T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PİEZO-ELEKTRİK TAHRİKLİ ESNEK VE ÇIRPAN KANATLI MİKRO HAVA ARACI TASARIMI VE DENEYSEL İNCELENMESİ

ULAŞ KAYA

DOKTORA TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hilmi KUŞÇU

EDİRNE-2025

Ulaş KAYA'nın hazırladığı **"Piezo-Elektrik Tahrikli Esnek ve Çırpan Kanatlı Mikro Hava Aracı Tasarımı ve Deneysel İncelenmesi"** başlıklı bu tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından **Makine Mühendisliği** Anabilim Dalında bir **Doktora tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	İmza
Prof. Dr. Hilmi KUŞÇU	……
Prof. Dr. M. Tahir ALTINBALIK	……
Doç. Dr. Sedat ŞENGÜL	……
Prof. Dr. Uğur AKYOL	……
Doç. Dr. Ümit HÜNER	……

Tez Savunma Tarihi: 19/06/2025

Bu tezin Doktora tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Prof. Dr. Hilmi KUŞÇU

Tez Danışmanı ……

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü onayı

……

Doç. Dr. Filiz UMAROĞULLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

T. Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI DOKTORA PROGRAMI

DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

19/ 06 / 2025

Ulaş KAYA

İmza

Doktora Tezi

Piezo-Elektrik Tahrikli Esnek ve Çırpan Kanatlı Mikro Hava Aracı Tasarımı ve Deneysel İncelenmesi

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Bu çalışmada, deneysel veriler sonucunda geliştirilen bir piezoelektrik eyleyici ile, yusufçuktan esinlenilerek tasarlanan ve üretilen mikro hava aracı (MHA) kanat çırpma mekanizması tahrik edilmiştir. Literatürdekiler gibi boyuna titreşimleri kullanmak yerine bir ucunda neodim mıknatıs bulunan iki adet boyuna seri olarak tutturulmuş kare kesitli piezoelektrik (PZT) kristal çubuğun eğilme ve burulma titreşimi, darbeli itki mekanizması (DİM) metodu uygulanarak sürekli doğrusal bir harekete çevrilmiş ve bu tez kapsamında biyobenzetim yoluyla yusufçuktan esinlenilerek tasarlanan çırpan kanatlı mikro hava aracı (ÇKMHA) kanat çırpma mekanizmasının itici gücü olarak kullanılmıştır.

Kuşçu H. Kaya U. (2023) tanımladığı gibi; DİM, bir PZT elemanın küçük titreşimlerinin sürtünmeli bir yüzey üzerinde uzama ve kısalma hızının dolayısıyla darbe kuvvetinin kontrol edilmesiyle sürekli doğrusal harekete dönüştürülmesi olarak tanımlanabilir. PZT elemanın DİM yönteminin uygulanmasıyla sürekli doğrusal hareket edebilmesi için sürekli bir yüzeye ihtiyaç vardır. Bu doğrultuda, tasarlanan kanat çırpma mekanizması gövdesine dikdörtgen bir çelik plaka yerleştirilmiştir. Çelik plaka üzerine neodim mıknatıs konulmuş ve iki adet seri bağlı çift PZT kristal bir silikon bazlı yapıştırıcı ile mıknatısa tutturulmuştur. Seri bağlı çift PZT kristallerden biri bir yöne hareketi sağlarken diğeri aksi yönde hareketi sağlamaktadır. Birinci yöne hareket kanatları yukarı doğru çırparken, aksi yöndeki hareket kanatları aşağı doğru çırpmaktadır. Kanat çırpma frekansı bir zaman rölesi vasıtasıyla 0-20 Hz. aralığında ayarlanabilir hale

gelmiştir. Zaman rölesi, sırasıyla önce birinci yöne (yukarı doğru çırpma) hareketi sağlayan seri bağlı çift PZT'ye elektriksel bir gerilim yüklemekte, ardından birincideki elektriksel gerilimi kesip ikinci yöne (aşağı doğru çırpma) hareketi sağlayan ikinci seri bağlı çift PZT'ye elektriksel bir gerilim yüklemektedir. Sonuç olarak tam bir çırpma hareketi sağlanmaktadır. Zaman rölesi periyoduna bağlı olarak çırpma frekansı ayarlanabilmektedir.

Literatürdeki çalışmalarda olduğu gibi, bir ucunda neodim mıknatıs bulunan tek bir PZT kristal çubuğun boyuna titreşimleri kullanılarak uygulanan DİM yöntemi yerine, uzunlamasına seri olarak bağlanmış iki PZT kristalin ucuna neodim mıknatıs tutturulmuş ve dikey olarak konumlandırıldıktan sonra eğilme ve burulma titreşimleri kullanılarak DİM yöntemi uygulanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda enine ve burulma titreşimleri kullanılan seri olarak tutturulmuş PZT kristallerin, aynı boydaki eğilme ve burulma veya boyuna titreşim kullanılan tek piezoelektrik kristalden daha fazla itki kuvveti oluşturduğu gözlemlenmiştir. Tasarlanan ÇKMHA'nın kanat çırpma mekanizması üretilmiş ve deneysel olarak maksimum itme kuvveti elde edilen bir ucunda neodim mıknatıs bulunan seri bağlı çift PZT kristal kullanılarak DİM metodu ile çalıştırılmıştır.

Bu çalışma kapsamında elde edilen çıktıların, mikrometre ölçeğinde hassas doğrusal ve döngüsel aktüatörlerin ve mikro hava araçlarının kanat tahrik mekanizması geliştirilmesinde önemli katkıları olacaktır.

Yıl : 2025

Sayfa Sayısı : 129

Anahtar Kelimeler : Çırpan kanatlı mikro hava aracı, Piezoelektrik etki, darbeli itki mekanizması,

PhD Thesis

Design and Experimental Investigation of a Flexible Flapping Wing Micro Air Vehicle Driven by a Piezo-Electric Actuator

Trakya University Institute of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

ABSTRACT

In this study, the wing flapping mechanism of a micro air vehicle (MHA), which was designed and produced by taking inspiration from dragonflies, was driven by a piezoelectric actuator developed as a result of experimental data. Instead of using longitudinal vibrations as in the literature, the bending and torsional vibrations of two longitudinally attached square-section piezoelectric (PZT) crystal rods with a neodymium magnet at one end were converted into a continuous linear motion by applying the impulse drive mechanism (PIM) method and used as the driving force of the flapping wing micro air vehicle wing mechanism designed by taking inspiration from dragonflies through biomimetic within the scope of this thesis.

As Kuşçu H. Kaya U. (2023) defined; IDM is the transformation of small vibrations of a piezo element into continuous linear motion on a frictional surface by controlling the extension and contraction speed thus the impact force. For the PZT element to have a continuous linear movement with the application of the IDM method, a continuous surface is required. In this regard, a rectangular steel plate was placed on the designed wing flapping mechanism body. A neodymium magnet is placed on the steel plate and two series-connected double PZT crystals are attached to the magnet with a silicone-based adhesive. One of the series-connected pairs of PZT crystals provides movement in one direction, while the other provides movement in the opposite direction. Movement in the first direction flaps the wings upwards, while movement in the opposite direction flaps the wings downwards. The wing flapping frequency can be adjusted

between 0-20 Hz by means of a time relay. The time relay, in turn, first loads an electrical voltage to the series-connected PZT pair that provides the movement in the first direction (upward flapping), then cuts off the electrical voltage in the first and loads an electrical voltage to the second series-connected PZT pair that provides the movement in the second direction (downward flapping). As a result, a full flapping movement is provided. The flapping frequency can be adjusted depending on the time relay period.

Instead of the IDM method, which is applied using longitudinal vibrations of a single PZT crystal bar with a neodymium magnet at one end as in the studies in the literature, a neodymium magnet was attached to the end of two piezoelectric crystals connected in series longitudinally and after positioning them vertically, the DIM method was applied using transverse and torsional vibrations. As a result of the experiments, it was observed that PZT crystals attached in series using transverse and torsional vibrations create more thrust force than PZT crystals of the same size using transverse and torsional or longitudinal vibrations. The wing flapping mechanism of the designed FWMAV was produced and operated with the IDM method using two serially connected PZT crystals with a neodymium magnet at one end, which experimentally obtained the maximum thrust force.

