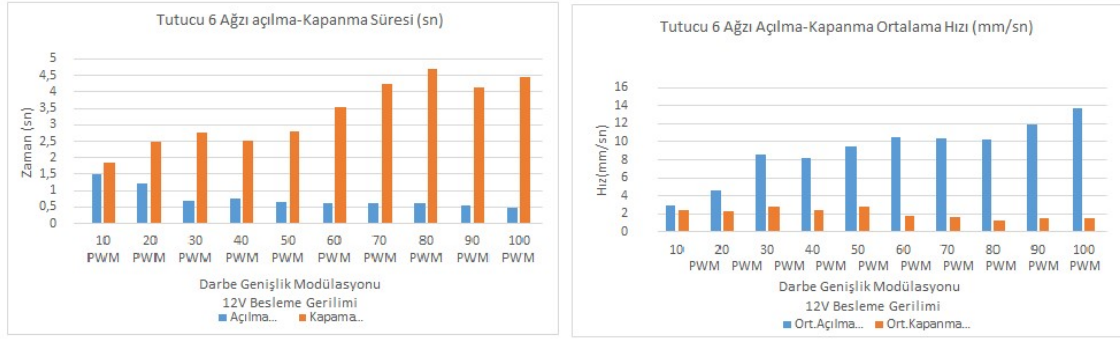
Şekil 19: 100 Hz sabit frekans değeri, 6V Besleme geriliminde Tutucu 6'ya ait tutucu uçların açılma miktarı.



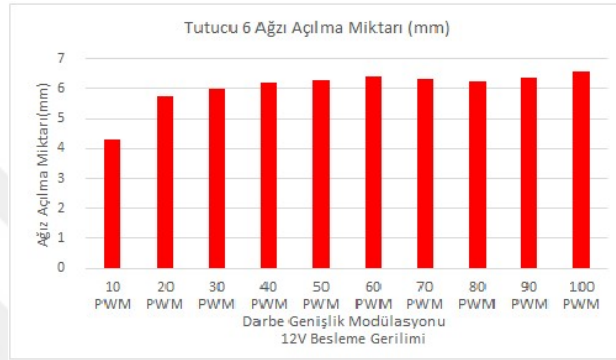
Şekil 20: 100 Hz sabit frekans değeri, 9V Besleme geriliminde Tutucu 6'ya ait tutucu uçların a) açılma ve kapanma süreleri, b) açılma ve kapanma ortalama hızları.



Şekil 21: 100 Hz sabit frekans değeri, 9V Besleme geriliminde Tutucu 6'ya ait tutucu uçların açılma miktarı.



Şekil 22: 100 Hz sabit frekans değeri, 12V Besleme geriliminde Tutucu 6'ya ait tutucu uçların a) açılma ve kapanma süreleri, b) açılma ve kapanma ortalama hızları.

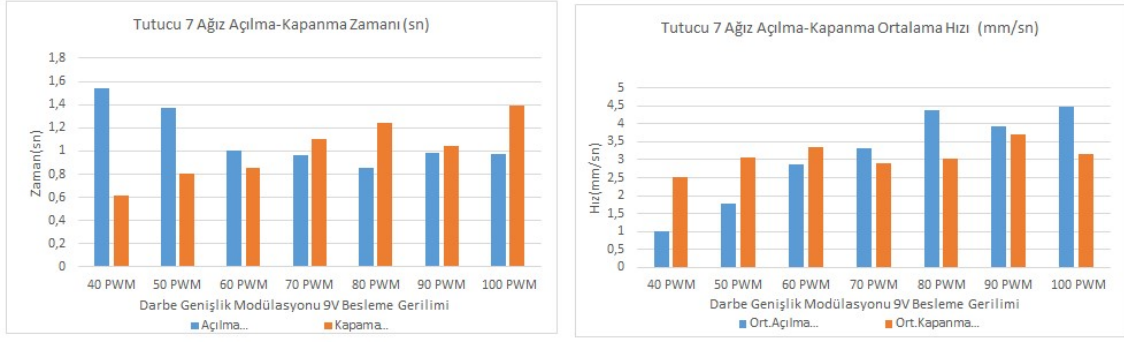


Şekil 23: 100 Hz sabit frekans değeri, 12V Besleme geriliminde Tutucu 6'ya ait tutucu uçların açılma miktarı.

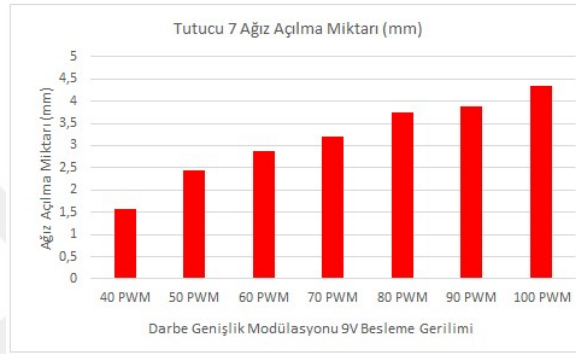
9.12 EK-12 Tutucu 7'ye Ait Tablo ve Grafikler

Tablo 7: Tutucu 7'ye ait 9 ve 12V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.

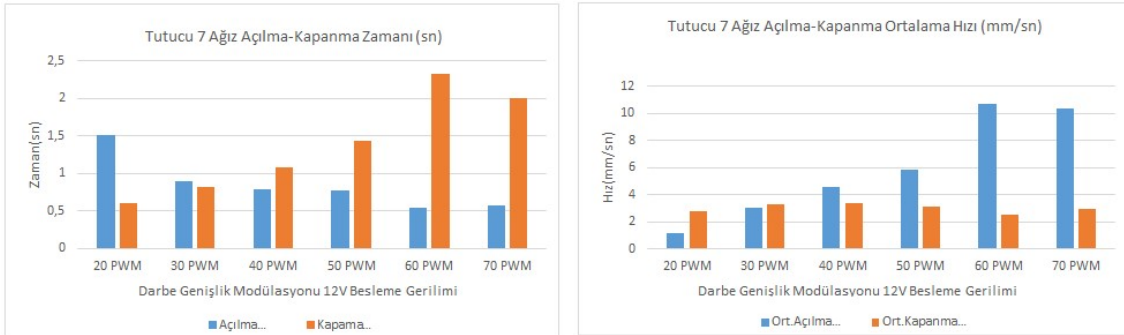
Besleme Voltajı (V)	DGM Görev Döngüsü (%)	Ortalama IBT2 Sürücü Devre Çıkış Voltajı (V)	Ortalama Sistem Akımı (A)	Açılma Zamanı (sn)	Başlangıç Ağız Açıklığı (mm)	Ortalama Açılma Hızı (mm/sn)	Kapanma Zamanı (sn)	Ortalama Kapanma Hızı (mm/sn)
9	10	0.82	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	20	1.56	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	30	2.27	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	40	2.97	0.21	1.55	1.59	1.02	0.62	2.53
9	50	3.10	0.27	1.37	2.44	1.79	0.80	3.05
9	60	4.36	0.31	1.00	2.88	2.88	0.86	3.37
9	70	5.10	0.37	0.97	3.21	3.32	1.10	2.91
9	80	5.78	0.42	0.85	3.75	4.40	1.24	3.02
9	90	6.43	0.47	0.99	3.87	3.92	1.05	3.70
9	100	7.07	0.51	0.97	4.34	4.47	1.40	3.17
12	10	1.09	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	20	2.07	0.16	1.51	1.71	1.13	0.61	2.79
12	30	3.00	0.24	0.90	2.70	3.00	0.82	3.28
12	40	3.93	0.31	0.79	3.61	4.57	1.08	3.34
12	50	4.89	0.39	0.77	4.52	5.87	1.43	3.16
12	60	5.77	0.48	0.55	5.84	10.68	2.33	2.51
12	70	6.68	0.51	0.58	5.98	10.34	2.00	2.99
12	80	7.63	0.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



