

**T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

**DİELEKTRİK ELASTOMER BAZLI YAPAY KASLARIN
DİNAMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

İBRAHİM KARAMAN

**Tez Danışmanı
DR. ÖĞR. ÜYESİ DAVUT ERDEM ŞAHİN**

YOZGAT – ARALIK 2021

**T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

**DİELEKTRİK ELASTOMER BAZLI YAPAY KASLARIN
DİNAMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

İBRAHİM KARAMAN

**Tez Danışmanı
DR. ÖĞR. ÜYESİ DAVUT ERDEM ŞAHİN**

**Bu çalışma Yozgat Bozok Üniversitesi Araştırma Projeleri Birimi
tarafından 6602a-FBE / 19-244 kodu ile desteklenmiştir.**

YOZGAT – ARALIK 2021

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdığı yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

İbrahim KARAMAN

02.12.2021

ÖZET

DOKTORA TEZİ

DİELEKTRİK ELASTOMER BAZLI YAPAY

KASLARIN DİNAMİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

İBRAHİM KARAMAN

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ DAVUT ERDEM ŞAHİN

Dielektrik Elastomer (DE), elektriksel gerilim uygulanarak deformasyon meydana gelmesi sağlayan bir polimer türüdür. DE'nin performansını etkileyen gerilim, öngerme, uygulanan frekans tipi ve frekans boyutu gibi birçok faktör bulunmaktadır. Dielektrik Elastomer Aktüatörler (DEA'lar) gelecek nesil yumuşak robot aktüatörleri ve yapay kaslar için en popüler malzemelerdendir. Bu tezde Yumuşak Dielektrik Elastomer Aktüatörlerde (YDEA) sayısal analiz, yüzey sıcaklıkları ve konum değişimleri üzerine deneyler yapılmıştır. İlk olarak, DEA'ların hesaplama yöntemlerinden faydalanılarak sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları uygulama neticesi elde edilen verilerle mukayese edilmiştir. Bir sonraki aşamada DEA yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimleri ve DEA'nın sıcaklığını etkileyen etmenler üzerine deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda kare, sinüs ve üçgen dâhil olmak üzere farklı frekanslara sahip elektrik sinyallerinin uygulanan çeşitli dalga biçimleri tarafından üretilen YDEA'ların yüzeyindeki sıcaklık değişimlerinin araştırılması ile ilgilidir. DEA yüzeyindeki en yüksek sıcaklığın kare dalga formu tarafından üretildiği gözlemlendi. Ayrıca yüzey sıcaklıkları, dalga şeklinin tipinden bağımsız olarak 2 Hz ile 10 Hz arasında değişen frekanslarda maksimum değerlerine ulaşır. Son olarak, dairesel bir DEA'da konum ve zaman değişimi üzerine deneyler ve simülasyonlar yapılmıştır. DEA'nın konum değişimini nicel olarak görmek için gerilim ve frekans olmak üzere iki faktör ele alınmıştır. Deneysel sonuçlara göre, gerilim ve frekans DEA'nın konumunun değişiminde etkili olduğu görülmüştür. Analizler ve kaydedilen sonuçlar araştırmacılara bu temel parametrelerin DEA'nın kontrolü üzerinde referans sağlayacaktır. Elde edilen sonuçlar farklı frekans tipi ve farklı frekans boyutunda DEA konumunda önemli farklılıklar gözlemlenmiştir. Ayrıca deneyler simülasyon ortamında test edilmiş, Yeoh modeli kullanılarak deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2021, 81 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Yumuşak robotik, Yapay kas, Sıcaklık Karakterizasyonu, Dielektrik Elastomer Aktüatör, Frekans, Elektrik Sinyali, Simülasyon.

ABSTRACT

DOCTORATE THESIS

INVESTIGATION OF THE DYNAMIC BEHAVIOR OF DIELECTRIC ELASTOMERS BASE ARTIFICIAL MUSCLES

İBRAHİM KARAMAN

**YOZGAT BOZOK UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF EDUCATION INSTITUTE**

MECHATRONIC ENGINEERING

SUPERVISOR: ASSİST. PROF. DR. DAVUT ERDEM ŞAHİN

Dielectric Elastomer (DE) is a type of polymer that provides deformation by applying electrical voltage. There are many factors that affect the performance of DE, such as voltage, pre-stretching, frequency type applied, and frequency size. Dielectric Elastomer Actuators (DEAs) are among the most popular materials for the next generation of soft robot actuators and artificial muscles. In this thesis, experiments on numerical analysis, surface temperatures and position changes in Soft Dielectric Elastomer Actuators (YDEA) were carried out. Firstly, numerical analysis of DEAs was carried out by using computational methods. The analysis results were compared with the data obtained as a result of the application. In the next step, experimental studies were carried out on the temperature changes on the DEA surface and the factors affecting the temperature of the DEA. These studies are concerned with the investigation of temperature changes on the surface of DEAs produced by various applied waveforms of electrical signals with different frequencies, including square, sine, and triangle. It was observed that the highest temperature on the DEA surface was produced by the square waveform. In addition, surface temperatures reach their maximum values at frequencies ranging from 2 Hz to 10 Hz, regardless of the type of waveform. Finally, experiments and simulations on position and time variation in a circular DEA are performed. In order to see the position change of the DEA quantitatively, two factors, voltage and frequency, are considered. According to the experimental results, it was seen that the voltage and frequency were effective in the change of the position of the DEA. The analyzes and recorded results will provide researchers with reference to the DEA's control of these key parameters. The results obtained showed significant differences in DEA location with different frequency type and different frequency size. In addition, the experiments were tested in the simulation environment and compared with the experimental results using the Yeoh method.

2021, 81 Pages

Keywords: Soft robotics, Artificial muscle, Temperature Characterization, Dielectric Elastomer Actuator, Frequency, Electrical Signal, Simulation.

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca maddi ve manevi vermiş olduğu desteklerinden dolayı öncelikle eşime ve aileme çok teşekkür ederim.

Tez konusu belirlenmesi, deneylerin yapılması ve tezin yazımı da dâhil olmak üzere en başından en sonuna kadar her an yardımını esirgemeyen ve büyük bir özveri ile yardımcı olup sürekli motive eden danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Davut Erdem ŞAHİN'e ve deney malzemelerin alınmasında bize yardımcı olan Dr. Öğr. Üyesi Mustafa YAZ'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışması;

Yozgat Bozok Üniversitesi BAP birimi “6602a-FBE / 19-244” tarafından finanse edilmiştir.

İbrahim KARAMAN

02/12/2021

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
Tez Onay Sayfası.....	ii
TEZ BEYANI.....	iii
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	x
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	16
2. ELEKTROAKTİF POLİMERLER.....	63
2.1. İyonik EAP'ler.	66
2.1.1. İyonik Polimer Metal Kompozitler (IMPC)	67
2.1.2. İyonik Jeller.....	8
2.1.3. Karbon Nanotübler (CNT)	68
2.1.4. İletken Polimerler (CP)	69
2.2. Elektronik EAP'ler.....	69
2.2.1. Ferroelektrik Polimerler.....	10
2.2.2. Polimer Elektretler.....	70
2.2.3. Elektrostriktif Polimerler.....	71
2.2.4. Relaxor Ferroelektirik Polimerler.....	71
2.2.5. Dielektrik Elastomerler (DE)	71
2.3. Tezin Motivasyonu.....	76
2.4. Tezin Amacı ve Katkıları.....	77
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	77
3.1. Deney Malzemeleri.....	77
3.2. Deney Düzenekleri.....	83
3.2.1. DEA Yüzey Sıcaklık Ölçümünde Kullanılan Deney Düzenegi.....	83
3.2.2. DEA Konum Deney Düzenegi.....	84
3.3. Yöntem.....	88

4. BULGULAR.....	94
4.1. Sayısal Analiz.....	94
4.1.1. Ön-germe.....	99
4.2. Sıcaklık Analizi.....	101
4.2.1. Test Numunelerinin Hazırlanması.....	40
4.2.2. DEA Yüzey Sıcaklık Ölçümünde Ön-germe İşlemi.....	40
4.2.3. DEA’da Yüzey Sıcaklık Bulguları ve Belirlenmesi.....	105
4.2.4. Farklı Sinyal ve Frekanslarda DEA Yüzey Sıcaklıkları.....	107
4.2.5. Gerilime Bağlı DEA Yüzey Sıcaklıkları.....	115
4.2.6. Farklı Ortam Sıcaklıklarında DEA Yüzey Sıcaklık Değişimi.....	118
4.2.7. Farklı Ön-Germe Oranlarında DEA Yüzey Sıcaklıkları.....	120
4.3. Konum Analizi.....	122
4.3.1. Doğrusal Voltaj Uygulanan DEA'da Konum Değişimi.....	61
4.3.2. DEA’nın Farklı Frekanslarda Zamana Göre Konum Değişimi.....	128
5. TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	136
6. KAYNAKLAR.....	139
ÖZGEÇMİŞ.....	

<u>Sekil</u>	ŞEKİLLER LİSTESİ	<u>Sayfa</u>
Şekil 1. 1.	Ahtapot kollarının kas yapısı (Kier ve Stella, 2007; Yekutieli vd., 2002)	2
Şekil 2. 1.	IPMC çalışma mekanizması (Shahinpoor ve Kim, 2000)	67
Şekil 2. 2.	İyonik jel gösterimi (Brochu ve Pei 2012)	68
Şekil 2. 3.	Bir CNT aktüatörü için harekete geçirme mekanizmasının şematik gösterimi (Mirfakhrai vd., 2007).....	9
Şekil 2. 4.	DEA'ların çalışma mekanizması.....	75
Şekil 3. 1.	(a) 3M Magic skotch bant, (b) 3M HVB bant, (c) İletken karbon gresi.....	79
Şekil 3. 2.	İletken bakır bant.....	19
Şekil 3. 3.	Dc-Dc yüksek gerilim dönüştürücü ve giriş-çıkış gerilim eğrisi (Kaynak: https://www.xppower.com).....	20
Şekil 3. 4.	Sinyal jeneratörü.....	20
Şekil 3. 5.	H-ti Termal kamera (Kaynak: https://hti-instrument.com/).....	21
Şekil 3. 6.	DEA yüzey sıcaklık ölçümü deney düzeneği şeması.....	22
Şekil 3. 7.	DEA yüzey sıcaklık ölçümü deney düzeneği.....	22
Şekil 3. 8.	Dairesel bir DEA tasarım aşamaları.....	23
Şekil 3.9.	Dairesel bir DEA'nın tasarımı.....	24
Şekil 3.10.	Dairesel DEA'nın yük bağlandığında meydana gelen değişim...	24
Şekil 3.11.	Dairesel bir DEA'ya gerilim uygulandığında meydana gelen değişim.....	25
Şekil 3.12.	DEA konum değişimi deney düzeneği.....	25
Şekil 3.13.	DEA gerilim ölçüm devresi.....	27
Şekil 3.14.	DEA çalışma sistemine ait blok şeması.....	27
Şekil 3.15.	Dielektrik elastomer aktüatörün gerilim altında iyon hareketi....	28
Şekil 3.16.	(a) (i) kare dalga, (ii) sinüs dalgası ve (iii) üçgen dalga; (b) Kare, sinüs ve üçgen dalga formlarının maksimum hız sayısal sonuçları (Liang vd., 2012).....	29
Şekil 3.17.	DEA'nın matematiksel modeli (a) makara sistemi, (b) eşdeğer sistem.....	30

Şekil 4. 1.	Gerilime bağlı Maxwell basıncı analizi blok şeması.....	96
Şekil 4. 2.	DEA maxwell basıncı analiz grafiği.....	97
Şekil 4. 3.	Farklı DE'lerin gerilime bağlı Maxwell basıncı tepkileri.....	98
Şekil 4. 4.	DEA'ların gerilime bağlı deplasman tepkisi	99
Şekil 4. 5.	DEA gerilim altında deformasyon oluşumu.....	99
Şekil 4. 6.	3M-VHB 4910'un farklı ön-germe oranlarında oluşan maxwell basınç tepkileri.....	100
Şekil 4. 7.	Gerilim altında DEA'da meydana gelen mekanik ve yük değişimi.....	103
Şekil 4. 8.	Ön-germe işlem basamakları.....	105
Şekil 4. 9.	Farklı elektriksel sinyallerin 0.52 Hz ve 5.2 Hz arasında, %20 nem ve 16 °C sıcaklık altında DEA meydana gelen sıcaklık görüntüleri.....	106
Şekil 4.10.	DEA yüzeyinde (a) kare, (b) sin, (c) üçgen dalga formlarında farklı frekanslarda zamanla sıcaklık değişimi.....	109
Şekil 4.11.	Zamana bağlı DEA yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimi termal kamera görüntüleri (kare dalga formu).....	109
Şekil 4.12.	Zamana bağlı DEA yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimi termal kamera görüntüleri (sinüs dalga formu).....	110
Şekil 4.13.	Zamana bağlı DEA yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimi termal kamera görüntüleri (üçgen dalga formu).....	111
Şekil 4.14.	Sinüs, üçgen ve kare dalga biçimlerinin farklı frekanslarında sıcaklık değişimi.....	112
Şekil 4.15.	Kare dalga formu hata çubukları.....	113
Şekil 4.16.	Üçgen dalga formu hata çubukları.....	50
Şekil 4.17.	Sinüs dalga formu hata çubukları.....	50
Şekil 4.18.	Doğrusal gerilim altında DEA yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimi.....	116
Şekil 4.19.	Doğrusal gerilim uygulanan DEA yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimi termal kamera görüntüleri.....	117

Şekil 4.20.	18°C sıcaklık ortamında, farklı elektriksel sinyaller uygulanan DEA'nın yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimi termal kamera görüntüleri.....	118
Şekil 4.21.	DEA yüzeyinde farklı frekans seviyelerinde ve farklı sıcaklık ortamlarında sıcaklık değişimi (a) kare dalga formu (b) sinüs dalga formu (c) üçgen dalga formu.....	120
Şekil 4.22.	Ön-germe uygulanan DEA'da, farklı elektriksel sinyaller ve frekanslarda meydana gelen sıcaklık değişimleri (a) 15mmX15mm→21mmX21mm (b) 20mmX20mm→31mmX31mm (c) 12mmX12mm→27mmX27mm.....	122
Şekil 4.23.	Farklı elektriksel dalgalara maruz kalan dielektrik elastomerlerin sonlu eleman modeli.....	60
Şekil 4.24.	DEA'ya uygulanan elektriksel sinyal grafiği.....	60
Şekil 4. 25.	Deney ve simülasyonda doğrudan form dalgasına maruz kalan dielektrik elastomerin konum grafiği.....	127
Şekil 4. 26.	Doğrudan form dalgasına maruz kalan dielektrik elastomerin yer değiştirme konturu, (a) İzometrik Görünüm, (b) Önden Görünüm.....	128
Şekil 4. 27.	a) sinüs dalgası, (b) üçgen dalga ve (c)kare dalgaya maruz kalan dielektrik elastomerin konum grafiği.....	130
Şekil 4. 28.	(a) kare dalga, (b) üçgen dalga ve (c) sinüs dalga; 3kV gerilim altında ve 20 Hz frekanslara maruz kalan dielektrik elastomerin yer değiştirme konturu.....	132
Şekil 4. 29.	3 kV gerilim ve 2 Hz frekansları altında dalga biçimlerine (sinüs, üçgen ve kare) maruz kalan dielektrik elastomerin konum grafiği.....	132
Şekil 4. 30.	Yüksek frekansta (kHz) (a) sinüs dalga, (b) üçgen dalga ve (c)kare dalgaya maruz kalan dielektrik elastomerin konum grafiği.....	67
Şekil 4. 31.	Farklı elektriksel dalga biçimlerine maruz kalan dielektrik elastomerin yer değiştirme konturu.....	68

<u>Tablo</u>	TABLolar LİSTESİ	<u>Sayfa</u>
Tablo 2. 1.	Elektroaktif Polimer çeşitleri (Kim ve Tadokoro, 2007).....	66
Tablo 2. 2.	DE'lerin doğal kas ve diğer materyallerle karşılaştırılması (Peltine vd., 2002).....	73
Tablo 3.1.	Elektrik sinyallerinin Fourier katsayıları.....	31
Tablo 4. 1.	Farklı elektriksel sinyaller ve frekanslarda DEA'ların yüzeylerinde meydana gelen sıcaklık değişimleri (°C)	106
Tablo 4. 2.	Farklı elektriksel sinyaller ve frekansların DEA yüzeyinde meydana gelen sıcaklık(°C) değişimlerinin deney setlerinin karşılaştırılması.....	107
Tablo 4. 3.	DEA yüzeyinde meydana gelen farklı elektrik sinyallerinde ve farklı yüksek frekanslarda sıcaklık değişimleri (°C).....	112
Tablo 4. 4.	Yeoh katsayıları, Abaqus/Standart 3B form, malzeme modeli (Shahzad vd., 2015).....	125
Tablo 4. 5.	Farklı elektriksel sinyal ve frekansların dairesel bir DEA'da meydana gelen anlık konum-zaman deney sonuçları.....	130

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
MPa	MegaPascal
Mm	Milimetre
N	Newton
v	Volt
kV	kiloVolt
r	Direnç
ϵ_r	Dielektrik direnci
ϵ_o	Boş alan geçirgenliği
d	Dielectric Elastomer kalınlığı
p	Maxwell basıncı
λ	Gerilme oranı
sz	Kalınlık gerilimi
Y	Young modülü
Hz	Herz
KHz	KiloHerz
MHz	MegaHerz
t	Zaman
Q_{ave}	Ortalama Sıcaklık
Q_{max}	Maksimum Sıcaklık
Dc	Doğrusal Gerilim
A	Akım
f	Frekans
Δt	Sıcaklık Farkı
mA	MiliAmper
Δ_x	Konum Farkı
Λ	Dalga boyu
c	Sinyal yayılma hızı
k	Sinyal genliği
Jlim	Gerinim Limiti

kPa	KiloPascal
K	Kelvin
HG	Homojenlik Grubu
$\bar{x}$	Aritmetik Ortalama
3B	Üç Boyutlu
ln	Dalga Boyu
c	Yayılma Hızı
k	Genlik
U	Elektriksel Sinyal
V_e	AC Sinyal RMS(etkin) Değeri
Δ_s	Yer değiştirme miktarı
q	Yük
k_1, k_2	Sertlik Katsayısı
m	Kütle
c_1, c_2	Sönüm Katsayısı
S_g	Etkin Alanın Karesi
a_0, a_n, b_n	Fourier Katsayıları
$\bar{I}_1$	Gerinim Değişmezi
W	Gerinim Enerjisi
C_{i0}, D_{i0}	Sıcaklığa Bağlı Malzeme Parametresi

Kısaltmalar

Açıklama

DE	Dielektrik Elastomer
DEA	Dielektrik Elastomer Aktüatör
YDEA	Yumuşak Dielektrik Elastomer Aktüatör
EAP	Elektroaktif Polimer
PU	Poliüretan
SMA	Şekil Hafızalı Alaşım
pH	Hidrojen Gücü
IPG	İyonik Polimer Jeller
IPMC	İyonik Polimer Metal Kompozit
CP	İletken Polimerler
CNT	Karbon Nanotüpler
LCE	Sıvı Kristal Elastomerler
DDEA	Dairesel Dielektrik Elastomer Aktüatör

Dc

Doğrusal Gerilim

RMS

Karekök Ortalaması

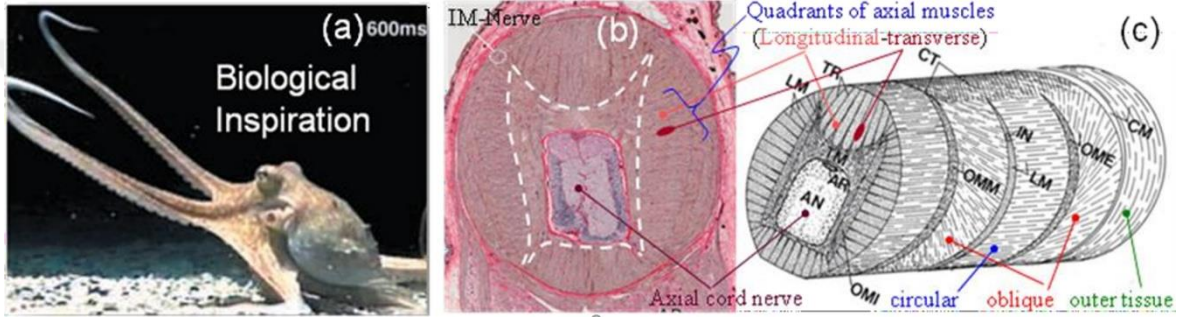
1. GİRİŞ

Canlı hareketlerinin robot olarak taklit edilmesi mühendisler için vazgeçilmez bir hedef olmuştur. Bu hedefte doğal organizmaların taklit edilmesinin aksine bu robotların güçlü performansı ve tasarımı da önemli bir kıstas olarak görülmektedir. Canlı sistemleri üzerine incelmenin mantıksal bir sonucu olarak biyomimetik uygulamalar karşımıza çıkmaktadır. Canlı sisteminde gerçekleştirmek için öncelikle biyolojik işlevi yöneten fiziksel ilkelerin iyi anlaşılması gerekmektedir. Başka bir deyişle, bir sistemle aynı yapı ve işleve sahip yeni bir mekanizma tasarlamak için taklit edilen sistemin derinlemesine anlaşılmasını gerektirir. Bu sürecin teknolojik bir sonucu, canlı sistemleriyle uyum sağlayabilen yapay organların oluşturulması bu sürecin bir sonucudur ve biyomedikal tasarım olarak adlandırılır. Biyomedikal tasarım canlı biyolojisine uygun tasarımlar sunar. Kuşları, balıkları, böcekleri ve hatta bitkileri taklit eden çeşitli makineler geliştirilmiştir. Günümüzde mühendisler çeşitli biyomimetik alanlarda; yapay zekâ, yapay görme, yapay kaslar ve diğer pek çok yol dâhil olmak üzere birçok tasarım yapmaya çalışmaktadırlar.

Canlı sistemine uygun yapılar geliştirmek için; geleneksel yaklaşımlar yerine yeni ve canlı biyolojisine uygun tasarım geliştirmeyi gerektirmektedir. Örneğin bir yapay kalp tasarımında canlı vücuduna geleneksel elektromanyetik döner motor sistemlerinin yerine daha yüksek enerji yoğunluğu olan gerçekçi protezler oluşturmak gerekir. Yeni bir biyomedikal tasarım gerçekleştirmek için yeni aktüatör ve aktüatör malzemelerine ihtiyaç duyulmaktadır. Aktüatör alanında kullanılan malzemelerinin gelişmesinin neticelerinden biri; polimer gibi dayanıklı ve hafif malzeme teknolojileridir. Yeni bir canlı sistemini taklit eden bir tasarım için en iyi alternatif aktüatör malzeme adaylarından biri, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren ve bir tür elektroaktif polimer olan dielektrik elastomer, hareket tepkimesinin yüksek olması sebebiyle aktüatör tasarımı için iyi bir malzeme adaydır. Biyomimetik alanlarında kullanılan bu polimerler, esneklik, harekete geçirme ve hata toleransı gibi biyolojik kaslara benzeyen özelliklere sahiptirler (Bar-Cohen, 2003).

Sert malzemeli makaslar kullanan makineler oluşturmak yerine, fil gövdeleri, ahtapot kolları veya tırtıllar gibi hayvanlardan gelen hareketleri taklit etmek için

uygun malzemeler kullanılır. Bu hayvanlar, geleneksel eklemli sert robotlardan çok farklı olan eklemsiz vücut yapıları ile neredeyse sonsuz dereceli serbestlik rotasyonları sunarlar. Son yıllarda yapay kaslar üzerine yapılan çalışmalarda, hafif robot kollar, enerji verimi yüksek ve dar alanda çalışabilen aktüatörler oldukça ilgi çekmektedir (Bar-Cohen,2004). Ahtapot kolu gibi doğadaki pek çok canlı; çok fazla deforme olabilen, esnek ve çok yüksek serbestlik derecesine sahip Şekil 1.1. 'deki gibi, örnekler sunuyor. Doğadaki bu ilham veren canlılar, gelecekte de yapay kas uygulamalarının geliştirilmesinin temelini oluşturan yumuşak aktüatörler ve yeni malzemelerin bulunmasına zemin hazırlayacaktır.



Şekil 1. 1. Ahtapot kollarının kas yapısı (Kier ve Stella, 2007; Yekutieli vd., 2002).

İnsan hayatında iletişim ortamları yaratan bilgi teknolojilerin gelişmesiyle robot teknolojisindeki gelişmeler, beklentiye daha da artırmıştır. Yeni bulunan malzemeler ve yumuşak aktüatörlerle robotlara yeni roller tanımlanmakta; rollerinde önemli bir değişiklik gözlenmektedir. Robotların gelişme eğilimlerine göre, işlevselliği yakın zamanda insan hareketlerini veya hayvan işlevlerini taklit etmeye odaklanmıştır. Yeni aktüatörlere giriş, yumuşak aktüatörler olarak adlandırılan yeni robot teknolojisi geliştirmesinde önemli bir bilgi alanı olmaktadır. Bununla birlikte, elektromanyetik motorlar, ses, bobin motorları gibi geleneksel dönüştürücülerin fiziksel özellikleri, hayvan kaslarından farklıdır, bu tarz aktüatörlerle donatılmış bir robotun çalışması, sadece yapılandırılmış bir ortamda sınırlı ve verimli olmaktadır. Sonuç olarak, bir robot iskeletine ve aktüatörlere bir miktar esneklik sağlamak, yeni nesil robotların önemli bir odak noktası olacaktır.

Geleneksel robot teknolojilerinde sensör ve aktüatör alanında doğada bulunan mekanizmaları taklit etmede bazı eksiklikler mevcuttur. Yeni robot uygulamalarının geliştirilmesi; mevcut robot donanımının mekanik ve elektriksel işlevselliğinin iyileştirilmesinde zorluklar meydana getirmektedir. Hâlihazırdaki robot

teknolojilerindeki donanım gelişiminin en aksak faaliyetlerinden biri, sensörler ve aktüatörler alanında görülmektedir. Doğanın mekanizmalarını taklit edebilen kas benzeri materyaller geleneksel yöntemlere göre ilgisi artmaktadır. Geleneksel yanmalı motorlar ve yüksek devirli elektrik motorları yüksek özgül güce sahiptirler, fakat süreklilik arz etmeyen ve üretken olmayan işleri gerçekleştirmek için karmaşık iletim sistemlerine gereksinim duyarlar. Direkt tahrikli elektrik motorları yapay kas ile karşılaştırıldığında tork ve güç düşüktür (Hunter vd., 1991; Khatib vd., 1992). Örneğin, Honda'nın etkileyici insansı robotunun (Asimo, 1) yürüme hızı her bir eklemi harekete geçiren doğrudan tahrik motorlarında mevcut torkla 2 km/s ile sınırlıdır. Kas benzeri bir aktüatörün kullanılabilirliği, her alanda önemli ilerlemeler sağlayacaktır (Hunter vd., 1991; Khatib vd., 1992; Brost, 1992).

Robotiğin bir alt dalı olarak karşımıza yumuşak robotik çıkmaktadır; yumuşak robotiğin görevi doğadaki canlıları taklit etmektir. Bu alanda yapılan çalışmalarda kullanılan malzemeler deformasyon meydana getirerek mekanik tepkime oluşturmaktadır. Yumuşak robotik, biyolojik canlılar gibi yumuşak ve esnek bir yapıya sahiptir. Genellikle biyolojik canlılar için yumuşak dokuya sahip olmak çok önemlidir. Örneğin; kan dolaşımı için kalp hareketleri, odaklanmak için göz merceği deformasyonu ve uzuv hareketleri için kas deformasyonu gibi birçok hayati önem taşıyan etmen bulunmaktadır (Pfeifer vd., 2014). Yumuşak robotik terimi; Avrupa Geleceği ve Gelişen Teknolojiler Açık Koordinasyon Eylemi sempozyumunda, RoboSoft1, Eylül 2014'te yayınlanan FirstWorking Belgesi'ne göre, (Laschi ve Cianchetti, 2014) yumuşaklık hem yapısal uygunluk hem de doğal malzeme uyumluluğu anlamına gelmektedir. Bu nedenle, yumuşak robotik, doğal veya yapısal uyumluluğa dayanan çevre ile etkileşime giren çözümleri kapsayan robotik olarak tanımlanabilir (Wang vd., 2017).

Yumuşak robotiğin gelişiminde en çok payı olan EAP'lerin (elektroaktif polimerler) ortaya çıkmasıyla birlikte, malzemelerin robot mühendislik alanında dikkat çekmeye başlamasının bir kaç nedeni vardır. İlk olarak; Karmaşık bir güç iletiminin herhangi bir yardım almadan doğrusal hareketlerle sağlanmasıdır. Karmaşık bir güç aktarım mekanizmasının hantal robotlar yarattığı ve hassas görevlerin yerine getirilmesinin engellenmesinin aksine, güç aktarma mekanizmasının tamamen ortadan kaldırılması veya kısmi azaltılmasının, hassas bir

cerrahi operasyonunun gerekli olduğu durumlarda robot uygulamasının gelişmesine fayda sağlamaktadır. Ayrıca, güç iletim aşamalarının sayısının azaltılması, enerji verimliliğini artırmaktadır. İkincisi; Polimerik malzemelerin doğal esnekliği, biyomimetik makineler oluşturmak için birçok mühendislik olanağı sunmaktadır. Canlıları doğal olarak yumuşak olduğu gerçeğini kabul ederek, daha doğrusu onların harekete geçirme cihazları yumuşaktır, yumuşak enerji dönüştürücüsünün gelişimi, biyomimetik robot operasyonları için en önemli ön koşullardan biri olmaktadır (Shahinpoor, 2000; Bar-Cohen, 2002). Geleneksel robotlar tipik olarak sert aktüatörler tarafından çalıştırılır, biyolojik varlıklar ise çoğunlukla yumuşak kaslardan oluşur. Yumuşak olmak, uyumluluk işlevini verir, böylece harekete geçirme aralığını ve serbestlik derecelerini büyük ölçüde artırır. Genellikle yapay kaslar olarak da adlandırılan esnek polimer bazlı aktüatörler, hayvanlar alemindeki canlıların hareket prensiplerini taklit eden biyomimetik sistemlerin önemli bir parçasıdır (Aleksyev vd.,2021).

2. ELEKTROAKTİF POLİMERLER

Elektroaktif Polimerler (EAP), elektrik ile tahrik edildiklerinde tepki veren polimer türüdür, iyonik ve elektrik alanı tahrikli olmak üzere iki kategoriye ayrılır. EAP'ların tepki verme yöntemleri, içerdikleri malzemenin tipine bağlı olarak değişiklik gösterir. Mühendisler, yapay kas uygulamaları için gerekli aktüatörlerin hafif ve tepkime süresi kısa olan akıllı malzemelere ihtiyaç duyarlar. Literatürde çok sayıda akıllı materyal bulunmaktadır. Başlıcaları Piezoelektrikler, Şekil Hafızalı Alaşımlar, İyonik Metal Kompozitler ve Dielektrik Elastomerlerdir. Polimerler, hafiflik, ucuzluk, kırılma toleransı ve bükülebilirlik gibi birçok çekici özelliğe sahiptir. Elektriksel uyaranlara mekanik bir yanıtla yanıt verme yeteneği, çok çeşitli disiplinlerden bilim camiasının dikkatini çekmektedir (Bashir ve Rajendran, 2018)

18. yüzyıldaki endüstri devriminden bu yana, bilim adamları ve mühendisler, güncel bir gerçek yaşam problemini çözmek ve sektörde verimliliği artırmak için yeni cihazlar üzerinde çalışmaktadırlar. Araştırmacılar, yapılandırılmamış ortamlarda ve beklenmedik durumlarda karmaşık etkileşimlerle başa çıkabilecek yeni nesil robotlar geliştirmeyi planlamaktadır (Tesch vd., 2009). Bu amaca yönelik olarak EAP'lar esnek robotik sistemlerin de araştırma konusu olmuştur. Tarihte insan

yapımı robotik sistemler çoğunlukla montaj hatlarında kullanılmak üzere üretilmiş, hızlı ve hassas görevleri yerine getirebilmeleri için sert ve güçlü olarak tasarlanmıştır (Levy vd., 2006; Kim vd., 2013). Buna karşın; Tabiattaki canlı ve cansız varlıklar yumuşak yapılara sahiptir. Aslında, hayvanların ve bitkilerin çoğunluğu yumuşak gövdelidir, (Trimmer ver vd., 2012) hatta ağaçlar, çalılar, böcekler veya odunsu bitkiler gibi sert dış iskeletlere sahip canlılar, esas olarak yumuşak maddeler ve sıvılardan oluşan eklemlere, iç dokulara sahiptir (Kim vd., 2013). Ayrıca, karmaşık ve öngörülemeyen ortamlara uyum sağlamak için esnek ve deforme olabilen vücut yapıları ile son derece karmaşık hareketleri gerçekleştirebilirler (Kim vd., 2013; Pfeifer vd., 2005). Bu bilgiler yeni nesil robotik uygulamalar için bilim adamlarının ilgisini çekmesine neden olmuştur.

Aktüatör hareketinin temel iki parametresi olan kuvvet ve yer değiştirmeyi üretmek için **voltaaj, elektromanyetik alan, ışık** veya **sıcaklıkla** yönlendirilen malzemeler, aktüatörlerin tahrik ve manevra kabiliyetine yeni yaklaşımlar getirmiştir. Akıllı malzemeler olarak adlandırılan bu malzemeler, etki ile deforme olup üzerinde etki kaybolunca eski hallerine dönebilirler. Onların bu özelliği yapay kas fikrini ortaya çıkarmış ve yumuşak aktüatörlerin gelişimini hızlandırmıştır. Bu tür yumuşak aktüatörlerin potansiyel uygulamaları, esnek robotik kollar ve tutucular, cerrahi uygulamalar ve mikro hava araçları için çırpma kanatlarıdır (Madden vd., 2004). Teknolojik gelişmelerle birlikte; metaller, alaşımlar gibi geleneksel malzemeler, otomobil, havacılık, ev eşyası ve elektronik gibi alanlarda polimerlerle değişmektedir. Polimerik malzeme teknolojisindeki önemli gelişmeler, bu malzemenin mekanik ve elektriksel özellikleri nedeniyle üretimini sağlayan çeşitli işleme teknikleri geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Küçük boyutlu yeni tasarımlar geliştirmek için çalışılan polimerler; hafif, ucuz, kırılma toleransı olan, bükülebilir, kolayca işlenebilen, üretilebilen malzemelerdir (Gurunathan vd., 1999). Bu akıllı materyaller çevredeki değişimleri algılayabilir, bilgiyi işleyebilir ve buna göre cevap verebilir. Şekil Hafızalı Alaşımlar, Piezoelektrik malzemeler, Karbon Nanotüpler, Dielektrik elastomerler vb. akıllı materyal kategorisine girerler (Zrinyi, 2000). Dış uyaranlara şekil veya boyut değiştirerek tepki veren polimerler, son zamanlarda bilinmekte ve çalışılmaktadır. Elektrik alanı, pH, manyetik alan ve ışık gibi

uyaranlara yanıt veren bu akıllı polimerler toplu olarak aktif polimerler olarak adlandırılabilirler (Bar-Cohen, 2004).

Elektroaktif polimerler, malzemenin cevabı ile elektrik veya kimyasal enerjiyi doğrudan mekanik enerjiye dönüştürebilirler. Özellikle, robotların minyatürizasyonu için EAPler, hızla küçülen mekanik bileşenlerde büyük bir kullanım alanı olmuştur(Courty vd., 2003). Harekete geçirme türüne bağlı olarak, kullanılan malzemeler yaygın bir şekilde elektriksiz olarak deforme olabilen polimerler (pH, ışık, sıcaklık, vs. gibi elektromanyetik uyarılarla harekete geçirilen) ve elektroaktif polimerler (EAP'ler) (elektrik girişleri ile harekete geçirilir) olarak sınıflandırılır. Farklı tipte elektromanyetik olarak deforme olabilen polimerler kimyasal olarak aktive edilmiş polimerler, şekil hafızalı polimerler, şişirilebilir yapılar, ışıkla aktive edilmiş polimerler, manyetik olarak aktive edilmiş polimerler ve termal olarak aktive edilmiş jeller olarak karşımıza çıkmaktadırlar (Bar-Cohen, 2003;2004). Elektriksel uyarana tepki olarak şekil veya boyut değiştiren polimerler, elektroaktif polimerler (EAP) olarak adlandırılır ve elektronik EAP'lerle elektrik alan veya kolombik kuvvetleri tarafından tahrik edilerek harekete geçerler, iyonik EAP'ler ise iyonların yer değiştirmesiyle harekete geçmektedirler. Jeller, iyonik polimer-metal kompozitler, iletken polimerler ve karbon nanotüpler gibi iyonik EAP malzemeleri, neredeyse 1-5 volta eşit olan düşük sürüş voltajları gerektirirler. İyonik EAP'lar çoğunlukla elektronik EAP'lere göre nispeten düşük harekete geçirme kuvvetleri sonucu daha yavaş harekete geçme özelliğine sahiptirler. Bu malzemelerin deformasyon miktarı genellikle elektronik EAP malzemelerinden çok daha fazladır ve deformasyon mekanizması biyolojik kas deformasyonuna daha fazla benzerlik gösterir (Samatham vd., 2007).