The results obtained within the scope of this study will contribute significantly to the development of micrometer-scale precision linear or rotary actuators and flapping wing micro or mini air vehicles.

Year 2025

Number of Pages : 129

Keywords : Flapping wing micro aerial vehicle, piezoelectricity, impact drive mechanism

TEŞEKKÜR

Bu tezi hazırlarken bana rehberlik eden ve değerli bilgileriyle yol gösteren tez danışmanım, değerli hocam Prof. Dr. Hilmi Kuşçu'ya derin minnettarlığımı sunarım. Hatta, istenilen sonuçların alınamadığı dönemlerde dahi sabır göstererek bana güvenen ve o güvenç ile beni cesaretlendirerek bugüne kadar bu çalışmayı getirmemi sağladığı için en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitemde olan sayın Prof. Dr. Tahir Altınbalık ve sayın Doç. Dr. Sedat Şengül'e bazı tez izleme dönemlerinde istenilen sonuçlar elde edilemese dahi olumlu ve cesaretlendirici yaklaşımları nedeniyle minnettarlığımı ve saygılarımı sunarım.

Ayrıca, önemli ölçü aletlerini ve piezo kristallere kutup yapmak için altın kaplama makinesini kullanımımıza sunan sayın Prof. Dr. Şaban AKTAŞ'a teşekkür ve minnettarlığımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv

ABSTRACT vi

TEŞEKKÜR viii

İÇİNDEKİLER ixi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xi

ŞEKİLLER DİZİNİ xiv

ÇİZELGELER DİZİNİ xviii

BÖLÜM 1 1

GİRİŞ 1

BÖLÜM 2 3

KAPSAM VE LİTERATÜR 3

2.1. Piezoelektriklik 4

2.1.1. Piezoelektrik Malzemelerin Elektromekaniği 8

2.1.2. Piezoelektrikliğin Bünye Denklemleri 11

2.1.3. Çok Katmanlı Piezoelektrik Aktüatörler 37

2.1.3.1. Uzunlamasına Çok Katmanlı Aktüatörler 27

2.1.3.2. Kesme Çok Katmanlı Aktüatörler 28

2.1.3.3. Boru Aktüatörleri 37

2.1.3.4. Büzülme Aktüatörleri 37

2.1.3.5. Bükülme Aktüatörleri 37

2.1.4. Tırtıl Tipi Aktüatörler 37

2.1.5. Darbeli İtki Mekanizması.....38

2.2. Yusufçuk Uçuş Mekaniği……...…… 40

2.2.1. Reynolds Sayısı……...… 42

2.2.2. Strouhal Sayısı ve Azaltılmış Frekans……..……. .44

2.2.3. Çırpan Kanat Korunum Denklemleri……...…… 45

2.2.4. Çırpan Kanat Uçuşun Karasız Aerodinamiği……..…… 46

2.2.5. Yapısal Kanat Esnekliği……...…… 48

BÖLÜM 3 52

MATERYAL VE DENEYSEL ARAŞTIRMA 52

3.1. DIM Prensibi Temelinde İtki Mekanizması Geliş. İçin Deney Düzeneği 52

3.2. Sonlu Eleman Analizi Yazılımı ile Test Numunelerinin Rezonans Frekans ve Eğilme Uzama Miktarlarının Hesaplanması 64

3.3. Deneysel Sonuçlar ve Diğer Numerik Sonuçlarla Karşılaştırma 69

3.4. Kanat Çırpma Mekanizmaları Tasarımı ve Deneysel Geliştirilmesi.....74

BÖLÜM 4 93

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....93

KAYNAKLAR 103

ÖZGEÇMİŞ 108

TEZ ÖĞRENCİSİNE AİT BİLİMSEL FAALİYETLER….……109

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A Ktm:	A Kısaltması (Kısaltmalar A'dan Z'ye sıralanmalıdır)
°C	Santigrat derece
C	Coulomb
cm	Santimetre
ÇKMHA	Çırpan kanatlı mikro hava aracı
DARPA	Amerikan İleri Savunma Projeleri Ajansı
DC	(Direct Curent) Doğru akım
DIM	Darbeli itki mekanizması
F	Farad
MHA	Mikro hava aracı
PLA	Polilaktik Asit
PZT	Piezoelektrik
ν	Poisson oranı
μm	Mikrometre
A	Yüzey alanı, m^2
B	Manyetik akı vektörü
c	Sönümleme sabiti,
d	Elektriksel gerinim katsayısı, C/N
D_d	Tahrik dişlisi bölüm dairesi çapı, mm
D_p	Küçük dişli bölüm dairesi çapı, mm
D	PZT elektriksel deplasman, C/m^2

e	Kirişin PZT özelliklerinden ve boyutlarından hesaplanan sabit katsayı
E	Elektriksel alan, V/m
f_{kanat}	Kanat çırpma frekansı, Hz
H	Entalpi, kJ/kg
H	Manyetik alan yoğunlık vektörü
I	Atalet momenti, $kg.m^2$
k	Piezoelektrik bağlantı katsayısı
L	Uzunluk, m
m	Kütle, kg
M	Uygulanan harici moment, N.m
M	Mıknatıslanma vektörü
p	Piroelektrik etki katsayısı
P	Polarizasyon vektörü
Q	Elektrotlarda oluşan elektrik yükü miktarı, C
S	Mekanik gerinim, m/m
T	Mekanik gerilim, N/m^2
U	İç enerji
V	Elektrotlar arasında uygulanan harici gerilim, V
V_d	Tahrik dişlisi hızı mm/s
V_p	Küçük dişli hızı mm/s
Y	Young modülü, N/m^2
α	Kirişin ucundaki eğim, derece
δ	Kirişin ucundaki dikey sapma, m
ε	Elektriksel yer değiştirme, C/m^2

ρ	Yoğunluk, kg/m^3
υ	Sapmış hacim, m^3
ω_d	Tahrik dişlisi döngüsel hızı, rad/dak.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. PZT malzemenin kristal yapısı……....5

Şekil 2.2. Ferroelektrik bir seramiğin mikroskop altında kesit görünümü. 6

Şekil 2.3. PZT seramik bir malzemenin polarizasyonu süreci; a) Polarize olmayan seramik, b) Polarizasyon esnasında seramik, c) Polarizasyon işlemi tamamlandıktan sonra PZT seramiğin kutup yönü.....7

Şekil 2.4. Elastik bir malzeme için gerilme-gerinim davranışı eğrisi 8

Şekil 2.5. Doğrudan PZT etki ve gerilim-elektriksel deplasman arasındaki ilişki.....9

Şekil 2.6. Ters PZT etkide elektriksel alan ve yer değiştirme arasındaki ilişki 10

Şekil 2.7. Ters PZT etki için elektriksel alan ve gerilim arasındaki ilişki 11

Şekil 2.8. Bir malzemenin özelliklerini tensör formatında tanımlamak için ortogonal koordinat sistemi 23

Şekil 2.9. Uzunlamasına yığın aktüatör 27

Şekil 2.10. Kesme yığın aktüatörü 29

Şekil 2.11. Boru aktüatör boyuna uzaması.....30

Şekil 2.12. Boru aktüatörler için radyal yer değiştirme (yarıçap değişimi) 31

Şekil 2.13. PZT Boru aktüatörlerin bükülmesi 32

Şekil 2.14. Büzülme aktüatörü 33

Şekil 2.15. Bükülme aktüatörü.....33

Şekil 2.16. Paralel bağlı tüm seramik bükme aktüatörü.....34

Şekil 2.17. Seri bağlı tüm seramik bükme aktüatörü 34

Şekil 2.18. İki katmanlı kompozit bükme aktüatörü 35
Şekil 2.19. Simetrik, Paralel bağlı ve üç katmanlı kompozit bükme aktüatörü 35
Şekil 2.20. Piezoelektrik rezonatörün eşdeğer devre şeması 36
Şekil 2.21. Empedans eğrisi 37
Şekil 2.22. Tırtıl mekanizması çalışma döngüsü elektrik düzeni 37
Şekil 2.23. DIM hareket prensibi 39
Şekil 2.24. DIM sol ve sağa hareket için elektriksel gerilim grafik paterni 40
Şekil 2.25. Doğada bir yusufçuk resmi 41
Şekil 2.26. Yusufçuk ön ve arka kanadının kord ve referans uzunlukları 43
Şekil 2.27. Çırpma fırlatma mekanizması 46
Şekil 2.28. Aşağı doğru kanat vuruşu için yüzeyinden gelen akım çizgileri 47
Şekil 3.1. Tek, çift seri bağlı ve üçlü seri bağlı test numunelerinin 3b tasarımı 54
Şekil 3.2. Tek ve birleştirilmiş çift seri bağlı ve üçlü seri bağlı test numuneler resmi 55
Şekil 3.3. Deney ve ölçme düzeneği resmi 56
Şekil 3.4. Test düzeneği sinyal akış diyagramı 57
Şekil 3.5. Sinyal jeneratörü 57
Şekil 3.6. İşlevsel yükseltici 58
Şekil 3.7. Trafo 59
Şekil 3.8. Trafo enerji akış diyagramı 60
Şekil 3.9. Güç kaynağı 60
Şekil 3.10. Ölçüm düzeneği akış diyagramı 61
Şekil 3.11. Hassas lazer sensörü 62
Şekil 3.12. PLC kontrol edici 62
Şekil 3.13. Osiloskop 63
Şekil 3.14. Tek kristal rezonans frekansı 64