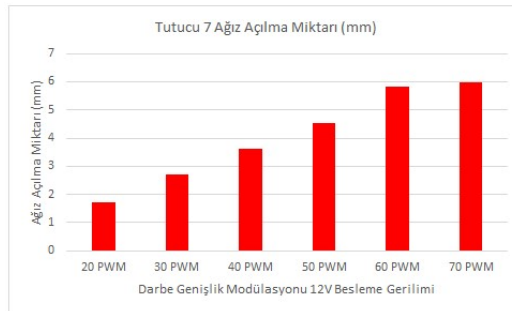
Şekil 24: 100 Hz sabit frekans değeri, 9V Besleme geriliminde Tutucu 7'ye ait tutucu uçların a) açılma ve kapanma süreleri, b) açılma ve kapanma ortalama hızları.



Şekil 25: 100 Hz sabit frekans değeri, 9V Besleme geriliminde Tutucu 7'ye ait tutucu uçların açılma miktarı.



Şekil 26: 100 Hz sabit frekans değeri, 12V Besleme geriliminde Tutucu 7'ye ait tutucu uçların a) açılma ve kapanma süreleri, b) açılma ve kapanma ortalama hızları.

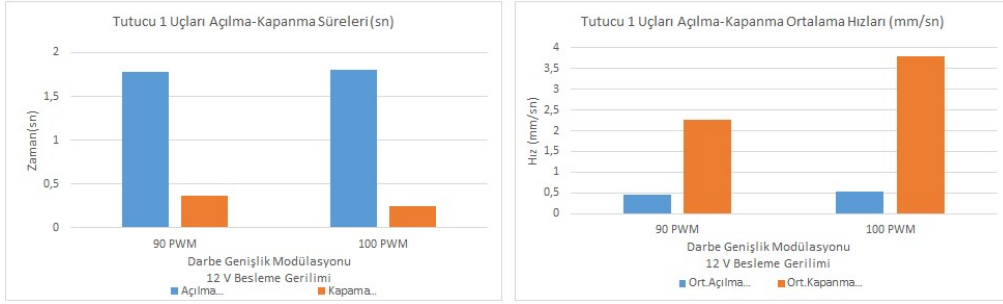


Şekil 27: 100 Hz sabit frekans değeri, 12V Besleme geriliminde Tutucu 7'ye ait tutucu uçların açılma miktarı.

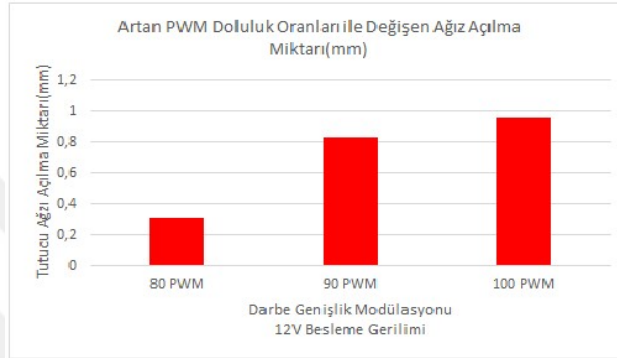
9.13 EK-13 Tutucu 8'ye Ait Tablo ve Grafikler

Tablo 8: Tutucu 8'e ait 12 ve 15V besleme voltajı altında operasyonel parametreler.

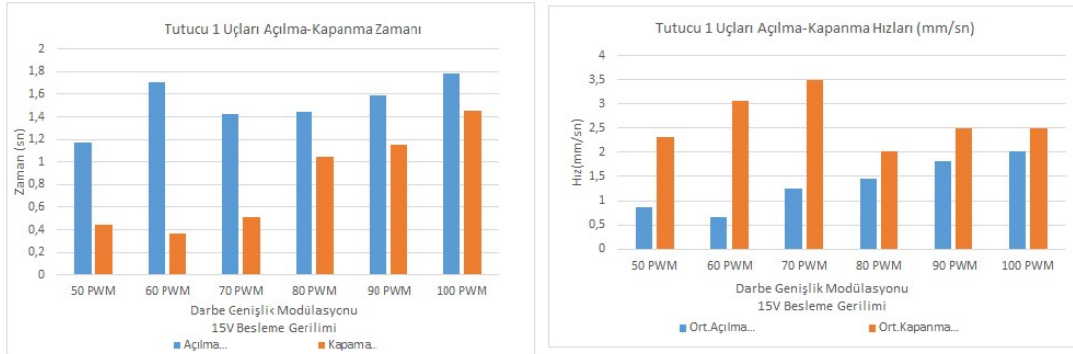
Besleme Voltajı (V)	DGM Görev Döngüsü (%)	Ortalama IBT2 Sürücü Devre Çıkış Voltajı (V)	Ortalama Sistem Akımı (A)	Açılma Zamanı (sn)	Başlangıç Ağız Açıklığı (mm)	Ortalama Açılma Hızı (mm/sn)	Kapanma Zamanı (sn)	Ortalama Kapanma Hızı (mm/sn)
12	10	1.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	20	1.74	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	30	2.41	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	40	3.22	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	50	4.26	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	60	5.13	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	70	5.98	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	80	6.82	0.44	0.00	0.31	0.00	0.00	0.00
12	90	7.48	0.50	1.78	0.83	0.46	0.37	2.26
12	100	7.80	0.54	1.80	0.95	0.53	0.25	3.79
15	10	1.16	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	20	2.13	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	30	3.09	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	40	4.36	0.30	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00
15	50	5.36	0.35	1.17	1.02	0.87	0.44	2.31
15	60	6.50	0.44	1.70	1.13	0.66	0.37	3.06
15	70	7.54	0.51	1.42	1.79	1.26	0.51	3.49
15	80	8.66	0.58	1.45	2.12	1.46	1.05	2.02
15	90	9.30	0.67	1.59	2.88	1.81	1.16	2.49
15	100	10.76	0.75	1.79	3.61	2.02	1.45	2.49



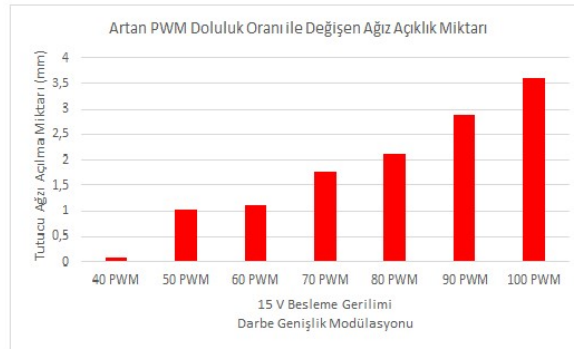
Şekil 28: 100 Hz sabit frekans değeri, 12V Besleme geriliminde Tutucu 8'ye ait tutucu uçların a) açılma ve kapanma süreleri, b) açılma ve kapanma ortalama hızları.