Aktivasyon mekanizmasına bağlı olarak iyonik ve elektronik EAP'lar birçok farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda, EAP'lar elektriksel uyarı altında deformasyonu meydana getiren polimerlerdir. İyonik EAP'lar uygulanan elektrik kuvveti ile tetiklenir, iyonların göçüyle tepkime oluştururlar. Bunlar genel olarak, 10 volt veya daha düşük gerilime ihtiyaç duyarlar. Ancak; düşük frekansta çalışan iyonik EAP'lar düşük enerji üretirler. EAP'ler, polimerik olmayan akıllı malzemelere kıyasla yüksek gerinimlere ve düşük kuvvet çıkışlarına sahip olmaları ile karakterize edilir. Tablo 2.1'de gösterildiği gibi, EAP'ler gerginliğin nasıl

indüklendiğine bağlı olarak iyonik ve elektronik olarak ayrılırlar. İyonik EAP'ler için gerilim, iyonların difüzyonu yoluyla oluşturulur. Genellikle yavaş tepki süresine sahiptirler ancak çalıştırma için düşük gerilim (1V~10V) yeterlidir. Bir diğeri elektronik EAP'lerde ise, bir elektrik alanının uygulanmasıyla gerilim indüklenir. Tepki süreleri önemli ölçüde daha hızlı olmasına rağmen, çalıştırma için gereken voltaj çok büyüktür (~2kV). İyonik ve elektronik EAP'ler bazen sırasıyla "ıslak" ve "kuru" olarak bilinir ve bu, iyonik EAP'lerin genellikle ıslak ortamlarda ve elektronik EAP'lerin kuru ortamlarda çalıştığı gerçeğini ifade eder. Bununla birlikte, iyonik polimer metal kompozitler (IPMC'ler) gibi bazı EAP'ler hem kuru hem de ıslak ortamlarda işlev görebilir bu nedenle, her iki gruba ait olarak kabul edilebilir.

Tablo 2. 1. Elektroaktif Polimer çeşitleri (Kim ve Tadokoro, 2007).

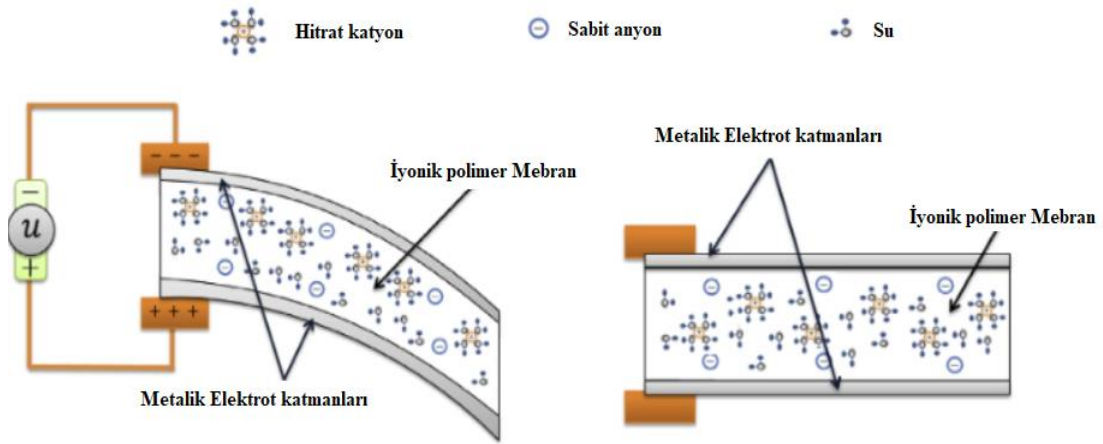
Elektronik EAP	İyonik EAP
Dielektrik EAP	İyonik polimer jeller (IPG)
Elektrostriktif graft elastomerleri	İyonik polimer metal kompozit (IPMC)
Elektrostriktif elastomer	İletken polimerler (CP)
Elektro-viskoelastik elastomerler	Karbon nanotüpler (CNT)
Ferroelektrik polimerler	
Sıvı kristal elastomerler (LCE)	

2.1. İyonik EAP'ler

İyonik EAP'lerin hareketi, aktivasyon sırasında polimerlerde bulunan iyonların göç etmesine dayanır. Kimyasal reaksiyonlarda ya da harici uygulanan yükler tarafından yönlendirilen iyon göçünden dolayı polimerde deformasyon meydana gelmektedir. İyonik göçlerin oluşmasında elektronik EAP'lara göre daha küçük gerilimlere ihtiyaç duyarlar. İyonik EAP'lerin çalışma voltajı seviyesi genellikle düşüktür (10 voltun altında). İyonik EAP'lar iyon difüzyonunun gerçekleşmesi sebebiyle, elektronik EAP'lere göre çok daha yavaş tepkime süresi vardır (Kim ve Shahinpoor, 2001; Kim ve Tadokoro, 2007; Tiwari ve Kim, 2010; Shahinpoor vd., 2007; Mirfakhrai vd., 2007). İyonik Polimer-Metal Kompozitler, İyonik Jeller, Karbon Nanotüpler ve İletken Polimerler iyonik sınıflandırma altındadır (Shahinpoor, 2008).

2.1.1 İyonik Polimer Metal Kompozitler (IMPC)

İyonik polimer-metal kompozitler (IPMC), robotik, biyotıp ve mikro manipülasyon sistemleri gibi çeşitli pratik alanlarda yumuşak aktüatörler olarak kullanılması beklenen elektroaktif polimerlerdir (Aabloo vd., 2020). IPMC'ler ilk olarak Oguro ve arkadaşları tarafından öne sürmüş ve kapsamlı çalışmalar yürütmüşlerdir. Bu çalışmalarda, IMPC'ler, 3-10 mm civarında kalınlığa sahip iki ince esnek metal (tipik olarak platin veya altın) elektrot tabakaları ile sandviçlenmiş bir iyon değişim polimer membranından oluşmaktadır (Oguro vd., 1999). Şekil 2. 1.'de gösterildiği gibi voltaj uygulanırken (normalde 10 volttan daha düşük), polimer membranındaki hareketli iyonlar IPMC'lerin anotuna doğru akmakta ve simetrik olmayan hacim dağılımına neden olmaktadır (Kim ve Shahinpoor, 2001).



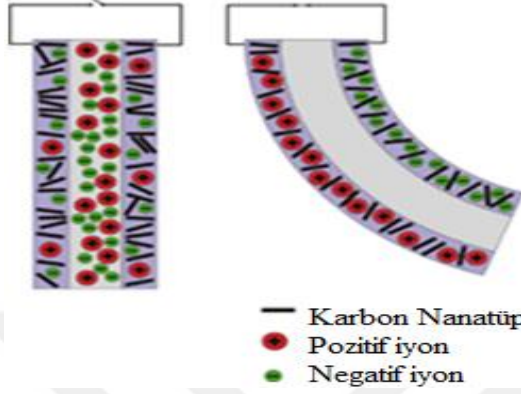
Şekil 2. 1. IPMC çalışma mekanizması (Shahinpoor ve Kim, 2000).

Bu kompozit polimer malzemeler iki ince esnek metal veya karbon bazlı elektrotlar arasında lamine edilmiş ve iyon değişimi meydana gelmektedir. Hazırlanan bu membrana bir ön-gerilimin uygulanması, film içindeki hareketli iyonların zıt yüklü elektrota göçüne neden olur, bu da zarın bir tarafının şişmesine ve karşı kısmının bükülmesi ile hareket etmesiyle sonuçlanmaktadır. Düşük gerilimler uygulanarak elde edilen hareketin sınırlı olması sebebiyle yapay kas gibi uygulamalarda beklentiyi karşılayamazlar (Shahinpoor ve Kim, 2001; Kim ve Shahinpoor, 2002; Shahinpoor, 2003).

2.1.2. İyonik Jeller

Bir elektrolit çözeltisinde çapraz bağlı polimer olan İyonik polimer jeller, poliakrilik jel asitten oluşur. Bu malzemeler, suda şişen bir tür ağ polimeri olan

hidrojeller sınıfına ait polimer türüdür. Hidrojeller, aktüatörler olarak kullanım için ilgi çekici olmuştur. Sulu bir çözeltiye yerleştirilen bir hidrojel (Bkz. Şekil 2.2.), polimer-sıvı etkileşimindeki bir değişiklik ve dolayısıyla şişme derecesine göre, şekil ve hacim de değişmektedir (Osada, 1987; Fragala vd., 1972).



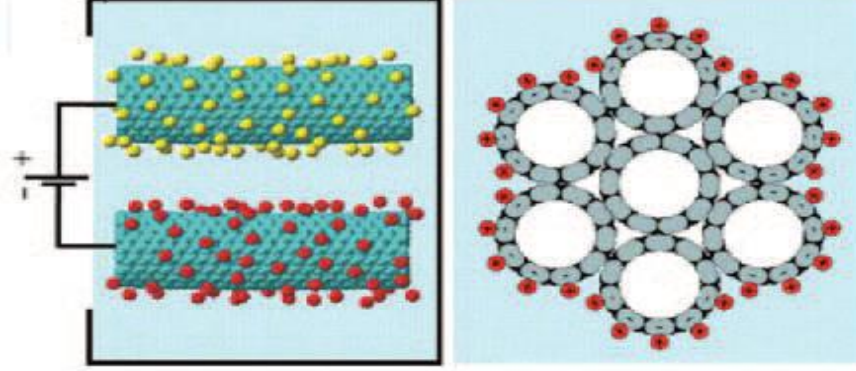
Şekil 2. 2. İyonik jel gösterimi(Brochu ve Pei 2012).

Hidrojeller, pH etkisiyle iyonize özelliğiyle bir değişim meydana gelerek, itme ve çekme kuvveti oluşturur. Poliakrilik jel asitler, pH'daki bir artışa tepki olarak iyonlaşarak şişmelerine neden olacaktır. Bununla birlikte, bu yaklaşım bir sıvı pompalama sistemine bağlı olduğu için pratik değildir. İyonik jeller ayrıca elektrik alanlarına da cevap vermektedir (Tanaka, 1979; Osada ve Hasebe, 1985). İyonik jeller gibi dağılmış yumuşak iyonik kısımlara sahip gerilebilir iyonik elastomerler genellikle elektrikli kaplamalar olarak adlandırılan giyilebilir cihazlar gibi uygulamalarda yumuşak sensörler olarak da ilgi görmüştür(Feng vd., 2021). Bu jeller, geleneksel dielektrik elastomerlerden oldukça farklı olan çarpıcı deformasyon davranışı ile yapay kaslar ve diğer yumuşak robotik cihazlar olarak kullanılabilir (Zheng vd., 2021).

2.1.3. Karbon Nanotüpler (CNT)

Bir tür iyonik elektroaktif polimer olan karbon nanotüp (CNT) aktüatörler, küçük aktivasyon voltajları, nispeten büyük aktivasyon tepkileri ve esnek ve yumuşak mekanik özelliklere sahiptir (Neuhaus vd., 2019). Bir elektrolit içinde askıya alınan Karbon Nanotüpler(CNT'ler), çift katmanlı şarj enjeksiyonundan dolayı genişleme kapasitesine sahiptir. CNT'ler ve karşı elektrot arasında gerilim uygulandığında, iyonlar CNT'lerin yüzeyine göç eder. Ortaya çıkan yük birikimi, tüpler içindeki elektronik yükte bir yeniden düzenleme ile dengelenmektedir (Şekil

2.3.). Ortaya çıkan bu hareket meydana gelen kolumbik kuvvetin bir sonucudur (Bar-Cohen, 2002; Brochu ve Pei 2012).



Şekil 2. 3. Bir CNT aktüatörü için harekete geçirme mekanizmasının şematik gösterimi (Mirfakhrai vd., 2007).

2.1.4. İletken Polimerler (CP)

Elektriksel olarak iletken polimerler (CP) iyonik tip aktüatörler için çekici malzemelerdir çünkü aktivasyon düşük voltajda (≤ 7 V) gerçekleşir [25]. Aktivasyon, CP'nin oksidasyonu ve redüksiyonu sırasında elektrolit iyonlarının eklenmesi ve atılmasının sonucudur, bu da malzemenin hacminde bir değişikliğe neden olur (Martinez vd., 2018). CP'sler, malzemelerin içinde bulunan iyonun (genellikle pozitif yükler) göçüne izin veren organik malzemelerden oluşmaktadır. İlk kez Baughman vd., aktüatör gelişimi için aktif malzeme deneyi yapmıştır. CP'lerin çalıştırma gerilimleri düşük olsa da (1-2 volt), % 2'den % 20'ye kadar gerilme oluşabilmektedir. Bu EAP türü, düşük çalışma(~%1) verimliliğine sahiptir (Baughman,1996; Gerard vd., 2002).

CP'ler elektrokimyasal tepkimesi sonucu zıt iyonların hareket etmesi sağlanır. Bunun sonucu olarak CP'ler harekete geçer ve çoğunlukla polimer zincir yönünde genişlemeye dik olarak meydana gelir. Oksidasyon durumundaki değişiklikler, polimer zincir boyunca bir şarj akı ile sonuçlanır ve elektrolit içindeki karşı iyonlar yükü dengelemek için göç eder (Baughman vd., 1991; Pytel vd., 2006).

2.2. Elektronik EAP'ler

Elektroaktif polimerler (EAP'ler), elektriksel bir uyarana tepki olarak boyut/şekil değişikliği sunan malzemeler, şu anda robotik, valfler, yumuşak aktüatörler, yapay kaslar ve elektromekanik sensörler gibi gelişmiş akıllı cihazlarla

ilgili çalışmalar yapılmaktadır (Kanaan vd., 2021). Elektronik EAP'lerin harekete geçirilmesi, polimerlerin şekil değişikliğini sağlayan elektrik alanıdır. Elektronik EAP'lerin deformasyonları doğrudan elektrostatik kuvvetler tarafından (Maxwell gerilimi gibi) uygulandığında tepki süreleri benzer şekilde hızlıdır, genellikle daha yüksek çalışma voltajı gerektirir (Madden vd., 2004; ,Kim ve Tadokoro, 2007). Ferroelektrik Polimerler, Polimer Elektretler, Elektro-Sıkılaştırıcı Polimerler, Relaxor Ferroelektirik Polilmerler ve Dielektrik Elastomerler elektronik sınıflandırma altındadır (Shahinpoor, 2008).

2.2.1. Ferroelektrik Polimerler

Ferroelektrik Polimerler, bir elektrik alanı uygulanmasının malzemelerde polarize edilmiş alanları hizaladığı ve bu yönüyle ferrometlere benzediği kabul edilir. Ferroelektrik polimerlerin deformasyonu sürekli elektrik alanı uygulanmadan kalabilir. Ferroelektrik EAP'ler, genellikle 20 ile 80 °C arasında değişen geniş bir sıcaklık aralığında havada, vakumda veya suda kullanılabilirler (Madden vd., 2004). Ferroelektriklerin Polimerlerin en yaygın özelliklerinden birisi yüksek dielektrik geçirgenliğe sahiptirler. Ferroelektrik polimerler, gelişmiş esnek elektronik cihazların temelidir (Zhang vd., 2020). Genel olarak yangın sensörleri, kızılötesi termal kameraları, dizel motorların enjeksiyonları, titreşim sensörleri, ultrason cihazları, sıcaklık düzenleyiciler, elektromanyetik radyasyon alıcıları ve kapasitesi ayarlanabilen kondansatörler gibi cihazlarda kullanılır. Bu polimerler, kalıcı elektriksel polarizasyon sergileyerek, bir elektrik alanına hizalanabilen malzemelerdir. İndüklenmiş polarizasyon bir ters elektrik alanı uygulanarak veya malzemelerinin üzerine sıcaklık uygulanarak çıkarılabilir. Bununla birlikte, hafif, esnek, kolayca oluşturulmuş ve kırılğan olma gibi özelliklere sahiptirler. Ayrıca, ferroelektrik polimerler %10 gerilmeler ve çok yüksek elektromekanik verimine sahiptir (Zhang vd., 1995; Huang vd., 2004).

2.2.2. Polimer Elektretler

Eguchi'nin balmumu elektretleri üzerine yaptığı ilk çalışmada, mikrofonlar, sensörler, transdüserler ve filtreler dâhil olmak üzere, ticari olarak düşük maliyetli polimer elektretlerinin geliştirilmesine giden yolu açtı. Modern polimer elektronlar gözeneklerde bir polarizasyon gazı ile oldukça gözenekli bir polimerden oluşur. Gözenekli filmler 5kV ile 10 kV arasında değişen voltajlarla şarj olur. Gözenekler

içindeki elektriksel boşalmanın, polimer gaz ara yüzündeki yüklerin birikmesine yol açtığı görülmektedir. Metal elektrotlar filmin her iki tarafına da temas edecek şekilde uygulanır. Polimer Elektretler sensörler veya aktüatörler olarak çalıştırılabilirler (Eguchi, 1925; Madden vd., 2004; Bar-Cohen ve Anderson, 2019)

2.2.3. Elektrostriktif Polimerler

Bir elektrik alanı elektrik yalıtkanı bir malzemeye uygulandığında, bu yalıtkan malzemenin şeklinde deforme olabilir veya değişebilir. Bu malzemeler elektrik alanlarına da çok hızlı tepki vermesinden dolayı yüksek hıza sahip kontrol devrelerine ihtiyaç duyulur. Elektrostriktif Polimerler kendiliğinden bir elektrik polarizasyonuna sahiptir. Elektrostriksiyon malzemenin dipol yoğunluğundaki değişiklikten kaynaklanır. Bu polimerler, uygulanan bir elektrik alanı ile hizalanan moleküler veya nanokristal polarizasyonlar içerir. Elektrostriktif malzemeler, malzemeye bir elektrik alanı uygulandığında tepkime hızı 10 milisanyeden azdır. Hızlı tepki vermesinden dolayı elektrolitik malzemeler, hassas aletler gibi ultra hızlı devre tepki süreleri gerektiren mekanik ve elektromekanik cihazlarda kullanılabilirler (Madden vd., 2004; Bar-Cohen ve Anderson, 2019).

2.2.4. Relaxor Ferroelektirik Polilmerler

Relaxor Ferroelektirik Polilmerler, yukarıda açıklanan Ferroelektirik Polimerler ile yakından ilişkilidir. Adından da anlaşılacağı gibi, bu polimerler dielektrik sabiti ve güçlü bir frekans dağılımında geniş bir tepe ile ayırt edilen, gevşeyici ferroelektirikler gibi davranırlar (Madden vd., 2004).

2.2.5. Dielektrik Elastomerler (DE)

Dielektrik elastomerler (DE'ler), bir elektrik alanı tarafından harekete geçirildiğinde büyük gerilmeler meydana getiren akıllı bir malzeme türüdür. Her iki tarafı da uyumlu elektrotlarla kaplanmış esnek yapıya sahip yumuşak bir dielektrik malzemeden oluşurlar. DE'ler, EAP'lar olarak bilinen akıllı bir malzeme grubuna aittir. Bunlar, gerilim uygulandığında şekil değişikliği yaşayan akıllı malzemelerdir. DE'ler sıkıştırılmaz fakat yüksek esnekliğe sahiptirler, böylece yüksek bir gerilme seviyesi elde edilebilir. Silikon ve akrilik malzemeler, dielektrik elastomerin çeşitleridir. DE'ler temelde iki plakalı bir kapasitör gibi davranır. Bir lamine dielektrik elastomer levha, her iki tarafta uyumlu elektrotlarla kaplanmıştır.

Elektrotlar boyunca bir elektrik alanı uygulandığında, elektrodun üzerinde pozitif ve negatif yükler biriktirir. Bu, elektrotlar arasında koulombik çekim kuvvetleri üretir ve Maxwell gerilimi adı verilen mekanik basınç ile sonuçlanır. Elektromekanik yüklerle yüklenen dielektrik elastomer, elektrotları birbirine yaklaştırır, sonuç olarak, sıkıştırılamaz elastomer yanal doğrultularda genişler ve yer değiştirmeye yol açar (Sommer-Larsen vd., 2002; Bar-Cohen ve Anderson, 2019).

DE'ler diğer polimerlerle karşılaştırıldığında birçok avantaja sahip olduğu görülmektedir. Örneğin; Piezoelektrikler yüksek frekans durumunda iyi çalışırken düşük gerilme ve yüksek sertlikleri nedeniyle uygulama alanlarında kullanımı sınırlıdır (Bar-Cohen, 2004; Madden vd., 2004). Diğer taraftan Şekil Hafızalı Alaşımlar (SMA) büyük gerilmeler oluşturabilmekte fakat tepkime süresi geç olmaktadır (Madden vd., 2004). Bunlara karşın DE'ler yapay kas uygulamalarında en uygun aday olarak karşımıza çıkmaktadır. Hafif, yumuşak ve uygun tepki süresi önemli gerilmeler oluşturabilmesi nedeniyle canlı kasına benzer özelliklere sahip akıllı bir materyal olarak dikkat çekmektedir (Bar-Cohen, 2004; Madden vd., 2004; Kim ve Tadokoro, 2007). DE'ler yüksek gerilim altında kısa sürede tepki vermesiyle büyük deformasyonlar oluşturur (Madden vd., 2004; Bar-Cohen, 2004; Kim ve Tadokoro, 2007). İyi performans sağlayan bir aktüatör geliştirmek için ilk başta yapılması gereken iyi bir malzeme seçmektir. DE'nin yüksek gerilim altında kısa sürede tepki vermesi, maliyetlerin düşük olması ve enerji verimliliğin yüksek olması sebebiyle yapay kas uygulamalarında önemli bir yere sahip olduğu görülmektedir (Kim ve Tadokoro, 2007; Chiba vd., 2008; Ashley, 2003; Kornbluh vd., 2008). DE'ler Şekil Hafızalı Bellek Alaşımı (SMA) ve Piezoelektrik malzemeler gibi, aktüatör gelişmeleri için kullanılan aktif malzemelerin çoğunluğu ile karşılaştırıldığında, tipik elektroaktif polimerler aktivasyon sırasında daha fazla deformasyon ve şekil değişikliği meydana getirmektedir. Ayrıca, DE'ler yumuşak olma özelliğinin yanında yüksek sıcaklıgda dayanıklı bir malzemedir (Bar-Cohen, 2004).

Bu malzemeler, uygun elektromekanik etkileri için nispeten yüksek dielektrik sabiti olan yumuşak polimerlerdir. R. Pelrine vd., ilk çalışmalarını yaptıkları DE'lerin, aktüatör ve sensör oluşturmak için kullanılabileceğini bildirdiler (Pelrine vd., 2000). Bir Dielektrik Elastomer Aktüatör (DEA) tipik olarak, uyumlu elektrotlar tarafından

tepkimeye geçer ve sıkıştırılmaz yumuşak bir dielektrik elastomer membrandan oluşur. DEA elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren hafif, esnek ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip aktüatörlerdir. DEA'lar elektriksel olarak indüklenen lineer gerilimi sağlayabilen % 100'ün üzerinde gerinme meydana getiren ve voltajla ayarlanabilen yumuşak elektromekanik bir polimer türüdür (Xiang vd., 2010).

Aynı zamanda DEA'lar, büyük deformasyon kabiliyetine ve hızlı tepkilere sahip olan DEA'lar, yüksek voltaj ile deforme olarak çalışan kapasitörlerdir. Aynı zamanda DEA'lar sensörler veya jeneratörler olarak da geliştirilmeye açıktır. Yüksek voltaja bağlı olarak dielektrik elastomerin zarı üzerinde zıt kutupların elektrik yükleri birikerek zar kalınlığında bir azalma meydana gelir ve zarda bir genişleme oluşur. Bu genişleme sonucunda şekil değişikliği meydana gelerek yapay kas gibi çalışmaya başlar (Pelrine vd., 2000; O'Halloran vd., 2008; Getz ve Shmuel, 2017).

DEA'lar doğada bulunan biyolojik canlıları taklit ederek tıbbi, askeri ve endüstriyel uygulamalarda kullanılan yapay kaslara ilham veren yeni bir teknolojidir. Bu sebepten dolayı DEA'lar elektrik enerjisini hareket enerjisine dönüştürdükleri için geleceğe umut veren bir teknoloji ürünüdür. DEA'lar Tablo 2.2.'de gösterildiği gibi enerji yoğunluğu yüksek, ağırlığı hafif, deformasyonu fazla, maliyeti düşük, yüksek elastikiyete sahip ve canlı kaslarına benzer özellikleri taşımasından dolayı gelecek için umut vermektedir. DEA'lar sadece aktüatör olarak görev yapmasının yanında sensör olarak da kullanılmaktadır (O'Halloran vd., 2008). Elektrik enerjisini hareket enerjisine dönüştüren bu malzemeler biyomedikal alanda robotlar ve protezler için yapay kaslar gibi birçok alanda kullanılmıştır (Brochu ve Pei, 2012).

Tablo 2. 2. DE'lerin doğal kas ve diğer materyallerle karşılaştırılması (Pelrine vd., 2002).

Aktüatör	Gerginlik	Tahrik Basıncı	Yoğunluk	Verimlilik	Hız (Hızlı ve yavaş)
Doğal Kas	***	***	***	***	***
Elektromanyetik	***	***	*	***	*
Piezoelektrik	*	***	**	***	***
Şekil Hafızalı	**	***	**	*	*

Alaşım					
Manyetostiktif	*	***	*	***	*
Elektrostatik	***	*	***	***	***
Dielektirik Elastomer	***	***	***	***	***

*:zayıf , **:orta, ***:iyi

DEA'ların çalışma mekanizması incelendiğinde: DEA'larda yüksek voltajda statik bir yük oluştuğu ve bunun sonucunda Maxwell basıncının etkisi altında kalan elastomer zarında incelme ve zarda düzelemsel bir genişlemeye neden olduğu görülür. Bu tür malzemeler doğal kas ile benzerliğinden dolayı yapay kas olarak kullanılmaya elverişlidir (Pelrine vd., 2000;2002). Bu alışma mekanizmasına enerji veren elektrik enerjisi hareket enerjisine dönüşerek büyük deformasyona neden olur (Liu vd.,2009; Bar-Cohen ve Anderson, 2019). DE'lere etki eden elektromekanik basınç (Maxwell) aşağıdaki denklemdeki gibi hesaplanabilir (Pelrine vd., 2000).

$$p = \epsilon_r \epsilon_0 E^2 = \epsilon_r \epsilon_0 (V/d)^2 \quad (1)$$

Burada ϵ_r dielektrik sabitidir, ϵ_0 boş alan geçirgenliği (8.85×10^{-12} F/m), E elektrik alanı, V voltaj, p maxwell basıncı, t ise dielektrik elastomer kalınlığıdır. Dielektirik Elastomerde düzlem içi uzama ve dikey olarak ise bir büzölme oluşmaktadır. Mekanik olarak sıkışan zar kalınlık yönünden incelemek, zarın düzleminin her yönünde bir genişleme meydana gelmektedir. Hooke'un yasasına dayanan kalınlık gerilimi şu şekilde yazılabilir:

$$s_z = -p/Y = -\epsilon_r \epsilon_0 V^2 / (Y d^2) \quad (2)$$

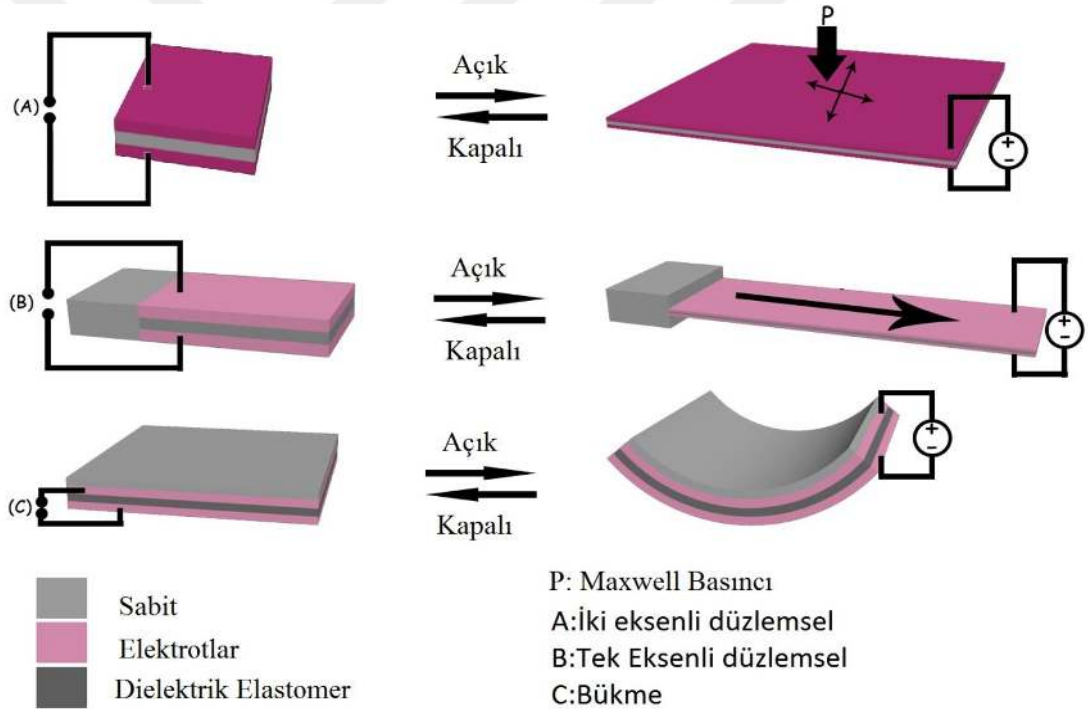
Y , Young modülü ismi verilen polimer elektrotlu kompozit filmin elastikiyet modülü yani malzemenin sertliğini tanımlayan malzeme modülüdür. Young modülü, bir malzemenin uzunlamasına gerilim veya sıkıştırma altındayken uzunluk değişikliklerine dayanma kabiliyetinin bir ölçüsüdür.

Gerilme oranını $\lambda = \epsilon_r \epsilon_0 / Y$ denklemdeki gibi yazılabilir. Bu gerilimin materyal üzerinde etkisi ise $\epsilon_z = -\lambda E^2$ ile tanımlanabilir. Dielektrik Elastomer malzemeler bir kapasitans gibi üzerinde elektrik alanı oluşmaktadır.

Son yıllardaki araştırmalarda DEA'larda, silikon ve akrilik polimerlerin kullanıldığı çalışmalar gerçekleştirilmiştir (O'Halloran vd., 2008). Pelrine ve arkadaşları yapmış

oldukları çalışmada yüksek bir dielektrik sabiti olan, düşük elastik modül ve bozulmaya dayanıklı malzemeler üzerinde çalışmaya odaklanmaktadır. Bu tür polimerleri belirledikten sonra birtakım testler ile meydana getirdikleri gerilmeleri hesapladılar. Yapılan çalışmaların sonucunda ise kullanılan polimerlerin ön-gerilmesi çalışma performansını önemli ölçüde arttığını gözlemlenmektedir (Peline vd., 2000).

Şekil 2.4. 'de görüldüğü gibi elastomer bir filmin her iki tarafına elektrotlar kaplanmıştır. Aktüatör bir devreye bağlandığında gerilim uygulanarak elektrostatik basınç meydana gelmektedir. Bu basınçla elastomer malzemenin kalınlığında bir inceltme ve yüzeyinde bir genişleme meydana gelirken elastomere uygulanacak sabitler ile tepkimenin yön değişimi görülmektedir.



Şekil 2. 4. DEA'ların çalışma mekanizması.

Bir DEA'da deformasyonu etkileyen ön-germe, gerilim, uygulanan elektriksel sinyal tipi ve frekans gibi etmenler bulunmaktadır. DEA'da farklı elektriksel sinyaller ve frekans boyutu değiştikçe deformasyon oranı da önemli ölçüde değişmektedir. Elektriksel sinyal uygulanan (kare, sinüs ve üçgen) DEA yüzeyinde sıcaklık değişimleri irdelenmiş olup, kare dalga formunda en yüksek deformasyon gerçekleşmesi sebebiyle DEA yüzeyinde oluşan sıcaklık değeri daha yüksek

gerçekleşmiştir. Ayrıca ön-germe oranı ve ortam sıcaklığı da DEA yüzeyinde meydana gelen sıcaklığı doğrudan etkilemektedir. Dairesel bir DEA'nın orta kısmına bir ağırlık asılarak konum değişimi incelenmiştir. Bu deneylerde farklı elektriksel sinyaller(doğrusal, kare, sinüs ve üçgen) uygulanarak konumunda meydana gelen yer değişim oranlarının farklı olduğu tespit edilmiştir. Doğrusal bir gerilim uygulanan DEA anlık tepkime gösterirken farklı frekanslar uygulandığında konum-zaman oranları da farklılık göstermektedir.

Bu tezde bir DEA'da meydana gelen deformasyonun farklı frekanslarda nasıl tepki verdiği üzerine sayısal analizler, yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimleri, merkezine bağlanan bir ağırlığın konum değişimi ve simülasyonları gerçekleştirilmiştir.

2.3. Tezin Motivasyonu

DE'ler mekanik performans olarak doğal kaslara bezememektedir. DEA'ların; yüksek enerji yoğunluğu, hızlı harekete geçme özelliği ve verimli elektromekanik dönüştürücü gibi özelliklere sahiptir. DE'lerin yumuşak robotik alanında kullanılan birçok uygulama alanı önerilmiştir (Ashley, 2003). DEA'lar robotik, biyomimetik ve cerrahi uygulamalar gibi alanların ilgisini çekmektedir. DEA'ların hafif ve esnek özelliği ile geleneksel motorlara kıyasla daha hassas uygulamalar için önem arz etmektedir.

DEA'lara yüksek gerilim uygulandığında, DEA'da oluşan elektrik enerjisi mekanik enerjiye dönüşerek bir deformasyon meydana gelir. Bu tepkimeyi etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. DEA'yı etkileyen faktörlerin başında uygulanan elektrik gerilimi vardır. Ayrıca DEA'ya ön-germe, elektriksel sinyaller, frekans boyutu, dielektrik direnci gibi etmenler bulunmaktadır.

Bu tezde DEA'ların yüksek verimliliğinden faydalanarak farklı elektriksel sinyallerin ve frekansların DEA'ya sıcaklık ve konum değişimi üzerine etkisi literatürde rastlanılmamıştır. İlk olarak DEA'nın Maxwell basıncına tepkisinde oluşan gerilme ve ön-germenin etkisi üzerine sayısal analizleri gerçekleştirdikten sonra DEA da farklı elektrik sinyalleri ve frekansların DEA'nın yüzeyinde meydana getirdiği

sıcaklığı incelenmesi düşünülmektedir. Son olarak dairesel bir DEA'nın merkezine ağırlık eklendikten sonra konum değişim analizleri yapılması planlanmaktadır.

2.4. Tezin Amacı ve Katkıları

Bu tezin amacı; DEA'ların robotik, biyomimetik, askeri ve cerrahi uyuglama gibi alanlarda daha etkin kullanılabilmesi için uygun elektriksel sinyal tipi ve frekans aralığını belirlemesinde yardımcı olmak. Ayrıca DEA'nın tepkimesini etkileyen ön-germe, ortam sıcaklığı gibi etmenlerin hangi koşullarda daha iyi sonuç verdiğini göstermek. Bahsedilen amaçların gerçekleştirilmesi için başlıca katkıları şu şekilde ifade edilebilir:

- ✓ DEA'nın sıcaklık karakterizasyonu ve konum değişimini incelemek için bir DEA tasarımı gerçekleştirmek.
- ✓ DEA'nın Maxwell basıncı ve farklı DE'lerin ön-germe tepkimelerinin sayısal analizlerini incelemek.
- ✓ DEA yüzey sıcaklık karakterizasyonu üzerine deneyler yapmak.
- ✓ DEA konum değişimi üzerine deney ve bu deneylere bağlı simülasyonların gerçekleştirilmesini sağlamak.
- ✓ DEA'nın sayısal analiz, sıcaklık karakterizasyonu ve konum değişimi üzerine değerlendirmeleri oluşturmak.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Deney Malzemeleri

Dielektrik Elastomerler

Dielektrik malzemesi serbest elektronu bulunmayan ve en yakın atomla bağlı olan bir malzemedir. DE'ler yaygın olarak kullanılan ve ticari olarak üretilen malzemeler BJB Enterprises TC-5005, 3M VHB-4910, 3M VHB-4905 ve NuSilTechnology'nin CF19-2186 olarak bilinmektedir. Dielektrik elastomerler, hafif, yüksek esneklik ve makul tepki süresine sahip aktüatörler olarak kullanmak için uygun malzeme adayıdır. VHB-4910 (Bkz. Şekil 3.1.) akrilik polimerler, silikon polimerlerden daha yüksek viskoelastik özellikler ve daha yüksek kaçak akımlar gösterdiği belirtilmiştir (Barnes vd., 2007).

Son yıllarda çok sayıda elastomerik malzeme test edilmiştir. Yaygın olarak kullanılan Poliüratanlar(PU), akrilikler ve silikonlar olmak üzere dielektrik elastomerleri 3 gruba ayırabiliriz.