Şekil 3.15. Çift seri bağlı kristal rezonans frekansı 64
Şekil 3.16. Üçlü seri bağlı kristal rezonans frekansı 65
Şekil 3.17. Üçlü seri bağlı kristal boyuna uzaması (x-ekseni) 66
Şekil 3.18. Üçlü seri bağlı kristal enine uzaması (z-ekseni) 66
Şekil 3.19. Çift seri bağlı kristal enine uzaması (z-ekseni) 67
Şekil 3.20. Çift seri bağlı kristal boyuna uzaması (x-ekseni) 67
Şekil 3.21. Tek kristal enine uzaması (z-ekseni) 68
Şekil 3.22. Tek kristal boyuna uzaması (x-ekseni) 68
Şekil 3.23. Çift seri bağlı kristal hız-zaman grafiği 70
Şekil 3.24. Üçlü seri bağlı kristal hız-zaman grafiği 71
Şekil 3.25. Tek kristal hız-zaman grafiği 72
Şekil 3.26. Ön-arka kanat çiftinin karşıt vuruş tarzı için üretilecek kanat çırpma test düzeneği tasarımının önden görünüşü 74
Şekil 3.27. Ön-arka kanat çiftinin karşıt vuruş tarzı için üretilecek kanat çırpma test düzeneği tasarımının arkadan görünüşü 75
Şekil 3.28. Ön-arka kanat çiftinin eşzamanlı vuruş tarzı için üretilecek kanat çırpma test düzeneği tasarımının önden görünüşü 76
Şekil 3.29. Ön-arka kanat çiftinin eşzamanlı vuruş tarzı için üretilecek kanat çırpma test düzeneği tasarımının arkadan görünüşü 76
Şekil 3.30. Kanat çırpma test düzeneğini oluşturan parçalar 77
Şekil 3.31. PZT itki mekanizmasını oluşturan parçaların montajlı hali 78
Şekil 3.32. Çift zıt yöne hareket sağlayan PZT itici test numunesi 79
Şekil 3.33. Zaman rölesi (20 Hz. kapasiteli) 80
Şekil 3.34. Eşzamanlı vuruş tarzı kanat çırpma test düzeneği 82
Şekil 3.35. Eşzamanlı vuruş tarzı kanat çırpma deney düzeneği 83
Şekil 3.36. Karşıt vuruş tarzı kanat çırpma test düzeneği önden görünüşü 84

Şekil 3.37. Karşıt vuruş tarzı kanat çırpma test düzeneği arkadan görünüşü 85
Şekil 3.38. Karşıt vuruş tarzı kanat çırpma deney düzeneği 86
Şekil 3.39. Döngüsel kanat çırpma mekanizması itki mekanizması kavramsal çizimi .. 87
Şekil 3.40. Döngüsel kanat çırpma mekanizması 3b kavramsal tasarımı 88
Şekil 3.41. Döngüsel kanat çırpma mekanizması 3b kritik tasarımı önden görünüşü 88
Şekil 3.42. Döngüsel kanat çırpma mekanizması kritik tasarımı arkadan görünüşü 89
Şekil 3.43. 3b Yazıcıda üretilen kanatlar (yusufçuk ön kanatları) 89
Şekil 3.44. Döngüsel kanat çırpma mekanizması komplesi önden görünüşü 91
Şekil 3.45. Döngüsel kanat çırpma mekanizması komplesi arkadan görünüşü 91
Şekil 3.46. Kanat hücum açısı temsili resmi 92
Şekil 3.47. Kanat hücum açısı ayarı için mekanizma çizimi 93
Şekil 4.1. Doğrudan PZT eyleyici tahrikli MHA kanadı 95
Şekil 4.2. Doğrudan PZT eyleyici tahrikli MHA kanadı deneysel verileri 95
Şekil 4.3. Tırtıl tipi PZT eyleyici hareket prensibi 96
Şekil 4.4. Eşzamanlı çırpma deney düzeneği 98
Şekil 4.5. ÇKMHA kritik tasarımı 99
Şekil 4.6. Yusufçuğun kalkış esnasında, ön kanadının bir çırpmadaki hücum açısı değişimi 100
Şekil 4.7. Kanat hücum açısı ayarı PZT eyleyicileri 101
Şekil 4.8. ÇKMHA kritik tasarımı önden görünüşü 102
Şekil 4.9. ÇKMHA kritik tasarımı arkadan görünüşü 102
Şekil 4.10. PZT kristal sürücüsü devresi 103

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. PZT Bünye Denklemlerini Matris Notasyonu ile İfadesi 22

Çizelge 2.2. Çırpan kanat aerodinamiği için boyutsal olmayan parametreler ve ölçekleme bağımlılığı 49

Çizelge 3.1. PZT Seramiklerin özellikleri ve katsayıları. 53

Çizelge 3.2. Sinyal Jeneratörü Özellikleri 58

Çizelge 3.3. Üçlü seri bağlı PZT kristal deneysel ve numerik sonuçları 73

Çizelge 3.4. Çift seri bağlı PZT kristal deneysel ve numerik sonuçları 73

Çizelge 3.5. Tek PZT kristal deneysel ve numerik sonuçları 73

Çizelge 3.6. Zaman Rölesi Teknik Özellikleri 81

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Mikro hava araçları (MHA) arama kurtarma, keşif, araştırma, vb. görevler için kullanılabilen santimetre ölçeğindeki (Amerikan İleri Savunma Projeleri Ajansı DARPA'ya göre uzunluk<15 cm, ağırlık<20 gr.) uçan robotlardır. MHA'lar genel olarak 3 gruba ayrılırlar, bunlar sabit kanatlılar, döner kanatlılar ve çırpan kanatlılardır. Çırpan kanatlılar, diğerlerine kıyasla daha yüksek manevra kabiliyetli ve çok ücra yerlerde dahi görev yapma yeteneği olan, biyobenzetim (arı, sinek, yusufçuk, vb.) yoluyla tasarlanan MHA çeşididir. ÇKMHA'ların, sabit ve döner kanatlılara kıyasla avantajları şunlardır:

a) İstenmeyen yönden gelen ani rüzgarlara karşı koyabilme,
b) Aerodinamik verimin daha yüksek olması,
c) İrtifa kaybının geciktirilebilmesi,
d) ÇKMHA'ların esnek kanatlı olması, hava akışına uyum sağlayarak daha stabil ve pürüzsüz bir uçuş gerçekleştirmesini sağlamaları
e) Herhangi bir dış etki ile şekil değiştirdikten sonra tekrar ilk haline dönebilmeleri gibi birçok avantajları vardır.

Bunun yanında aerodinamik ve mekanik tasarımda doğrusal olmayan hesaplamalar ve yeni üretim metotları geliştirilme zorunluluğu dezavantajlarıdır.