Şekil 29: 100 Hz sabit frekans değeri, 12V Besleme geriliminde Tutucu 8'ye ait tutucu



Şekil 30: 100 Hz sabit frekans değeri, 15V Besleme geriliminde Tutucu 8'ye ait tutucu uçların a) açılma ve kapanma süreleri, b) açılma ve kapanma ortalama hızları.



Şekil 31: 100 Hz sabit frekans değeri, 15V Besleme geriliminde Tutucu 8'ye ait tutucu

9.14 EK-14 Tutucu 5'e 6V Besleme Gerilimi ve Artan Frekans Değişimine Ait

Tablo ve Grafikler

Tablo 9: Tutucu 5'e ait artan frekans sinyaline karşı tutucu uç parametreleri.

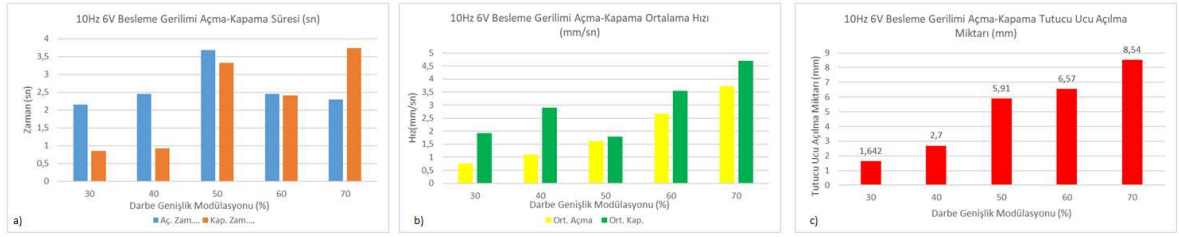
Frekans (Hz)	DGM Görev Döngüsü (%)	Ortalama IBT2 Sürücü Devre Çıkış Voltajı (V)	Ortalama Sistem Akımı (A)	Açılma Zamanı (sn)	Başlangıç Ağız Açıklığı (mm)	Ortalama Açılma Hızı (mm/sn)	Kapanma Zamanı (sn)	Ortalama Kapanma Hızı (mm/sn)
10	30	1.52	0.08	2.15	1.64	0.76	0.86	1.92
10	40	2.07	0.11	2.46	2.70	1.10	0.93	2.90
10	50	2.55	0.13	3.68	5.91	1.61	3.32	1.78
10	60	2.99	0.16	2.46	6.57	2.67	2.41	3.55
10	70	3.54	0.18	2.30	8.54	3.72	3.73	4.71
100	30	1.57	0.09	1.75	1.09	0.62	0.36	3.04
100	40	1.95	0.11	2.38	3.94	1.65	2.52	1.56
100	50	2.30	0.13	2.40	3.94	1.64	1.59	2.49
100	60	2.81	0.15	2.79	6.79	2.43	2.52	2.69
100	70	2.81	0.15	2.25	7.59	3.38	2.60	2.92
500	20	1.13	0.06	2.14	2.01	0.94	2.22	0.90
500	30	1.67	0.08	1.82	2.30	1.26	1.65	1.40
500	40	2.14	0.10	2.32	1.50	0.65	0.57	2.64
500	50	2.64	0.13	2.83	2.63	0.93	0.96	2.73
500	60	3.15	0.16	3.47	4.01	1.16	1.26	3.18
500	70	3.54	0.18	2.85	4.74	1.67	1.48	3.02
500	80	4.02	0.21	2.66	5.07	1.90	1.43	3.54
1000	20	1.11	0.06	1.76	1.17	0.66	0.97	1.20
1000	30	1.66	0.08	2.16	2.23	1.03	1.68	1.32
1000	40	2.11	0.10	2.84	3.43	1.21	2.48	1.38
1000	50	2.64	0.13	3.05	4.82	1.58	2.72	1.77
1000	60	3.10	0.16	2.31	4.93	1.93	2.63	1.87
1000	70	3.52	0.17	2.89	5.84	2.02	3.36	1.74
1000	80	3.99	0.20	3.13	7.37	2.35	3.66	2.01
10000	10	0.39	0.02	0.64	0.33	0.51	0.33	0.99
10000	20	0.97	0.05	2.02	1.28	0.61	2.02	0.63
10000	30	1.50	0.08	2.44	2.15	0.88	2.65	0.81
10000	40	2.07	0.10	2.53	2.99	1.18	2.49	1.20
10000	50	2.50	0.12	2.47	3.87	1.57	2.84	1.35
10000	60	2.98	0.16	2.85	4.16	1.46	2.02	2.06
10000	70	3.42	0.17	2.92	5.18	1.77	2.74	1.89
10000	80	3.87	0.19	3.88	6.35	1.64	2.88	2.20
100000	60	1.92	0.02	3.13	2.19	0.70	2.05	1.07
100000	70	3.70	0.18	2.56	6.06	2.34	3.26	1.86
100000	80	3.95	0.19	2.80	6.83	2.44	2.81	2.43
100000	90	3.89	0.20	3.20	7.12	3.20	2.89	2.46
100000	100	4.45	0.21	3.41	7.52	2.11	3.51	2.14
150000	70	3.50	0.17	3.25	7.34	2.26	3.23	2.27
150000	80	3.85	0.19	2.75	7.70	2.80	3.44	2.24
150000	90	3.85	0.20	2.98	8.07	2.71	2.94	2.75
150000	100	4.48	0.21	3.13	7.37	3.13	2.69	2.69

Tablo 10: Tutucu 5 6V Besleme gerilimi ve artan frekans değerlerinde ortalama sistem gerilim ve akımının değişimi.