- ✓ PU'lar yüksek dielektrik sabitine ve büyük güç çıkışına sahiptirler. Bu nedenle düşük elektrik alanlarında çalışırlar.
- ✓ Akrilik elastomerler ticari olarak kolay temin edilebilir (3M VHB4910, 3M VHB4905) ve %380 üzerinde deformasyon elde edilebilir (Pelrine vd.,1998; Pelrine vd., 2000).
- ✓ Silikon elastomerler, PU'lara göre daha büyük, akriliklere göre daha küçük gerilme gösterirler. Daha yüksek frekanslarda çalışırlar (Brochu ve Pei, 2012).

Uygulamalarda yaygın olarak kullanılan dielektrik malzemelerden biri akrilik, diğeri ise silikon elastomerlerdir. Bu malzemelerin birbirlerine göre farklı avantaj ve dezavantajları vardır. Akrilik elastomerler, silikon elastomere göre daha fazla deformasyon üretebilir ve yüksek dielektrik sabitlerine sahiptir. Silikon elastomerler ise yüksek elektromekanik tepki hızına, yüksek çalışma sıcaklığına ve yüksek enerji verimliliğine sahiptir (Kornbluh vd., 2002). Silikon malzemeler, uygulama kolaylığı nedeniyle katı haldeki akrilik malzemelere göre daha geniş bir uygulama alanına sahiptir.

Elektrotlar

Yapılan deneylerde, uyumlu elektrotlar için iletken karbon gresi (Premium Carbon Conductive Grease) seçilmiştir. Genel olarak, karbon bazlı tozlar (tek başına veya yağ veya gres içinde süspansiyon halinde) DEA'lar için çok uyumlu elektrot adaylarıdır. Büyük gerilmeler mükemmel uyum ve tolerans sağlarken olağanüstü elektrik iletkenliğine sahiptirler.

- ✓ Karbon tozu, Karbon gresi ile karşılaştırıldığında taşıma kolaylığı, özellikle harekete geçirme sırasında daha iyi paketleme (sızma) ve düzgün alan kaplaması. Grafit, pul benzeri yapıya sahip tozun özellikle aktivasyon üzerine süreksiz elektrot oluşturduğunu ve dolayısıyla performansı sınırlandırdığı görülmektedir (Bkz. Şekil 3.1.).

- ✓ Karbon gresi (Karbon iletken gres, MG Chemicals Inc., ABD) uygulamadan sonra viskoz olmaya eğilimlidir; bu da, lekelenmeye ve kısa devrelere eğilimli olmasını sağlar.
- ✓ Çok katmanlı yapının üretimi sırasında karbon gresi sıkılır. Ayrıca, viskoz formda kaldığı için, kayması, kolaylığı, aralarında elektrotlar ile başka bir tabaka üzerine yapıştırılmış bir VHB bandının arka kâğıdının soyulmasının zorluğunu artırır.

Elektriksel iletimi sağlamak için grafit tozu, karbon tozu veya karbon gresi gibi malzemeler çok iyi bir iletken olduklarından dolayı tercih edilmektedir.

Güçlendiriciler

Bu çalışmada Şekil 3.1.de gösterilen 3M Scotch Magic bantlar (~ 56 mikron kalınlığında) seçilmiştir. Güçlendiricilerin kullanılmasının amacı, harekete geçme sırasında genişlemeyecek, ancak bükülebilecek bir aktif olmayan tabaka oluşturmaktır. Böylece, bükülmeye izin veren, ancak genişlemeye izin vermeyen bir ara sertlik ve ince bölümler, malzeme seçiminin ana ve gerekli kriterleri olmalıdır. 3M Magic skotch bantlar sadece gerekliliği yerine getirmekle kalmaz, aynı zamanda imalat ve demonstrasyon prototipleme için mükemmel olan bantlar çok iyi



(a)



(b)



(c)

kullanılabilirliğe sahiptir.

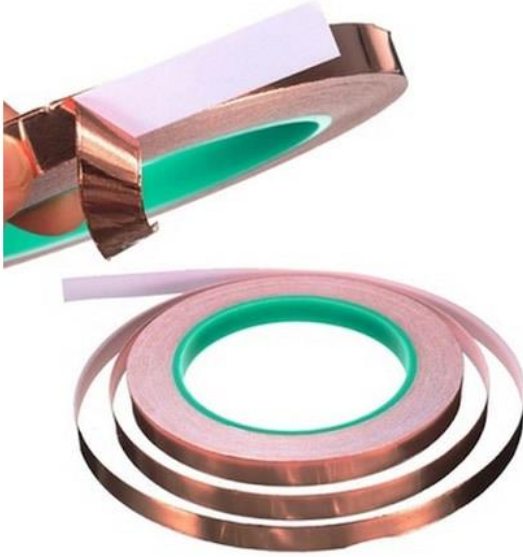
Şekil 3. 1. (a) 3M Magic skotch bant, (b)3M HVB bant, (c)İletken karbon gresi.

Diğer Deney Gereçleri

DEA'nın her iki yüzeyinde iletkenliği sağlamak için iletken karbon gresi fırçalanarak uygulanmıştır. Karbon gresini yüksek gerilime bağlamak için yapışkan

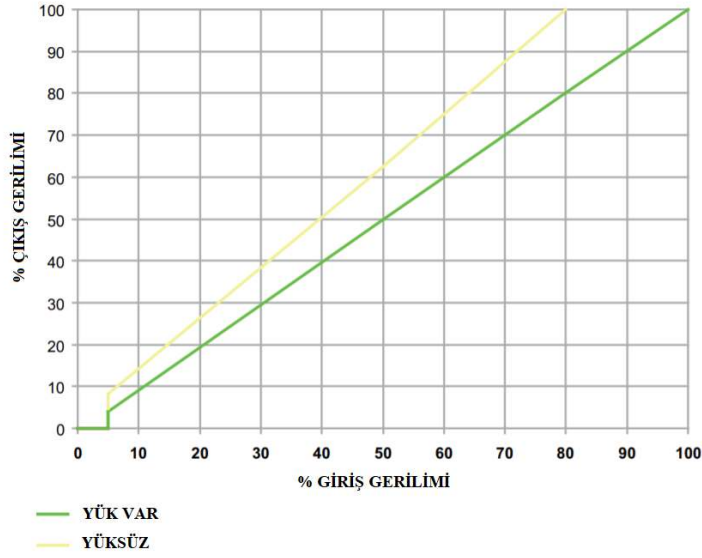
bakır bantlar kullanılmıştır (Bkz. Şekil 3. 2.). DEA yüzey sıcaklık ölçümlerinde - 20~300 °C arasında ölçüm yapabilen 0.07 °C hassasiyete sahip kızılötesi bir termal kamera (Bkz. Şekil 3.5.), 0~5 volt arası giriş gerilime sahip ve 8 kV üretebilen Dc-Dc dönüştürücü (Bkz. Şekil 3.3.) ve 0,12Hz~2MHz frekans aralığında kare, üçgen, sinüs dalga formlarına sahip bir sinyal jeneratörü deneylerde kullanılmıştır (Bkz. Şekil 3.4.).

Bakır bantlar, akrilik yapışkanlık özelliğine sahiptir. Bakır bantların elektrik iletkenliğini sağlayan bakır folyo taşıyıcıları bulunmaktadır. Bu bantlar ince ve esnek bir yapıya sahiptir. Yapışma özelliği ile DE'lerde kolay kullanım olanağı sunmaktadır. Başta elektrik ve elektronik alanlar olmak üzere sanayi, otomobil, savunma sanayi ve inşaat sektörlerinde kullanılmaktadır.



Şekil 3. 2. İletken bakır bant.

Dc-Dc dönüştürücüler minyatürize edilerek uygulamalarda kullanım kolaylığı sağlamaktadır. Bu dönüştürücüler 0 ile 5V arası gerilim uygulanarak çıkışta 8kV'ya kadar gerilim elde edilebilmektedir. Giriş geriliminin düşük olması sebebiyle harici bir pil yardımıyla da çalıştırılabilmektedir.



Şekil 3. 3. Dc-Dc yüksek gerilim dönüştürücü ve giriş-çıkış gerilim eğrisi (Kaynak: <https://www.xppower.com>).

Yapılan deneysel uygulamalarda, 3 farklı dalga formu üreten (sinüs, kare ve üçgen) sinyal jeneratörü DE'nin sıcaklık ve konum analizlerinde kullanılmıştır. 0.2 Hz ile 2 MHz arası çıkış sinyali üretebilen VC2002 (Bkz. Şekil 3.4.) fonksiyonel bir sinjal jeneratörüdür.



Şekil 3. 4. Sinyal jeneratörü.

DEA'nın yüzey sıcaklık ölçümlerinde 0.02 hassasiyete sahip Hti-04 termal kızılötesi kamera kullanılmıştır. Bu kamera yardımıyla hassas ölçüm işlemlerinde resimler kaydedilip dijital ortama kolay bir şekilde aktarılabilir.

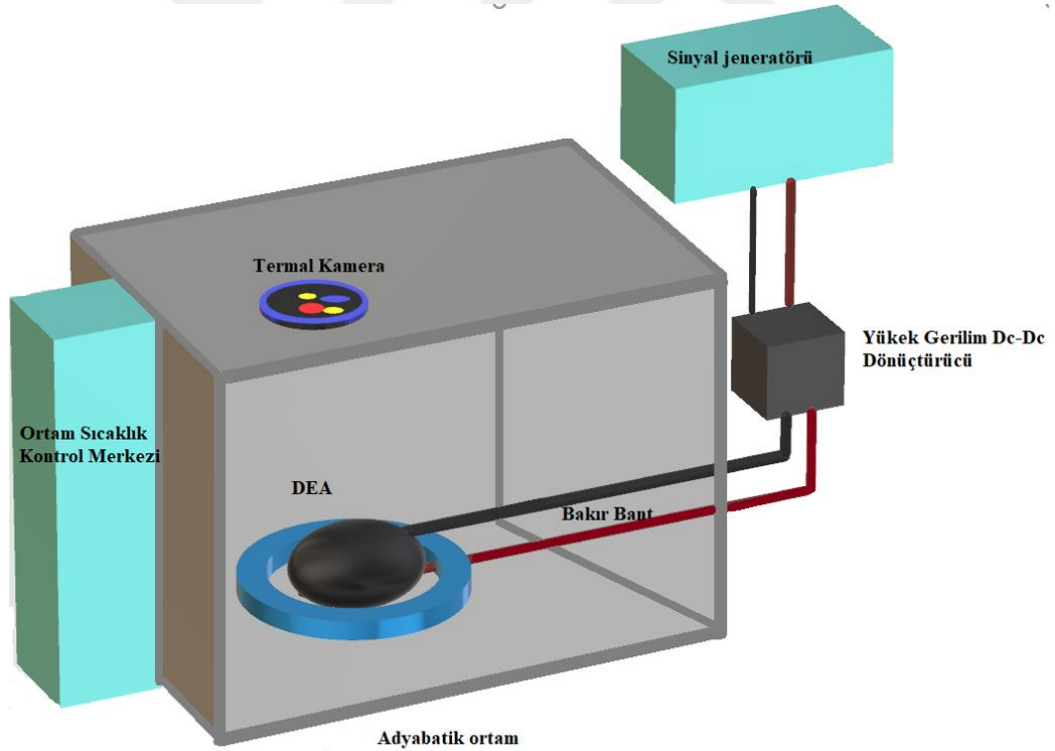


Şekil 3. 5. H-ti Termal kamera (Kaynak: <https://hti-instrument.com/>).

3.2. Deney Düzenekleri

3.2.1. DEA Yüzey Sıcaklık Ölçümünde Kullanılan Deney Düzeneği

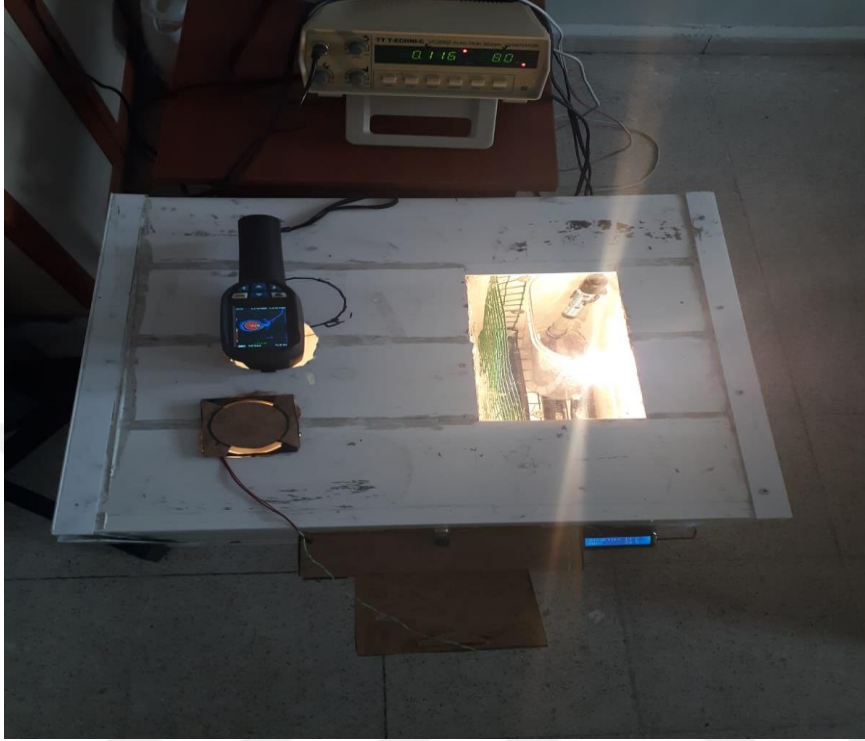
Adyabatik bir ortam Şekil 3.6. ve Şekil 3.7’de gösterildiği gibi hazırlanarak deneyler yapılmıştır. Sinyal üretici ile farklı frekanslarda kare, sinüs ve üçgen dalga formları kullanılarak dc-dc dönüştürücü(Emco Q80-5) yardımıyla 0 ila 5 volt uygulanarak 0~8 kV voltaj elde edilir. Elde edilen voltaj yardımıyla ön-geme uygulanan dielektrik elastomer, her iki yüzeyine de karbon gresi, fırça yardımıyla sürülerek uygulanır ve daha sonra yapışkan bakır bantlar kullanılarak dönüştürücüye bağlanır. Deneyde 0,12Hz~2MHz frekans aralığında kare, üçgen ve sinüs dalga formlarına sahip bir sinyal üretici (TT T-ECHNIC-C VC2002) ve (-20~300 °C) arasında ölçüm yapabilen, 0.07 °C hassasiyette kızılötesi termal görüntüleyici (HTI-04) kullanılmıştır. Termal kamera yardımı ile DEA'nın yüzey sıcaklığında meydana gelen sıcaklık değişimleri ile ölçülmüş ve anlık olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3. 6. DEA yüzey sıcaklık ölçümü deney düzeneği şeması.

Şekil 3.7’de gösterilen deney düzeneği DEA’nın dış ortamdan etkilenmemesi için sabit ortam sıcaklığı ve nem ortamında deneylerin sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği sıcaklık nem sensörleri ile ölçülmüş ve DEA

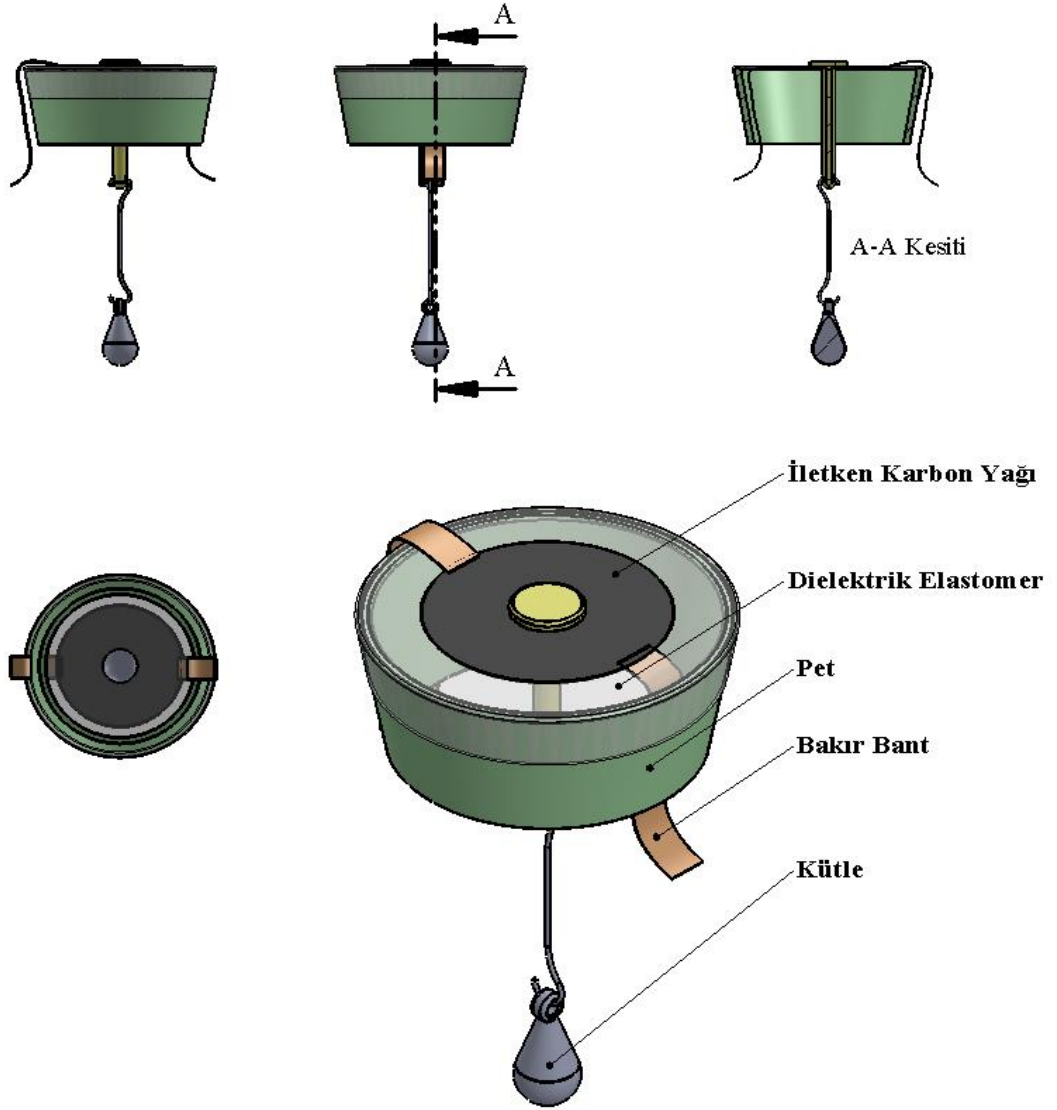
yüzey sıcaklıklarında meydana gelen değişimler daha hassas ölçülmesi düşünülmüştür.



Şekil 3. 7. DEA yüzey sıcaklık ölçümü deney düzeneği.

3.2.2. DEA Konum Deney Düzeneği

DEA'nın değişen frekans ve voltaj altındaki konumunu gösteren deneysel bir platform üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.8.'de görüldüğü gibi, DEA'nın merkezine 46.22 g'lık bir kütle bağlanmıştır. Ağırlık takıldığında, statik çökme 2 mm gerçekleşmiştir. 3.5 cm çapında bir DEA, ön gerdirme ile 7 cm çapa yükseltilmiştir. Merkezde 1.5 cm çapında delikli ped kullanılmıştır. Elektrot olarak kullanılmak üzere elastomer üzerine 3 cm çapında karbon gresi fırça ile sürülmüştür. Elastomerin her iki tarafına da karbon gres uygulandıktan sonra bakır yapışkan bantlar ile Dc-Dc dönüştürücüye bağlanarak devre tamamlandı. Gerilimi ölçmek için paralel bağlanmış 10 adet direnç (10Mohm) ve gerilim değeri voltmetre ile ölçülerek DEA'ya uygulanmıştır. DEA üzerindeki konum değişim oranı, kronometre ve kamera senkronize edilerek videolar elde edilmiştir. Videolar incelenerek zamana bağlı konum değişiklikleri gözlemlenmiş ve elde edilen değerler bilgisayar ortamına aktarılmıştır.



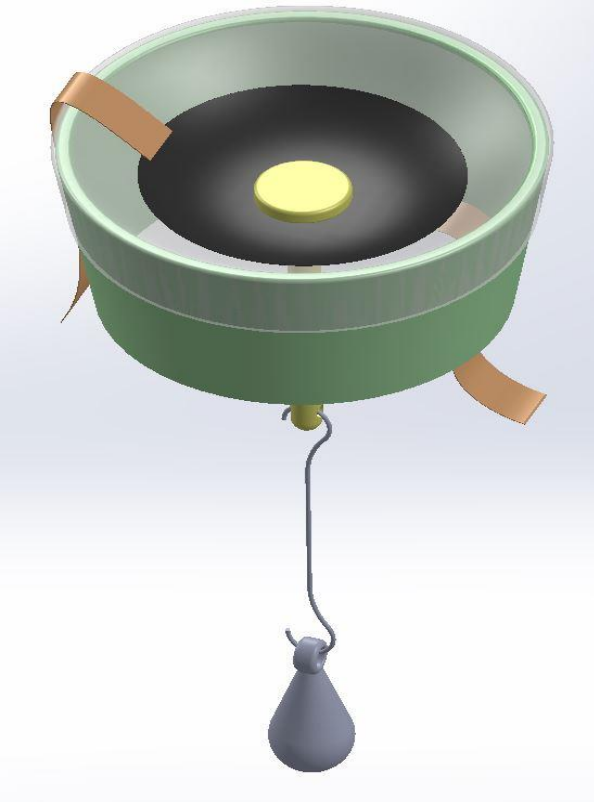
Şekil 3. 8. Dairesel bir DEA tasarım aşamaları.

Dairesel bir DEA Şekil 3.9’da gösterildiği gibi hazırlanmıştır. Dairesel bir PET üzerine ön-germe uygulanarak sarılan DEA’nın orta merkez noktasına güçlendirici bir bant yerleştirilmiştir. Bu bant sayesinde DE’nin bozulmasını önlenmiş ve kısa devre olarak çalışması engellenmiştir.



Şekil 3.9. Dairesel bir DEA'nın tasarımı.

Merkeze bağlanan bir ağırlık ile (Bkz. Şekil 3.10.) statik bir çökme meydana gelmiştir.



Şekil 3.10. Dairesel DEA'nın yük bağlandığında meydana gelen değişim.

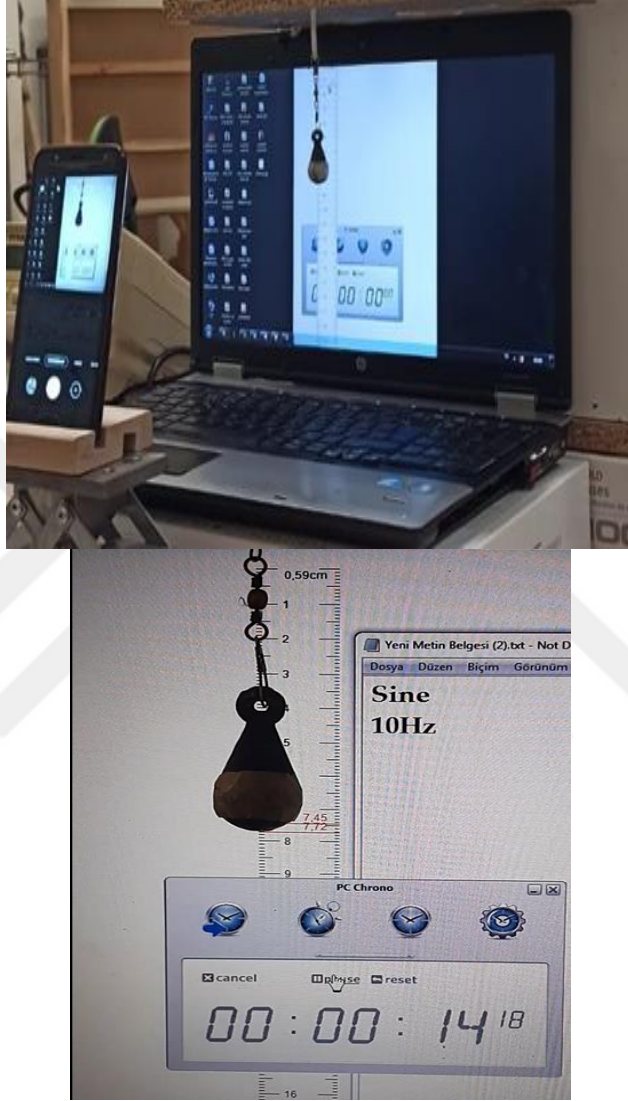
Esnek bir yapıya sahip olan DE'de meydana gelen bu çökme gerilim ve frekans uygulandığında (Bkz. Şekil 3.11.) artmaktadır.



Şekil 3.11. Dairesel bir DEA’ya gerilim uygulandığında meydana gelen değişim.

Ayrıca Dairesel DEA’nın farklı elektriksel sinyaller ve frekanslarda tepkimeleri incelenirken video kayıt ile anlık veriler alınarak Şekil 3.12’de gösterildiği gibi incelenmiştir. Verileri elde etmek amacıyla, kalibre edilen cetvel, süreölçer ve

kamera kayıtları digital ortama aktarılmıştır. Elde edilen görüntüler ile deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca Dairesel DEA'yı simülasyon ortamında aynı koşullarda test edilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.12. DEA konum değişimi deney düzeneği.

3.3. Yöntem

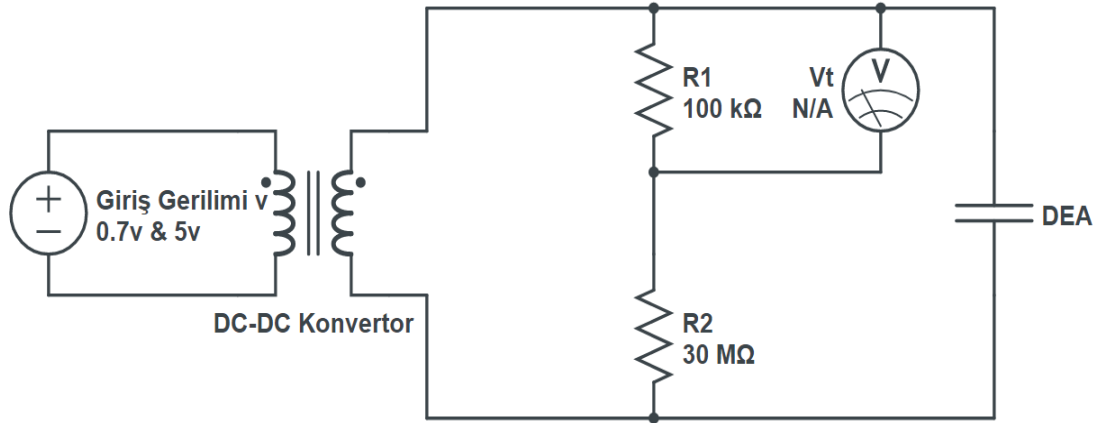
DEA'lar kuvvet, şekil değiştirme (yer değiştirme) açısından canlıların doğal kaslarına benzeyen bir tür yumuşak hareket üretilebilen malzemelerdir. DEA'lar yüksek voltaj ile deformasyon üretebilen, düşük maliyetli ve hızlı tepki vermesi gibi nedenlerden dolayı ilgi çekmektedir. Yapay kas olarak karşımıza çıkan DEA'lar; kuvvet, yoğunluk ve gerilme bakımından canlı kaslarına birçok yönden benzerlik göstermektedir. DEA'lar deformasyon ve mekanik yükleme uygulandığı zaman

kapasitif yapısından dolayı bir değişiklik meydana gelir ve bu nedenle sensör haline gelebilir. İki elektrot arasındaki karşıt yükler arasında ortaya çıkan elektrostatik kuvvet, zarı kalınlık yönünden sıkıştırarak zarın düzlemsel alanda genişlemesi ve eş zamanlı bir gerilme (Maxwell basıncı) meydana getirmektedir. Bu sayede elektrik enerjisi mekanik enerjiye dönüşmüş olur (Pelrine vd., 2000).

Bir dielektrik elastomer aktüatörün çalışma sistemi karşılıklı iki uyumlu elektrot ile kaplanan malzemenin yüksek bir Dc voltaj güç kaynağı ile elektriksel olarak yüklenir. Oluřan bu elektrik yükü ise DEA'nın elektrostatik bir şekilde deforme olması ile meydana gelmektedir. Dielektrik elastomer aktüatörler güçlü bir elektrik alanı meydana gelmektedir aynı zamanda bu malzemeleri etkinleştirmek için yüksek voltajlara ihtiyaç vardır. DEA'ların çalışma gerilimi yüksek olmasına rağmen (1-10 kV), çok az çalışma gücüne yol ačan akım değeri birkaç miliamperden daha düşüktür. Harekete geçirme gerinimi yüksek olan DEA'lar, % 100' den fazla deformasyon meydana getirmektedir (Pelrine vd.,2000).

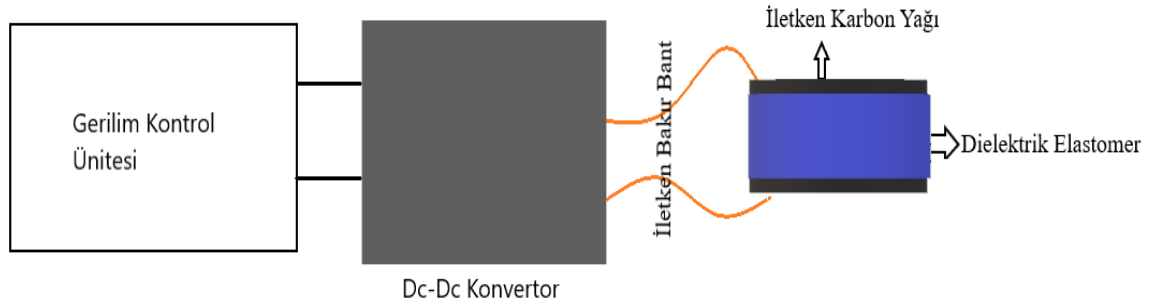
DE'ler yüksek gerilimde çalışan aktüatörler olması sebebiyle DEA'ların yüksek iç direnci ve piyasada bulunan multimetrelerin volt ölçüm sınırı istenilen düzeyde olmaması nedeniyle Şekil 3.13.'deki devre kullanılarak DEA üzerine düşen voltaj ölçülmüştür.

Dirençlere paralel bağlanan DEA eşit gerilimlere bölünmektedir. Bu sayede r_1 direncinin r_2 direncine oranla çok düşük olması sebebiyle r_1 direnci üzerine daha az gerilim meydana gelirken standart bir multimetre yardımıyla paralel bağlanan bir DEA'nın gerilim hesaplanabilmektedir. $V_{dea}=(r_2+r_1)*V$ olarak DEA üzerine düşen vgerilim hesaplanmaktadır. Burada r_1 - r_2 direnç, V gerilimdir, 100K üzerine düşen gerilim toplam dirençlerin çarpılması ile toplam gerilim(V_{dea}) ile bulunur.



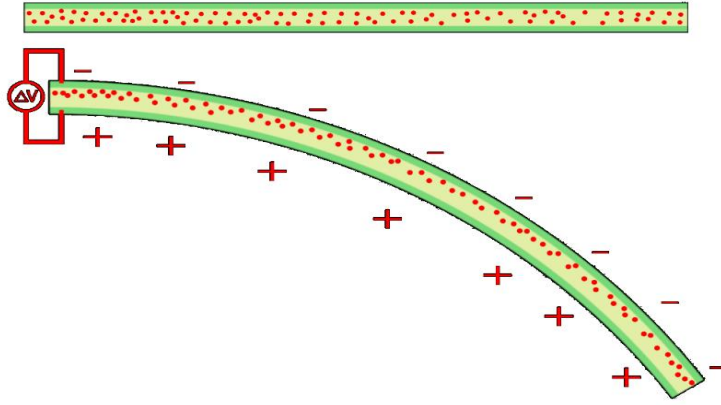
Şekil 3. 13. DEA gerilim ölçüm devresi.

DEA'ları kontrol edebilmek için yüksek bir Dc voltaja ve düşük bir akıma ihtiyaç olduğu gibi Şekil 3.14. 'de gösterildiği gibi bağlanarak bir kontrol ünitesine ihtiyaç vardır. Bu sayede aktüatörün ne sıklıkla ve ne kadar bir elektrostatik basınç elde edilmesi gerekeceği belirlenir.



Şekil 3. 14. DEA çalışma sistemine ait blok şeması.

İlk olarak, bir dielektrik elastomerde elektrotların, film kalınlığı azaldıkça birbirine yaklaşımaya ek olarak alanda genişleme oluşur. Birbirine yaklaştıkça, karşıt yükler birbirine yaklaşarak elektriği mekanik enerjiye dönüştürür (Pelrine vd., 2000). DEA'lar bir devreye bağlandığı zaman Şekil 3.15.'de görüldüğü gibi elastomer içindeki elektronlar dağınık halde bulunurken yüksek voltajın artı ucuna doğru bükülme veya genişleme meydana gelir.



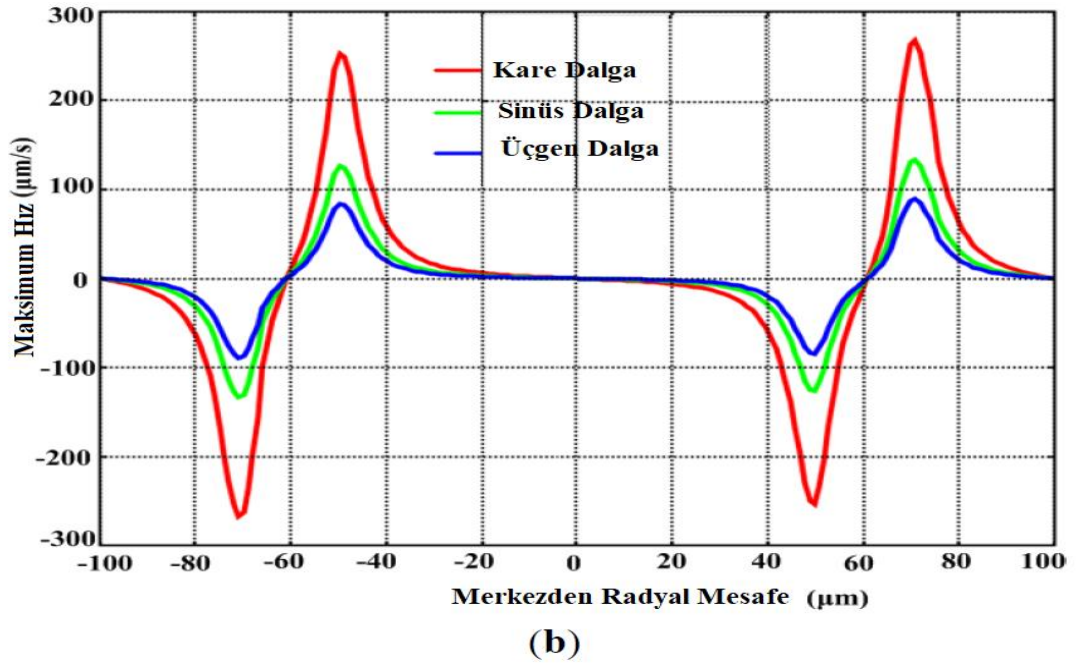
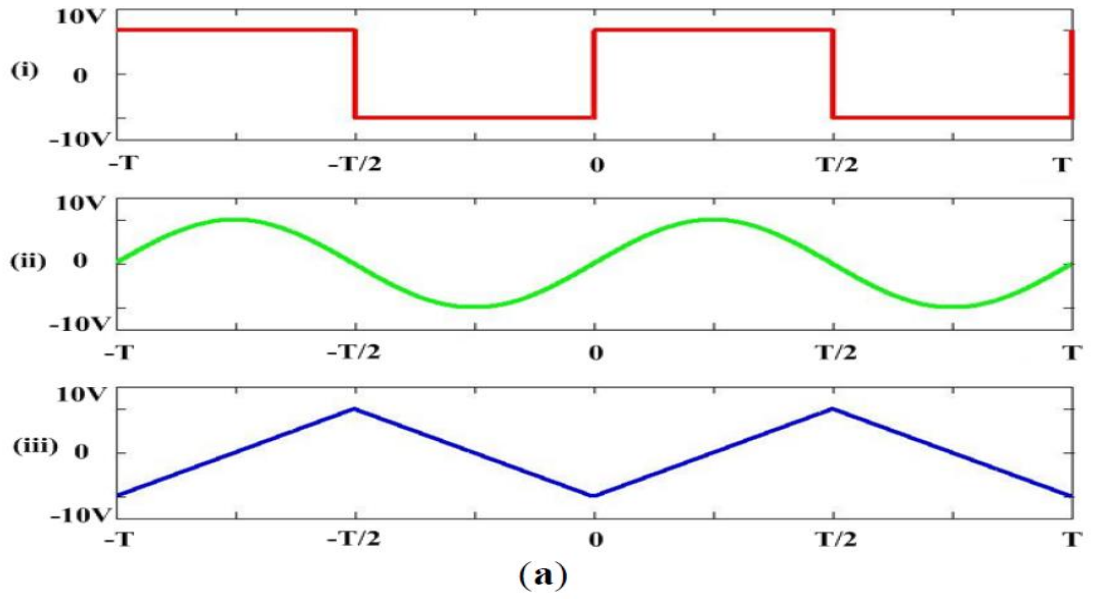
Şekil 3. 15. Dielektrik elastomer aktuatörün gerilim altında iyon hareketi.