ÇKMHA'lar daha büyük insansız hava araçlarının giremedikleri derin kanyonlarda, mağaralarda, ormanlarda ve kapalı mekanlarda görev yapabilme yeteneğine sahip olmalıdırlar. Bu yeteneğe sahip olabilmeleri için hafif ve boyutunun küçük olması gerekmektedir. Bir ÇKMHA'nın boyutunu ve ağırlığını belirleyen en önemli bileşen

çırpma hareketini yaptıran eyleyici mekanizmasıdır. Cao, Liu, Peng ve Yu (2015) yaptıkları çalışmada kanat çırpma eyleyicilerini iki ana gruba ayırmışlardır: bunlar döngüsel ve doğrusal olanlardır. En bilinen döngüsel eyleyiciler DC motorlardır. Fakat DC motorla tahrik edilen ÇKMHA'larda hızı istenilen seviyeye indirgemek için dişli aktarım sistemi kullanma gerekliliği vardır. İlave dişli kutusu, motorun küçük boyutlu olma gerekliliği; DC motorlu eyleyicilerin cm ölçeğindeki ÇKMHA'nda kullanımına kısıtlamalar getirmektedir. ÇKMHA'nda boyut ve ağırlık hedefini tutturabilmek için doğrusal eyleyiciler hafif ve basit tasarımları ile daha uygun bir seçim olarak düşünülebilir. Bunlar; şekil hafızalı alaşımlar, elektro aktif polimerler, selenoid ve piezoelektrik elemanlardır. Elektro aktif polimerler yüksek gerilimlere ihtiyaç duyarlar. Böyle büyük bir gerilimi oluşturabilmek için kullanılan güç elektroniğindeki batarya büyük ve ağırdır. Selenoidler ve şekil hafızalı alaşımlar düşük bant genişliği kısıtlamasından dolayı yeterince hızlı değillerdir. Son olarak PZT malzemeler ÇKMHA için en uygun eyleyiciler olarak düşünülmüştür. Küçük boyutları, hızlı yanıt vermeleri, yüksek bant genişliği ve nispeten yüksek güç çıkışları bunun nedenleridir. Bununla birlikte PZT malzemelerin toplam deplasmanları birkaç μm'yi geçmemektedir.

PZT malzemelerin küçük deplasmanını yükseltmenin iki yöntemi vardır. Bunlar, sürtünme ile tahrik edilen mekanizmalar olan, tırtıl tipi ve darbeli itki mekanizması (DİM) yöntemiyle tahrik edilen PZT eyleyicilerdir.

Bu tezin amacı, tez kapsamında deneysel olarak geliştirilen, DİM metodu temelinde eğilme ve burulma titreşimlerini kullanan PZT kristallerin sürekli ve doğrusal hareketini tasarlanan kanat çırpma mekanizmasına uygulamaktır.

BÖLÜM 2

KAPSAM VE LİTERATÜR

Bu tez; piezoelektriklik, sürtünme ile tahrik edilen PZT mekanizmaları, yusufçuk uçuş mekaniği, sonlu eleman analizi metodu yoluyla PZT malzemelerin rezonans frekanslarının ve deplasmanlarının hesaplanması, deneysel tasarım yoluyla DİM prensibi uygulanarak PZT malzeme ile tahrik edilen ÇKMHA itki sistemi geliştirilmesi ve ÇKMHA kanat ve çırpma mekanizması tasarımı ve geliştirilmesi konularını kapsamaktadır.

Öncelikle bu bölümde; literatürdeki mevcut gelişmeler ışığında piezoelektriklik, sürtünme ile tahrik edilen PZT mekanizmaları, yusufçuk uçuş mekaniği konuları teorik olarak ifade edilmiştir.

Üçüncü bölümün ilk kısmında; kurulan deney düzenekleri ifade edilerek, yeni eyleyicinin geliştirilmesi sürecinde yapılan testlerin ve bir sonlu eleman analizi programının (ANSYS) elektromekanik modülünde yapılan analizler ve sonuçları paylaşılmıştır. DİM prensibi temelinde hareket eden PZT test numunelerinin rezonans frekansları ANSYS programı ile gerçek deneylerde kullanılmak üzere hesaplanmıştır. Aynı program ile x, y, z eksenlerindeki deplasmanlar da elde edilmiştir. Daha sonra yapılan deneyler sonucunda elde edilen çıktılar ile teorik ve numerik sonuçlar kıyaslanmıştır. Yapılan deneylerde kalibrasyonları yapılmış sensör ve enstrümanlar kullanılmıştır. Maksimum verimin elde edildiği test numunesi, tasarlanan çırpan kanat mekanizmasında itki mekanizması olarak kullanılmıştır. Üçüncü bölümün ikinci kısmında ise yusufçuktan esinlenilerek tasarlanan kanat çırpma mekanizmaları sunulmuş ve bu mekanizmalardan biri üretilerek, önceki kısımda deneysel olarak geliştirilen eyleyici ile tahrik edilmiştir.

Dördüncü bölümde elde edilen çıktılar doğrultusunda sonuç ve değerlendirme yapılmıştır.

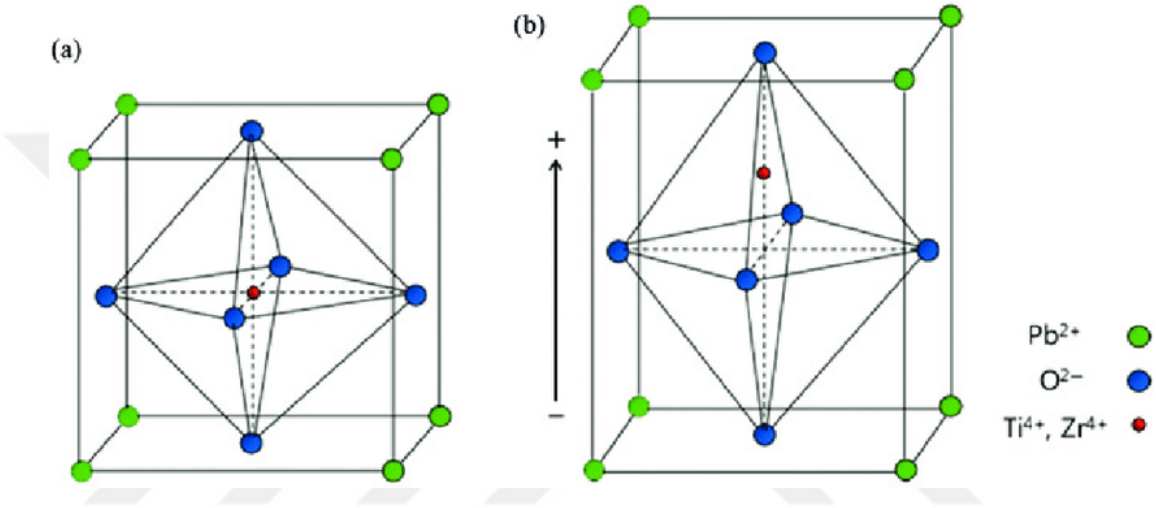
2.1. Piezoelektriklik

Curie J, Curie P. (1880)'de yaptıkları çalışmada, bazı kristallere mekanik bir gerilim uygulandığında elektrik yükü oluştuğunu gözlemlediler. Dolayısıyla, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren bu fenomeni Latince basınç anlamına gelen "piezo" ve elektrik kelimelerini birleştirerek "piezoelektriklik" olarak adlandırdılar. Daha sonra Lippman (1905) yazdığı "Termodinamik" adlı kitabında elektrik yükü altındaki PZT kristallerin mekanik gerilime maruz kalacağını matematiksel olarak ifade ederek tahmin etmiştir. Devam eden deneyler Lippman'ı haklı çıkarmış ve PZT malzemeye uygulanan elektrik alanın, mekanik deformasyon ve buna bağlı olarak mekanik bir gerilim oluşturduğu gözlemlenmiştir. Endüstriyel atılım, bilim insanlarının Baryum Titana 'ya bir elektrik alanı uygulandığında PZT özellikler kazandığını keşfetmeleriyle, yani PZT seramiklerin bulunmasıyla gerçekleşti.

Piezoelektrikliğin keşfinden sonraki en önemli kullanım alanı sonar cihazlarının geliştirilmesi olmuştur. PZT malzemelerin ilk uygulaması 1. Dünya savaşı esnasında Paul Langevin (1917) tarafından yapılan ultrasonik denizaltı bulucu idi. Bu sensörde, PZT malzemenin iki tarafına çelik plaka tutturulmuş ve rezonans frekansında titretilerek suda dalgalanmalar oluşturulmaktaydı. Ve denizaltıya çarpıp geri dönen yankının zamanlamasını ölçerek derinliğini belirliyordu. PZT kristaller halen sonar, ultrasonik dönüştürücü gibi uygulamalarda kullanılmaktadır.