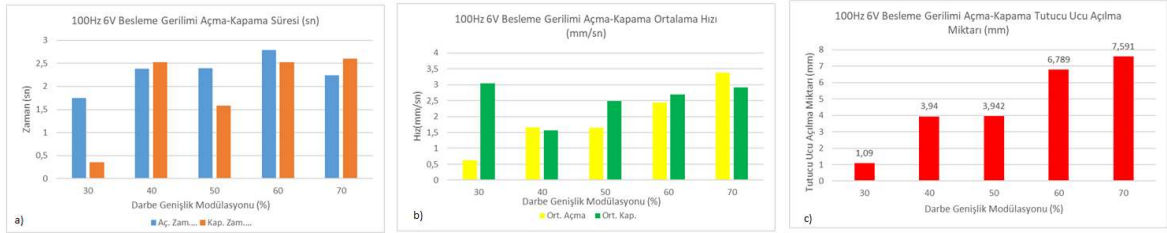
10PWM			20PWM			30PWM			40PWM			50PWM		
f (Hz)	Volt(V)	Akım(A)	f (Hz)	Volt(V)	Akım(A)	f (Hz)	Volt(V)	Akım(A)	f (Hz)	Volt(V)	Akım(A)	f (Hz)	Volt(V)	Akım(A)
10	0.50	0.03	10	1.04	0.05	10	1.52	0.08	10	2.07	0.11	10	2.55	0.13
100	0.57	0.03	100	1.03	0.06	100	1.66	0.09	100	1.95	0.11	100	2.03	0.13
200	0.57	0.03	200	1.12	0.06	200	1.63	0.08	200	2.12	0.10	200	2.64	0.12
300	0.58	0.03	300	1.13	0.06	300	1.65	0.08	300	2.12	0.10	300	2.66	0.12
400	0.58	0.03	400	1.13	0.06	400	1.66	0.08	400	2.14	0.11	400	2.67	0.12
500	0.57	0.03	500	1.13	0.06	500	1.67	0.08	500	2.14	0.10	500	2.64	0.13
600	0.57	0.03	600	1.13	0.06	600	1.66	0.08	600	2.14	0.10	600	2.64	0.13
700	0.57	0.03	700	1.13	0.06	700	1.66	0.08	700	2.13	0.10	700	2.63	0.13
800	0.58	0.03	800	1.13	0.06	800	1.66	0.08	800	2.10	0.10	800	2.62	0.13
900	0.57	0.03	900	1.11	0.06	900	1.65	0.08	900	2.10	0.10	900	2.62	0.13
1000	0.57	0.03	1000	1.11	0.06	1000	1.66	0.08	1000	2.11	0.10	1000	2.64	0.13
10000	0.39	0.02	10000	0.97	0.05	10000	1.50	0.08	10000	2.07	0.10	10000	2.50	0.12
17400	0.00	0.00	20000	0.76	0.04	20000	1.39	0.07	20000	1.84	0.09	20000	2.34	0.11
			30000	0.11	0.05	30000	1.10	0.06	30000	1.67	0.08	30000	2.19	0.10
			35500	0.00	0.00	40000	0.45	0.02	40000	1.31	0.06	40000	2.03	0.10
						50000	0.18	0.00	50000	0.62	0.03	50000	1.72	0.08
						55300	0.00	0.00	60000	0.09	0.04	60000	1.09	0.05
									66800	0.00	0.00	70000	0.44	0.02
												80000	0.08	0.00
												87500	0.00	0.00

Tablo 10: Tutucu 5 6V Besleme gerilimi ve artan frekans değerlerinde ortalama sistem gerilim ve akımının değişimi (devam).

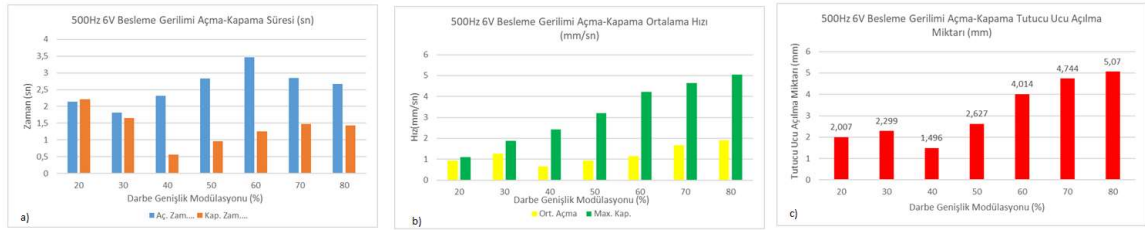
60PWM			70PWM			80PWM			90PWM			100PWM		
f (Hz)	Voltaj (V)	Akım (A)	f (Hz)	Voltaj (V)	Akım (A)	f (Hz)	Voltaj (V)	Akım (A)	f (Hz)	Voltaj (V)	Akım (A)	f (Hz)	Voltaj (V)	Akım (A)
10Hz	2.99	0.16	10Hz	3.54	0.18	10Hz	4.11	0.24	10Hz	n/a	n/a	10Hz	n/a	n/a
100Hz	2.81	0.15	100Hz	2.81	0.15	100Hz	3.66	0.20	100Hz	n/a	n/a	100Hz	n/a	n/a
200Hz	3.14	0.15	200Hz	3.60	0.17	200Hz	3.66	0.19	200Hz	3.97	0.20	200Hz	4.34	0.19
300Hz	3.15	0.15	300Hz	3.59	0.18	300Hz	3.75	0.19	300Hz	4.02	0.21	300Hz	4.34	0.19
400Hz	3.15	0.16	400Hz	3.59	0.18	400Hz	3.77	0.20	400Hz	3.96	0.20	400Hz	4.32	0.20
500Hz	3.15	0.16	500Hz	3.54	0.18	500Hz	4.02	0.21	500Hz	3.96	0.20	500Hz	4.36	0.20
600Hz	3.15	0.16	600Hz	3.54	0.18	600Hz	4.01	0.21	600Hz	3.99	0.20	600Hz	4.37	0.20
700Hz	3.14	0.16	700Hz	3.54	0.17	700Hz	4.00	0.21	700Hz	4.08	0.21	700Hz	4.37	0.21
800Hz	3.13	0.16	800Hz	3.52	0.17	800Hz	4.02	0.21	800Hz	4.09	0.21	800Hz	4.38	0.21
900Hz	3.10	0.16	900Hz	3.54	0.17	900Hz	3.99	0.20	900Hz	4.07	0.21	900Hz	4.40	0.21
1kHz	3.10	0.16	1kHz	3.52	0.17	1kHz	3.99	0.20	1kHz	4.03	0.20	1kHz	4.40	0.21
10kHz	2.98	0.16	10kHz	3.42	0.17	10kHz	3.87	0.19	10kHz	4.30	0.21	10kHz	4.43	0.21
20kHz	2.83	0.15	20kHz	3.26	0.16	20kHz	3.75	0.19	20kHz	4.02	0.21	20kHz	4.38	0.21
30kHz	2.69	0.14	30kHz	3.16	0.16	30kHz	3.87	0.20	30kHz	3.94	0.20	30kHz	4.40	0.21
40kHz	2.59	0.14	40kHz	3.35	0.17	40kHz	4.20	0.21	40kHz	3.87	0.20	40kHz	4.34	0.20
50kHz	2.74	0.14	50kHz	3.52	0.18	50kHz	4.10	0.20	50kHz	3.85	0.20	50kHz	4.31	0.20
60kHz	2.93	0.15	60kHz	3.30	0.16	60kHz	3.96	0.20	60kHz	3.93	0.20	60kHz	4.38	0.20
70kHz	2.81	0.15	70kHz	3.17	0.16	70kHz	3.92	0.19	70kHz	3.92	0.20	70kHz	4.38	0.20
80kHz	2.59	0.14	80kHz	3.35	0.17	80kHz	3.96	0.19	80kHz	3.91	0.20	80kHz	4.38	0.20
90kHz	2.24	0.12	90kHz	3.66	0.18	90kHz	3.89	0.19	90kHz	3.93	0.20	90kHz	4.44	0.20
100kHz	1.92	0.09	100kHz	3.70	0.18	100kHz	3.95	0.19	100kHz	3.89	0.20	100kHz	4.45	0.21
110kHz	1.55	0.08	110kHz	3.59	0.17	110kHz	3.89	0.19	110kHz	3.89	0.20	110kHz	4.50	0.21
120kHz	1.20	0.06	120kHz	3.53	0.17	120kHz	3.94	0.19	120kHz	3.91	0.20	120kHz	4.46	0.21
130kHz	0.82	0.04	130kHz	3.49	0.17	130kHz	3.88	0.19	130kHz	3.91	0.20	130kHz	4.44	0.20
140kHz	0.58	0.03	140kHz	3.50	0.17	140kHz	3.93	0.19	140kHz	3.87	0.20	140kHz	4.50	0.21
150kHz	0.39	0.02	150kHz	3.50	0.17	150kHz	3.85	0.19	150kHz	3.85	0.20	150kHz	4.48	0.21