Ayrıca deneylerde DEA'ya farklı frekanslar uygulanmıştır. Uygulanan bu frekanslarda elde edilen sonuçlar farklılık göstermektedir. Frekansların gerilim ve herz düzeyleri değiştikçe oluşturdukları güç ve enerjide değişmektedir. RMS bir dizi sayının karesinin ortalaması ve kareleri toplamının ortalamasının köküdür. RMS ikinci dereceden ortalama olarakda bilinmektedir. RMS gerilim hesaplayıcısı, tepe voltajdan, tepeden tepeye voltajdan veya ortalama voltajdan RMS voltaj değeri hesaplanır. Herhangi bir periyodik sinyalin RMS değeri;

$$U^2 = \frac{1}{f} \int_0^f u^2 dt \quad (3)$$

Burada U periyodik sinyali gösterirken, f frekansı göstermektedir. Tepeden-tepeye 20V, 30kHz uygulandığında kare dalga formu sinüs dalga formuna göre iki kat fazla kuvvet üretebilmektedir (Bkz. Şekil 3.16.). Bu sayısal sonuçlara göre; $V_{kare} : V_{sinüs} : V_{üçgen} = 6 : 3 : 2$ olarak görülmektedir (Liang vd., 2012).

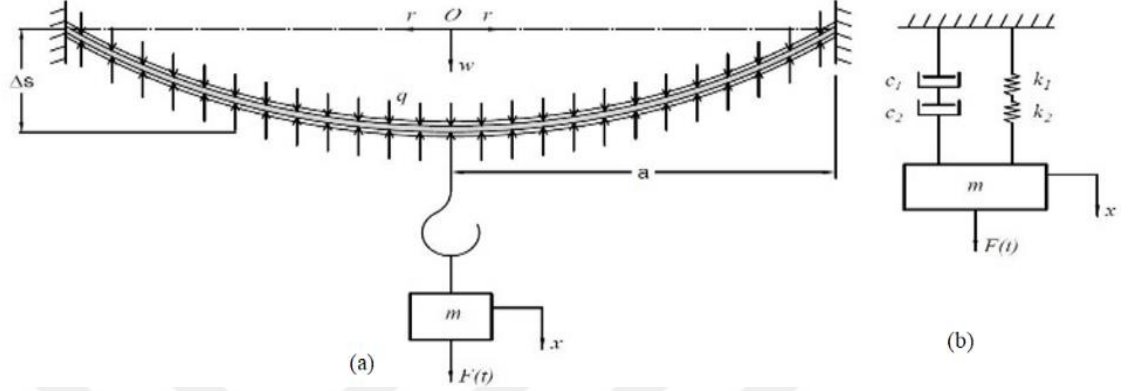
DEA'ya uygulanan farklı elektriksel sinyaller uygulanmıştır. DEA'ya uygulan bu elektriksel sinyallerin güç hesabı efektif gerilim ile yapılır. Sinüs dalga formunda $V_e = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot V$ ile etkin(rms) değeridir. Yani sinüs rms değeri = 0.707 x Tepe değeri, kare dalga rms değeri = Tepe değeri üçgen ise değeri = 0.577 x Tepe değeri olarak hesaplanabilir.



Şekil 3. 16. (a) (i) kare dalga, (ii) sinüs dalgası ve (iii) üçgen dalga, (b) Kare, sinüs ve üçgen dalga formlarının maksimum hız sayısal sonuçları (Liang vd., 2012).

DEA kalınlığındaki ve karbon gres alanındaki değişiklikler elektrik alanını ve dolayısıyla Maxwell stresini etkiler. Bozucu giriş ölçülemediğinden, ölçüm işlemi sırasında gerilim kaynağı ve ekipmanın istenen geriliminin sabit olduğu varsayılmıştır. Bu durumda sistem serbest salınım hareketi yapar. İkinci aşamada sistem kare, üçgen ve sinüs gibi farklı elektriksel sinyallerle sürülmüştür. Bu durumda birinci durumda belirtilen istenmeyen dalgalanmaların yanı sıra sistemin hareketi AC sinyalleri ile belirlenmiştir. Bu durumda sistem harmonik hareket yapar.

Yıkıcı girdi ölçülemediğinden, sistem statik koşullardan ziyade dinamik koşullar altında olmuştur. Ayrıca işlem sırasında gerilim kaynağı ve ekipmanın istenen geriliminin sabit olduğu varsayılmıştır. DEA sisteminin matematiksel gösterimi Şekil 3.17’de gösterilmektedir.



Şekil 3.17. DEA'nın matematiksel modeli. (a) makara sistemi, (b) eşdeğer sistem.

Burada Δ_s ve q sırasıyla statik bir yer değiştirmeyi ve düzgün dağılmış bir yükü temsil eder. Ayrıca, k_1 ve k_2 eşdeğer sertliklerdir ve c_1 ve c_2 eşdeğer sönüm katsayılarını gösterir. Kancadaki esneme elastomere göre ihmal edilebilir olduğundan c_2 ve k_2 parametrelerinin sistem üzerindeki etkileri ihmal edilerek $x=w$ ve $k_{eq}=k_1$, $c_{eq}=c_1$ olduğu yazılabilir. Buna dayanarak, sistemin hareket denklemi aşağıdaki ifade ile ayrık biçimde tanımlanabilir.

$$m_{eq}\ddot{x} + c_{eq}\dot{x} + k_{eq} = F(t)$$

Denklemdaki $F(t)$ 3 denklem seti ile aşağıdaki gibi belirlenebilir:

$$F(t)$$

$$= \begin{cases} S_g(t) \left(\frac{\epsilon_r \epsilon_0}{d^2(t)} \right) V^2(t) & \text{sabit voltaj için} \\ S_g(t) \left(\frac{\epsilon_r \epsilon_0}{d^2(t)} \right) \left[\sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right]^2 & \text{sinüs dalga formu için} \\ S_g(t) \left(\frac{\epsilon_r \epsilon_0}{d^2(t)} \right) \left[\sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right]^2 & \text{kare dalga formu için} \\ S_g(t) \left(\frac{\epsilon_r \epsilon_0}{d^2(t)} \right) \left[a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right]^2 & \text{üçgen dalga formu için} \end{cases} \quad (4)$$

Sabit gerilime maruz kalan sistem serbest titreşim koşulunda, AC sinyalleriyle uyarılan sistem ise harmonik zorlamalı titreşim koşulundadır. V , $V_{(t)}$ elektrik voltajı

fonksiyonunun genliği, DEA yüzeyindeki S_g etkin alanın karesi, sinyallerin T periyodu ve a_0 , a_n , b_n , Tablo 3.1’de belgelenen Fourier katsayılarıdır.

Tablo 3.1. Elektrik sinyallerinin Fourier katsayıları.

Frekanslar	a_0	a_n	b_n
Üçgen	$\frac{V}{2}$	$\frac{-4V}{n^2\pi^2}$	
Kare			$\frac{-3}{n\pi} [\cos(n\pi) - 1]$
Sinüs	$\frac{2V}{\pi}$	$\frac{2V}{\pi(1 - n^2)}$	$b_1 = \frac{V}{2}$

4. BULGULAR

4.1. Sayısal Analiz

Yapay kas olarak kullanılan bir DEA’da hesaplama yöntemleri kullanılarak bilgisayar ortamında sayısal analiz gerçekleştirilmiştir. Sayısal analiz sonuçları, deneylerde yapılan uygulamalarda elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. DEA’nın sayısal analizi MATLAB 2016 student ve Labview Home and Students programlarında gerçekleştirilmiştir.

DE’ler olarak bilinen 3M VHB4910 ve 3M VHB4905 malzemelerinin uygulama alanları, yöntemleri ve özellikleri ile yapay kas aktüatörlerinde analizi incelenmiştir. Çalışmamız, düzlemsel bir aktüatör modellemek ve elektrotlara yüksek Dc gerilimler uygulandığında Maxwell basıncı, uzama miktarı, kalınlık miktarı ve ön-germenin uzamaya etkisi analiz etmektir.

Bu uygulamada karşılaşılan en zor görevlerden biri de DEA’ya 1kV ile 10kV arasında değişen yüksek gerilim beslemesidir. Ancak, bu yüksek voltajın DEA'lara uygulanması, düşük akımlarda çalışabilmeleri nedeniyle herhangi bir güvenlik endişesi oluşturmaz. DEA'nın hem ön-germe hem de gerilim, malzemenin özelliklerini etkilediği görülmektedir. Bu nedenle, çalışmada yapılan deney ve sayısal analiz sonuçları göstermektedir ki; DEA'nın robotik, cerrahi ve yapay kas

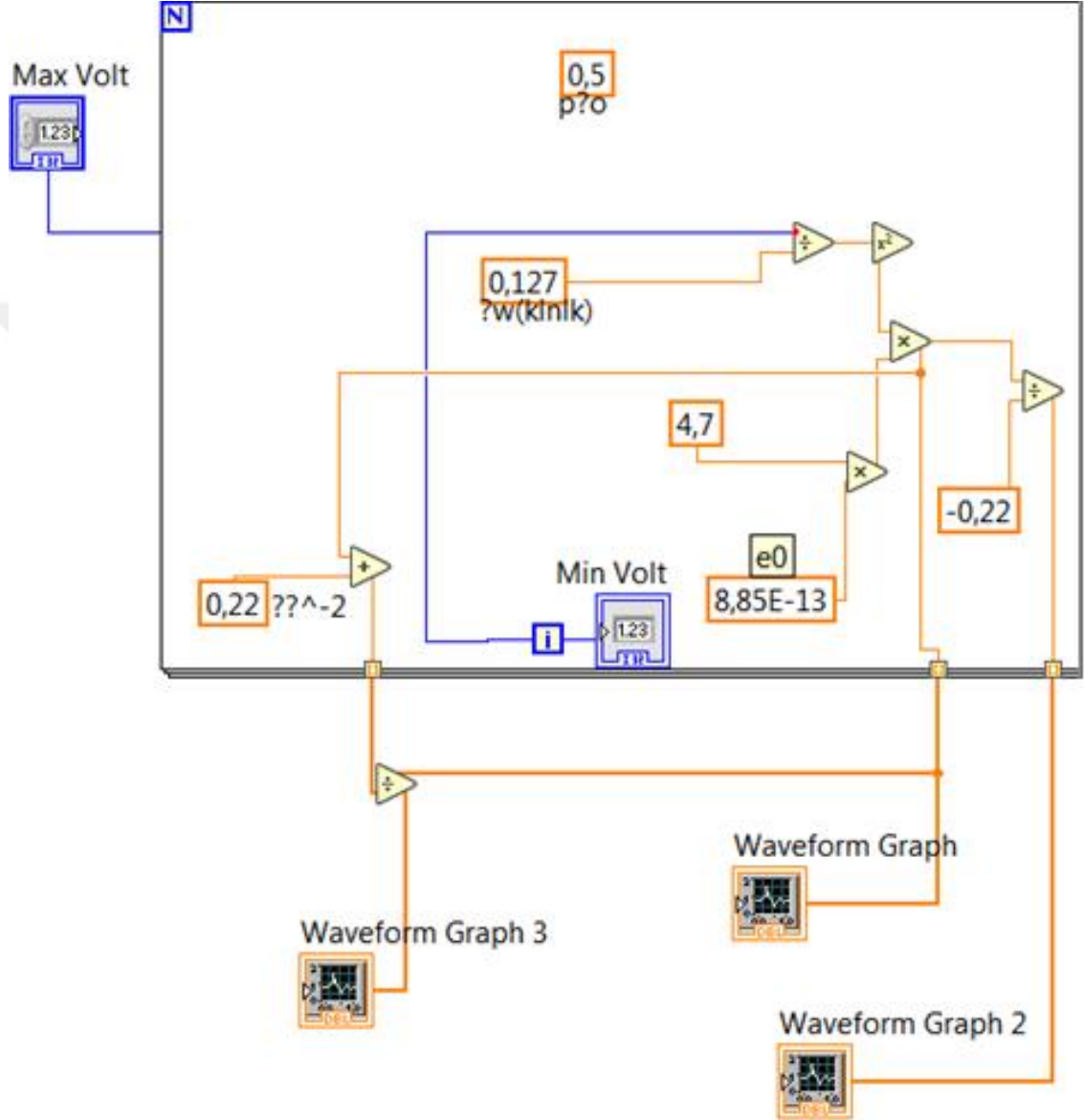
olarak kullanılabilmesi için uygun gerilim ve ön-germe oranlarının belirlenmesi gerekir. İstenilen deformasyon oranında ön-gerilme yüksek ise verilen gerilimde azalır. Aşırı ön-germe ve yüksek gerilim DEA'ya zarar verir. DEA'da ön-germe ve gerilim nedeniyle oluşan Maxwell basıncı, uzama miktarı ve VHB-4910 ile VHB-4905 arasındaki farklılıklar bilgisayar ortamında analiz edilmiştir. Bilgisayar ortamında analiz edilen DEA'nın, deney ortamında da test işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Bu deneylerde 1mm kalınlığında ve 15mm x15mm çaplarında DE 30mm x30mm ön-germe işlemi uygulanmıştır. DE'nin merkezindeki 10mm x 10mm'lik yüzeye bir elektrik alanı uygulanır. Deneylerin ön-germe ve gerilim altında meydana gelen deformasyonların sayısal analizi yapılmıştır. Dielektrik elastomer malzemeler genellikle akrilik, silikon veya poliüretandan oluşur. Deneylerde kullandığımız VHB-4910 ve VHB-4905, iyi yapışma özelliğine sahip ve yüksek deformasyon üreten bir tür çift taraflı yapışkan banttır (Carpi vd., 2010). Bu bantlar elastik olduğu için ön-germe uygulanabilmektedir. Ayrıca yaygın olarak kullanılan ve elektrot görevi gören iletken karbon gresi (Premium Carbon Conductive Grease, MG Chemicals), elastomere iyi yapışması, mükemmel elektrik iletkenliği, düşük direnci ve uygun fiyatı gibi özelliklere sahip bu elektrot her iki yüzeye de fırçalanarak uygulanmıştır. Bu uygulama sonunda ise yapışkan bakır bantlar ile iletken sürülen alanın iki farklı yüzeyinden yüksek Dc gerilim uygulanmıştır.

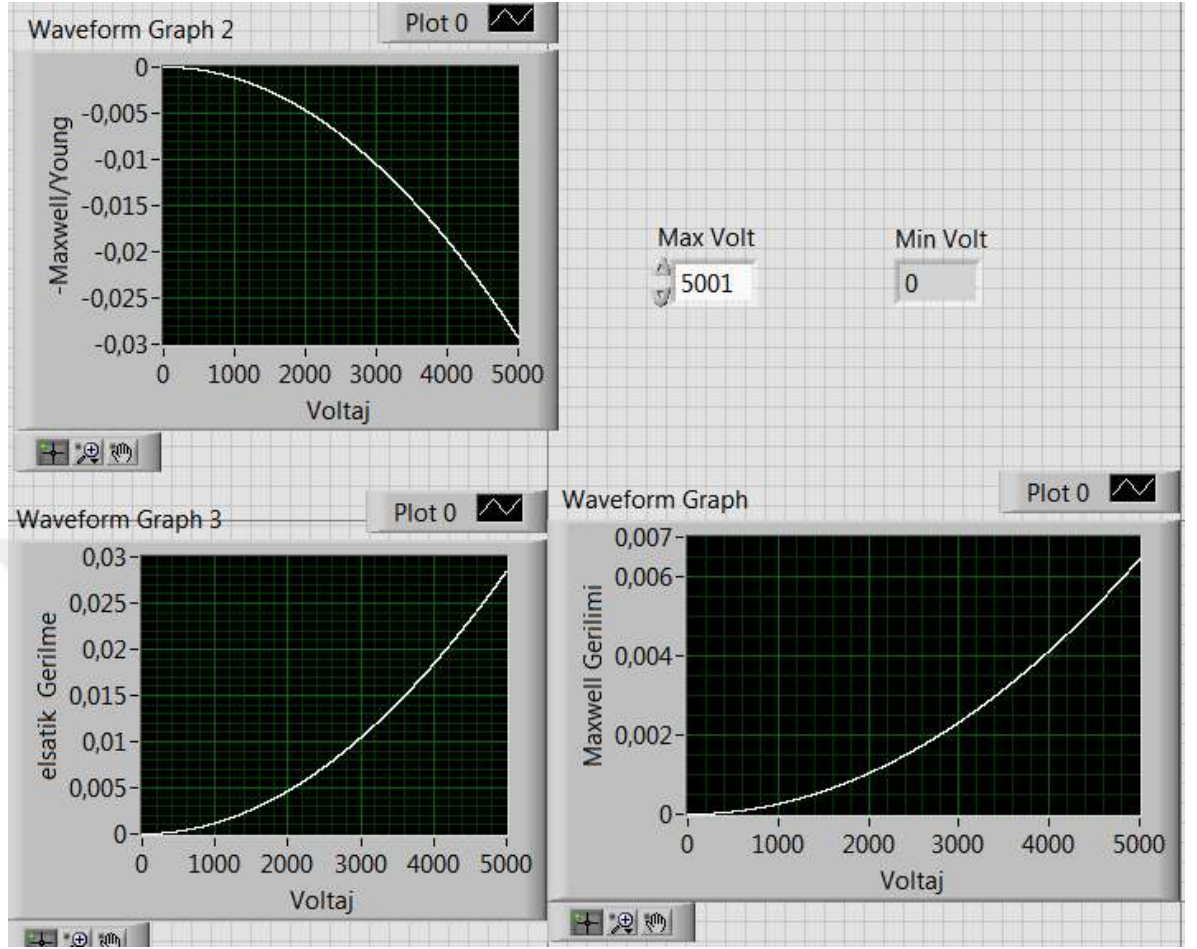
Son yıllarda DEA modelleme ve simülasyon alanında çalışmalar yapılmaktadır. Bunlar; Çok katmanlı bir DE'de gerçekleştirilen fiziksel tabanlı modelleme, (Simone vd., 2017) DEA'nın yüksek voltaj uygulanarak üç boyutlu modellenmesi sonucunda zamana bağlı mekanik reaksiyon ölçülmesi, (Wissler ve Mazza, 2005) ve bunlara ek olarak, yumuşak makinelerin tasarımı için, çok katmanlı bir DEA'nın statik ve dinamik tepkisi, mekanik bir model simüle edilerek analiz edilmiştir (Luo vd., 2020). Prechtl ve arkadaşları DEA'nın iyi performansını sağlamak için çok serbestlik dereceli bir dinamik model sunmuştur (Prechtl vd., 2021).

Bu çalışmada ise dairesel bir DEA'nın Maxwell basıncı, uzama miktarı ve ön-germenin reaksiyonu reaksiyonu analizi ve deneyi test edilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde dielektrik sabiti (ϵ_r) VHB-4910 için 4.7, VHB-4905 için 4.5, boş alan

geçirgenliği (ϵ_0) 8.85×10^{-12} F/m, gerinim limiti (J_{lim}) 120, gerinim kayma modülü 25.4 kPa standart değerleri kullanılmıştır. Bu değerler ışığında Labview ortamında 0 ile 5kV arasında değişen gerilim uygulanmış blok şeması Şekil 4.1. ve analiz sonuçları 4.2.'de görüldüğü gibi gerçekleştirilmiştir.

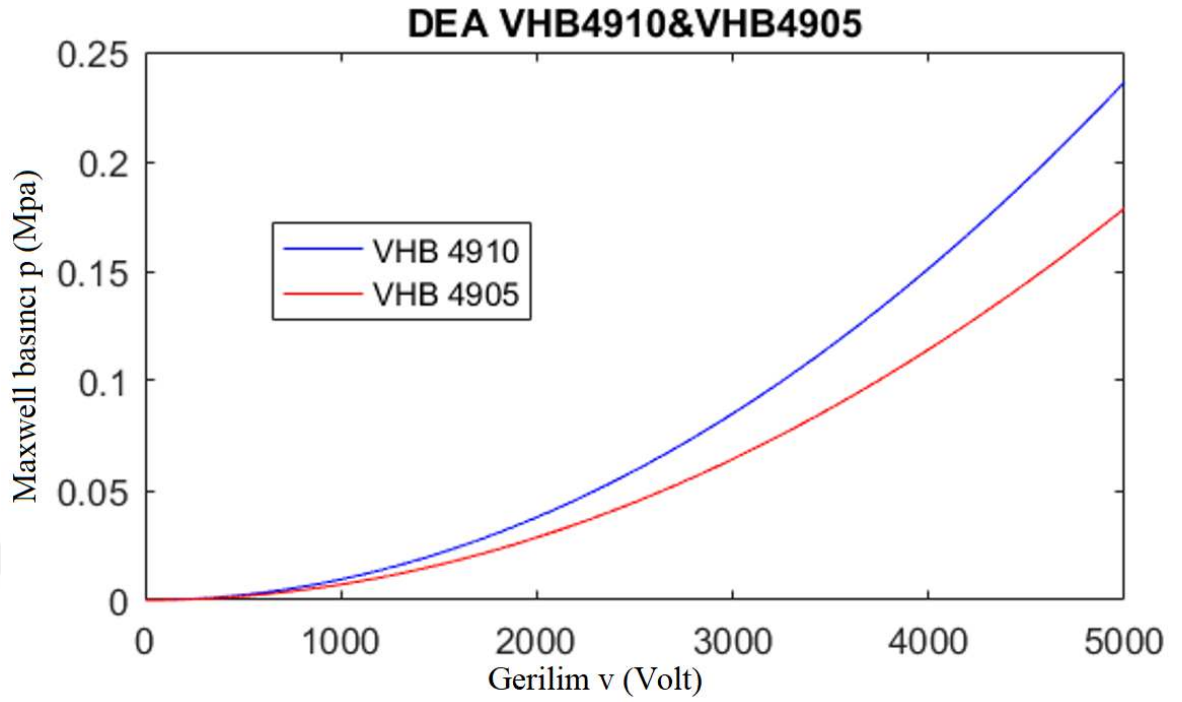


Şekil 4. 1. Gerilime bağlı Maxwell basıncı analizi blok şeması.



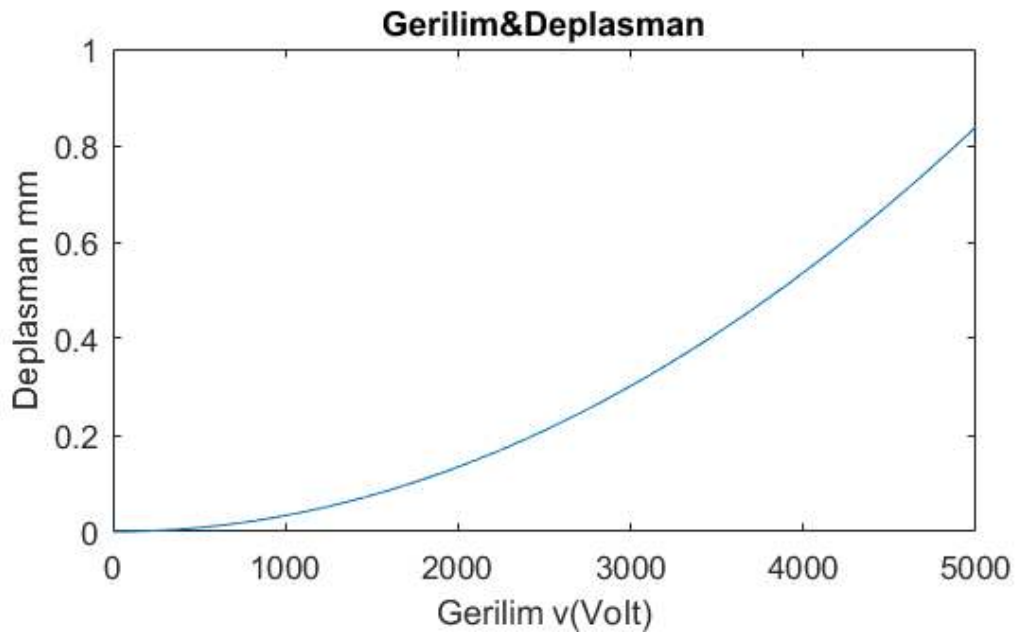
Şekil 4. 2. DEA maxwell basıncı analiz grafiği.

Labview programında elde edilen değerler MATLAB ortamında da incelenerek analiz edilmiştir. Bu değerler göstermektedir ki elde edilen sonuçlar ile yapay kas olarak bilinen DEA'lar gerilime bağlı olarak uzama gerçekleştiği görülmektedir. DEA'lar farklı farklı dielektrik sabitine ve farklı vakum geçirgenliklerine sahiptirler, Şekil 4.3'de 3M VHB-4910 ve 3M VHB-4905 arasındaki 0 ile 5 kV arası gerilim uygulandığında maxwell denkleminde oluşan basıncın volt arasındaki bağlantının analizi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. 3. Farklı DE'lerin gerilime bağlı Maxwell basıncı tepkileri.

Dielektrik elastomer olarak üretilen farklı dielektrik sabitine ve boş alan geçirgenliğine sahip bu malzemeler gerilim altında deformasyon oranı değişmektedir. VHB4910 malzemesinin VHB-4905 malzemesine göre daha fazla deformasyon meydana getirdiği görülmektedir. DEA'larda meydana gelen maxwell basıncıyla elde edilen uzama miktarıda verilen gerilime göre arttığı görülmektedir. Şekil 4.4. de gösterildiği gibi merkezden uzaklaşan deplasmanı göstermektedir.



Şekil 4. 4. DEA'ların gerilime bağlı deplasman tepkisi

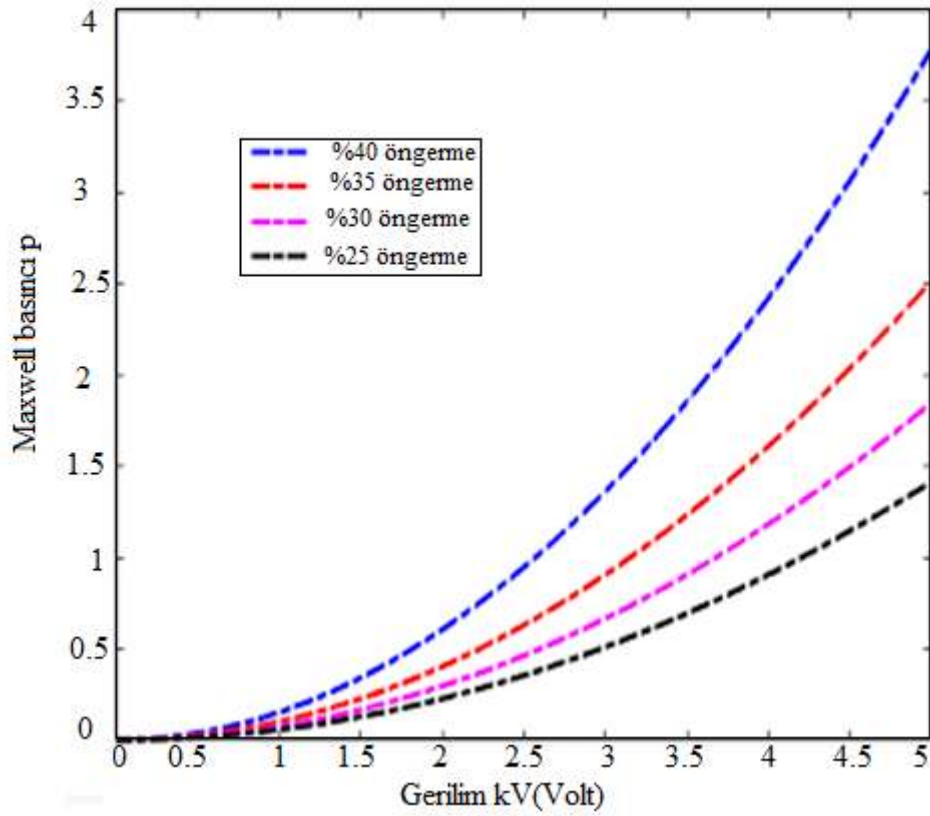
Yapılan deneyler sonucunda Şekil 4.5.'de analiz elde edilen grafiğin yapılan deney aşamasında da yaklaşık 0 ile 5 kV uygulandığında tepkime süreci test edilmiştir. Bu test aşamasında 0 ile 6kv volt üretebilen EMCO Ap60 dc-dc konvertör, aynı zamanda dielektrik elastomer olarak kullanılan ticari olarak üretilen bantlardan 3M VHB4910 ve 3M VHB4905 kullanılmıştır. Deneylerde ise VHB4910 malzemesinin VHB4905 malzemesine göre aynı gerilim altında daha fazla deformasyon meydana getirmiştir. Ayrıca VHB-4905, VHB-4910'a göre yüksek gerilim altında dayanıklılığı daha az olduğu görülmüştür.



Şekil 4. 5. DEA gerilim altında deformasyon oluşumu.

4.1.1. Ön-germe

Ön-germe işlemi DE membranının zarının inceltirme işlemidir. Bu işlemi farklı oranlarda gerçekleştirildiğinde tepkime oranları farklı gerçekleşmektedir. Bir DE'de Şekil 4.6. da görüldüğü gibi, %25, %30, %35 ve %40 ön-germe uygulandığında, ön-germe arttıkça deformasyon da arttığı görülmektedir. DEA ile %75 ön-germeyi farklı uygulandığında daha az voltajda uygulayarak daha fazla deformasyon gerçekleşmektedir.



Şekil 4. 6. 3M-VHB 4910'un farklı ön-germe oranlarında oluşan maxwell basınç tepkileri.

3M VHB-4910 veya 3M VHB-4905 kullanılarak meydana getirilen bir aktüatörün daha hızlı ve fazla genleşme oluşması için ön-germe gerekmektedir. 3M VHB-4910 veya 3M VHB-4905 için en uygun aktüatörü tasarımı, yaylı bir aktüatör olarak düşünülebilir. Bir dielektrik elastomer giriş voltajı değiştiğinde sadece güç tüketmeye devam ederken bir kondansatör gibi davranır. Aynı zamanda elastomerin DC voltajlarında meydana gelen kaçak akım güç tüketmeye neden olarak yüksek güç kullanımına sebep olmaktadır.

Dielektrik bir malzemenin bozulması, uygulanan voltajın çok yüksek olması ve dielektrik elastomer zarının çok ince olması nedeniyle her iki tarafa uygulanan voltajın kısa devre yaparak aktüatörün zarar görmesine neden olmaktadır. Uygun malzemelerin seçimleri, üretim tekniğindeki gelişmeler ve olası ön-germeler, yeni aktüatörün çalışma performanslarının potansiyel iyileştirmelerini sağlayacak önemli faktörlerdendir.

Bu çalışmada, dielektrik elastomerler olarak VHB-4910 ve VHB-4905 kullanılarak deneyler ve sayısal analizler yapılmıştır. Yapılan deneylerde ve analizlerde ön-germe oranı arttıkça, VHB-4910'un 4905'e göre ve gerilim arttıkça deformasyonun arttığı görülmüştür. Ayrıca 5kV üzeri gerilim uygulanan DEA'da bozulmalar meydana gelmektedir. DEA'da meydana gelen en iyi 3kV ile 5kV arası iken ön-germenin de DEA deformasyonunda önemli bir etmen olduğu görülmüştür. Ön-germe arttıkça istenilen DEA deformasyonuna daha az gerilim uygulanarak elde edilebilmektedir.

4.2. Sıcaklık Analizi

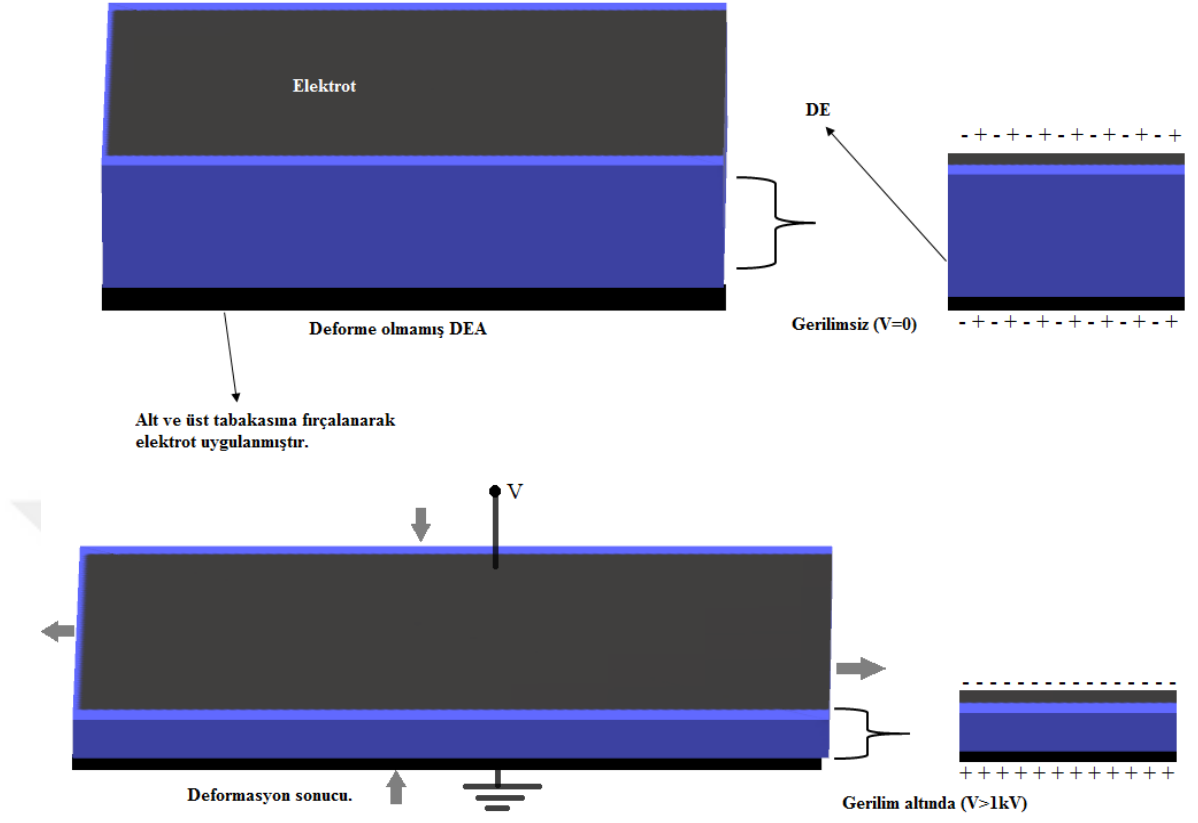
Sıcaklık analizi deneylerinde, Yumuşak Dielektrik Elastomer Aktüatörlerin (YDEA) yüzeyinde oluşan sıcaklığa etki eden faktörler araştırılmıştır. Çeşitli elektrik alanlarına maruz kalan DEA'ların davranışlarını anlamak hala çok önemli bir çalışma alanı olmaya devam ediyor. Bu nedenle; Çalışmada kare, sinüs ve üçgen dâhil olmak üzere farklı frekanslara sahip elektrik sinyallerinin uygulanan çeşitli dalga biçimleri tarafından üretilen YDEA yüzeyindeki sıcaklık değişimlerinin araştırılması ile ilgilidir. DEA yüzeyindeki en yüksek sıcaklığın kare dalga formu tarafından üretildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca yüzey sıcaklıkları, dalga şeklinin tipinden bağımsız olarak 2 Hz ile 10 Hz arasında değişen frekanslarda maksimum değerlerine ulaşır. Ayrıca ortam sıcaklığının, ön-germe ve gerilimlerin artması DEA yüzeyindeki sıcaklığın artmasına neden olur.

DE yüksek voltaj altında ve ön-germe işlemi sonucu fazla inceltirilerek elektriksel bozulmaya neden olur. DE'nin Mooney-Rivlin modelini kullanarak, termo-elektromekanik dengesizlik (Liu vd., 2009), sıcaklık artışının elektrik alanı altında sıcaklığın etkisi üzerine bir model önerdi (Jean-Mistral vd., 2008). DE'nin sıcaklığını etkileyen birçok faktör vardır. DE'nin elektromekanik davranışı, sıcaklığı etkileyen en önemli faktörlerden biridir. DE'nin dielektrik sabiti azaldıkça sıcaklığının lineer olarak arttığı bilinmektedir (Sheng vd., 2012). DEA yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimleri elektriksel sinyallerde farklılık gösterir. Elektrik sinyallerinden kare dalga biçiminin sinüs ve üçgen dalga biçimine göre daha yüksek olduğu görülmektedir (Karaman ve Şahin,2020). Çalışma frekansı arttıkça ve çok düşük frekanslarda (0-1Hz) DEA deformasyonu azalır (Zou ve Gu, 2018). Ortalama olarak,

5Hz ve 10Hz frekansları arasında bir büyüklük sırasına göre iyileşme meydana gelirken, 10 frekansın ötesinde daha az reaksiyon vardır (Buckner vd., 2018).