Doğada bulunan PZT kristaller (Kuvars vb.), polarizasyon sürecinden geçirilerek üretilen PZT seramiklere (Baryum Titanat vb.) kıyasla daha az piezoelektriklik özellikleri gösterirler. Örneğin mekanik bir yük altında (doğrudan piezolektriklik) daha az elektriksel yük üretirler veya elektriksel alan uygulandığında (ters piezoelektriklik) daha az mekanik gerinim gözlemlenir. Ayrıca polarize edilmiş seramiklerin, PZT parametreleri ve dielektrik katsayıları, polarizasyon esnasında çeşitli iyonların ilave edilmesiyle istenilen uygulamaya göre özelliklere sahip olmaları sağlanabilir. Örneğin sensör uygulamalarında ultrasonik titreşime ihtiyaç duyulurken, eyleyici uygulamalarında daha yüksek genlik gerekesimi vardır.

Yapılan deneylerde, PZT kristallerin belli bir kritik sıcaklığın üstünde piezoelektriklik özelliklerini kaybettiği gözlemlenmiştir. Bu kritik noktadaki sıcaklık "Curie sıcaklığı (T_C)" olarak adlandırılır. Şekil 2.1b.'de görüldüğü gibi Curie sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda, PZT kristalin hücre yapısı değişerek asimetrik hale gelir ve bu durum piezoelektriklik olayının oluşması için gereklidir. Curie sıcaklığının üstünde ise malzeme piezoelektriklik özelliklerini kaybeder.

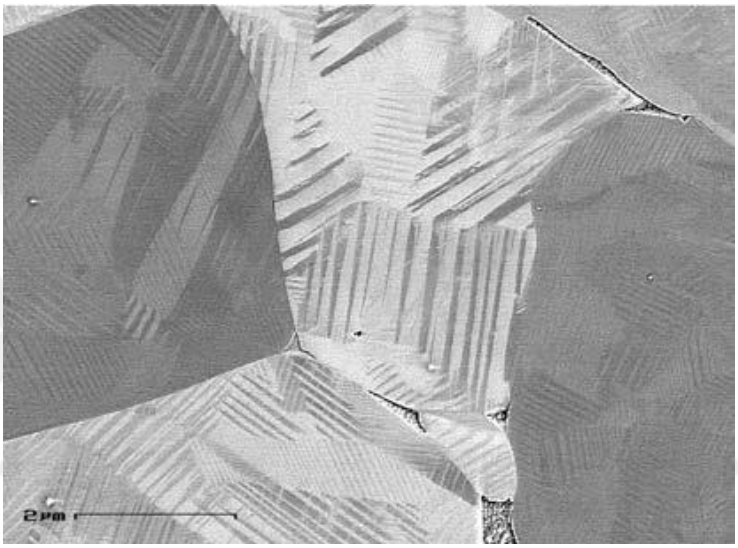


Şekil 2.1. PZT malzemenin hücre yapısı; a) Curie sıcaklığı üstünde PZT kristalin yapısı, b) Curie sıcaklığının altında PZT kristalin yapısı (Priya S. Vd. (2017).

Sonuç olarak günümüz teknolojisinde; piezoelektriklik fenomeni, doğada bulunan tek kristalli PZT malzemeler ve ferroelektrik hücre yapısına sahip PZT seramiklerde gözlemlenir. Doğada bulunan tek kristalli malzemelerde, Şekil 2.1b. de görüldüğü gibi hücre yapısında bir asimetri olmalıdır. Bu asimetri Curie sıcaklığı altında oluşmakta, üstünde ise kaybolmaktadır. Doğal tek kristalli malzemelerin polarizasyon yönü tek yöne doğru yoğunlaştığı için makroskobik olarak piezoelektrik malzeme özellikleri gösterirler.

Ferroelektrik hücre yapısına sahip PZT seramiklerin de ise hücre yapısında asimetri olmasına rağmen, Şekil 2.3. deki gibi malzemeyi oluşturan kristallerin polarizasyon yönü değişik yönlere doğrudur. Her bir kristal kendi polarizasyonu yönünde uzamaya çalışır. Sonuç olarak bir iç gerilim oluşmasına neden olurlar. Bu durum ferroelektrik hücre yapısına sahip bir PZT seramiğin mikroskobik olarak PZT özelliklere sahip fakat makroskobik olarak PZT özelliğe sahip olmadığını gösterir.

Şekil 2.2. de görüldüğü gibi ferroelektrik bir seramiğin içinde birçok farklı polarizasyon alanları vardır. Dolayısıyla seramiği makroskobik olarak piezoelektriklik özelliği kazandırılması için her bir polarizasyon alanının aynı yönde olması sağlanmalıdır. Ferroelektrik malzeme içerisindeki her bir alanın aynı yönde polarizasyona sahip olması için malzemeye istenilen kutup yönü doğrultusunda her iki uca güçlü bir elektrik alanı uygulanır. Uygulanan bu güçlü elektriksel alan polarizasyonun istenilen yönde oluşmasını sağlar.



Şekil 2.2. Ferroelektrik bir seramiğin mikroskop altında kesit görünümü

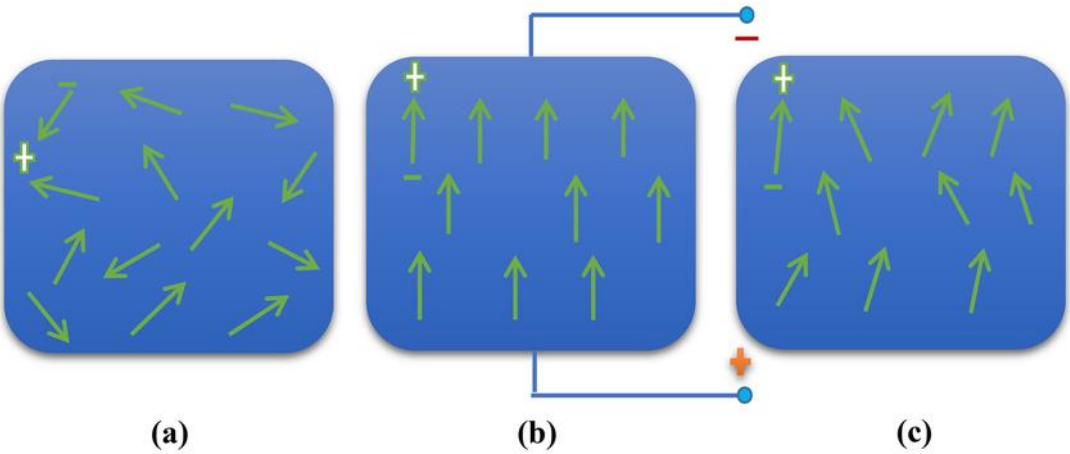
Şekil.2.3.'te bir seramiğin PZT özellik kazandırılması için polarizasyon öncesi, esnası ve sonrası kutup yönü görülmektedir. Burada;

(a) Polarize olmamış seramik: Bu durum ferroelektrik PZT malzemenin Şekil 2.2. deki kristal yapısına sahip olduğu durumdur. Dolayısıyla kristaller mikroskobik olarak PZT özellik sergilemekte fakat malzeme makroskobik olarak PZT özellik sergilememektedir.

(b) Polarizasyon esnasında seramik: Bu durumda ferroelektrik PZT malzemeye istenilen polarizasyon yönüne göre polarizasyon yönünün iki ucundan güçlü bir elektrik alan uygulanır ve makroskobik polarizasyon Şekil 2.3b. deki gibi tek yönde olur.

(c) Polarizasyon işlemi tamamlandıktan sonra PZT seramiğin kutup yönü: Güçlü elektrik alan serbest bırakılınca Şekil 2.3b.'de görüldüğü gibi polarizasyon yönünde küçük bir

sapma meydana gelir. Bu sapma PZT malzemenin doğrusal olmayan histerezis ve özelliklerin oluşmasına neden olur.



Şekil 2.3. PZT seramik bir malzemenin polarizasyon süreci; a) Polarize olmamış seramik, b) Polarizasyon esnasında seramik, c) Polarizasyon işlemi tamamlandıktan sonra PZT seramiğin kutup yönü (Korkmaz S. Kariper A. (2021)).