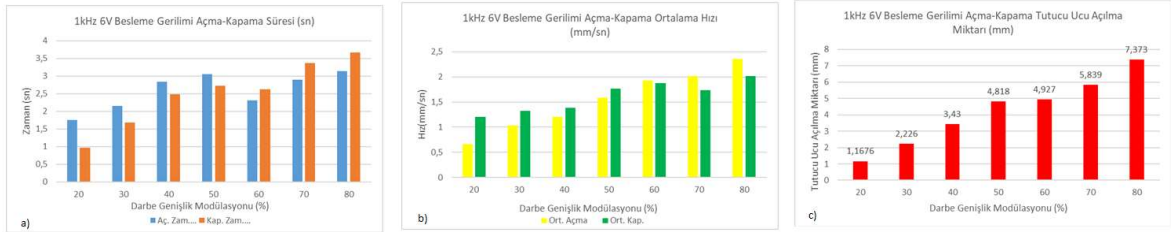
Şekil 32: 6V 10 Hz Tutucu Uçları Açılma-Kapanma a) Süresi, b) Ortalama Hız, c) Ağız Açıklık Miktarı.



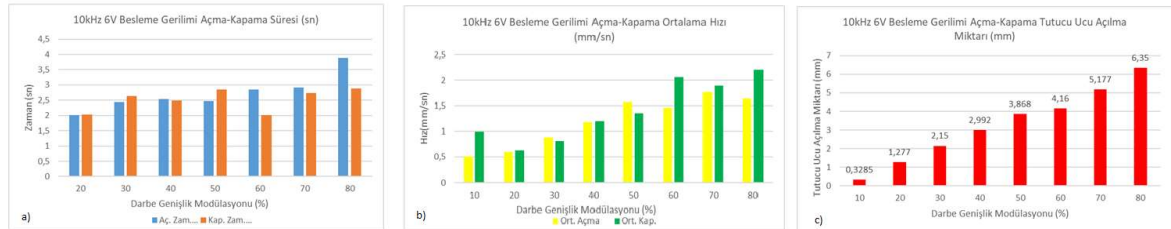
Şekil 33: 6V 100 Hz Tutucu Uçları Açılma-Kapanma a) Süresi, b) Ortalama Hız, c) Ağız Açıklık Miktarı.



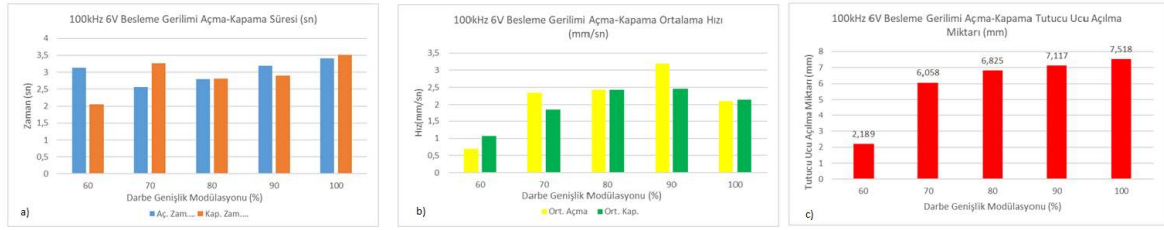
Şekil 34: 6V 500 Hz Tutucu Uçları Açılma-Kapanma a) Süresi, b) Ortalama Hız, c) Ağız Açıklık Miktarı.



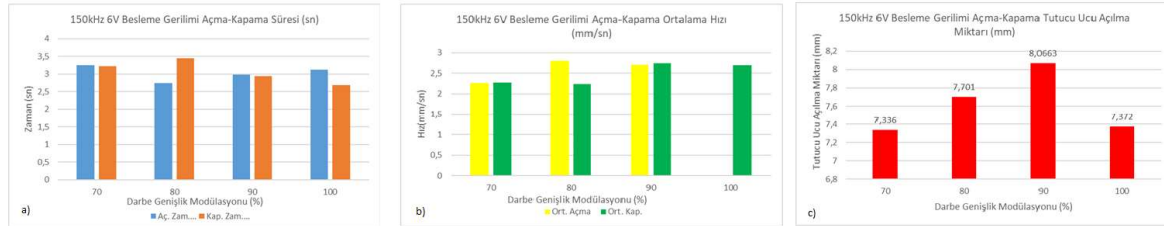
Şekil 35: 6V 1 kHz Tutucu Uçları Açılma-Kapanma a) Süresi, b) Ortalama Hız, c) Ağız Açıklık Miktarı.



Şekil 36: 6V 10 kHz Tutucu Uçları Açılma-Kapanma a) Süresi, b) Ortalama Hız, c) Ağız Açıklık Miktarı.



Şekil 37: 6V 100 kHz Tutucu Uçları Açılma-Kapanma a) Süresi, b) Ortalama Hız, c) Ağız Açıklık Miktarı.



Şekil 38: 6V 150 kHz Tutucu Uçları Açılma-Kapanma a) Süresi, b) Ortalama Hız, c) Ağız Açıklık Miktarı.

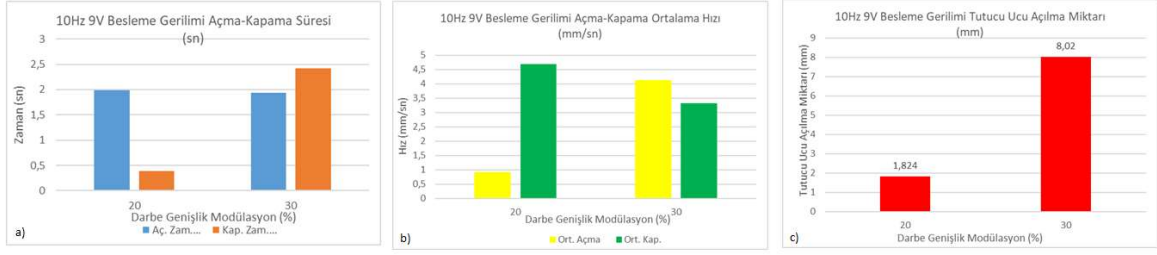
EK-15 Tutucu 5'e ait 9V Besleme Gerilimi ile Artan Frekans Değişimine Ait Tablo ve Grafikler

Tablo 11: Tutucu 5'e ait artan frekans sinyaline karşı tutucu uç parametreleri.