Literatürde farklı tasarımlara, geometrilere ve malzemelere dayalı birçok farklı DEA konfigürasyonu önerilmiştir. Tüm bu faktörler, cihazların performansını büyük ölçüde etkiler (Araromi vd., 2014). DEA'nın iki ana avantajı, tamamen kapalı kenarı nedeniyle güvenilirliğinin yanı sıra kolay imalat ve çok katmanlı işlemedir (Khanh vd., 2018).

Dielektrik malzemeler, stres, gerinim, güç yoğunluğu ve esneklik gibi özelliklere sahip olması aktüatör olarak kullanılmasına etki eden etmenlerdendir. Bu etmenlere sahip Dielektrik malzemesi olarak VHB-4910 veya VHB-4905 kullanılarak oluşturulan herhangi bir aktüatör, kırılma mukavemetini önemli bir düzeye çıkarmak için malzemeye ön-germeyi gerektirir. VHB-4910, geliştirilmiş çekme performansı ve düşük güç tüketimi nedeniyle yapay kas aktüatörü için önemli bir malzemedir. İdeal olarak, bir dielektrik elastomer bir kapasitör gibi davranır ve yalnızca giriş voltajı değiştiğinde güç tüketir. Bununla birlikte, artık akım, elastomerin Dc voltajlarında da güç tüketmesine neden olur ve bu da daha yüksek güç kullanımına yol açmaya devam eder. Bir dielektrik malzemenin kırılması, hem uygulanan yüksek gerilim hem de çok ince dielektrik elastomer membran nedeniyle her iki tarafa uygulanan voltajı kısa devre yaparak aktüatöre zarar vermesiyle oluşur. Uygun malzemelerin seçimi, imalat tekniğindeki gelişmeler ve olası ön-germeler, aktüatör çalışma performansında potansiyel iyileştirmeler sağlayacak önemli faktörlerdir. Şekil 4.7.'de gerilim uygulandığında bir DEA'nın boyuna uzaması, kalınlığının incilmesi ve DE'de bulunan yüklerin dağılımı gösterilmektedir. DEA'ya gerilim uygulanmadığında dağınık halde bulunan yükler, gerilim uygulandıktan sonra değişim göstermektedir.



Şekil 4. 7. Gerilim altında DEA’da meydana gelen mekanik ve yük değişimi.

Bu deneyde DEA yüzeyinde ilk olarak sabit frekanslarda sıcaklık (T)-zaman (t) değişimi, ikincisi ise sıcaklık (T)-frekans (f) değişimi ve son olarak sıcaklık (T)-elektrik gerilimi (V) değişimi olmak üzere 3 tip ölçüm yapılmıştır. Termal Kamera yardımıyla yapılan ölçümlerde, DEA yüzey sıcaklığının zamana, frekansa ve elektrik gerilimine bağlı değişimleri önce resim halinde elde edilmiş sonra grafiklere dönüştürülmüştür.

Deneysel çalışmada, farklı ortam sıcaklıklarına, farklı elektrik sinyallerinin frekanslarına, gerilime ve ön-germeye bağlı olarak DEA yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Deneylerde (233~363 K) sıcaklık aralığında yüksek deformasyonlar ürettiği için VHB-4910 malzemesi kullanılmıştır (Ghazali vd., 2017). Bu değişiklikler yapay kaslar olarak kabul edilen DEA'lar için önemlidir. DEA'nın cerrahi ve pratik uygulamalarda kullanılabilmesi için sıcaklık değişiminin hangi koşullarda tutulması gerektiğinin bilinmesi gerekmektedir. DEA'ların 1 ila 10 kV yüksek gerilim uygulaması en önemli zorluklardan biri olmasına rağmen, düşük

akımda(A) çalıştıkları için güvenlik endişesi oluşturmamaktadır. Aynı zamanda, Dc-Dc dönüştürücülerle çalıştığı için elektronik devreler tarafından kontrol edilebilmesi kolaydır.

4.2.1. Test Numunelerinin Hazırlanması

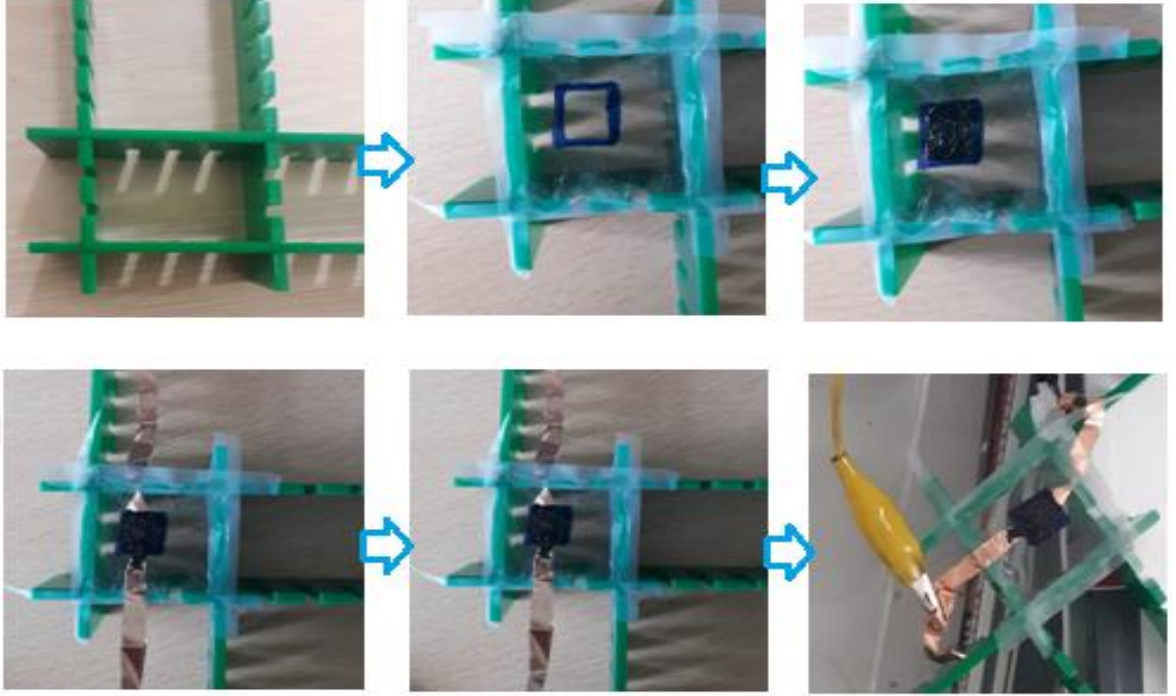
Deneylerde DEA yüzeyinde; Elektrik sinyallerinin farklı frekanslarındaki DEA yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimleri sinyal üretici yardımıyla, ön-germeden kaynaklanan sıcaklık değişimleri, ortam sıcaklığından kaynaklanan sıcaklık değişimleri ve gerilime bağlı sıcaklık değişimleri termal kamerayla kayıt altına alınmıştır.

4.2.2. DEA Yüzey Sıcaklık Ölçümünde Ön-germe İşlemi

Mevcut dielektrik elastomer esaslı aktüatörler geliştirmesinde, literatürde bulunan çeşitli zorluklar vardır. Sorunlardan biri, elastomerlerin ön-germelerini desteklemek için kullanılan ek donanım olarak ortaya çıkmıştır. Ön-germenin Dielektrik Elastomer Aktüatörlerin aktivasyonunu iyileştirdiği kanıtlanmıştır (Peltine vd., 2000; Zhao ve Suo, 2010). Bununla birlikte, toplam harekete geçme gerilmesi, ön-germenin kapsamı ile sınırlıdır. Sonuç olarak, ön-germe gereksinimini ortadan kaldıran ancak aynı zamanda büyük deforme edilebilirlik ve aktüatör performansını koruyan bağımsız bir aktüatör geliştirmek de zorlaşmaktadır(Suo, 2010).

Ön-germe, DE membranının inceltme işlemidir. DE'nin ön-gerdirme işlemi her iki yönde eşit olarak uygulanarak inceltme sağlanmıştır. Ön-germe oranı hem deformasyonu hem de sıcaklığı etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Deneylerde, ön gerdirme işlemleri, Şekil 4.8.'de gösterildiği gibi elastomerin farklı ölçümleri altında test edildi. Ön-gerdirme, elastomer membranlardan %300'den fazla bir esneme sağlar. Ön-germe, elastomer membran üzerine gerilim uygulama işlemidir. Ön-germe işlemi de elastomer membranı gerilim uygulamadan basınç altında bırakmaktır. Son olarak, ön-germe, bir DEA'nın gerilme ve deformasyon özelliklerini değiştirir (Carpi vd., 2003; Kim ve Tadokoro, 2007). Deneylerde ön-germe işlemi farklı ölçülerde kesilen yumuşak ve esne olan DE her iki tarafından da eşit olarak uzatılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu işlem ile DE'nin kalınlığı inceltmiş ve deformasyon davranışında farklılıklar meydana gelmiştir. Her iki tarafına iletken

karbon gresi sürülerek iletken bakır bantlar yardımıyla deney bağlantıları sağlanmıştır.

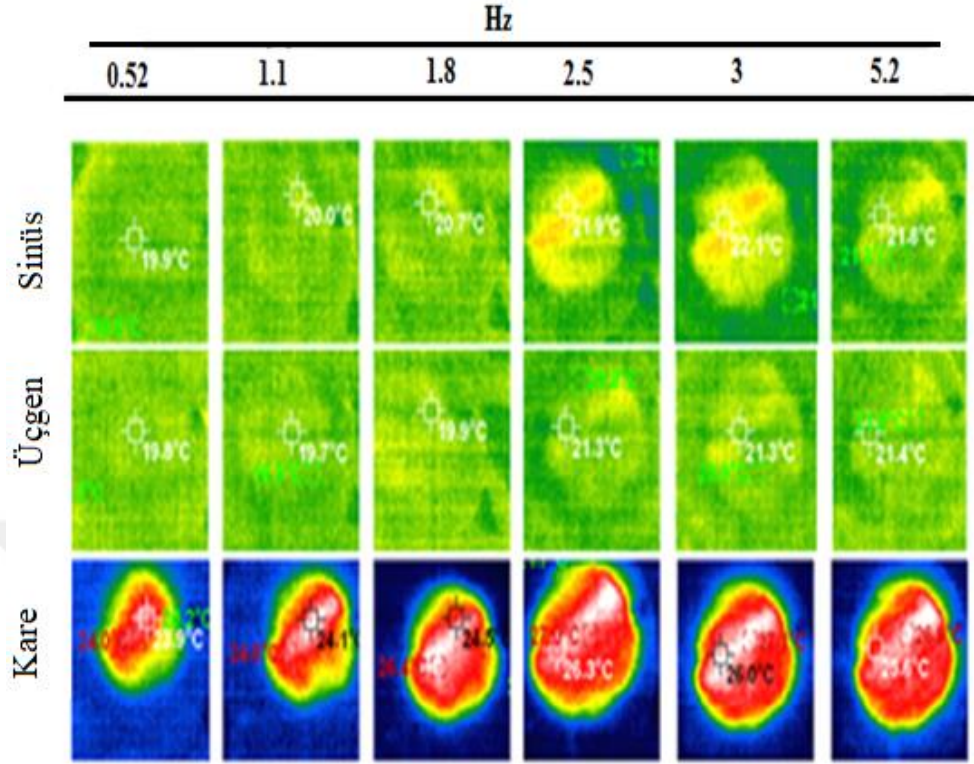


Şekil 4. 8. Ön-germe işlem basamakları.

Bu deneylerde 15mmX15mm çaplarında DE 30mmX30mm ön gerdirme işlemi yapılmıştır. DE'nin merkezindeki 10mmX10mm'lik yüzeye elektrik alan uygulanmıştır. DEA'ya uygulanan elektrik alan ile DEA yüzeyindeki sıcaklık değişimleri incelenmiştir.

4.2.3. DEA'da Yüzey Sıcaklık Bulguları ve Belirlenmesi

DEA'nın yüzey sıcaklık değerinin belirlenmesinde hazırlanan numuneler termal kamera yardımıyla adyabatik ortamda test edilmiştir. Şekil 4.9. ve Tablo 4. 1.'deki gibi elde edilen sıcaklık değerleri bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bu değerler termal kameradan alınan sıcaklık değerleridir. Farklı elektriksel sinyaller ve farklı frekanslarda DEA yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değerleri görülmektedir. Diğer dalga formlarına göre kare dalga formunda kırmızı bölgenin fazla olması sıcaklık değerinin yüksek gerçekleştiğini göstermektedir. Ölçümlerde, DEA'nın yüzey sıcaklığını; ortam sıcaklıkları, voltaj, frekans boyutu, elektriksel sinyal tipi ve ön-germe gibi birçok faktörün etkilediği gözlemlenmiştir. Sıcaklık ortalamaları ile sıcaklık farkları arasında (Δt) $\sim \pm 1$ °C olarak görülmektedir.



Şekil 4. 9. Farklı elektriksel sinyallerin 0.52 Hz ve 5.2 Hz arasında, %20 nem ve 16 °C sıcaklık altında DEA meydana gelen sıcaklık görüntüleri.

Tablo 4. 1. Farklı elektriksel sinyaller ve frekanslarda DEA'ların yüzeylerinde meydana gelen sıcaklık değişimleri (°C).

Elektriksel Sinyaller	Frekanslar f (Hz)					
	0.52	1.1	1.8	2.5	3	5.2
Sinüs	19.9*	20*	20.7*	21.9*	22.1*	21.8*
Üçgen	19.8*	19.7*	19.9*	21.3*	21.3*	21.4*
Kare	24*	24.6*	26.4*	27*	27.1*	26.9*

*DEA yüzeyinde oluşan sıcaklık değerleri (°C)

DEA yüzey sıcaklık ölçümlerindeki deneyler, üç farklı elektrik sinyalinin dalga boyları incelenerek 5 kez tekrarlanmıştır. Veriler MSTAT-C paket programında 0.95 güven düzeyinde değerlendirildi. Gruplar arasındaki fark anlamlı olduğunda ortalama değerler arasındaki fark Duncan testi ile karşılaştırıldı. Böylece deneye dahil edilen

faktörlerin başarı sıralamaları, en az önemli fark (LSD) kritik değerine göre homojenlik gruplarına ayrılarak belirlenmiştir. Tablo 4.2.'de görüldüğü gibi sinüs ve üçgen dalga formları yüksek ve düşük frekans seviyelerinde aynı homojenlik grubundadır.

Tablo 4. 2. Farklı elektriksel sinyaller ve frekansların DEA yüzeyinde meydana gelen sıcaklık(°C) değişimlerinin deney setlerinin karşılaştırılması.

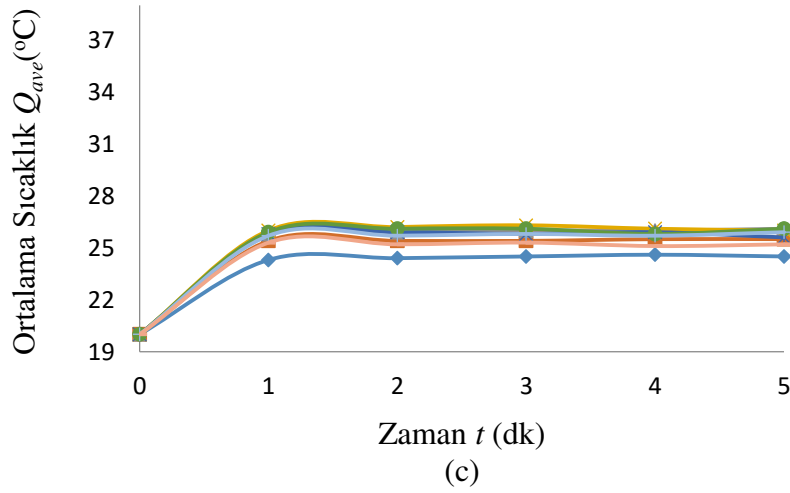
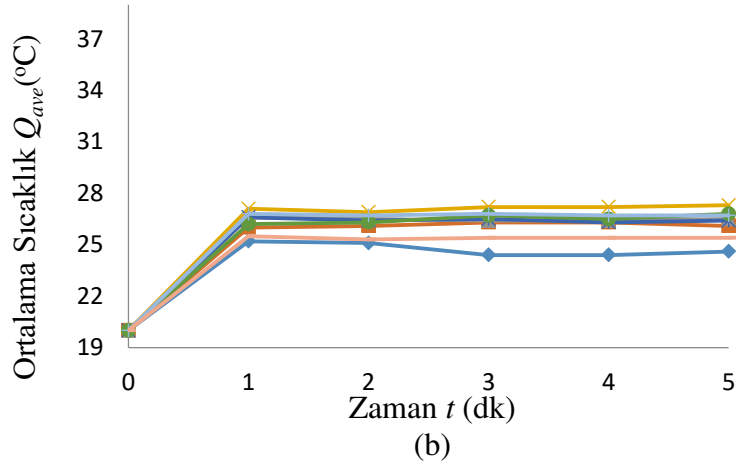
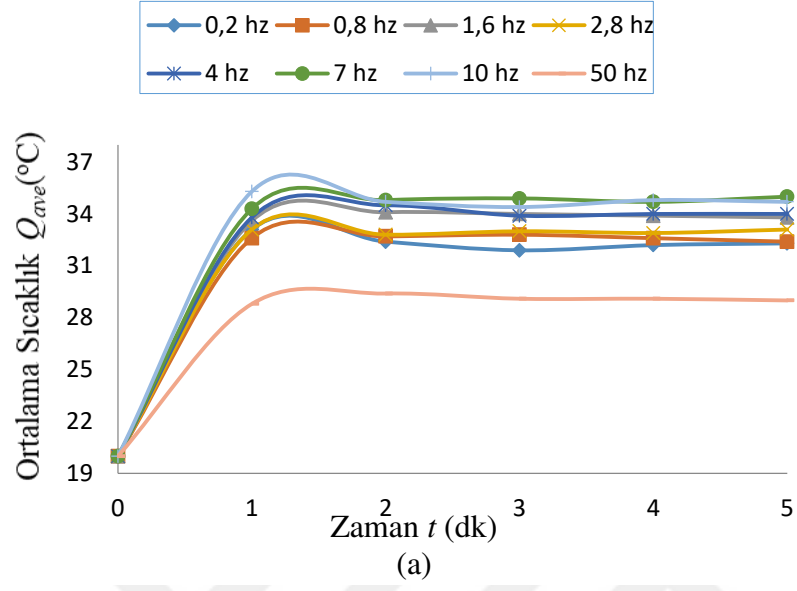
Frekanslar (Hz)	Kare		Sinüs		Üçgen		LSD ±
	$\bar{X}$	HG	$\bar{X}$	HG	$\bar{X}$	HG	
0.12	27.50	A	22.02	B	22.16	B	0.3378
0.2	28.10	A	22.36	B	22.34	B	0.1966
1	32.52	A	23.30	B	22.58	C	0.2187
2	38.32	A	24.22	B	23.22	C	0.3665
3	38.08	A	25.36	B	23.98	C	0.3563
12	33.88	A	24.18	B	23.50	C	0.2941
16	31.26	A	23.64	B	23.32	B	0.4159

HG: Homejenlik Grubu $\bar{X}$: Aritmetik Ortalama (°C)

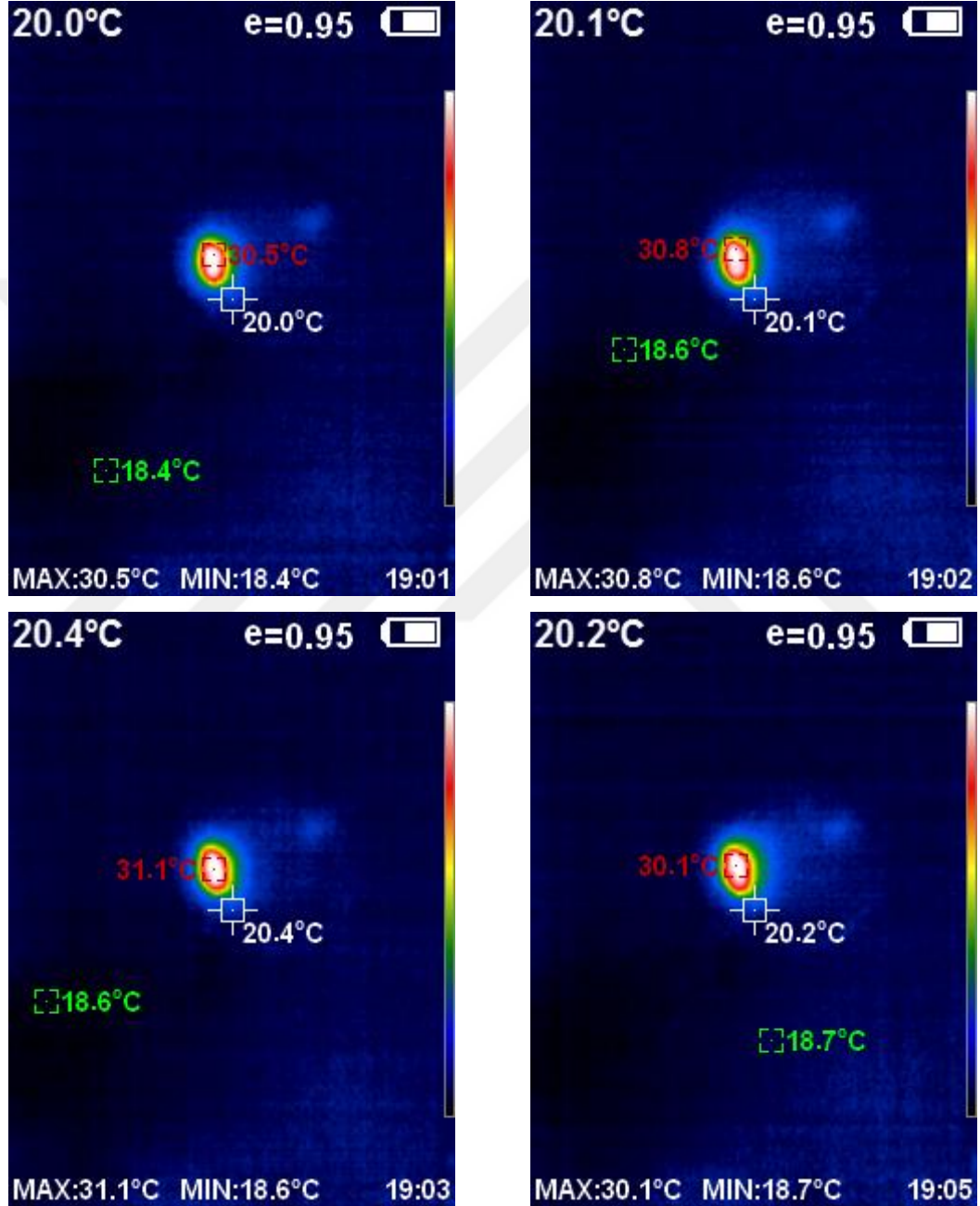
4.2.4. Farklı Sinyal ve Frekanslarda DEA Yüzey Sıcaklıkları

DEA yüzeyindeki sıcaklık ölçümlerinde gerilim sabit tutularak kare, sinüs ve üçgen dalga formların frekans düzeylerinde zaman içindeki değişimleri incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda termal kamera görüntülerinde sıcaklıkların ilk dakikada aniden yükseldiği ve ardından sıcaklık değerlerinin stabil hale geldiği gözlemlenmiştir. Sıcaklık değişimleri, %25 nem ve 17°C sıcaklık değeri, 3.2 kV voltaj ve 10mmX10mm elektrik alanı uygulanarak üç farklı sinyal tipinin farklı frekans değerlerinde 5 farklı ölçümden oluşmaktadır. Yapılan deneylerde, sıcaklık ölçümlerinde (Δt)= 1°C sıcaklık değişiminin meydana geldiği tespit edilmiştir. Şekil 4.10. ve Şekil 4.11'de görüldüğü gibi DEA yüzeyinde daha fazla deformasyon olması nedeniyle kare dalga formundaki sıcaklıklar diğer dalga formlarından daha yüksek olmuştur. Aynı zamanda Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'de gösterildiği gibi DEA'nın yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimlerinde sinüs ve üçgen dalga formlarında birbirlerine yakın sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Bu şekillerde gösterilen değerler farklı zaman aralıklarında ve farklı frekanslarda alınan termal kamera görüntüleri yer

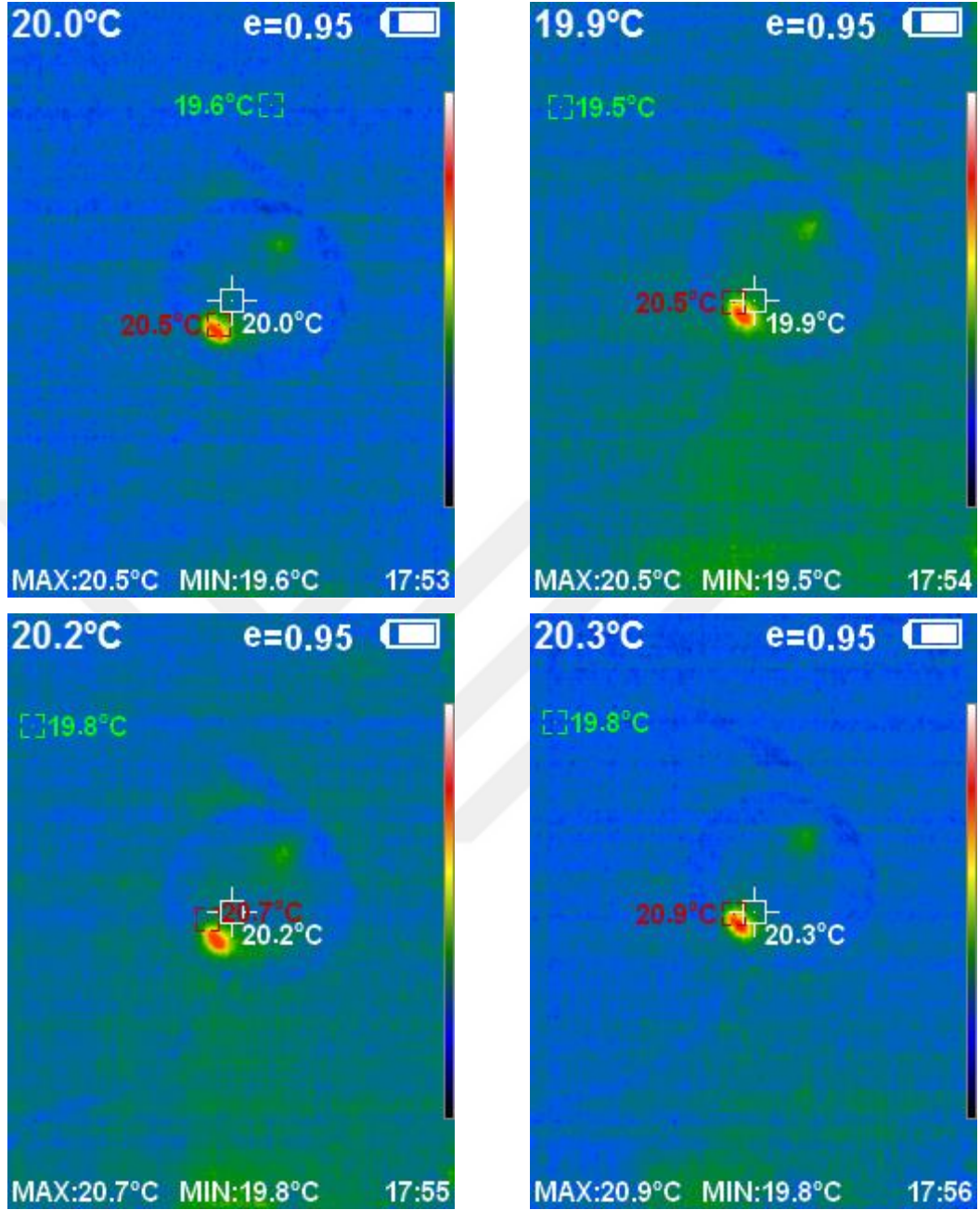
almaktadır. En yüksek sıcaklık değeri kırmızı renkle belirtilirken beyaz renkli değer ise DEA'nın merkez noktasının sıcaklık değerini göstermektedir.



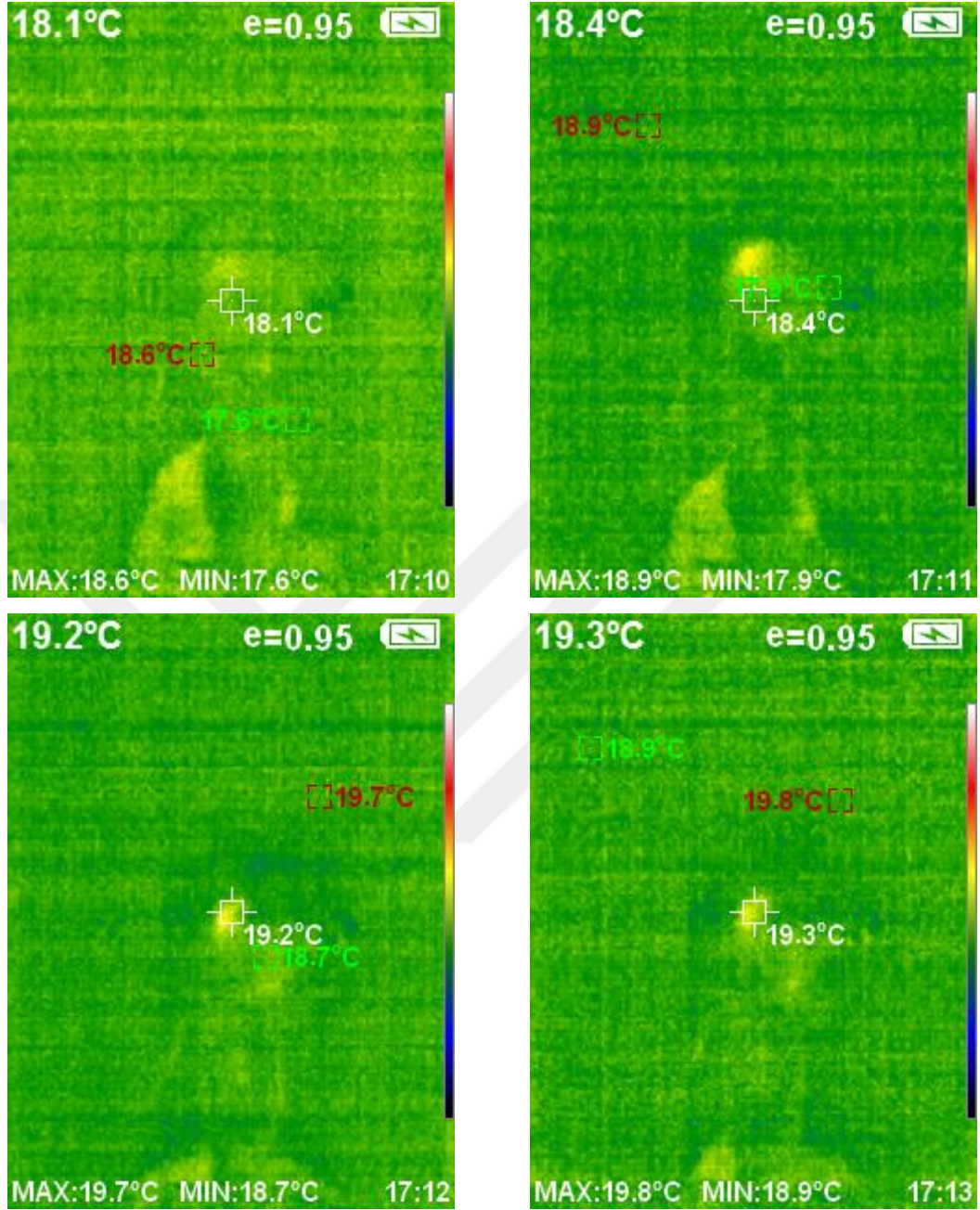
Şekil 4. 10. DEA yüzeyinde (a) kare, (b) sin, (c) üçgen dalga formlarında farklı frekanslarda zamanla sıcaklık değişimi.



Şekil 4. 11. Zamana bağlı DEA yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimi termal kamera görüntüleri (kare dalga formu).



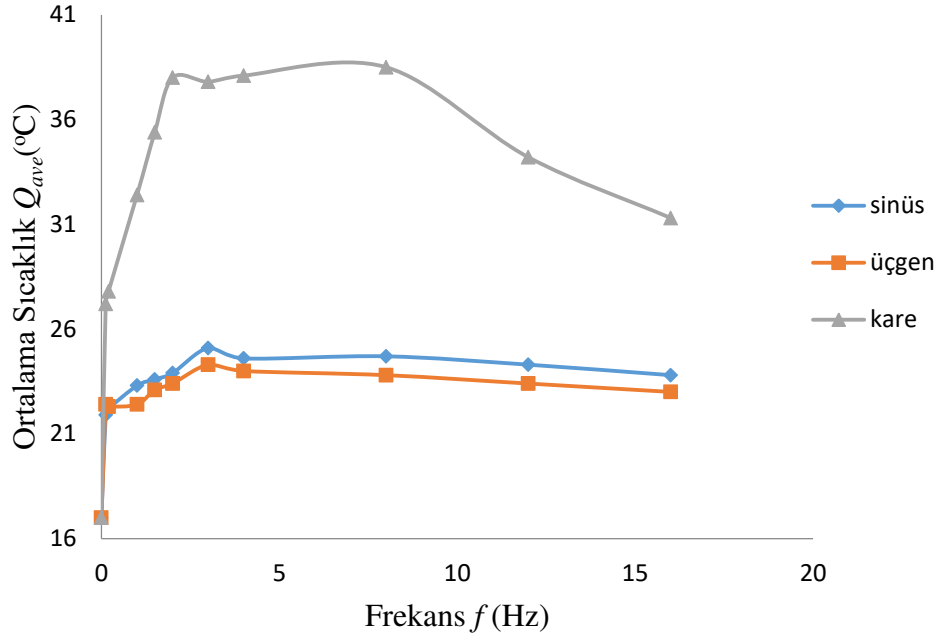
Şekil 4. 12. Zamana bağlı DEA yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimi termal kamera görüntüleri (sinüs dalga formu).



Şekil 4. 13. Zamana bağlı DEA yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimi termal kamera görüntüleri (üçgen dalga formu).

DEA'ya 3.2 kV gerilim ve 10mmX10mm elektrik alan uygulanarak farklı elektrik sinyallerinin frekans değişimlerinde sıcaklık değerlerinin değiştiği gözlemlenmiştir. Ortam sıcaklığı (17°C) ve nem ortamı %20 korunarak yapılan ölçümlerde DEA yüzeyinde oluşan sıcaklık değerleri sinüs ve üçgen dalga formlarına göre kare dalga formunda daha yüksek çıkmıştır. Öte yandan sinüs ve üçgen dalga formlarının sıcaklık değerleri birbirine yakın olarak belirlenmiştir. Tüm elektrik sinyallerinde 2

Hz ile 10 Hz arasında maksimum sıcaklığa ulaştığı (Bkz. Şekil 4.6.) ve MHz ve KHz seviyelerinde sıcaklık değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir (Bkz. Tablo 4.3.).



Şekil 4. 14. Sinüs, üçgen ve kare dalga biçimlerinin farklı frekanslarında sıcaklık değişimi.

Yapılan DEA'nın çalışma frekansları incelendiğinde frekans arttıkça ve çok düşük frekanslarda DEA deformasyonu azaldığı görülmektedir (White vd., 2017; Zou ve Gu, 2018). Ortalama olarak 5 Hz ile 10 Hz frekansı arasında meydana gelen reaksiyonda bir iyileşme olurken, reaksiyonun 10 Hz'den daha az gerçekleştiği görülmektedir. Sonuç olarak Tablo 4.3.'teki gibi yüksek frekanslardaki tüm elektrik sinyallerinde DEA yüzeyinde oluşan sıcaklıkların azaldığı gözlemlenmiştir.