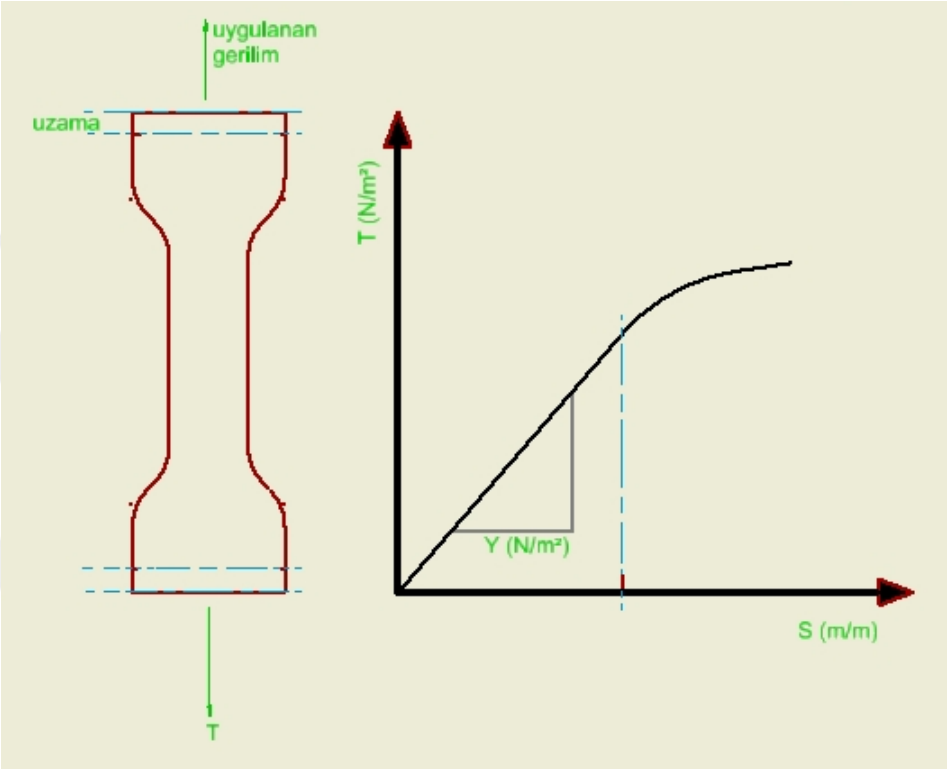
Endüstriyel olarak kullanılan PZT seramikler sert ve yumuşak olmak özere iki grupta sınıflandırılırlar ve her iki grupta kurşun zirkona-kurşun titana malzeme yapısına sahiptirler. Farklı malzemeler de ilave edilerek istenilen uygulamaya yönelik PZT özelliklere sahip olmaları sağlanabilir.

Yumuşak PZT seramikler, elektriksel bir yük altında yüksek mekanik gerinim özelliğine sahiptir. Bu durum yüksek deformasyon katsayıları olmasına dolayısıyla eyleyici vb. uygulamalar için kullanımını uygun kılmaktadır. Bu nedenle bu tez kapsamında geliştirilecek olan ÇKMHA kanat çırpma mekanizmasında yumuşak PZT seramik tercih edilmiştir.

Sert PZT malzemeler ise elektriksel yük altında düşük bir mekanik gerinim özelliğine, dolayısıyla düşük piezoelektrik deformasyon katsayılarına sahiptirler. Bu düşük gerinim nedeniyle ultrasonik seviyede titreşimin ihtiyaç olduğu durumlarda kullanılabilirler.

2.1.1. Piezoelektrik Malzemelerin Elektromekaniği

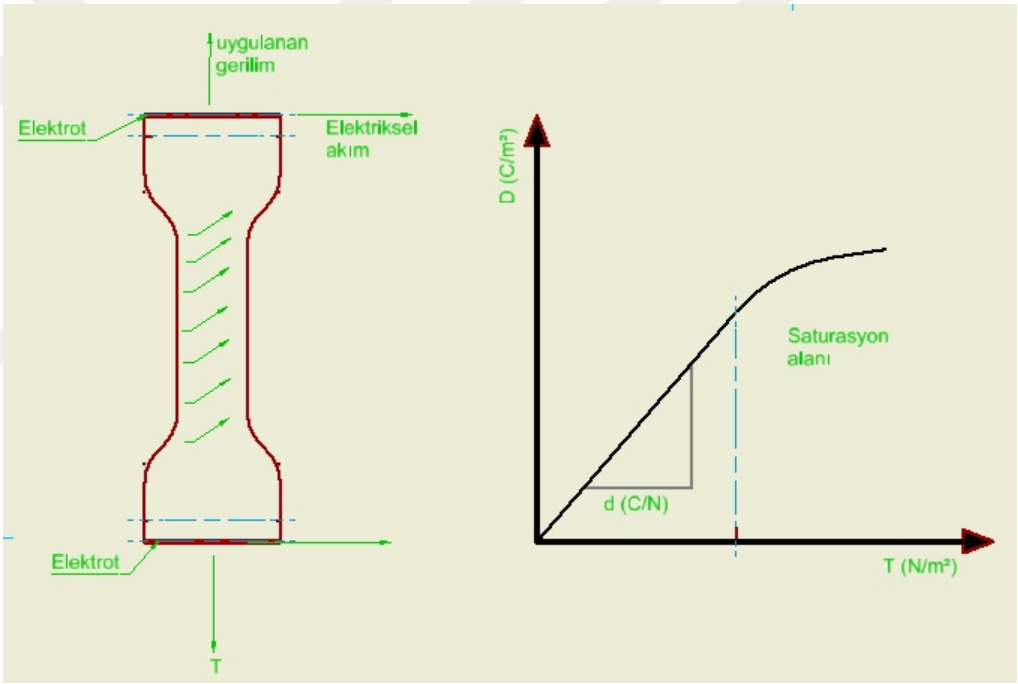
Polarizasyonu tamamlanmış PZT seramikler, mekanik ve elektriksel olarak ilişkilendirilmek için bazı katsayılar ve ilişkilerle ifade edilirler. Bu bölümde bu ilişkiler ve katsayılar sunulmuştur.



Şekil 2.4. Elastik bir malzeme için gerilme-gerinim davranışı eğrisi

Şekil 2.4.'deki gibi; uygulanan gerilim doğrultusunda hareketine izin verilen elastik bir test numunesine, tek eksende uygulanan gerilim sonucunda oluşan toplam uzamanın asıl boyuna oranı, gerinimi (S) verir. Bir elastik malzemede akma dayancına kadar olan gerilim doğrusaldır. Bu doğrusal elastik bölgede gerilme-gerinim eğrisinin eğimi sabittir ve bu sabite Young modülü (Y) denir. Akma dayancının üzerinde gerilme-gerinim eğrisinin eğimi uygulanan yükün fonksiyonu olarak değişir. Eğer bir malzeme akma dayancının üzerindeki gerilimde plastik deformasyona uğrarsa gerilme-gerinim eğrisinin eğimi daha da artacaktır, yumuşama gösterirse eğim azalacaktır.