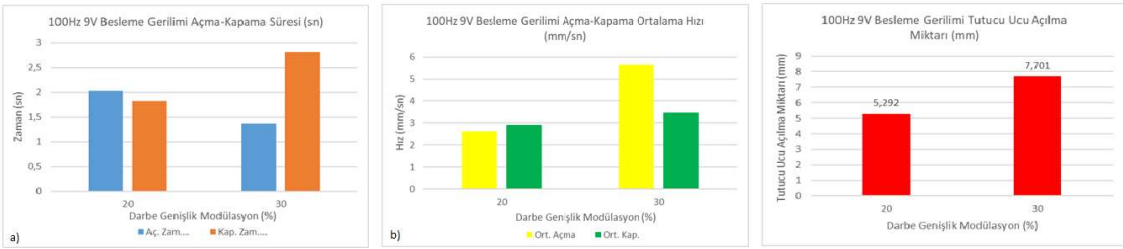
Frekans (Hz)	DGM Görev Döngüsü (%)	Ortalama IBT2 Sürücü Devre Çıkış Voltajı (V)	Ortalama Sistem Akımı (A)	Açılma Zamanı (sn)	Başlangıç Ağız Açıklığı (mm)	Ortalama Açılma Hızı (mm/sn)	Kapanma Zamanı (sn)	Ortalama Kapanma Hızı (mm/sn)
10	20	1.48	0.09	1.98	1.82	0.92	0.39	4.69
10	30	2.01	0.13	1.94	8.02	4.14	2.42	3.31
100	20	1.61	0.93	2.03	5.29	2.61	1.82	2.90
100	30	2.36	0.14	1.37	7.70	5.64	2.82	3.48
500	10	0.85	0.47	1.60	1.53	0.96	1.38	1.11
500	20	1.69	0.93	1.98	5.00	2.53	2.45	2.04
500	30	2.45	0.14	1.64	8.91	5.44	2.73	3.26
1000	10	0.84	0.05	1.79	1.68	0.94	1.33	1.27
1000	20	1.69	0.93	1.91	4.27	2.23	1.71	2.50
1000	30	2.46	0.14	1.49	8.36	5.61	2.52	3.32
10000	10	0.53	0.03	1.19	0.55	0.46	0.37	0.68
10000	20	1.48	0.08	1.72	3.65	1.72	1.88	1.94
10000	30	2.26	0.12	1.64	7.23	4.41	3.57	0.20

Tablo 12 :Tutucu 5 9V Besleme gerilimi ve artan frekans değerlerinde ortalama sistem gerilim ve akımının değişimi

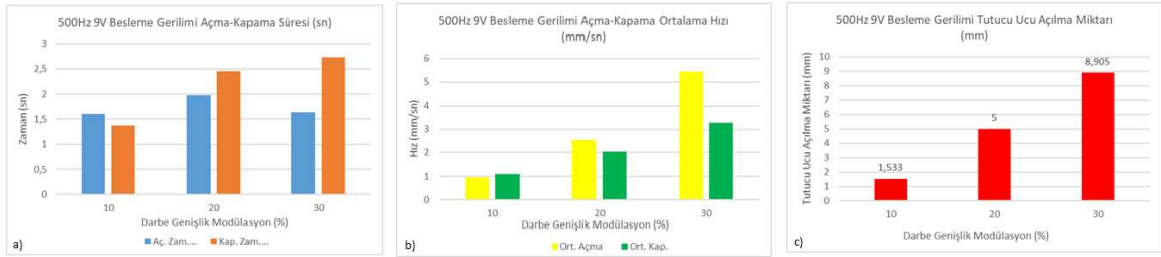
10PWM			20PWM			30PWM			40PWM			50PWM			60PWM	
f(Hz)	Voltaj (V)	Akım (A)	f(Hz)	Voltaj (V)	Akım (A)	f(Hz)	Voltaj (V)	Akım (A)	f(Hz)	Voltaj (V)	Akım (A)	f(Hz)	Voltaj (V)	Akım (A)	f(Hz)	Voltaj (V)
10	0.74	0.04	10	1.48	0.09	10	2.01	0.13	10	3.11	0.17	10	n/a	n/a	10Hz	n/a
100	0.85	0.05	100	1.61	0.09	100	2.36	0.14	100	3.06	0.17	100	n/a	n/a	100Hz	n/a
200	0.85	0.05	200	1.66	0.09	200	2.43	0.14	200	3.08	0.17	200	n/a	n/a	200Hz	n/a
300	0.85	0.05	300	1.68	0.09	300	2.46	0.14	300	3.07	0.17	300	n/a	n/a	300Hz	n/a
400	0.85	0.05	400	1.69	0.09	400	2.42	0.14	400	3.06	0.18	400	n/a	n/a	400Hz	n/a
500	0.85	0.05	500	1.69	0.09	500	2.45	0.14	500	3.10	0.17	500	n/a	n/a	500Hz	n/a
600	0.85	0.05	600	1.69	0.09	600	2.44	0.14	600	3.08	0.17	600	n/a	n/a	600Hz	n/a
700	0.84	0.05	700	1.69	0.09	700	2.46	0.14	700	3.06	0.17	700	n/a	n/a	700Hz	n/a
800	0.84	0.05	800	1.68	0.09	800	2.46	0.14	800	3.10	0.17	800	n/a	n/a	800Hz	n/a
900	0.84	0.05	900	1.69	0.09	900	2.44	0.14	900	3.03	0.18	900	n/a	n/a	900Hz	n/a
1000	0.53	0.03	1000	1.69	0.09	1000	2.46	0.14	1000	3.05	0.17	1000	n/a	n/a	1kHz	n/a
10000	0.39	0.02	10000	1.48	0.08	1000	2.26	0.12	10000	2.97	0.17	10000	n/a	n/a	100kHz	n/a
16700	0.00	0.00	20000	1.05	0.06	2000	2.05	0.12	20000	2.77	0.16	20000	n/a	n/a	200kHz	n/a
			30000	0.08	0.04	3000	1.55	0.09	30000	2.55	0.15	30000	n/a	n/a	300kHz	n/a
			33700	0.00	0.00	4000	0.46	0.03	40000	2.07	0.11	40000	n/a	n/a	400kHz	n/a
						51200	0.00	0.00	50000	0.98	0.53	50000	2.64	0.15	500kHz	n/a
									68300	0.00	0.00	60000	1.63	0.09	600kHz	n/a
												70000	1.24	0.07	700kHz	n/a
												80000	0.08	0.03	800kHz	n/a
												90500	0.00	0.00	900kHz	n/a
															100kHz	n/a
															110kHz	2.55
															120kHz	2.01
															130kHz	0.59
															140kHz	0.24
															148kHz	0.00



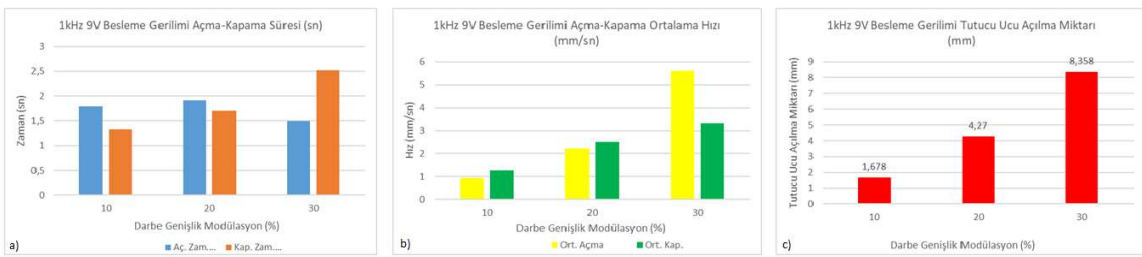
Şekil 39: 9V 10 Hz Tutucu Uçları Açılma-Kapanma a) Süresi, b) Ortalama Hız, c) Ağız Açıklık Miktarı.