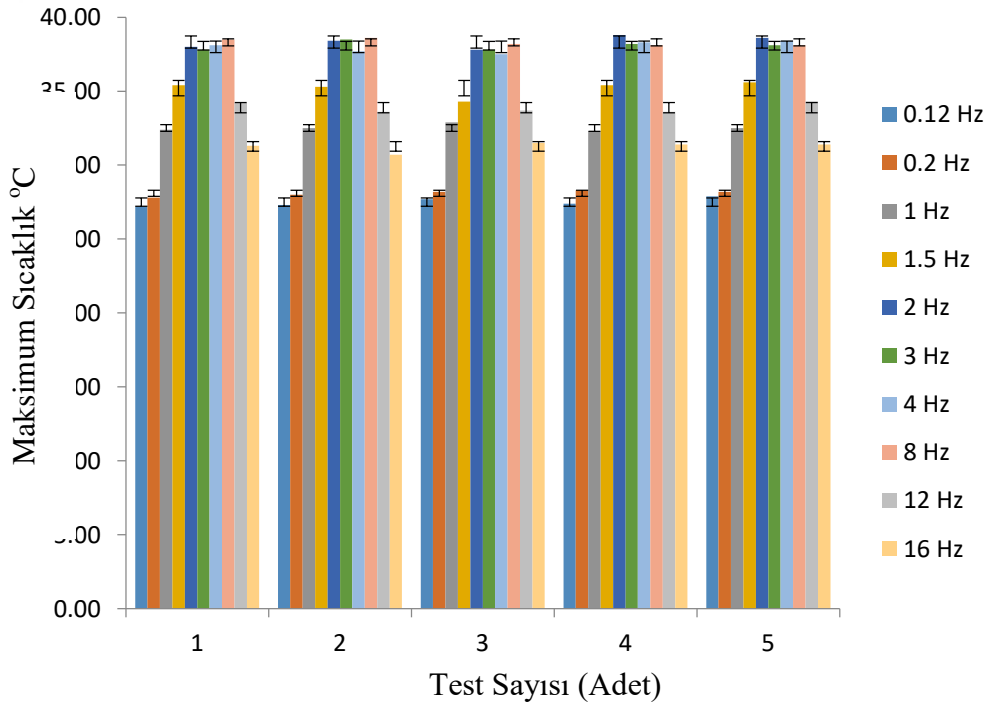
Tablo 4. 3. DEA yüzeyinde meydana gelen farklı elektrik sinyallerinde ve farklı yüksek frekanslarda sıcaklık değişimleri (°C).

Elektriksel Sinyal	Frekanslar f (Hz)					
	1 kHz	2 kHz	5 kHz	10 kHz	1 MHz	2 MHz
Kare	30.8*	30.7*	30.3*	29.9*	28.6*	28.4*
Sinüs	19.2*	19.2*	18.8*	18.7*	18.4*	18.2*

Üçgen	19.1*	19.0*	18.8*	18.6*	18.2*	18.1*
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

*Yüksek frekanslarda(f) DEA yüzeyinde oluşan sıcaklık değeri (°C)

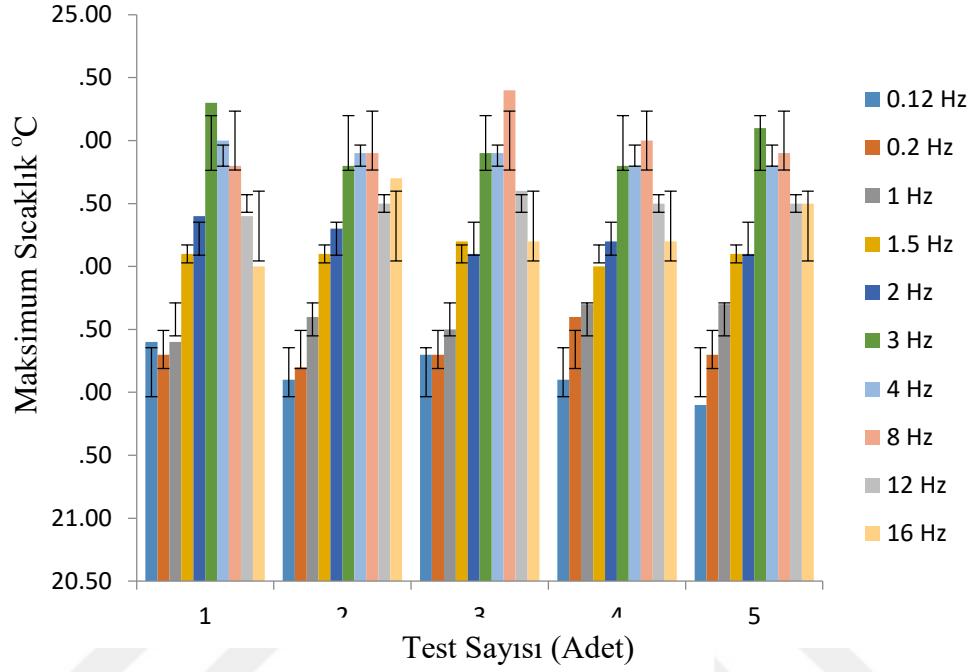
DEA yüzeyinde sıcaklık ölçümleri her deney için beş farklı düzenek ile tekrarlanmıştır. Elde edilen deneyler sonucu kare dalga hata çubukları Şekil 4.15. üçgen dalga hata çubukları Şekil 4.16. ve sinüs dalga hata çubukları Şekil 4.17' de verilmiştir.



Şekil 4. 15. Kare dalga formu hata çubukları.

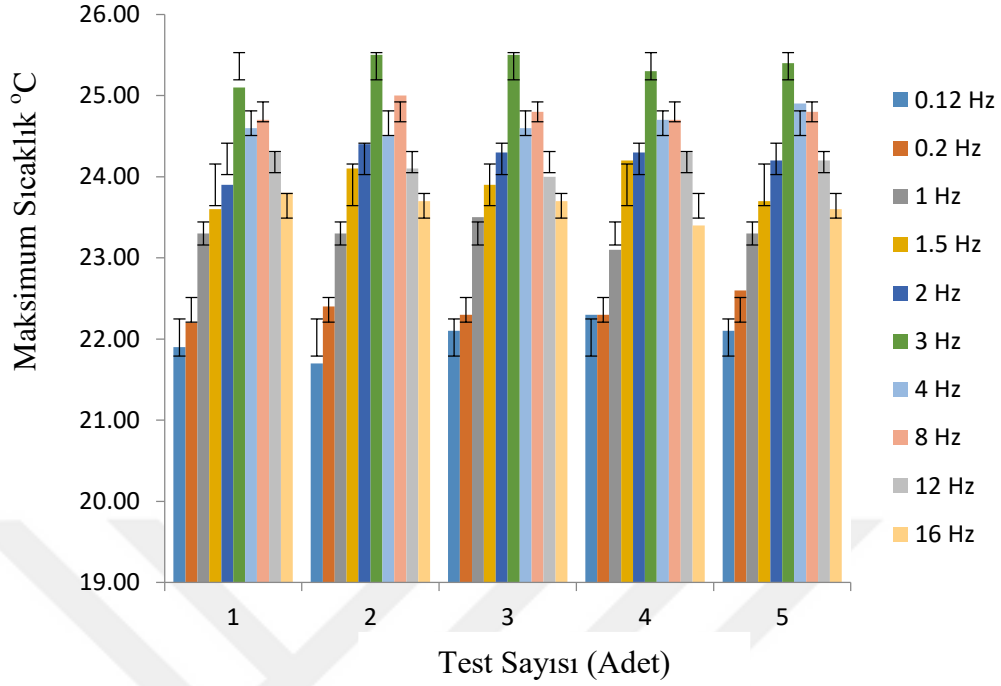
Bu deneyler sonucu aritmetik ortalama değerlerinin yapılan deneylerle ölçüm aralıkları birbirine yakın ve hata paylarının değerleri düşük çıkmaktadır. Kare dalga formu üzerinden DEA yüzeyinde ölçülen sıcaklık hata payları sinüs ve üçgen dalga formuna göre daha düşüktür. Kare dalga formunda 0.2 Hz düzeyinde hata oranı en aza indiği görülmüştür. Aynı zamanda kare dalga formunda terar edilen testlerde

sinüs ve üçgen dalga formlarında elde edilen hata çubuklarına göre daha istikrarlı sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4. 16. Üçgen dalga formu hata çubukları.

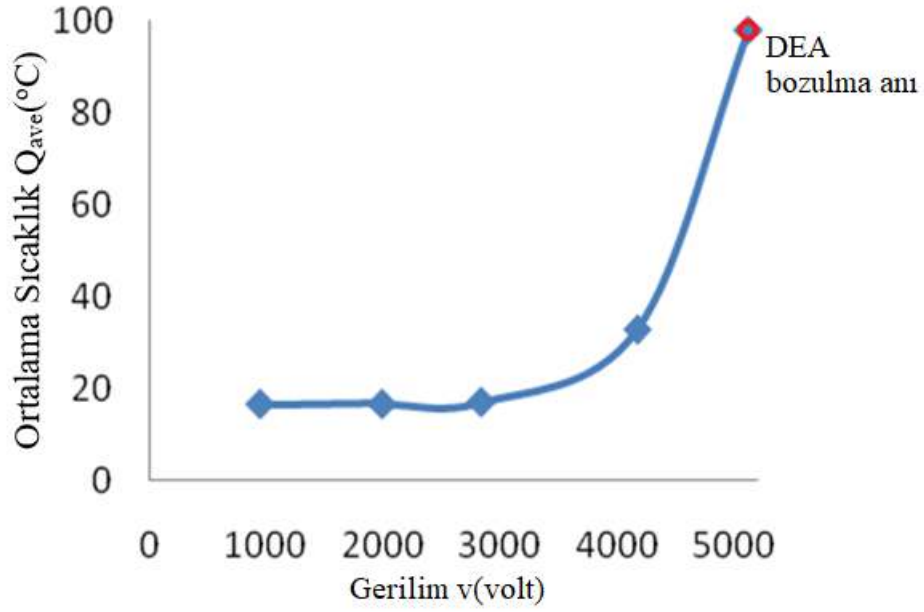
Üçgen dalga formunda 1.5 Hz frekans düzeyinde en istikrarlı sonuç elde edilirken, 3 Hz, 12 Hz ve 16 Hz düzeyinde hata oranları arttığı görülmüştür. Sinüs dalga formunda ise 1 Hz düzeyinde hata oranı daha düşük tespit edilmiştir.



Şekil 4. 17. Sinüs dalga formu hata çubukları.

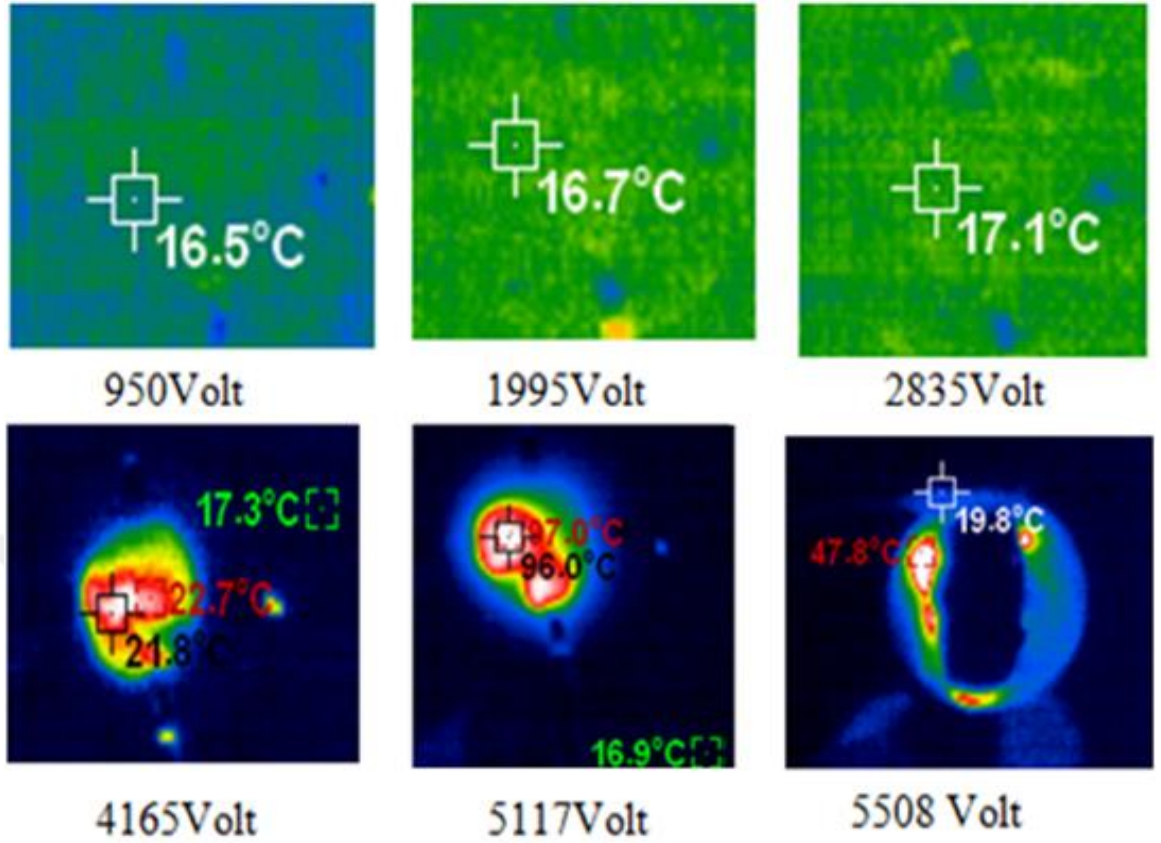
4.2.5. Gerilime Bağlı DEA Yüzey Sıcaklıkları

DEA yüzeyinin sıcaklığını etkileyen en önemli faktörlerden biri hiç şüphesiz DEA'ya uygulanan gerilimdir. Uygulanan gerilim arttıkça DEA yüzeyinde oluşan sıcaklığın da yükseldiği ve 5kV'dan sonra sıcaklık değerlerinin aniden arttığı gözlemlenmiştir. VHB-4910 malzemesi yüksek sıcaklığa dayanıklı bir malzemedir. Bu nedenle DEA'nın bozulması, yüksek voltaj uygulanarak ve yüksek sıcaklıklarda da gerçekleşir. Sıcaklık artışı ile elastomer arızaları ve elektrotların kısa devre yapması DEA'nın özelliğini kaybetmesine neden olur. Deney sonuçlarına göre Şekil 4.18. ve Şekil 4.19.'da görüldüğü gibi DEA yüzeyinde gerilim arttıkça sıcaklık değeri artmıştır. Gerilim seviyesi 5 kV'u aştığında DEA'da yırtılma sonucu bozulmalar meydana gelmiştir.



Şekil 4. 18. Doğrusal gerilim altında DEA yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimi.

Sıcaklık artışı ile dielektrik elastomer bozularak elektrotların kısa devre olması ile DEA'nın özelliğinin kaybetmesine neden olmaktadır. Sıcaklık analizlerinde (Bkz. Şekil 4.18.) 2kV altında DEA'nın deformasyon etkisi göstermediği ve sıcaklık değerlerinin ortam sıcaklığı ile aynı olduğu görülmektedir. Ayrıca gerilim 2kV ve üzeri deformasyon oranı giderek arttığı ve DEA yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değeri de belirgin bir şekilde artmaktadır.



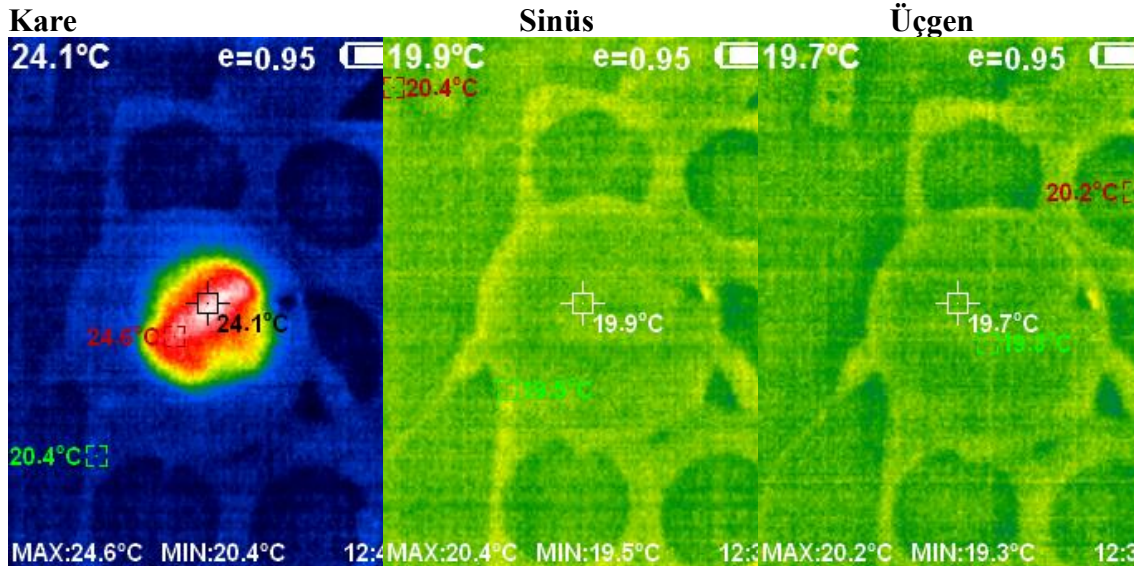
Şekil 4. 19. Doğrusal gerilim uygulanan DEA yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimi termal kamera görüntüleri.

Özellikle uygulanan bir elektrik alanını mekanik harekete dönüştüren bu yumuşak aktüatörler, biyomimetik robotlar, protezler ve yapay kaslar dâhil olmak üzere birçok robot uygulamasında kullanılmaktadır (Brochu ve Pei, 2012). Kullanılan Dc-Dc dönüştürücü giriş voltajı (0~5V) düşüktür ve çıkış voltajı (kV) yüksektir. DEA'lar, düşük akım(mA seviyesi) çalışmaları nedeniyle herhangi bir canlı veya mekanizmada güvenle kullanılabilir. Uygulamalarda gerilimi 5kV'nin üzerinde olan dielektrik elastomerde bozulma ve 3kV'un altında DEA'da meydana gelen düşük mekanik reaksiyon nedeniyle 3kV ile 5kV arasında ortalama gerilim uygulanmıştır. Bu deneyin sonuçlarına göre ideal voltajın 3kV ile 5kV arasında olduğu, en iyi reaksiyonu verdiği ve zarar görmediği tespit edilmiştir. DE'ya uygulanan gerilimin 5.5 kV üzeri olduğunda DEA yüzeyinde meydana gelen sıcaklıkların aniden yükseldiği ve DEA'nın yapısında bozulmaların meydana geldiği ve aktüatör özelliğini kaybettiği gözlemlenmiştir.

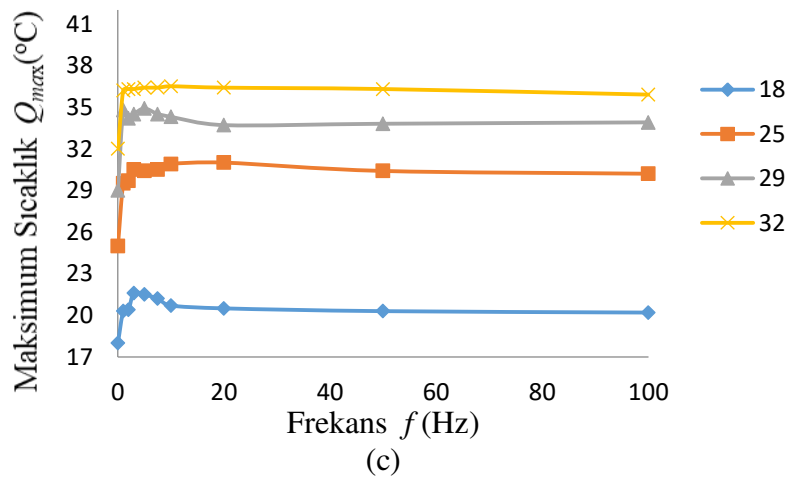
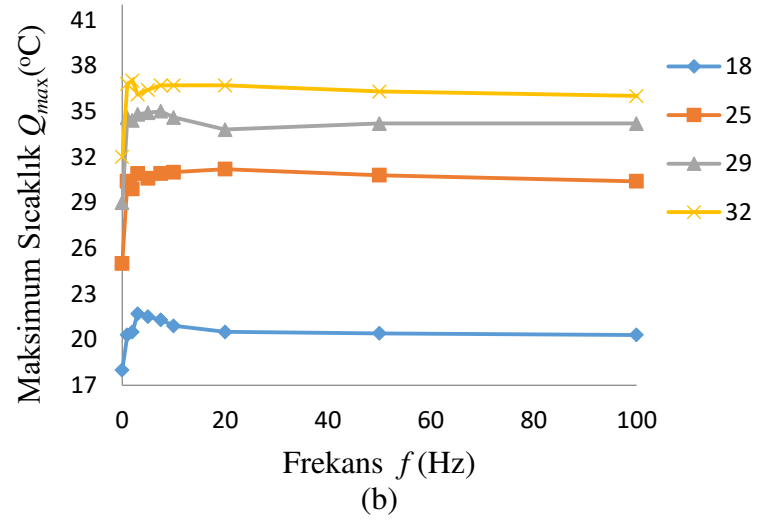
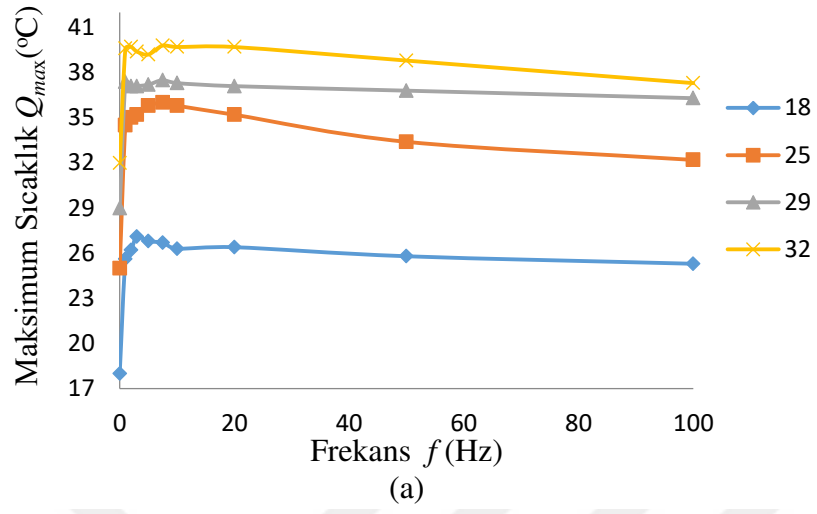
4.2.6. Farklı Ortam Sıcaklıklarında DEA Yüzey Sıcaklık Değişimi

DEA'ya 3.2 kV voltaj ve farklı elektirksel sinyal DEA yüzey sıcaklığını etkileyen ortam sıcaklığının (18°C ila 32°C) etkisi incelenmiştir. Farklı ortam sıcaklıkları altın %20 nem ortamında deneyler test edilmiştir. Ortam sıcaklığı ile doğru orantılı değiştiği ve DEA'nın bulunduğu ortam sıcaklığı artırıldığında DEA yüzeyinde oluşan sıcaklık değeri de arttığı görülmüştür. Ortam sıcaklığının farklı olduğu ortamlarda Şekil 4.21.'de ki gibi farklı elektrik sinyallerinin sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Yapılan deneylerde DEA yüzey sıcaklığı kare dalga formunda ve ortam sıcaklığı artırıldığında daha yüksek çıkmıştır. Sinüs ve üçgen dalga formlarının frekans değişimleri incelendiğinde DEA yüzey sıcaklık değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Şekil 4.20.'de ortam sıcaklığına bağlı termal kamera görüntüleri yer almaktadır.

Dört farklı sıcaklık ortamında, DEA'nın yüzey sıcaklık değerleri özellikle ani yükselmelerden sonra istikrarlı hale gelmektedir. Ayrıca tüm elektrik sinyallerde 2Hz ile 10 Hz arasında sıcaklık değerleri daha yüksek çıkmaktadır. Kare dalga formunda DEA'nın yüzey sıcaklığının yüksek çıkması yanında deformasyon oranında fazla olduğu gözlemlenmiştir(Bknz 4.21).



Şekil 4. 20. 18°C sıcaklık ortamında, farklı elektrikselsinyaller uygulanan DEA'nın yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimi termal kamera görüntüleri.

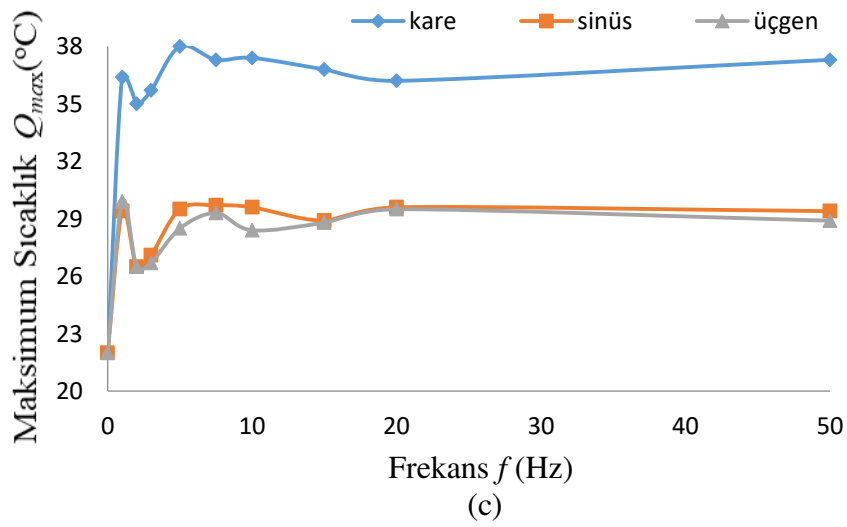
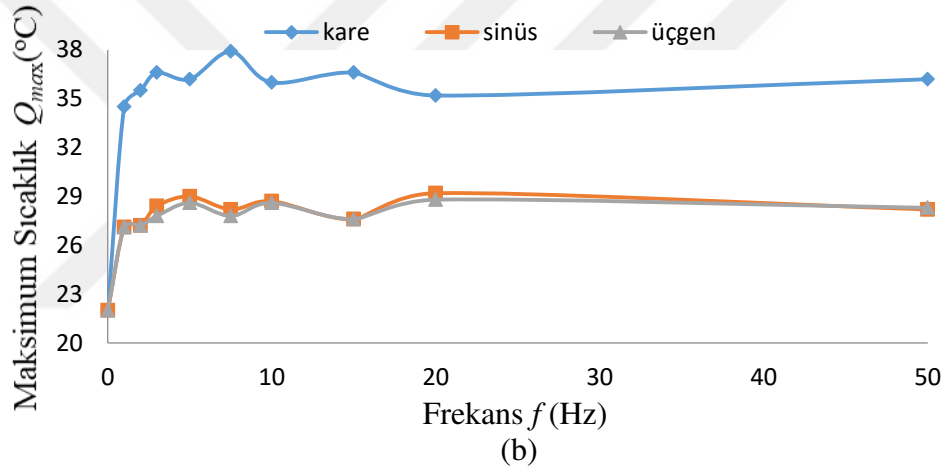
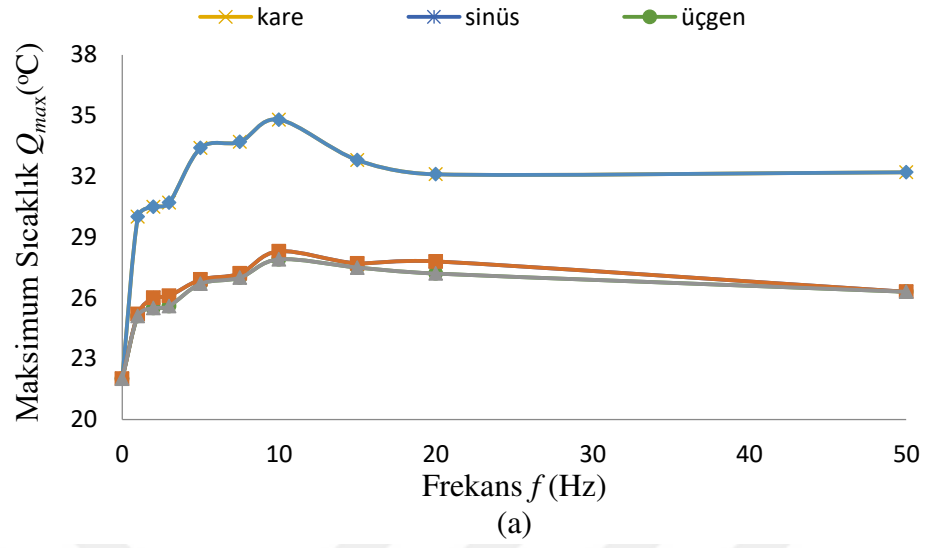


Şekil 4. 21. DEA yüzeyinde farklı frekans seviyelerinde ve farklı sıcaklık ortamlarında sıcaklık değişimi (a) kare dalga formu (b) sinüs dalga formu (c) üçgen dalga formu

4.2.7. Farklı Ön-Germe Oranlarında DEA Yüzey Sıcaklıkları

Ön-germe, DEA'nın sıcaklığını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Ön-germe oranı arttıkça sıcaklık değerlerinin de önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. 22°C ortam sıcaklığında ve %20 nemde ölçülen DEA yüzey sıcaklıkları Şekil 4.22'de gösterildiği gibi oluşur. 3 farklı ön gerdirilmiş elastomer için farklı frekanslarda sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre en yüksek deformasyon ve sıcaklık artışı ön gerdirme arttıkça elastomerin incelmesinden dolayı kare dalga formunda meydana gelmiştir.

Ön-germe nedeniyle daha düşük gerilimle daha fazla deformasyon meydana gelmektedir. Bu nedenle ön gerdirmenin artmasıyla daha düşük gerilimle daha fazla mekanik hareket oluşturulabilir. Bu deneysel çalışmada, üç farklı ön germe işlemi uygulanmış ve DEA yüzeyinde farklı dalga boylarında meydana gelen sıcaklık değişimleri analiz edilmiştir. Dielektrik elastomer boyutları önce 15X15 mm'den 21X21 mm'ye, ikincisi 20X20 mm'den 31X31 mm'ye ve son olarak 12X12 mm'den 27X27 mm'ye ön gerdirilmiştir. Bu ön gerdirme işlemleri sonucunda, daha fazla ön gerdirme uygulanan DEA'da daha fazla mekanik reaksiyonun gerçekleştiği ve yüzey sıcaklığının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu deneyden uygulanan elektrik alan 3.2kV/10mmX10mm olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. 22. Ön-germe uygulanan DEA’da, farklı elektriksel sinyaller ve frekanslarda meydana gelen sıcaklık değişimleri (a) 15mmX15mm→21mmX21mm (b) 20mmX20mm → 31mmX31mm (c) 12mmX12mm→27mmX27mm.

DEA yüzeyindeki sıcaklık değişimi ile ilgili deneysel çalışmalarla sonucunda ise yüzeydeki en yüksek sıcaklık değerleri 2-10Hz frekans aralığında gözlemlenmiştir. Yüzey sıcaklığının hem yüksek (kHz) hem de düşük (0~1Hz) frekanslarda düştüğü gözlemlenmiştir. DEA yüzey sıcaklıkları kare dalga formunda yüksek, sinüs ve üçgen dalga formlarında daha düşük ve birbirine yakın olarak oluşmuştur. Voltaj arttıkça DEA yüzeyindeki deformasyon ve sıcaklık artmıştır. Ön-germe ve ortam sıcaklığı arttıkça, kare sinüs ve üçgen dalga formlarının frekans seviyelerinde DEA yüzey sıcaklığı artırılmıştır. DEA yüzeyinde meydana gelen sıcaklıklar yukarıda fenomenolojik olarak açıklanmış ve yüksek voltajlarda (5kV üzeri) sıcaklık değerlerinin aniden arttığı gözlemlenmiştir. Son zamanlarda, DEA’ların birçok cerrahi, robotik çalışmada ve yapay kaslar olarak ele alınması nedeniyle sıcaklık değerleri önemlidir. Sıcaklık değerindeki aşırı artış DEA’nın bozulmasına neden olur. Bu nedenle DEA tasarımlarında sıcaklık değişimlerinde frekans tipi ve boyutu, ortam sıcaklığı, uygulanacak voltaj ve ön-germe dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

4.3. Konum Analizi

Bu bölümde ise Dairesel Dielektrik Elastomer Aktüatörler (DDEA) için bir tasarım gerçekleştirilmiştir. DDEA’larda zamana bağlı konum değişimi üzerine deneyler ve simülasyonlar yapılmıştır. DEA’nın yer değiştirmesini nicel olarak görmek için gerilim ve frekans olmak üzere iki faktör göz önünde bulundurulur. Deneysel sonuçlara göre, DEA’nın konumunun değiştirilmesinde gerilim, elektriksel sinyallerin tipleri ve frekans boyutları etkili olduğu görülmektedir. Analizler ve kaydedilen sonuçlar, araştırmacılara DEA’nın bu önemli parametreler üzerindeki kontrolüne bir referans sağlar. Elde edilen sonuçlar, farklı frekans tipi ve farklı frekans boyutu ile DEA konum değişiminde önemli farklılıklar olduğunu göstermiştir. Ayrıca deneyler simülasyon ortamında test edilmiştir. Simülasyonda Yeoh modülü kullanılarak deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu modelde elde edilen test sonuçları ile deneysel sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

DEA'nın kare dalga formunda daha hızlı ve daha fazla yer değiştirme hızı ürettiği görölmektedir. Ayrıca gerilim arttıkça çok yüksek gerilmelerde DEA'da daha fazla kırılma meydana geldiği için yer değiştirme oranındaki deformasyon artar.

DEA'lar doğal kaslara benzer özelliklere sahip olduğundan, bu tür yumuşak aktüatörler genellikle solucan robotları, insan benzeri robotlar ve robotik balıklar gibi biyomimetik yumuşak robotlar geliştirmek için kullanılır (Duduta vd., 2017; Cao vd., 2018). Literatürde çalışma frekansları incelendiğinde frekans arttıkça ve çok küçük frekanslarda DEA deformasyonu azalmaktadır (Ghazali vd., 2017; Zou ve Gu, 2018). Ortalama olarak 5 Hz ile 10 Hz frekansı arasında reaksiyonda bir iyileşme meydana gelirken, reaksiyonun 10 Hz'den daha az gerçekteştiği görölmektedir (Joshiyura vd., 2017; Karaman ve şahin, 2020). Hiperelastik malzemeler birçok endüstride kullanılmaktadır. Kauçuk gibi hiperelastik malzemelerin en önemli özellikleri büyük deformasyonlardır. Gerilme ve gerinim özellikleri lineer olmayan bu malzemelerde yüksek uzama meydana gelir (Sujendra vd., 2018). DEA'nın geometrik boyutları $l_1 \times l_2 \times l_3$ ve tüm yönlerdeki gerilme oranları $\lambda_1 = l_1 / L_1$, $\lambda_2 = l_2 / L_2$ ve $\lambda_3 = l_3 / L_3$ olarak tanımlanmıştır. Burada, l_1 , l_2 ve l_3 , λ_1 , λ_2 ve λ_3 tarafından verilen üç ana sabittir ve temel esneme oranlarıdır.

Kauçuk elastikiyet teorisinde, elastomerin deformasyonuna bağlı olarak elastik enerji için iyi test edilmiş birkaç fonksiyon vardır, örneğin; Neo-Hookean, Mooney-Rivlin, Yeoh, Gent, Ogden ve Arruda-Boyce. Bu modeller, gerilim-gerinim ilişkisini tanımlamak için malzeme parametreleri gerektirir. Bu malzeme parametrelerini elde etmek için en basit yaklaşım, tek eksenli veya çift eksenli çekme testleri yapmaktır. Kauçuk genellikle sıkıştırılmaz, izotropik ve yapısal modeli genellikle gerinim enerjisi yoğunluk fonksiyonları cinsinden tanımlanan hiperelastik malzeme olarak kabul edilir (Mirjavadi vd., 2020). Sayısal analiz, sonlu elemanlar modeli Abaqus'ta Yeoh hiperelastik malzeme modeli kullanılarak gerçekteştirilmiştir. Deneyler Yeoh modeli kullanılarak simüle edilmiştir. Yeoh modelini kullanarak dairesel bir DEA'nın uzamasını incelemek için analitik bir yöntem geliştirilmiştir. Abaqus'ta analiz edilen deformasyonun bir sonucu olarak, çift eksenli basit kesmede Yeoh modeli, malzeme gerinme-gerilme tepkisinin kararlı bir analitik tanımını ve büyük gerilme değerlerinde bile sayısal ve deneysel veriler arasında iyi bir uyum sağlar (Shahzad vd., 2015). Yeoh hiperelastik malzeme modeli, kauçuk gibi neredeyse sıkıştırılmaz,

doğrusal olmayan elastik malzemelerin deformasyonu için kullanılan indirgenmiş üçüncü dereceden bir polinom modelidir. Sıkıştırılabilir bir kauçuk için polinom biçiminde gerinim-enerji yoğunluğu (veya depolanmış enerji yoğunluğu) şu şekilde verilebilir (Yeoh, 1993).

$$W = \sum_{i=1}^3 C_{i0} (\bar{I}_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{D_i} (J_1 - 1)^{2i}$$

(5)

Burada W, referans hacim birimi başına gerinim enerjisini temsil eder. Ayrıca C_{i0} ve D_i , sıcaklığa bağlı malzeme parametrelerini belirtir. Ayrıca, $\bar{I}_1$ ilk hacimde oluşan gerinim değişmezidir ve $\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2$ olarak tanımlanabilir. Burada, hacimde meydana gelen gerinim $\bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_i$ uzanır. Burada J, toplam hacim değişimini temsil eder, ayrıca λ_i , temel esnemeleri ifade eder. Ayrıca, ilk kesme ve yığın modülü sırasıyla $\mu_0 = 2C_{10}$ ve $K_0 = \frac{2}{D_1}$, olarak tanımlanabilir (Gajewski vd., 2015).