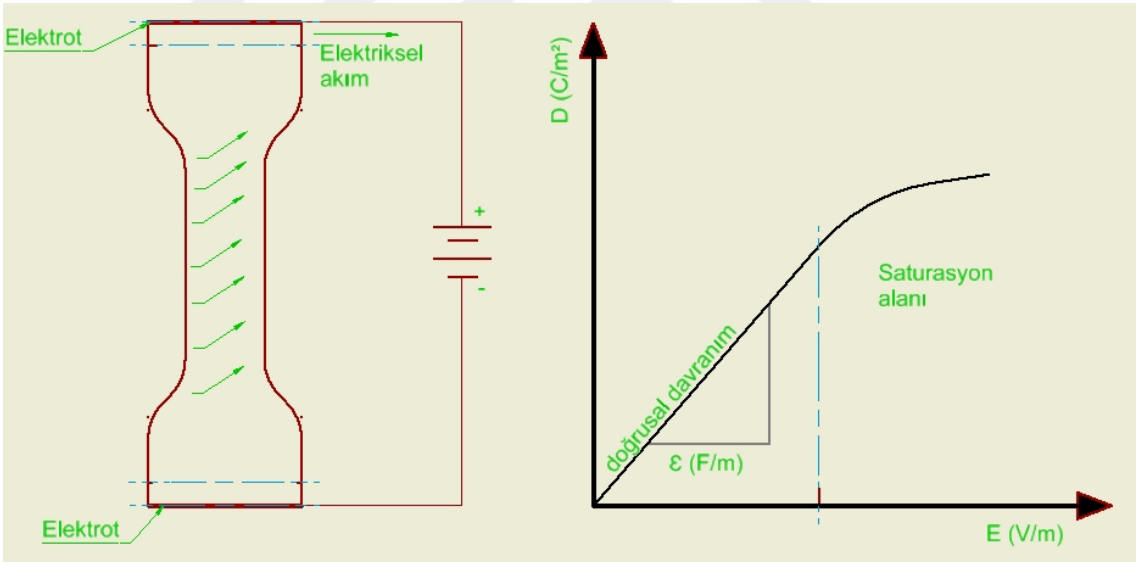
Aynı test numunesinin PZT bir malzeme olduğu kabul edilip, gerilimin uygulandığı iki uca elektrotlar yerleştirilirse, uygulanan gerilim sonucunda elastik bir malzeme gibi uzamanın yanında Şekil 2.5.'te ifade edildiği gibi elektrotlardan elektriksel bir yük akışı açığa çıkacaktır. Bu elektriksel yük akışına malzemenin içindeki elektrik dipollerinin hareketi sebep olur. Leo J. D. (2007) ifadesiyle; uygulanan gerilim, yüklü parçacıkların hareket etmesine neden olarak, iki elektrot arasında ölçülebilen elektriksel bir yük akışı oluşturur. Üretilen elektriksel yük, elektrotların alanına bölündüğünde "PZT elektriksel deplasman (D)" elde edilir. Uygulanan gerilim arttıkça elektrik dipollerinin hareketi artar, buna bağlı olarak PZT elektrik deplasman da artacaktır.



Şekil 2.5. Doğrudan PZT etki ve gerilim-elektriksel deplasman arasındaki ilişki

Şekil.2.5.'te ifade edildiği gibi belirli bir noktaya kadar uygulanan gerilim ve ölçülen elektriksel yük arasında doğrusal bir ilişki vardır. Bu noktaya kadar olan eğrinin eğimine "PZT gerinin katsayısı (d)" denir. Burada "$D\,[\mathrm{C/m^2}]$" PZT elektriksel deplasmandır. Uygulanan gerilim kritik noktayı geçtiğinde, elektrik dipollerinin hareketi satürasyona ulaşır ve gerilim-elektriksel yük arasındaki ilişki doğrusal olmaz.

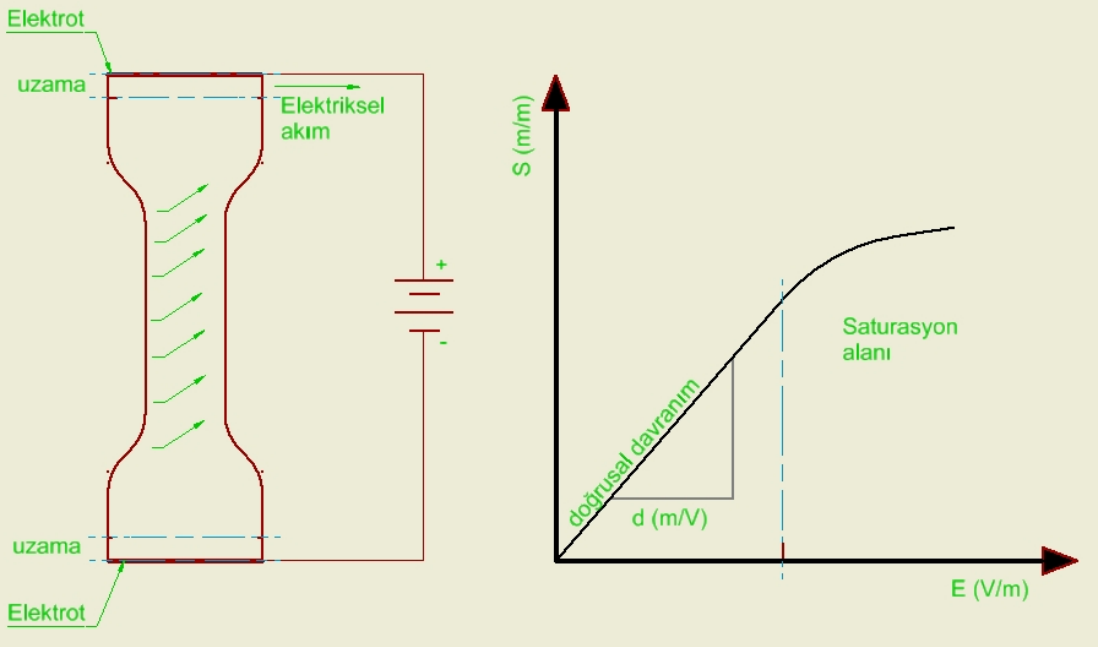
PZT malzemeler aynı zamanda ters bağıntı göstererek uygulanan elektrik alana mekanik tepki verirler. Buna “ters PZT etki” denir. Şekil 2.6.'da olduğu gibi, PZT malzemenin elektrotları arasına sabit bir potansiyel uygulandığı varsayılırsa, uygulanan potansiyel malzeme içinde bir elektriksel alan oluşturur (E), bu da uygulanan alanın elektrotlar arasındaki mesafeye bölünmesiyle elde edilir, dolayısıyla elektrik alanının birimi V/m’dir. Elektrik alanının malzemeye uygulanması, uygulanan yük ile elektrik dipolleri arasında çekim kuvvetleri oluşturur. Sonuç olarak dipol dönüşümü meydana gelir ve malzemenin elektrotlarında elektriksel yer değiştirme ölçülür. Uygulanan alanın satürasyon noktasının altında olduğu durumlarda, E ile D arasındaki ilişki doğrusal olur ve orantı sabiti olan dielektrik geçirgenlik birimi F/m cinsindendir. Uygulanan gerilimde olduğu gibi, satürasyon noktasından daha yüksek bir elektrik alanı uygulandığında dipol hareketinin doygunluğa ulaşması ve uygulanan alan ile elektriksel yer değiştirme arasında doğrusal olmayan bir ilişki üretmesi görülür.



Şekil 2.6. Ters PZT etkide elektriksel alan ve elektriksel yer değiştirme arasındaki ilişki

Doğrudan PZT etkide, bir mekanik gerilme uygulandığında dipol rotasyonu ve görünen yük akışı oluşur. Bir elektrik alanı uygulandığında ise dipol rotasyonu meydana gelir ve malzemede bir gerilme oluşturur (Şekil 2.7.). Satürasyon noktası altındaki elektrik alanı değerlerinde, uygulanan alan ile mekanik gerinim arasında doğrusal bir

ilişki gözlemlenir. Uygulanan alan ile gerinim arasındaki ilişkinin eğimi PZT gerilme katsayısına eşittir.



Şekil 2.7. Ters PZT etki için elektriksel alan ve gerilim arasındaki ilişki

Sonuç olarak bir piezoelektrik malzemenin temel özellikleri, iki mekanik değişken (gerilim ve gerinim) ve iki elektriksel değişken (elektriksel alan ve elektriksel deplasman) arasındaki ilişki olarak ifade edilir.

2.1.2. Piezoelektrikliğin Bünye Denklemleri

Piezoelektrikliğin bünye denklemleri 20. Yüzyılın ikinci çeyreğinde şekillenmiştir. Günümüze kadar birçok makale ve kitap yazılmış olup, aralarındaki tek fark notasyonlarıdır. Bu çalışmada "Amerikan Ulusal Standart Enstitüsü" için "Amerikan Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE)" tarafından hazırlanan "ANSI/IEEE Std 176-1987" kod numaralı "IEEE Piezoelektriklik Standartları" adlı standart ve Tiersten H.F. (1969) tarafından yazılan referans kitaptan alıntı yapılmıştır.