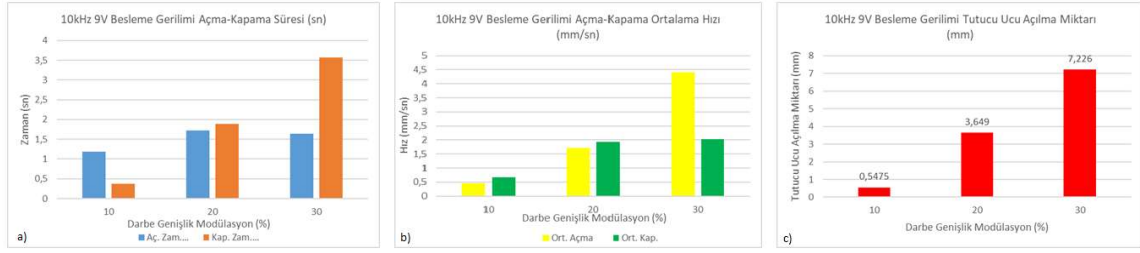
Şekil 40: 9V 100 Hz Tutucu Uçları Açılma-Kapanma a) Süresi, b) Ortalama Hız, c) Ağız Açıklık Miktarı.



Şekil 41: 9V 500 Hz Tutucu Uçları Açılma-Kapanma a) Süresi, b) Ortalama Hız, c) Ağız Açıklık Miktarı.



Şekil 42: 9V 1 kHz Tutucu Uçları Açılma-Kapanma a) Süresi, b) Ortalama Hız, c) Ağız Açıklık Miktarı.



Şekil 43: 9V 10 kHz Tutucu Uçları Açılma-Kapanma a) Süresi, b) Ortalama Hız, c) Ağız Açıklık Miktarı.

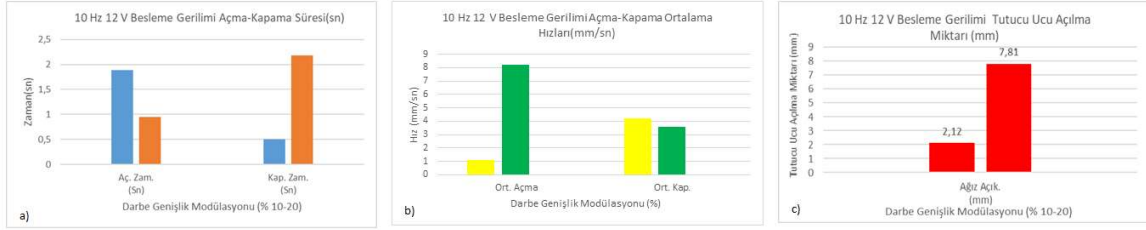
EK-16 Tutucu 5'e ait 12V Besleme Gerilimi ile Artan Frekans Değişimine Ait Tablo ve Grafikler

Tablo 13 : Tutucu 5'e ait 6V besleme gerilimi ile artan frekans sinyaline karşı tutucu uç parametreleri.

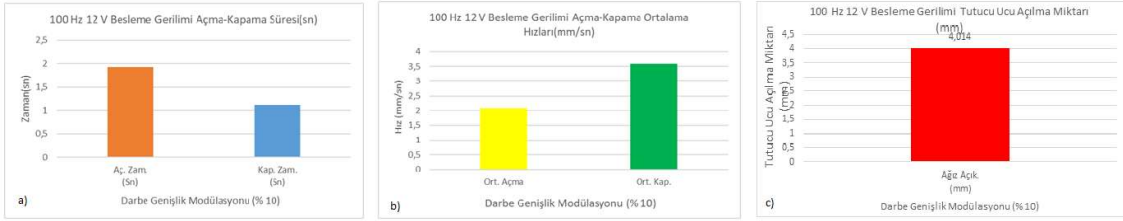
Frekans (Hz)	DGM Görev Döngüsü (%)	Ortalama IBT2 Sürücü Devre Çıkış Voltajı (V)	Ortalama Sistem Akımı (A)	Açılma Zamanı (sn)	Başlangıç Ağız Açıklığı (mm)	Ortalama Açılma Hızı (mm/sn)	Kapanma Zamanı (sn)	Ortalama Kapanma Hızı (mm/sn)
10Hz	10	1.03	0.06	1.89	2.12	1.12	0.50	4.23
	20	2.07	0.12	0.95	7.81	8.21	2.18	3.58
100Hz	10	1.12	0.06	1.92	4.01	2.09	1.11	3.60
500Hz	10	1.15	0.06	2.42	4.34	1.76	2.22	1.95
1000Hz	10	1.15	0.06	2.57	4.63	1.80	2.19	2.11
10000Hz	10	0.58	0.03	2.06	1.10	0.52	0.82	1.33

Tablo 14:Tutucu 5 12V Besleme gerilimi ve artan frekans değerlerinde ortalama sistem gerilim ve akımının değişimi.

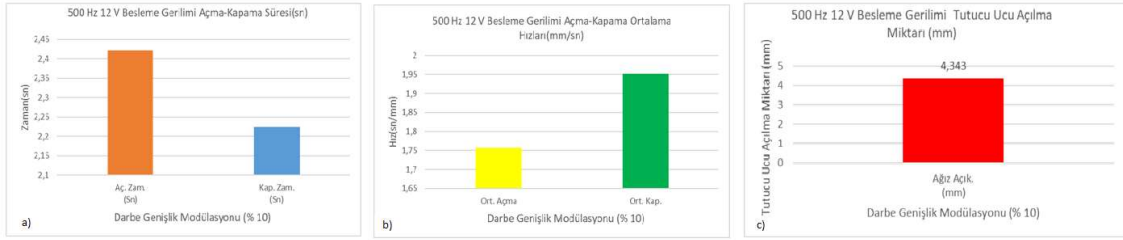
10PWM			20PWM			30PWM			40PWM			50PWM			60PWM		
f(Hz)	Voltaj (V)	Akım (A)	f(Hz)	Voltaj (V)	Akım (A)	f(Hz)	Voltaj (V)	Akım (A)	f(Hz)	Voltaj (V)	Akım (A)	f(Hz)	Voltaj (V)	Akım (A)	f(Hz)	Voltaj (V)	Akım (A)
10	0.74	0.04	10	1.48	0.09	10	2.01	0.13	10	3.11	0.17	10	n/a	n/a	10Hz	n/a	n/a
100	0.85	0.05	100	1.61	0.09	100	2.36	0.14	100	3.06	0.17	100	n/a	n/a	100Hz	n/a	n/a
200	0.85	0.05	200	1.66	0.09	200	2.43	0.14	200	3.08	0.17	200	n/a	n/a	200Hz	n/a	n/a
300	0.85	0.05	300	1.68	0.09	300	2.46	0.14	300	3.07	0.17	300	n/a	n/a	300Hz	n/a	n/a
400	0.85	0.05	400	1.69	0.09	400	2.42	0.14	400	3.06	0.18	400	n/a	n/a	400Hz	n/a	n/a
500	0.85	0.05	500	1.69	0.09	500	2.45	0.14	500	3.10	0.17	500	n/a	n/a	500Hz	n/a	n/a
600	0.85	0.05	600	1.69	0.09	600	2.44	0.14	600	3.08	0.17	600	n/a	n/a	600Hz	n/a	n/a
700	0.84	0.05	700	1.69	0.09	700	2.46	0.14	700	3.06	0.17	700	n/a	n/a	700Hz	n/a	n/a
800	0.84	0.05	800	1.68	0.09	800	2.46	0.14	800	3.10	0.17	800	n/a	n/a	800Hz	n/a	n/a
900	0.84	0.05	900	1.69	0.09	900	2.44	0.14	900	3.03	0.18	900	n/a	n/a	900Hz	n/a	n/a
1000	0.53	0.03	1000	1.69	0.09	1000	2.46	0.14	1000	3.05	0.17	1000	n/a	n/a	1kHz	n/a	n/a
10000	0.39	0.02	10000	1.48	0.08	10000	2.26	0.12	10000	2.97	0.17	10000	n/a	n/a	100kHz	n/a	n/a
16700	0.00	0.00	20000	1.05	0.06	20000	2.05	0.12	20000	2.77	0.16	20000	n/a	n/a	200kHz	n/a	n/a
			30000	0.08	0.04	30000	1.55	0.09	30000	2.55	0.15	30000	n/a	n/a	300kHz	n/a	n/a
			33700	0.00	0.00	40000	0.46	0.03	40000	2.07	0.11	40000	n/a	n/a	400kHz	n/a	n/a
						51200	0.00	0.00	50000	0.98	0.53	50000	2.64	0.15	500kHz	n/a	n/a
									68300	0.00	0.00	60000	1.63	0.09	600kHz	n/a	n/a
												70000	1.24	0.07	700kHz	n/a	n/a
												80000	0.08	0.03	800kHz	n/a	n/a
												90500	0.00	0.00	900kHz	n/a	n/a
															100kHz	n/a	n/a
															110kHz	2.55	0.13
															120kHz	2.01	0.10
															130kHz	0.59	0.03
															140kHz	0.24	0.01
															148kHz	0.00	0.00