Yeoh 1993'te, yalnızca birinci değişmez I_1 'e dayanan üçüncü dereceden bir polinom fenomenolojik model önerdi. Karbon siyahı dolgulu kauçuğun karakterizasyonu için kullanılabilir ve gerilim-gerinim eğrisinin yüksekliğini yakalayabilir. Çok çeşitli gerilimlerle uyumludur ve sınırlı verilerle çeşitli deformasyon modlarını simüle edebilir. Bu, malzeme testi için gereksinimlerin azalmasına yol açar (Renaud vd., 2009).

Bu deneysel çalışmada, DEA'ların elektrik sinyallerine, frekans boyutlarına ve gerilime tepkileri sonucunda konumları araştırılmıştır. Yapılan deneylerde elektrik sinyallerinde kare dalga formunun kısa sürede daha fazla ve daha hızlı yer değiştirdiği tespit edilmiştir. Ayrıca voltaj arttıkça konum da artar. Yüksek gerilim (5kV üzeri) uygulandığında DE'lerin zarar gördüğü tespit edilmiştir. Kare dalga biçimi, zamana bağlı konum için en iyi yanıtı verir. DEA'ların 3kV ile 5kV arasında uygulanan gerilimde etkin bir şekilde çalıştığı görülmektedir. DEA'larda zamana bağlı konum değişiklikleri bir kamera ile kaydedilmiş ve deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca deneylerin sayısal analizleri Abaqus/Standard 3d mühendislik programında yapılmıştır. Simülasyonlarda kullanılan Yeoh modeli ile deneysel sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir.

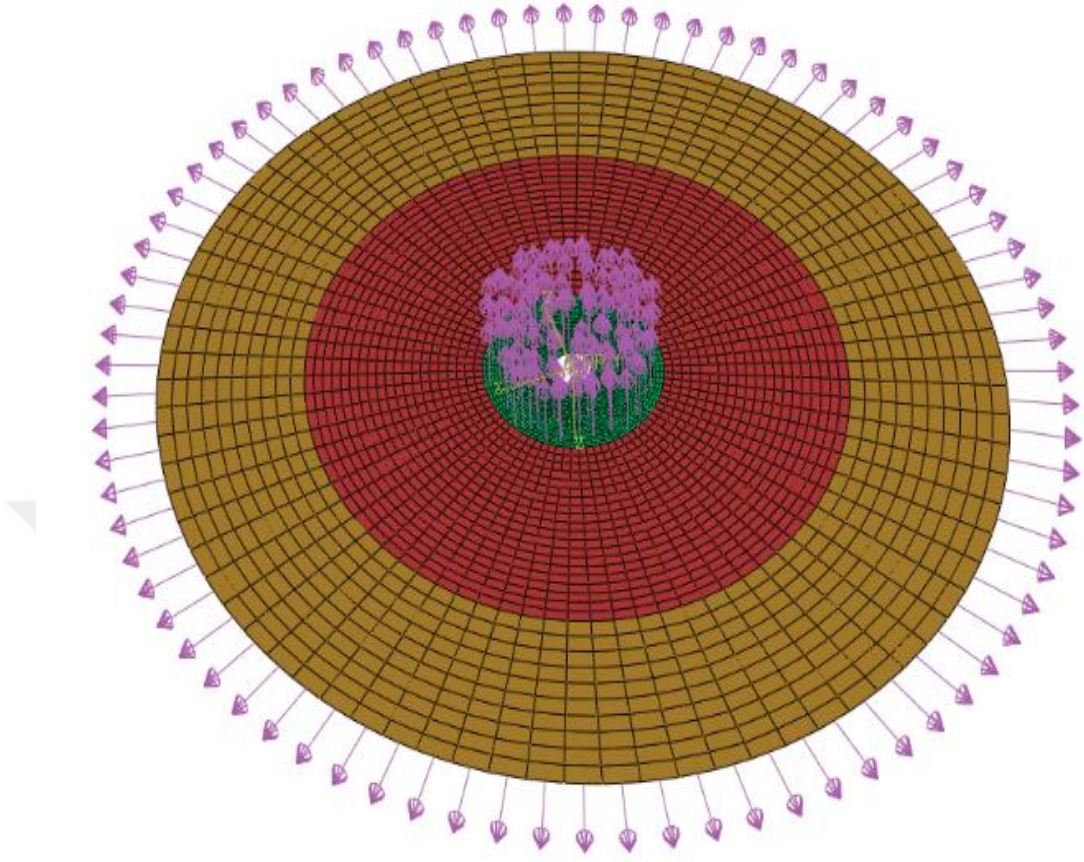
Şekil 4.23.'de gösterilen testin sayısal analizleri Abaqus/Standard 3d mühendislik programında yapılmıştır. Burada kullanılan DE, sonlu elemanlar analizinde

hiperelastik malzeme olarak kabul edilir ve bu malzeme için Tablo 4.4.'de gösterilen değerler kullanılır. Sayısal simülasyonlar üç ana bölüme ayrılır. Birinci bölümde malzemeye öngerilme, ikinci bölümde ise kütleden dolayı ani statik mekanik yükleme uygulanmıştır. Son aşamada ise malzemeye farklı dalga formlarında (kare, sinüs, üçgen ve lineer) uygulanan gerilimden kaynaklanan mekanik yükler uygulanmıştır. Hiperelastik malzemelerin mekanik karakterizasyonu için geliştirilmiş birçok malzeme modeli olmasına rağmen, literatürden elde edilen sabitlerle (Tablo 4.4) Yeoh modeli statik sapma açısından deneysel sonuçlara göre en doğru tahminleri sağlamıştır. Bu nedenle simülasyonlarımızda kurucu malzeme modeli olarak Yeoh modeli tercih edilmiştir. Son aşamada, DEA'ya kare, sinüs ve üçgen gibi farklı dalga formlarında uygulanan gerilimin neden olduğu mekanik yükler uygulanmıştır.

Tablo 4. 4. Yeoh katsayıları, Abaqus/Standart 3B form, malzeme modeli (Shahzad vd., 2015).

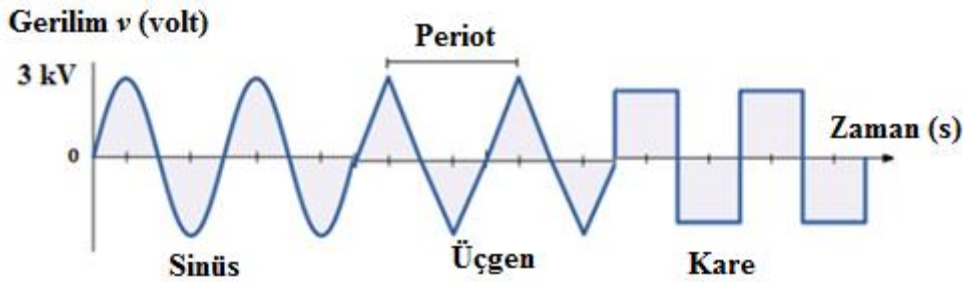
C₁₀ (MPa)	C₂₀ (MPa)	C₃₀ (MPa)	D₁	D₂	D₃
0.2019	4.43e ⁻⁵	1.295e ⁻⁴	2.1839e ⁻³	8.68e ⁻⁵	-1.794e ⁻⁵

Sayısal hesaplamalar için kabuk eleman formülasyonu kullanılmıştır. Yapılan testlerin sonlu eleman model tasarımı gerçekleştirilmiştir (Bkz. Şekil 4.23.). Ayrıca simülasyonlarda mekanik yükü tanımlamak için kullanılan kare, sinüs ve üçgen dalga formlarının grafiği Şekil 4.24.'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 23. Farklı elektriksel dalgalara maruz kalan dielektrik elastomerlerin sonlu eleman modeli.

Elektrik sinyallerinde t anında dalganın genliği DEA deformasyonunu etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Kare dalga formunda genlik arttırıldığında, doğrusal bir elektrik sinyali elde edildiğinden, DEA'da mekanik uzama daha fazla meydana gelir. Burada sinüs dalga biçiminin genliği, $\ln$ dalga boyu, c yayılma hızı ve f frekansı ile $k = \omega/c = 2\pi f/c = 2\pi/\ln$ denklemindeki bir çizgi boyunca dalganın genliğini verir. Uygulanan voltaj $V(t) = \sin(\omega t)V$, 1 hz ile 20 hz arası frekans uygulanmıştır.

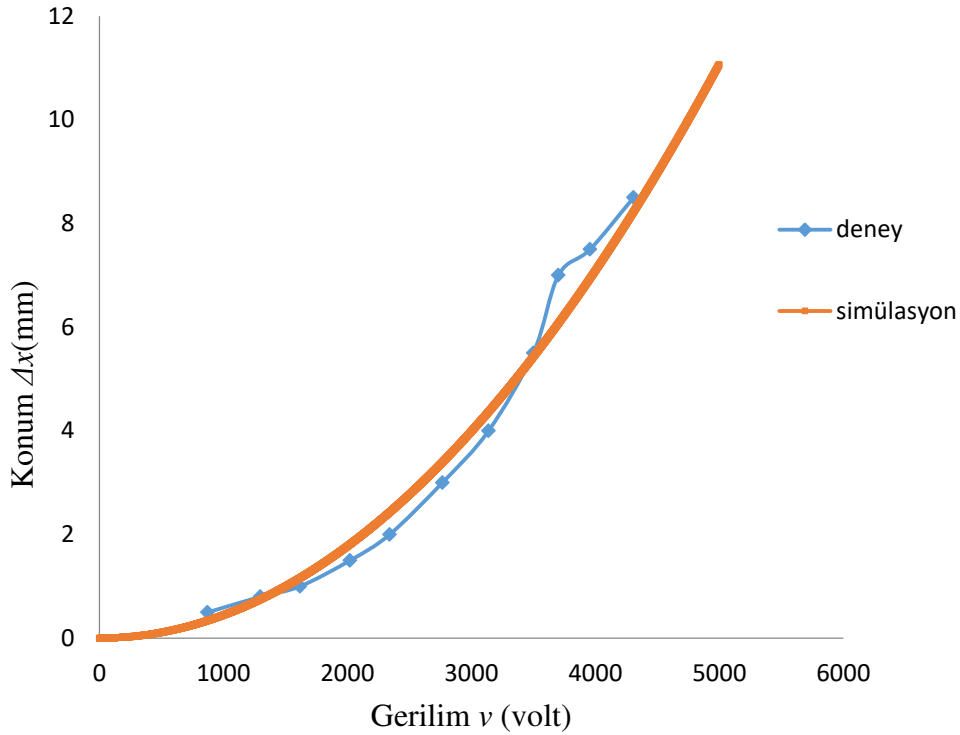


Şekil 4. 24. DEA'ya uygulanan elektriksel sinyal grafiği.

0 ~ 5V'luk bir uyarıcı girişı oluştuğunda 8 kV'a ulaşan DE aktüatörünü sürmek için yüksek bir voltaj kaynağı kullanılır. Yüksek gerilimi görebilmek için paralel bağlı dirençlerden yararlanılarak voltmetrenin bir direncine düşen gerilim bulunur ve bir direnç üzerindeki gerilimin diğer dirençlerin toplamı sonucu çarpılmasıyla elde edilir.

4.3.1. Doğrusal Voltaj Uygulanan DEA'da Konum Değişimi

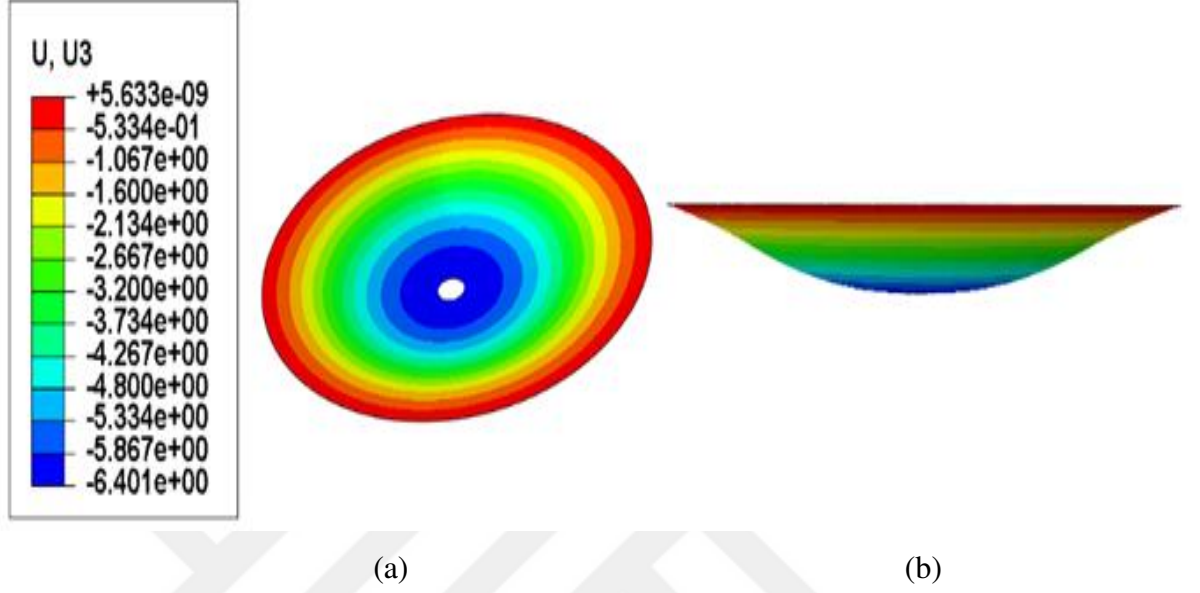
DEA'ya doğrusal gerilim uygulandığında konum ve gerilim değişimi Şekil 4.25.'de görülmektedir. Simülasyon ile elde edilen deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. DEA'daki uzamanın gerilim arttıkça daha fazla olduğu görülmektedir. Yüksek gerilimlerde (5kV üzeri) DEA arıza olduğu için deformasyon özelliği kaybolur. Düşük voltajlarda, DEA üzerindeki düşük elektromekanik yükleme nedeniyle uzama daha azdır.



Şekil 4. 25. Deney ve simülasyonda doğrudan form dalgasına maruz kalan dielektrik elastomerin yer değiştirme grafiği.

Deneylerde kullanılan ölçümlerde elde edilen sonuçlarla Yeoh modeli kullanılarak doğrudan DEA'ya voltaj uygulanarak Şekil 4.26.'da gösterilen simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyon 3 kV gerilim altında uygulanmıştır. Deney ve

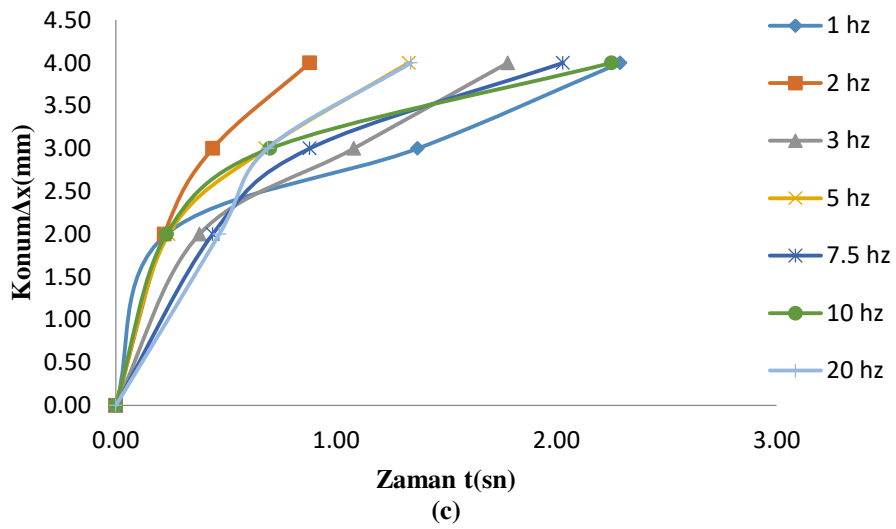
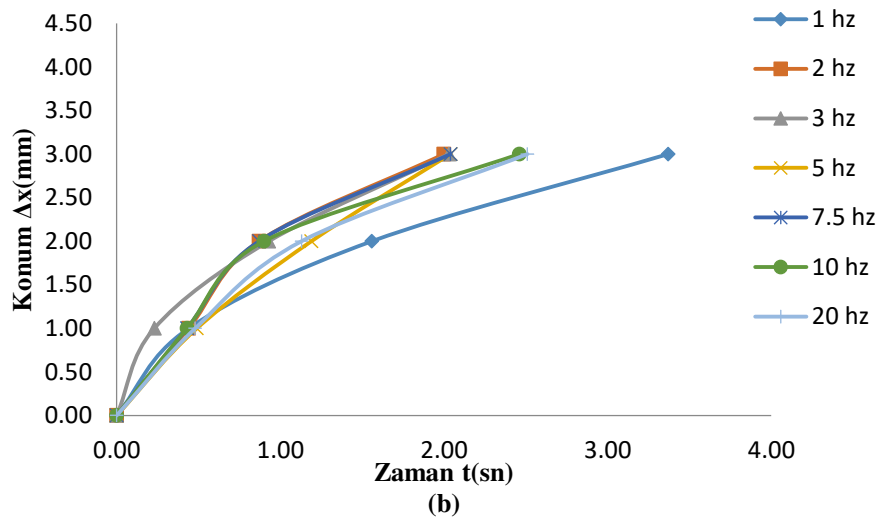
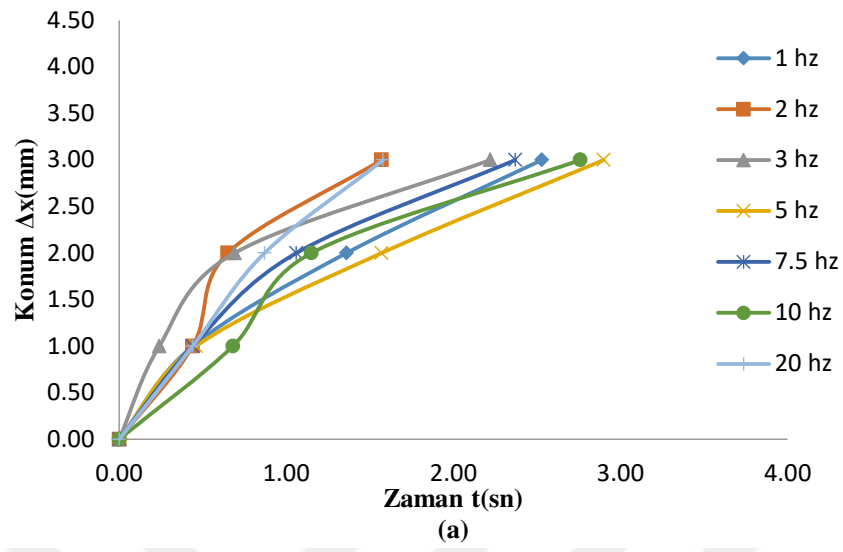
simülasyon sonuçları karşılaştırıldığında konik bir yapının oluştuğu görülmektedir. Deney ve simülasyonda konum değişikliklerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 26. Doğrudan form dalgasına maruz kalan dielektrik elastomerin yer değiştirme konturu, (a) İzometrik Görünüm, (b) Önden Görünüm.

4.3.2. DEA'nın Farklı Frekanslarda Zamana Göre Konum Değişimi

3kV gerilim ve 1Hz ile 20Hz frekans aralığında uygulanan bir DEA, elektrik sinyallerinin zamana bağlı değişimi (kare, sinüs ve üçgen) incelenmiştir. Deneylerde kare dalga biçimindeki konum değişikliğinin sinüs ve üçgen dalga biçimlerinden daha fazla olduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda kare dalga biçimindeki konum değişikliği diğer dalga biçimlerinden daha hızlı yanıt verir. Şekil 4.27. ve Tablo 4.5.' de gösterildiği gibi, kare dalga formunda 3 kV gerilim uygulandığında farklı frekanslarda 4 mm uzama meydana gelirken, sinüs ve üçgen dalga formlarında 3mm uzama meydana gelmiştir. Bu grafiğe göre elde edilen zamana bağlı konum değişimi, diğer dalga formlarının kare dalga formuna göre hem zaman bakımından maksimum ulaşabildiği nokta daha geç gerçekleşmekte hemde deplasman farkı daha az oluşmaktadır.



Şekil 4. 27. a) sinüs dalgası, (b) üçgen dalga ve (c) kare dalgaya maruz kalan dielektrik elastomerin konum grafiği.

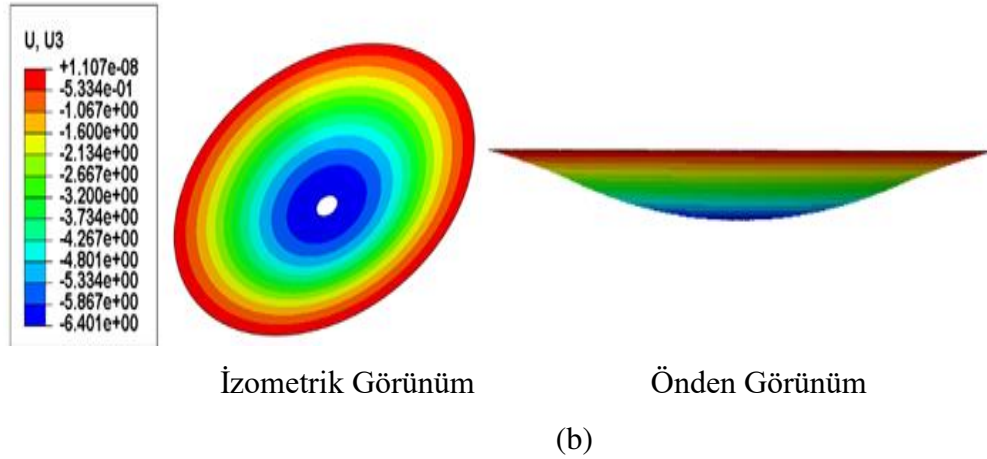
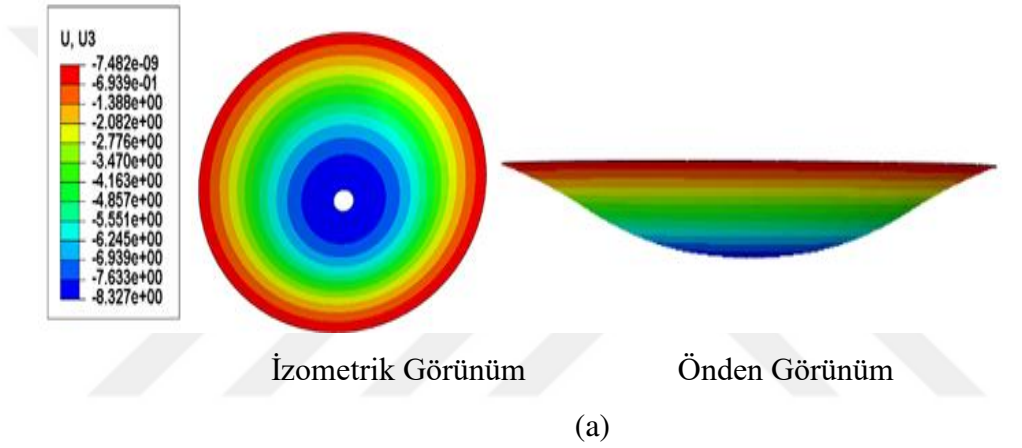
Frekans boyutları incelendiğinde en hızlı tepkime 2 Hz düzeyinde gerçekleşmektedir. Sinüs ve üçgen dalga formlarında 2 Hz'nin altında 3 mm'ye kadar düştüğü görülürken, daha yüksek frekanslarda düşme daha da artmaktadır. Sinüs ve üçgen dalga formları birbirine yakındır. Sinüs dalga formu, üçgen dalga formuna kıyasla daha hızlı yanıt vermektedir.

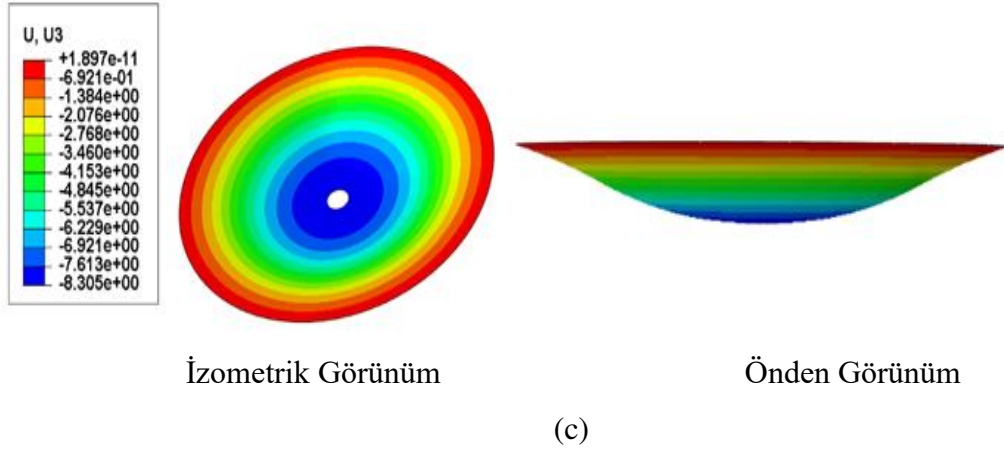
Tablo 4. 5. Farklı elektriksel sinyal ve frekansların dairesel bir DEA'da meydana gelen anlık konum-zaman deney sonuçları.

Frekans(Hz)	Sinüs dalga							
	$t_0(^*)$	$\Delta_{x0}(^{**})$	$t_1(^*)$	$\Delta_{x1}(^{**})$	$t_2(^*)$	$\Delta_{x2}(^{**})$	$t_3(^*)$	$\Delta_{x3}(^{**})$
1 Hz	0,00	0,00	0,440	1,00	1,360	2,00	2,530	3,00
2 Hz	0,00	0,00	0,440	1,00	0,650	2,00	1,570	3,00
3 Hz	0,00	0,00	0,240	1,00	0,690	2,00	2,220	3,00
5 Hz	0,00	0,00	0,460	1,00	1,570	2,00	2,900	3,00
7.5 Hz	0,00	0,00	0,440	1,00	1,060	2,00	2,370	3,00
10 Hz	0,00	0,00	0,680	1,00	1,150	2,00	2,760	3,00
20 Hz	0,00	0,00	0,440	1,00	0,870	2,00	1,580	3,00
Frekans(Hz)	Üçgen dalga							
	$t_0(^*)$	$\Delta_{x0}(^{**})$	$t_1(^*)$	$\Delta_{x1}(^{**})$	$t_2(^*)$	$\Delta_{x2}(^{**})$	$t_3(^*)$	$\Delta_{x3}(^{**})$
1 Hz	0,00	0,00	0,44	1,00	1,56	2,00	3,37	3,00
2 Hz	0,00	0,00	0,44	1,00	0,87	2,00	2,00	3,00
3 Hz	0,00	0,00	0,23	1,00	0,93	2,00	2,03	3,00
5 Hz	0,00	0,00	0,49	1,00	1,19	2,00	1,89	3,00
7.5 Hz	0,00	0,00	0,43	1,00	0,87	2,00	2,04	3,00
10 Hz	0,00	0,00	0,43	1,00	0,90	2,00	2,46	3,00
20 Hz	0,00	0,00	0,48	1,00	1,13	2,00	2,51	3,00
Frekans(Hz)	Kare dalga							
	$t_0(^*)$	$\Delta_{x0}(^{**})$	$t_1(^*)$	$\Delta_{x1}(^{**})$	$t_2(^*)$	$\Delta_{x2}(^{**})$	$t_3(^*)$	$\Delta_{x3}(^{**})$
1 Hz	0,00	0,00	0,23	2,00	1,37	3,00	2,29	4,00
2 Hz	0,00	0,00	0,22	2,00	0,44	3,00	0,88	4,00
3 Hz	0,00	0,00	0,38	2,00	1,08	3,00	1,78	4,00

5 Hz	0,00	0,00	0,24	2,00	0,68	3,00	1,33	4,00
7.5 Hz	0,00	0,00	0,44	2,00	0,88	3,00	2,03	4,00
10 Hz	0,00	0,00	0,23	2,00	0,70	3,00	2,25	4,00
20 Hz	0,00	0,00	0,47	2,00	0,69	3,00	1,34	4,00

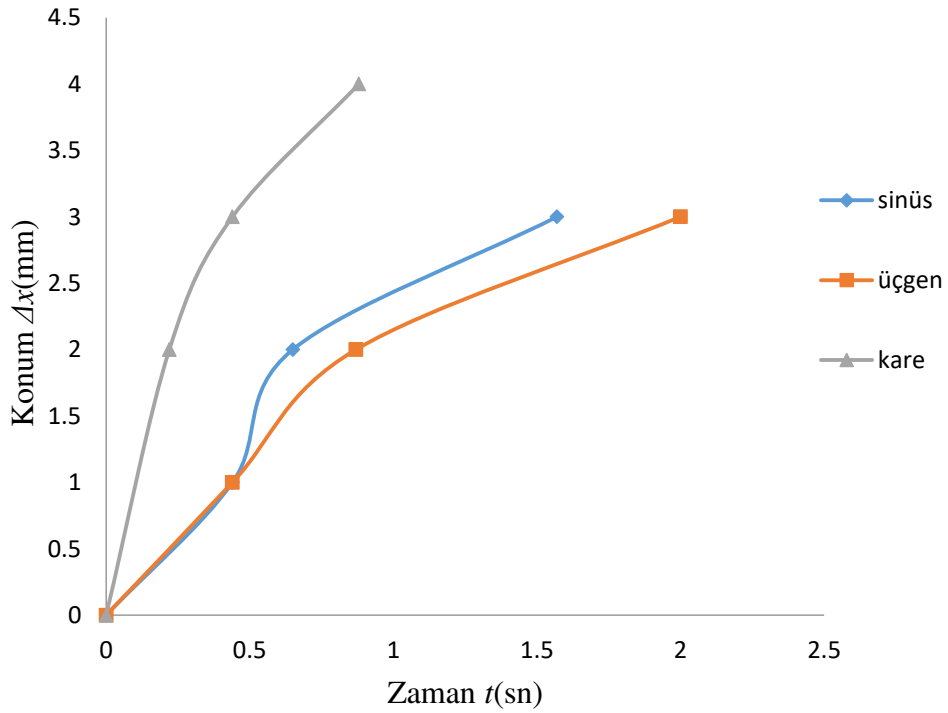
Sayısal hesaplamalarda, Şekil 4.28.'de gösterilen kabuk eleman formülasyonu ve sonlu eleman modeli farklı elektrik sinyallerine uygulanmaktadır. Elde edilen simülasyon sonuçlarında kare dalga formunda daha fazla uzama meydana geldiği görülmektedir.





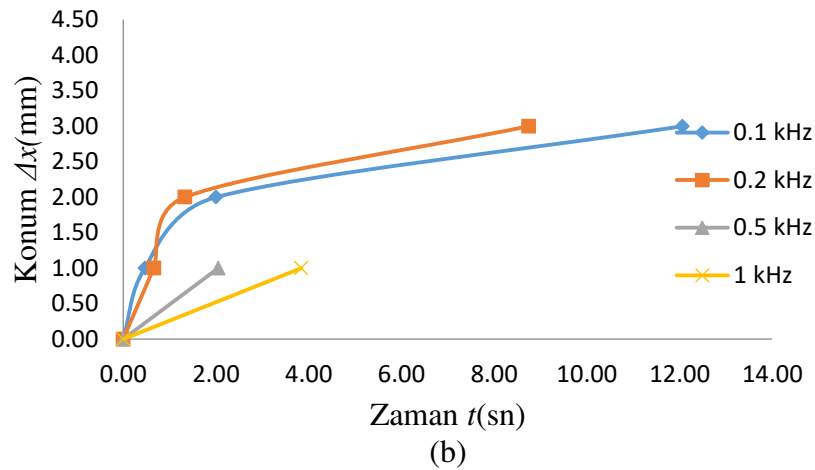
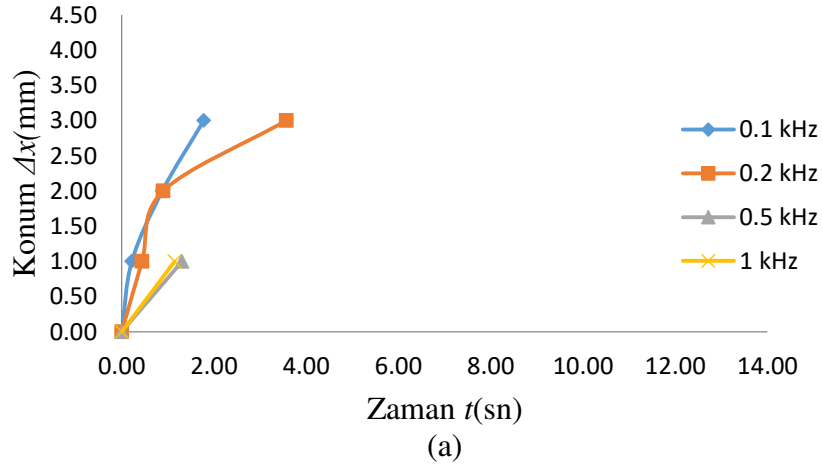
Şekil 4. 28. (a) kare dalga, (b) üçgen dalga ve (c) sinüs dalga; 3kV gerilim altında ve 20 Hz frekanslara maruz kalan dielektrik elastomerin yer değiştirme konturu.

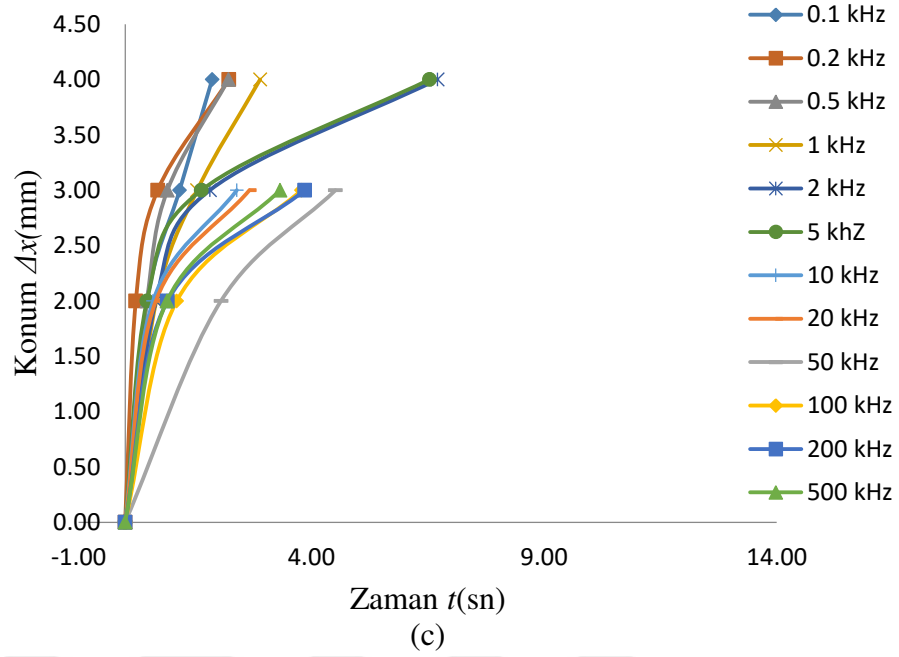
Farklı frekansların en hızlı tepki verdiği aralık 2 ile 20 Hz arasındadır. Bu frekanslar arasında Şekil 4.29.'de belirtilen farklı dalga biçimlerinin en hızlı tepkisi 2 hz ve kare dalga biçiminde meydana gelmektedir.



Şekil 4. 29. 3 kV gerilim ve 2 Hz frekansları altında dalga biçimlerine (sinüs, üçgen ve kare) maruz kalan dielektrik elastomerin konum grafiği.

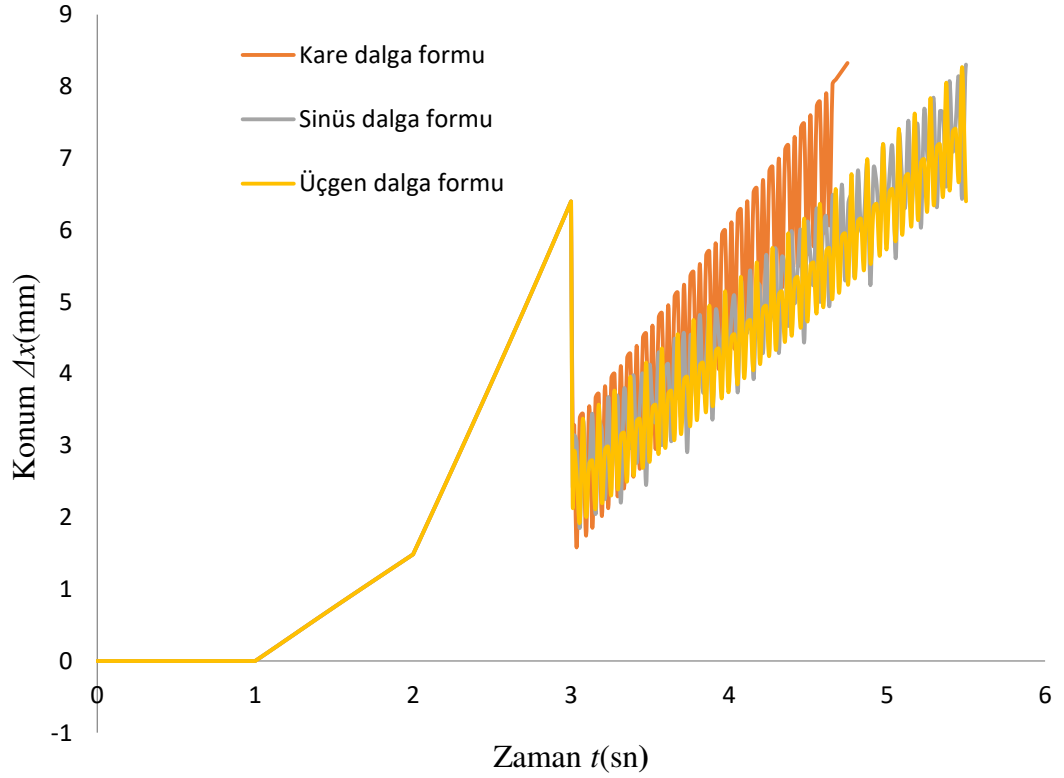
DEA yanıtı düşük frekanslarda lineer iken, yüksek frekanslarda hızlı deforme olamadığı için konum değişimi daha yavaş ve daha az sıklıkta olmaktadır. Sinüs ve üçgen dalga formlarında 1 kHz'e yaklaştıkça konum değişikliği 1 mm azalır ve daha yüksek frekanslarda reaksiyon olmaz. Reaksiyonun üçgen dalga biçiminde yüksek frekanslarda sinüs dalga biçimine göre daha yavaş gerçekleştiği görülmektedir. Kare dalga formunda ise 10 kHz'in üzerinde reaksiyon azalır (3 mm) ve reaksiyon süresi artar. Kare dalga formunda işlem süresinin 2 kHz ila 5 kHz seviyesinde arttığı ve 4 mm'ye ulaştığı görülmektedir. Yüksek frekans seviyelerinde kare dalga formunun sinüs ve üçgen dalga formlarına göre daha yüksek konum değişikliği ile daha hızlı tepki verdiği tespit edilmiştir (Bkz. Şekil 4.30.).





Şekil 4. 30. Yüksek frekansta (kHz) (a) sinüs dalga, (b) üçgen dalga ve (c)kare dalgaya maruz kalan dielektrik elastomerin konum grafiği.

Dairesel bir DEA'nın yer değiştirme miktarları, farklı frekanslarda mekanik bir yük, birinci aşama öngerme, ikinci aşama statik yük ve son olarak elektrik sinyali kullanılarak zaman içinde simüle edilir. Bu simülasyonda uzama ve zaman grafikleri Şekil 4.31'de verilmiştir. 20 Hz farklı elektrik sinyallerinin altında zamana bağlı yer değiştirme miktarları elde edilmektedir. Kare dalga formunda 4 mm'nin üzerinde, üçgen ve sinüs dalga formlarında ise 3 mm ile 4 mm arasında olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 31. Farklı elektriksel dalga biçimlerine maruz kalan dielektrik elastomerin konum grafiği.

DeneySEL sonuçların analizi ve simülasyondan elde edilen veriler incelendiğinde, elastomer kalınlığının incelenmesi ve DEA üzerindeki elektrostatik basıncın artması sonucu konum değışikliğı meydana gelmektedir. Konum analizinde, DEA'ya uygulanan elektriksel sinyaller ve voltaj sonucu oluşan konum değışiminin deneySEL çalışmasını ve simülasyonunu sunmaktayız. Konum analizinde görölmektedir ki; DDEA, gerilim konum değışiminde 3kV ile 5kV arasında etkili sonuçlar vermiştir. DDEA'da farklı elektrik sinyallerinin tepkimelerinde önemli farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Yer değıştirme oranı hem kare dalga formunda hem de 2 Hz ile 10 Hz arasındaki frekanslarda en yüksekte olduğu saptanmıştır. Yeoh modeli ve deneyleri birbiriyle kıyaslandığında uyumlu görölmektedir. Yüksek frekanslarda (kHz) düşük deformasyon nedeniyle yer değıştirme daha az gerçekleştiğı saptanmıştır.

DDEA'ların sonuçlara göre araştırmacılar, en uygun frekans aralığı ve gerilim oranına göre deformasyonu üzerine yapılan çalışmalarda DE aktüatörünün uygun değerlerde tutulmasını sağlayabilirler. Ayrıca deneyde kullanılan DE'nin boyutları

Abaqus/Standar 3d programına aktarılmış ve deformasyon testleri ile deneysel veriler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bu sonuçlar bir DEA'da robotik veya cerrahi uygulamalarda yer değiştirme oranının belirlenmesine katkı sağlayacaktır.

5. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bir yapay kas oluşturmak, bilim ve mühendisliğin en büyük zorluklarından biri görülsede esnek çok yönlü ve güç açısından verimli bir aktüatörün icadı, hafif, yüksek verimliğe sahip ve çok işlevli robotik geliştirmeyi amaçlamaktadır. En çok araştırılan EAP'lerden bazıları, büyük gerilmeleri, kırılma tokluğu ve güç-ağırlık oranları doğal kas ile olumlu şekilde karşılaştırılan DE'ler dir. Son yıllarda yapay kas olarak bilinen DEA'lar sıcaklık ve voltaj açısından önemli aralıklarını iyileştirmeyi, malzemelere yeni işlevler eklemeyi ve bağımlı oldukları bileşenlerin güvenilirliğini iyileştirmeyi içeren temel sorunlar ortaya çıkmaktadır. DEA'lar doğal kaslara tam olarak benzemesede, doğal kasların stres, gerinim, kuvvet yoğunluğu ve elastikiyet gibi birçok önemli özelliğine bezer özellikler taşıması nedeniyle yapay kas olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu tezde ise DEA'ların sayısal analizleri, sıcaklık karakterizasyonları ve DEA'nın merkezine bağlanan bir yükün konumunda meydana gelen değişimler incelenmiştir. DE malzemeleri piyasada ticari olarak üretilen 3M VHB-4910 veya 3M VHB-4905 kullanılarak aktüatörler oluşturulmuş ve deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerde bu malzemeye ön-germe işleminin aktüatör olarak hareket işleminin gerçekleşmesini sağlamada önemli bir faktör olduğu görülmüştür. DEA'lar gerilim verildikten sonra bir kapasitör gibi görev yapmaktadır. DEA'larda gerilim kesildikten sonra da üzerinde elektrik alanı bulunmakta ve kısa devre yapılarak kapasitör görevi yapan DEA deşarj (kısa devre) edilmiştir. Aynı zamanda elastomerin Dc gerilimlerinde oluşan yüksek güç tüketmesiyle kaçak akım oluşumuna neden olur. DEA'ların zarar görmemesi için yalıtılması ve yüksek gerilim uygulanan cihazın kısa devre edilmemesi gerekir. Yüksek gerilim altında (DEA>3kV) DEA yalıtım yapılmaz ise havadan da kısa devre meydana gelmesiyle cihazlar zarar görmektedir.

Dielektrik malzemenin bozulması, ince membran nedeniyle kısa devre yapılması ve gereğinden fazla voltaj uygulanması aktüatöre zarar veren sebeplerdir. Uygun malzemelerin seçimi, üretim tekniğindeki iyileştirmeler ve olası ön-germe, yeni

aktüatörün çalışma performanslarını potansiyel olarak iyileştirecek önemli faktörlerdir. DEA'lar, yumuşak robotlarda umut verici bir uygulama potansiyeline sahiptir.

Bu tezde elektriksel sinyallerin tipleri, frekans boyutları, ön-germe, gerilim gibi birçok etmen ele alınmış ve deneysel testler gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak yapılan deney ve sayısal analizlerde;

- Ön-germenin oranının DEA'nın deformasyonunu doğrudan etkilediği görülmüştür.
- Dielektrik dirençleri farklı olması sebebiyle VHB-4910, VHB-4905'e göre daha fazla uzama ve esnekliğe sahiptir.
- Deney ve sayısal analizlerde gerilim arttıkça deformasyon arttığı görülmüştür.
- 5kV üzeri gerilim uygulanan DEA'da bozulmalar meydana gelmektedir.
- Ön-germe oranı %100 arttırıldığında 3kV ile 5kV arası en uygun gerilim aralığı olduğu tespit edilmiştir.

DEA yüzey sıcaklık deneylerinde;

- Elektriksel sinyallerde kare dalga formunda en yüksek sıcaklık oluştuğu ve deformasyonun fazla oluşur.
- Gerilim arttıkça sıcaklık değerleride armaktadır. Özellikle 5kV ve üzeri DEA'ya uygulandığında sıcaklık ($\sim 100^{\circ}\text{C}$ ve üzeri) ani yükselmektedir.
- Hem yüksek (kHz düzeyinde) hem de düşük (0~1Hz) frekanslarda, DEA yüzeyinde meydana gelen sıcaklık düşmektedir. Ayrıca yüksek frekanslarda zaman içinde DEA'larda bozulmalar meydana gelmektedir.
- Sinüs ve üçgen dalga formlarında sıcaklık değerleri birbirlerine yakın seyretmektedir.
- Ortam sıcaklığı, ön-germe oranı, gerilim arttıkça DEA'nın yüzey sıcaklığı da artmaktadır. Elektriksel sinyal tipleri ve frekans boyutları DEA yüzeyinde meydana gelen sıcaklığı etkilemektedir.

Yapay kas olarak düşünülen bir DEA'da sıcaklık değerleri, DEA'nın performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle, DEA'nın sıcaklığa dayalı tasarımı için frekans tipi, genliği, ortam sıcaklığı, uygulanan elektriksel gerilim ve ön-germe gibi etmenlerin yapılacak çalışmalarda dikkate alınması gerekmektedir.

Son olarak dairesel bir DEA’da meydana gelen konum değişimi analizi ve simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçların ve simülasyonundan elde edilen verilerin analizi incelendiğinde elastomerin kalınlığındaki incelme ve DEA üzerindeki elektrostatik basıncı artması sonucu konum değişimi meydana gelmektedir. DDEA üzerine uygulanan ön-germe, elektriksel sinyallerin ve gerilimin sonucunda konum değişiminin deneysel çalışmasını ve simülasyonunu sunulmuştur. Simülasyon ve deneylerde doğrusal gerilim, kare, sinüs ve üçgen olmak üzere dört farklı deney yapılmıştır. Bu deney ve simülasyonlarda;

- DEA’nın konum değişimini etkileyen en önemli faktör gerilimdir. DEA’ya 3kV ile 5kV uygulanan gerilimle arasında etkin sonuçlar elde edilmiştir.
- Elektriksel sinyallerin farklı olması da konum-zaman değişimi için oldukça önemli bir etmendir. Kare dalga formunda daha fazla uzama ve hızlı gerçekleşirken, sinüs ve üçgen dalga formlarında daha az uzama ve daha yavaş gerçekleşmiştir.
- Yeoh modeli uygulanan simülasyonlarla deneyler birbirleriyle uyumlu olduğu görölmüştür.
- Frekans boyutları konum değişimini etkileyen bir diğer faktördür. 2 Hz ile 10 Hz arası uzama miktarı ve hızı fazladır.
- Yüksek frekanslarda(kHz) hem deformasyon azalmaktadır hemde DEA’da tepkime hızı yavaşlamaktadır.

DDEA’nın deneysel sonuçlarına göre araştırmacılar en uygun elektriksel sinyal tipi, frekans aralığı ve gerilim miktarı, DE aktüatörün tepkimesi üzerine yapılacak çalışmalarda önemli katkılar sağlayacağı düşünölmektedir.

Bu çalışmaların sonuçları incelendiğinde yapay kas olarak bilinen bir DEA’da robotik, cerrahi, askeri gibi birçok alanda olduğu gibi hassas işlemlerin yapılmasında da fayda sağlayacaktır. Özellikle gerilim, elektriksel sinyal tipi, frekans boyutu ve ön-germe gibi etmenlerin DEA alışma davranışı önemli ölçüde etkilediği ve bu sonuçların araştırmacılara fayda sağlayacağı düşünölmektedir. Son zamanlarda güröltüsüz, yüksek basına dayanıklı olması ve uzun ömürlü olmaları sebebiyle kesif araçları olarakda ilgi çekmektedirler. DE teknolojisinin kendisinde, bu teknolojinin

birçok uygulamaya uygunluğunu daha da etkileyebilecek önemli gelişmeler için hala birçok fırsat bulunmaktadır.

6. KAYNAKLAR

- Aabloo, A., Belikov, J., Kaparin, V., & Kotta, Ü. (2020). Challenges and perspectives in control of ionic polymer-metal composite (IPMC) actuators: a survey, *IEEE Access*, 8, 121059-121073. Erişim: 3 Temmuz 2020, IEEE.
- Alekseyev, N. I., Khmel'nitskiy, I. K., Aivazyan, V. M., Broyko, A. P., Korlyakov, A. V., & Luchinin, V. V. (2021). Ionic EAP Actuators with Electrodes Based on Carbon Nanomaterials, *Polymers*, 13(23), 4137. Erişim: 20 Kasım 2021, MPDI.
- Araromi, O. A., Gavrilovich, I., Shintake, J., Rosset, S., Richard, M., Gass, V., & Shea, H. R. (2014). Rollable multisegment dielectric elastomer minimum energy structures for a deployable microsatellite gripper. *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, 20(1), 438-446, Erişim: 26 Haziran 2014, IEEE.
- Ashley, S. (2003). Artificial muscles, *Scientific American*, 289(4), 52-59, Erişim: 4 Ekim 2003, Scientific American, a division of Nature America, Inc.
- Bar-Cohen, Y. (2002). Electroactive polymers as artificial muscles: A review, *Journal of Spacecraft and Rockets*, 39(6), 822-827. Erişim: 23 Mayıs 2012, ARC.
- Bar-Cohen, Y. (2004). EAP as artificial muscles: progress and challenges, In *Smart Structures and Materials 2004: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, 5385, 10-16. Erişim: 27 Temmuz 2004, Spie Digital Library.
- Bar-Cohen, Y. (2003). Actuation of biologically inspired intelligent robotics using artificial muscles, *Industrial Robot*, Vol. 30 No. 4, pp. 331-337. Erişim: 1 Ağustos 2003, IEEE.
- Bar-Cohen, Y., & Anderson, I. A. (2019). Electroactive polymer (EAP) actuators-background review, *Mechanics of Soft Materials*, 1(1), 1-14. Erişim: 22 Mart 2019, Springer Link.

- Barnes, A., Liu, Q., Young, G., & Lu, T. F. (2007). Evaluation of selected dielectric elastomers for use in an artificial muscle actuator. In *Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation* (pp. 1-9). Erişim: Ocak 2007, ResearchGate.
- Bashir, M., & Rajendran, P. (2018). A review on electroactive polymers development for aerospace applications, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 29(19), 3681-3695. Erisim: 12 Ekim 2018, SAGEJournals.
- Baughman, R. H. (1996). Conducting polymer artificial muscles. *Synthetic metals*, 78(3), 339-353. Erişim: şubat 1999, ScienceDirect
- Baughman, R. H., Shacklette, L. W., Elsenbaumer, R. L., Plichta, E. J., & Becht, C. (1991). Micro electromechanical actuators based on conducting polymers. In *Molecular Electronics* (pp. 267-289). Erişim: Temmuz 1991, Springer Link.
- Brochu, P., & Pei, Q. (2012). Dielectric elastomers for actuators and artificial muscles. *Electroactivity in polymeric materials*, 1-56. Erişim: 2 Mart 2012, SpringerLink.
- Brost, R. C. (1992). Dynamic analysis of planar manipulation tasks, In *Proceedings 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2247-2254. Erişim: Ocak 1992, IEEE Computer Society.
- Buckner, T. L., White, E. L., Yuen, M. C., Bilodeau, R. A., & Kramer, R. K. (2017). A move-and-hold pneumatic actuator enabled by self-yumuşakening variable stiffness materials. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (pp. 3728-3733). Erişim: 14 Aralık 2017, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS).
- Cao, J., Liang, W., Ren, Q., Gupta, U., Chen, F., & Zhu, J. (2018). Modelling and control of a novel yumuşak crawling robot based on a dielectric elastomer actuator. In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 4188-4193). Erişim: 13 Eylöl 2018, IEEE.
- Carpi, F., Bauer, S., & De Rossi, D. (2010). Stretching dielectric elastomer performance. *Science*, 330(6012), 1759-1761. Erişim: 20 Aralık 2010, Science.
- Carpi, F., Chiarelli, P., Mazzoldi, A., & De Rossi, D. (2003). Electromechanical characterisation of dielectric elastomer planar actuators: comparative

- evaluation of different electrode materials and different counterloads, *Sensors and Actuators A: Physical*, 107(1), 85-95. Erişim: 1 Ekim 2003, Science Direct.
- Chiba, S., Waki, M., Kornbluh, R., & Pelrine, R. (2008, April) “Innovative power generators for energy harvesting using electroactive polymer artificial muscles”, In *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, 6927, 692715. Erişim: 10 Nisan 2008, Spie Digital Library.
- Courty, S., Mine, J., Tajbakhsh, A. R., & Terentjev, E. M. (2003) “Nematic elastomers with aligned carbon nanotubes: New electromechanical actuators”, *EPL (Europhysics Letters)*, 64(5), 654. Erişim: Eylöl 2003, Iop Science.
- Duduta, M., Clarke, D. R., & Wood, R. J. (2017, May). A high speed yumuşak robot based on dielectric elastomer actuators. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 4346-4351). Erişim: 24 Temmuz 2017, . IEEE
- Eguchi, M. (1925). XX. On the permanent electret. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 49(289), 178-192. Erişim: 8 Nisan 2009, Taylor&Francis Online.
- Feng, C., Rajapaksha, C. H., & Jákli, A. (2021). Ionic Elastomers for Electric Actuators and Sensors, *Engineering*, 7(5), 581-602. Erişim: 5 Mayıs 2021, Science Direct.
- Fragala, A., Enos, J., LaConti, A., & Boyack, J. (1972). Electrochemical activation of a synthetic artificial muscle membrane. *Electrochimica Acta*, 17(8), 1507-1522, Erişim: Ağustos 1972, Science Direct.
- Gajewski, M., Szczerba, R., & Jemioł, S. (2015). Modelling of elastomeric bearings with application of Yeoh hyperelastic material model, *Procedia Engineering*, 111, 220-227. Eriřim: 8 Temmuz 2015, Science Direct.
- Gerard, M., Chaubey, A., & Malhotra, B. D. (2002). Application of conducting polymers to biosensors. *Biosensors and bioelectronics*, 17(5), 345-359. Erişim: Mayıs 2002, Science Direct.
- Getz, R., & Shmuel, G. (2017). Band gap tunability in deformable dielectric composite plates. *International Journal of Solids and Structures*, 128, 11-22. Erişim: 26 Temmuz 2017, Science Direct.

- Ghazali, F. A. M., Mah, C. K., AbuZaiter, A., Chee, P. S., & Ali, M. S. M. (2017). Yumuşak dielectric elastomer actuator micropump. *Sensors and Actuators A: Physical*, 263, 276-284. Erişim: 15 Ağustos 2017, Science Direct.
- Gurunathan, K., Murugan, A. V., Marimuthu, R., Mulik, U. P., & Amalnerkar, D. P. (1999). Electrochemically synthesised conducting polymeric materials for applications towards technology in electronics, optoelectronics and energy storage devices, *Materials chemistry and physics*, 61(3), 173-191. Erişim: 1 Kasım 1999, Science Direct.
- HTi-Instrument, Erişim:01.11.2021, <https://hti-instrument.com/>
- Huang, C., Klein, R., Xia, F., Li, H., Zhang, Q. M., Bauer, F., & Cheng, Z. Y. (2004). Poly (vinylidene fluoride-trifluoroethylene) based high performance electroactive polymers. *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation*, 11(2), 299-311. Erişim: 2 Nisan 2004, IEEE Xplore.
- Hunter, I. W., Hollerbach, J. M., & Ballantyne, J. (1991). A comparative analysis of actuator technologies for robotics. *Robotics Review*, 2, 299-342. Erişim: 10 Ağustos 1992, ACM Digital Library.
- Jean-Mistral, C., Basrour, S., Chaillout, J. J., & Bonvilain, A. (2008). A complete study of electroactive polymers for energy scavenging: modelling and experiments. *arXiv preprint arXiv:0802.3046*. Erişim: 1 Şubat 2008, Cornell University aRxiv.org.
- Joshipura, I. D., Finn, M., Tan, S. T. M., Dickey, M. D., & Lipomi, D. J. (2017). Stretchable bioelectronics—Current and future. *MRS Bulletin*, 42(12), 960-967. Erişim: 8 Aralık 2017, Cambridge University Press.
- Kanaan, A. F., Pinho, A. C., & Piedade, A. P. (2021). Electroactive Polymers Obtained by Conventional and Non-Conventional Technologies, *Polymers*, 13, 2713. Erişim: 9 Ağustos 2021, MPDI.
- KARAMAN, İ., & ŞAHİN, D. E.(2020). Elektromekanik Yükle Tahrik Edilen Yumuşak Dielektrik Elastomerin Sıcaklık Karakterizasyonu. *Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi*, 2(2), 190-204. Erişim: 15 Aralık 2020, DergiPark.
- Khanh, V. T. V., Mathew, A. T., Short, J. S., Quek, Z. F., Ang, M. H., & Koh, S. J. A. (2018, July). Displacement improvement from variable pre-stretch

- diaphragm type Dielectric Elastomer Actuator. In *2018 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)* (pp. 545-550). Erişim: 3 Eylöl 2018, IEEEExplore.
- Khatib, O., Craig, J., Lozano-Perez, T. (1992) "A comparative analysis of actuator technologies for robotics" in *The Robotics Review*, MA, Cambridge:MIT Press, 2, 299-342. Erişim: 10 Ağustos 1992, ACM Digital Library.
- Kier, W. M., & Stella, M. P. (2007). The arrangement and function of octopus arm musculature and connective tissue, *Journal of morphology*, 268(10), 831-843. Erişim: 11 Temmuz 2007, Wiley Online Library.
- Kim, K. J., & Shahinpoor, M. (2001). Development of three-dimensional polymeric artificial muscles. In *Smart Structures and Materials 2001: Electroactive Polymer Actuators and Devices*, *International Society for Optics and Photonics*, 4329, 223-232. Erişim: 16 Temmuz 2001, Spie Digital Library.
- Kim, K. J., & Shahinpoor, M. (2002). A novel method of manufacturing three-dimensional ionic polymer-metal composites (IPMCs) biomimetic sensors, actuators and artificial muscles. *polymer*, 43(3), 797-802, Erişim: şubat 2002, Science Direct.
- Kim, K. J., & Tadokoro, S. (2007). Electroactive polymers for robotic applications. *Artificial Muscles and Sensors*, 23, 291. Erişim: 1 Aralık 2007, Springer London.
- Kim, S., Laschi, C., & Trimmer, B. (2013) "Yumuşak robotics: a bioinspired evolution in robotics", *Trends in biotechnology*, 31(5), 287-294. Erişim: Nisan 2013, ResearchGate.
- Kornbluh, R. D., Pelrine, R., Pei, Q., Heydt, R., Stanford, S., Oh, S., & Eckerle, J. (2002). Electroelastomers: applications of dielectric elastomer transducers for actuation, generation, and smart structures. In *Smart Structures and Materials 2002: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies* (Vol. 4698, pp. 254-270). International Society for Optics and Photonics. Erişim: 9 Temmuz 2002, Spie Digital Library.
- Kornbluh, R., Pelrine, R., Carpi, F., De Rossi, D., & Sommer-Larsen, P. (2008). High-performance acrylic and silicone elastomers. *Dielectric elastomers as electromechanical transducers: Fundamentals, materials, devices, models and*

- applications of an emerging electroactive polymer technology*, 33-42. Erişim: Aralık 2008, Research Gate.
- Laschi, C., & Cianchetti, M. (2014). Yumuşak robotics: new perspectives for robot bodyware and control, *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 2, 3. Erişim: 30 Ocak 2014, Frontiers.
- Levy, M. L., Nguyen, A., Aryan, H., Jandial, R., Meltzer, H. S., & Apuzzo, M. L. (2006). Robotic Virtual Endoscopy: Development of a Multidirectional Rigid Endoscope, *Operative Neurosurgery*, 59(suppl_1), ONS-134. Erişim: Temmuz 2006, National Library of Medicine.
- Liang, W., Wang, S., Dong, Z., Lee, G. B., & Li, W. J. (2012). Optical spectrum and electric field waveform dependent optically-induced dielectrophoretic (ODEP) micro-manipulation. *Micromachines*, 3(2), 492-508. Erişim: 16 Mayıs 2012, ResearchGate.
- Liu, Y., Liu, L., Zhang, Z., & Leng, J. (2009). Dielectric elastomer film actuators: characterization, experiment and analysis. *Smart Materials and Structures*, 18(9), 095024. Erişim: 17 Temmuz 2009, IOP Science.
- Luo, K., Tian, Q., & Hu, H. (2020). Dynamic modeling, simulation and design of smart membrane systems driven by yumuşak actuators of multilayer dielectric elastomers. *Nonlinear Dynamics*, 102(3), 1463-1483. Erişim: Kasım 2020, ResearchGate.
- Madden, J. D., Vandesteeg, N. A., Anquetil, P. A., Madden, P. G., Takshi, A., Pytel, R. Z., ... & Hunter, I. W. (2004) "Artificial muscle technology: physical principles and naval prospects", *IEEE Journal of oceanic engineering*, 29(3), 706-728. Erişim: 8 Kasım 2004, IEEE.
- Martinez, J. G., Richter, K., Persson, N. K., & Jager, E. W. (2018). Investigation of electrically conducting yarns for use in textile actuators, *Smart Materials and Structures*, 27(7), 074004. Erişim: 5 Temmuz 2018, IOP Science.
- Mirfakhrai, T., Madden, J. D., & Baughman, R. H. (2007). Polymer artificial muscles. *Materials today*, 10(4), 30-38, Erişim: Nisan 2007, Science Direct.
- Mirjavadi, S. S., Forsat, M., & Badnava, S. (2020). Nonlinear modeling and dynamic analysis of bioengineering hyper-elastic tubes based on different material

- models, *Biomechanics and modeling in mechanobiology*, 19(3), 971-983. Erişim: 17 Eylöl 2019, Springer Link.
- Neuhaus, R., Bitzer, V., Jablockin, J., Glanz, C., Kolaric, I., Siegert, J., & Bauernhansl, T. (2019). Ionic CNT actuators and arrays–towards cost-efficient manufacturing through scalable dispersion and printing processes, *In 2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 56-61. Erişim: 17 Ekim 2019, IEEE.
- O'Halloran, A., O'malley, F., & McHugh, P. (2008). A review on dielectric elastomer actuators, technology, applications, and challenges. *Journal of Applied Physics*, 104(7), 9. Erişim: 24 Temmuz 2008, AIP Journal of Applied Physics.
- Oguro, K., Fujiwara, N., Asaka, K., Onishi, K., & Sewa, S. (1999). Polymer electrolyte actuator with gold electrodes. In *Smart Structures and Materials 1999: Electroactive Polymer Actuators and Devices* (Vol. 3669, pp. 64-71). International Society for Optics and Photonics. Erişim: 28 Mayıs 1999, Spie Digital Library.
- Osada, Y. (1987). Conversion of chemical into mechanical energy by synthetic polymers (chemomechanical systems). *Polymer Physics*, 1-46, Erişim:14 Haziran 2005, Sringer Link.
- Osada, Y., & Hasebe, M. (1985). Electrically activated mechanochemical devices using polyelectrolyte gels. *Chemistry Letters*, 14(9), 1285-1288. Erişim: 26 Nisan 1985, CJS Journals.
- Pelrine, R. E., Kornbluh, R. D., & Joseph, J. P. (1998). Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation. *Sensors and Actuators A: Physical*, 64(1), 77-85. Erişim: 21 Mayıs 1998, Science Direct.
- Pelrine, R., Kornbluh, R. D., Pei, Q., Stanford, S., Oh, S., Eckerle, J., ... & Meijer, K. (2002). Dielectric elastomer artificial muscle actuators: toward biomimetic motion. In *Smart Structures and Materials 2002: Electroactive polymer actuators and devices (EAPAD)* (Vol. 4695, pp. 126-137). International Society for Optics and Photonics. Erişim: 11 Temmuz 2002, Spie Digital Library.

- Pelrine, R., Kornbluh, R., Pei, Q., & Joseph, J. (2000). High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100%, *Science*, 287(5454), 836-839. Erişim: Mart 2000, ResearchGate.
- Pfeifer, R., Iida, F., & Bongard, J. (2005). New robotics: Design principles for intelligent systems, *Artificial life*, 11(1-2), 99-120. Erişim: Aralık 2005, ResearchGate.
- Pfeifer, R., Iida, F., & Lungarella, M. (2014). Cognition from the bottom up: on biological inspiration, body morphology, and yumuşak materials, *Trends in cognitive sciences*, 18(8), 404-413. Erişim: 16 Mayıs 2014, National Library of Medicine.
- Prechtl, J., Kunze, J., Seelecke, S., & Rizzello, G. (2021). Yumuşak Robotic Module Actuated by Silicone-Based Rolled Dielectric Elastomer Actuators-Modeling and Simulation. In *ACTUATOR; International Conference and Exhibition on New Actuator Systems and Applications 2021* (pp. 1-4). Erişim: 22 Nisan 2020, ResearchGate.
- Pytel, R., Thomas, E., & Hunter, I. (2006). Anisotropy of electroactive strain in highly stretched polypyrrole actuators. *Chemistry of Materials*, 18(4), 861-863. Erişim: 21 Ocak 2006, ACS Publications.
- Renaud C, Cros JM, Feng ZQ and Yang B. (2009). The Yeoh model applied to the modeling of large deformation contact/impact problems. *International Journal of Impact Engineering*. 36(5):659-666. Erişim:5 Mayıs 2009, ScienceDirect.
- Samatham, R., Kim, K. J., Dogruer, D., Choi, H. R., Konyo, M., Madden, J. D., ... & Yamakita, M. (2007). Active polymers: an overview, *Electroactive polymers for robotic applications*, 1-36. Erişim: 2007, Springer London.
- Shahinpoor, M. (2000). Ion-exchange polymer-metal composites as biomimetic sensors and actuators, In *Polymer sensors and Actuators*, 325-359. Erişim: Ocak 2000, ResearchGate.
- Shahinpoor, M. (2003). Mechanoelectrical phenomena in ionic polymers. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 8(3), 281-288, Erişim: 1 Haziran 2003, Sage Journals.

- Shahinpoor, M. (2008). Ionic polymeric conductor nanocomposites (IPCNCs) as distributed nanosensors and nanoactuators, *Bioinspiration & biomimetics*, 3(3), 035003. Erişim: Ekim 2008, ResearchGate.
- Shahinpoor, M., & Kim, K. J. (2000). The effect of surface-electrode resistance on the performance of ionic polymer-metal composite (IPMC) artificial muscles, *Smart Materials and Structures*, 9(4), 543. Erişim: ağustos 2000, ResearchGate.
- Shahinpoor, M., & Kim, K. J. (2001). Ionic polymer-metal composites: I. Fundamentals. *Smart materials and structures*, 10(4), 819, Erişim: 7 Ağustos 2001, Iop Science.
- Shahinpoor, M., Kim, K. J., & Mojarad, M. (2007). *Artificial muscles: applications of advanced polymeric nanocomposites*, (1.basım), CRC press. Erişim: şubat 2007, ResearchGate.
- Shahzad, M., Kamran, A., Siddiqui, M. Z., & Farhan, M. (2015). Mechanical characterization and FE modelling of a hyperelastic material. *Materials Research*, 18(5), 918-924. Erişim: 29 Temmuz 2015, SciELO Brasil.
- Sheng, J., Chen, H., Li, B., Wang, Y., & Qiang, J. (2012, April). Effect of temperature on electromechanical instability of dielectric elastomers. In *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2012* (Vol. 8340, p. 83402B). International Society for Optics and Photonics. Erişim: Mart 2012, ResearchGate.
- Simone, F., Linnebach, P., Rizzello, G., & Seelecke, S. (2017). FE simulation of a dielectric elastomer actuator (DEA) driven Contactor in COMSOL. In *VDI Fachtagung Mechatronik* (pp. 244-249). Erişim: Mart 2017, ResearchGate.
- Sommer-Larsen, P., Kofod, G., Shridhar, M. H., Benslimane, M., & Gravesen, P. (2002). Performance of dielectric elastomer actuators and materials, In *Smart structures and materials 2002: Electroactive polymer actuators and devices (EAPAD)*, 4695, 158-166. Erişim: 11 Temmuz 2002, Spie Digital Library.
- Sujendra, H. M., Jayaram, A. S., Chandan, R., & Hattaraki, G. (2018). Finite element modelling and simulation of rubber component in predicting hyperelastic material model. *Int. J Eng. Technol*, 5, 751-754. Erişim: Ocak 2018, IRJET.

- Suo, Z. (2010). Theory of dielectric elastomers, *Acta Mechanica Solida Sinica*, 23(6), 549-578. Erişim: 25 Ekim 2010, Science Direct.
- Tanaka, T. (1979). Phase transitions in gels and a single polymer. *Polymer*, 20(11), 1404-1412. Erişim: 8 Temmuz 1972, Science Direct.
- Tesch, M., Lipkin, K., Brown, I., Hatton, R., Peck, A., Rembisz, J., & Choset, H. (2009). Parameterized and scripted gaits for modular snake robots, *Advanced Robotics*, 23(9), 1131-1158. Erişim: 2 Nisan 2012, Taylor & Francis Online.
- Tiwari, R., & Kim, K. J. (2010). Disc-shaped ionic polymer metal composites for use in mechano-electrical applications, *Smart Materials and Structures*, 19(6), 065016. Erişim: 4 Mayıs 2010, Iop Science.
- Trimmer, B. A., Lin, H. T., Baryshyan, A., Leisk, G. G., & Kaplan, D. L. (2012). Towards a biomorphic yumuşak robot: design constraints and solutions, *In 2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob)*, 599-605. Erişim: Haziran 2012, ResearchGate.
- Wang, L., Nurzaman, S., & Iida, F. (2017). Yumuşak-Material Robotics, *Foundations and Trends in Robotics*, 5 (3), 191-259. Erişim: 12 Nisan 2017, NOW Publishers.
- White, E. L., Yuen, M. C., & Kramer, R. K. (2017). Distributed sensing in capacitive conductive composites. In *2017 IEEE SENSORS* (pp. 1-3).. Erişim: 25 Aralık 2017, IEEEExplore.
- Wissler, M., & Mazza, E. (2005). Modeling and simulation of dielectric elastomer actuators. *Smart Materials and structures*, 14(6), 1396. Erişim: Ekim 2005, ReserachGate.
- Xiang, Y., Arora, J. S., & Abdel-Malek, K. (2010). Physics-based modeling and simulation of human walking: a review of optimization-based and other approaches. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 42(1), 1-23. Erişim: 18 Mart 2010, Springer Link.
- XP Power, Erişim:01.11.2021, <https://www.xppower.com>
- Yekutieli, Y., Sumbre, G., Flash, T., & Hochner, B. (2002). How to move with no rigid skeleton?, *Biologist*, 49(6), 250-254. Erişim: 1 Aralık 2002, Europa PMC.
- Yeoh OH. (1993). Some form of strain energy functions for rubber. *Rubber*

Chemistry and Technology. Erişim: 1 Kasım 1993, British Library Online Contents.

- Zhang, Q. M., Zhao, J., Shrout, T., Kim, N., Cross, L. E., Amin, A., & Kulwicki, B. M. (1995). Characteristics of the electromechanical response and polarization of electric field biased ferroelectrics. *Journal of applied physics*, 77(6), 2549-2555. Erişim: 6 Eylül 1994, AIP Journal of Applied Physics.
- Zhang, X., Jiang, Y., Gao, R., Li, X., Shen, Z., Li, B. W., ... & Nan, C. W. (2021). Tuning ferroelectricity of polymer blends for flexible electrical energy storage applications, *Science China Materials*, 64(7), 1642-1652. Erişim: 3 Mart 2021, Springer Link.
- Zhao, X., & Suo, Z. (2010). Theory of dielectric elastomers capable of giant deformation of actuation, *Physical review letters*, 104(17), 178302. Erişim: 30 Nisan 2010, APS Physics.
- Zheng, B., Man, X., Andelman, D., & Doi, M. (2021). Enhanced Electro-actuation in Dielectric Elastomers: The Nonlinear Effect of Free Ions, *ACS Macro Letters*, 10(4), 498-502. Erişim: 10 Nisan 2021, ACS Publications.
- Zou, J., & Gu, G. (2018). Modeling the viscoelastic hysteresis of dielectric elastomer actuators with a modified rate-dependent prandtl–ishlinskii model. *Polymers*, 10(5), 525. Erişim: 14 Mayıs 2018, MDPI.
- Zrinyi, M. (2000). Intelligent polymer gels controlled by magnetic fields, *Colloid and Polymer Science*, 278(2), 98-103. Erişim: Şubat 2000, SpringerLink.