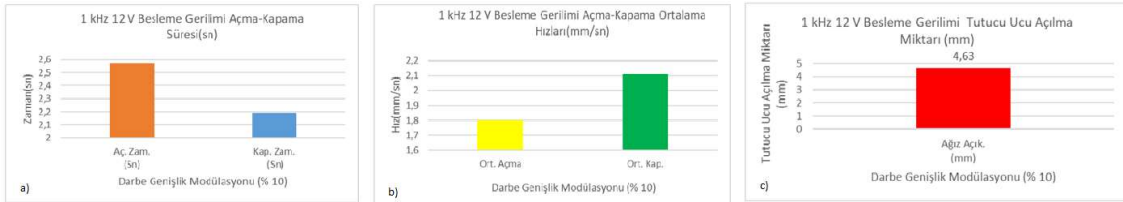
Şekil 44: 12V 10 Hz Tutucu Uçları Açılma-Kapanma a) Süresi, b) Ortalama Hız, c) Ağız Açıklık Miktarı.



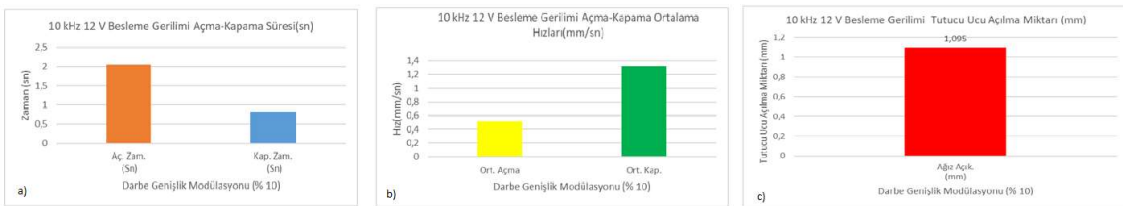
Şekil 45: 12V 100 Hz Tutucu Uçları Açılma-Kapanma a) Süresi, b) Ortalama Hız, c) Ağız Açıklık Miktarı.



Şekil 46: 12V 1 kHz Tutucu Uçları Açılma-Kapanma a) Süresi, b) Ortalama Hız, c) Ağız Açıklık Miktarı.



Şekil 47: 12V 10 kHz Tutucu Uçları Açılma-Kapanma a) Süresi, b) Ortalama Hız, c) Ağız Açıklık Miktarı.



Şekil 48: 12V 100 kHz Tutucu Uçları Açılma-Kapanma a) Süresi, b) Ortalama Hız, c) Ağız Açıklık Miktarı.





Özgür Yurtsever, MSc

Salacak Mh.Dr.Sıtkı Özferendeci Sk No:47/2

Üsküdar/İstanbul

Tel: +90505 7478717

Email: oyurtseverozgur@gmail.com

EĞİTİM

İstanbul Teknik

Kimya-Metalurji Fakültesi

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

Sakarya Üniversitesi

Metalurji Mühendisliği Lisans Programı

ANAHTAR KELİMELE

Toz Metalurjisi (TM), Mekanik Alaşımlama (MA), Şekil Hafızalı Alaşımlar (ŞHA), Endodontik Döner Eğeler, Mikro Lazer Kaynak (MLK), Nitinol, İleri Teknolojik Seramikler, XRD, SEM &EDS, DSC TG,

İŞ TECRUBESİ

Sağlık Bakanlığı Kuzey Kamu Hastaneleri Başkanlığı (1992- ...)

İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanı

YABANCI DİL

İngilizce (YDS Score 79.75 Nisan 2014)

SERTİFİKA

İş Sağlığı ve Güvenliği Sertifikası (C 2014)

BİLGİSAYAR

Solidworks, Ms Office (Word, Excel, PPT ...),

DİĞER

Kişisel olarak aşağıdaki laboratuvar ekipmanlarını kullanabiliyorum;

- 1.Bruker™ D8 Advance X-ray Powder Diffractometer,
- 2.Micromeritics™ AccuPyc II 1340 Gas Pycnometer,
- 3.JEOL™ JCM-6000 Benchtop SEM Scanning Electron Microscop.
- 4.Malvern™ Mastersizer Particle Size Analyzer
- 5.Zeiss Stereo Microscope
- 6.Nikon Eclipse Optical Microscope
- 7.UNITHERM™ 1161 V High Temperature Dilatometer

KİŞİSEL BİLGİLER

HOBİLER

REFERANS

- 8.TA™ Instruments DSC-DTA-TGA
9.LINN™ High Temprature Furnice
10.SPEX™ Mixer Mill High Energy Ball Milling
11.Metallographic Laboratory Equipments

Toplam Tecrube : 28 Year
Medeni Hal : Evli
Askerlik Görevi : Tamamlandı (22.08.2000)
Doğum Tarihi : 23.05.1972
Doğum Yeri : Türkiye - Ömerli
Sürücü Belgesi : B (1991)

Resim (Karakalem, Yağlı Boya), Karikatür (Klasik, Dijital), Müzik (Klavye, Bağlama), Model Araba Tasarımı, Video Edit Montaj.

Burak Özkal
ITU Kimya-Metalurji Fakültesi - Profesör
Gsm: +90 533 3969435
ozkal@itu.edu.tr