PZT cisimlerin küçük titreşimleri, piezoelektrikliğin doğrusal teorisinin denklemleriyle yönetildiğini Tiersten H.F. (1969) ifade etmiştir. Yine Tiersten H.F. (1969) piezoelektrikliğin elektriksel yükün mekanik harekete, mekanik hareketin ise

elektriksel alana bağlı olduğunu ifade ederek; mekanik gerinim-gerilim denklemleri, PZT katsayılar ve sabitler aracılığıyla elektrostatik denklemleriyle birleştirildiğini belirtmiştir. Piezoelektrikliğin doğrusal teorisinin çıkarımı yapılırken, sonsuz küçük mekanik sapma ve gerilimin denklemleri öncelikle ifade edilir, ardından elektriksel tarafta ise Maxwell denklemlerinden başlayarak Poyntik teoreminin çıkarımı yapılır ve çeşitli kabuller ve PZT katsayıları kullanılarak yarı statik elektrik denklemleri elde edilerek mekanik gerinim ve sapma denklemlerine bağlanır. Denklem (2.1)'den denklem (2.69)'a kadar olan çıkarım piezoelektrikliğin bünye denklemlerinin nasıl bağlandığını göstermekte olup Tiersten H.F. (1969) tarafından yapılarak ispatlanmıştır. Bu denklemler Tiersten H.F. (1969) yazdığı kitaptan alıntılanmıştır.

Maxwell denklemleri şu şekildedir,

$$\boldsymbol{\nabla} \times \mathbf{H} = \frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \mathrm{t}} + \frac{4\pi}{c}\mathbf{J} \tag{2.1}$$

$$\boldsymbol{\nabla} \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial \mathrm{t}} \tag{2.2}$$

burada **H** manyetik alan yoğunluğu, **E** elektrik alan yoğunluğu, **D** elektriksel yer değiştirme vektörü ve **B** manyetik akı vektörüdür. Bu vektör alanları aşağıdaki denklemlerle ilişkilidir,

$$\mathbf{D} = \mathbf{E} + 4\pi\mathbf{P} \tag{2.3}$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{H} + 4\pi\mathbf{M} \tag{2.4}$$

burada **P** polarizasyon vektörü ve **M** manyetizma vektörüdür. **D**, **E** ve **P** polar vektörler iken **B**, **H** ve **M** eksenel vektörlerdir. Aşağıdaki iki yardımcı denklemler ile toplamda altı Maxwell denklemi vardır.

$$\boldsymbol{\nabla} \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{2.5}$$

$$\boldsymbol{\nabla} \cdot \mathbf{D} = 4\pi\rho_e \tag{2.6}$$

Denklem (2.5) diğer bağıntılardan çıkarılabilir ve (2.6) basitçe ρ_e'yi elektrik yükünün korunum denklemi olacak şekilde tanımlar.

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \boldsymbol{\nabla} \cdot \mathbf{J} = 0 \tag{2.7}$$

Maxwell diferansiyel denklemleri, uygun türevlenebilirdik koşulları varsayıldığında integral formlarından belirlenir. İntegral formlar şunlardır:

Ampere kanunu:

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot \mathrm{d}\mathbf{r} = \frac{1}{c}\int_S \mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{D}}\, ds + \frac{4\pi}{c}\int_S \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}\, ds, \tag{2.8}$$

Faraday kanunu:

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\mathbf{r} = -\frac{1}{c}\int_S \mathbf{n} \cdot \dot{\mathbf{B}}\, ds, \tag{2.9}$$

$$\int_S \mathbf{n} \cdot \mathbf{B}\, ds = 0, \tag{2.10}$$

$$\int_S \mathbf{n} \cdot \mathbf{D}\, ds = 4\pi \int_V \rho_e\, dV, \tag{2.11}$$

Denklem (2.8) ve (2.9)'daki "*l*" keyfi bir kapalı devreyi ve "*S*" ise "*l*" içinde bulunan keyfi bir açık yüzeyi ifade eder. Denklemler (2.10) ve (2.11)'deki "*S*" keyfi bir kapalı yüzeyi ifade eder. Sonuç olarak elektrik yükünün korunumunun integral biçimi şu biçimi alır,

$$\int_S \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}\, ds = -\int_V \dot{\rho}_e\, dV, \tag{2.12}$$

buradaki "*S*" kapalı bir yüzeydir.

İndis notasyon gösterimde Maxwell denklemleri (2.1) ve (2.2) ve (2.5) ve (2.6) sırasıyla şu biçimde ifade edilebilir:

$$e_{ijk} H_{k,j} = \frac{1}{c}\dot{D}_i + \frac{4\pi}{c} J_i \tag{2.13}$$

$$e_{ijk} E_{k,j} = \frac{1}{c}\dot{B}_i \tag{2.14}$$

$$B_{i,i} = 0 \tag{2.15}$$

$$D_{i,i} = 4\rho_e \tag{2.16}$$

Bu denklemler, vektör ve skalar potansiyeller "**A**" ve "φ" kullanılarak yeniden aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$B_i = e_{ijk} A_{k,j} \tag{2.17}$$

$$e_{ijk}\left(E_k + \frac{1}{c}\dot{A}_k\right)_{,j} = 0 \tag{2.18}$$

$$\left(E_k + \frac{1}{c}\dot{A}_k\right) = -\varphi_{,k} \tag{2.19}$$

Yine Tiersten H.F. (1969) (1969) kitabında $A_{k,k}$ keyfi bir skalar sayı olduğunu ve $A_{k,k}$ için farklı seçimlerin farklı göstergeleri belirleyeceğini ifade etmiştir. "**A**" vektör potansiyeli benzersiz değildir çünkü diğer herhangi bir $\overline{\mathbf{A}}$ şu şekilde tanımlanabilir:

$$\overline{\mathbf{A}} = \mathbf{A} + \boldsymbol{\nabla\Psi} \tag{2.20}$$

Burada $\boldsymbol{\Psi}$ herhangi bir skalar veya vektör potansiyeli olarak da kullanılabilirdi, çünkü

$$\boldsymbol{\nabla} \times \boldsymbol{\nabla\Psi} = 0$$

Vektör ve skalar potansiyel açısından yazıldığında Maxwell denklemleri (2.13), (2.17) ve (2.19) olur ve şu şekilde yeniden yazılır:

$$e_{ijk}H_{k,j} = \frac{1}{c}\dot{D}_i + \frac{4\pi}{c}J_i \tag{2.21}$$

$$B_i = e_{ijk}A_{k,j} \tag{2.22}$$

$$E_k = -\varphi_{,k} - \frac{1}{c}\dot{A}_k \tag{2.23}$$

Denklemler (2.3) ve (2.4) tanımlarıyla birlikte, burada yeniden ifade edilirse

$$D_i = E_i + 4\pi P_i\,, \qquad H_i = B_i - 4\pi M_i \tag{2.24}$$

olur. Ve yardımcı denklem (2.16) şu formu alır,

$$D_{i,i} = 4\pi\rho_e. \tag{2.25}$$

"**A**" ve dolayısıyla "φ" tek olmasa da "E", "H", "B", "D" ve "J" tektir.

Denklemler (4.13) ve (4.14)'ten şu ifade oluşturulur:

$$E_i e_{ijk}H_{k,j} = \frac{1}{c}\dot{D}_i + \frac{4\pi}{c}J_i \tag{2.26}$$

$$H_i e_{ijk}E_{k,j} = -\frac{1}{c}H_i\dot{B}_i \tag{2.27}$$

ve bu ifadeleri birbirinden çıkararak şu sonucu elde ederiz

$$e_{ijk}E_iH_{k,j} - e_{ijk}H_iE_{k,j} = \frac{1}{c}E_i\dot{D}_i + \frac{1}{c}H_i\dot{B}_i + \frac{4\pi}{c}E_iJ_i$$

$$-\left(e_{ijk}E_iH_k\right)_{,j} = \frac{1}{c}\left(E_i\dot{D}_i + H_i\dot{B}_i\right) + \frac{4\pi}{c}E_iJ_i \tag{2.28}$$

$$-\frac{c}{4\pi}\oint_S \mathbf{n}\cdot\mathbf{E}\times\mathbf{H}\,dS = \int_V \frac{1}{4\pi}\left(\mathbf{E}\cdot\dot{\mathbf{D}}+\mathbf{H}\cdot\dot{\mathbf{B}}\right)dV + \int_V \mathbf{E}\cdot\mathbf{J}\,dV \tag{2.29}$$

Denklem (2.29) Poynting teoremidir. Maxwell denklemlerinin matematiksel bir sonucudur. Şimdi yukarıdaki terimler tamamen elektromanyetik durum için fiziksel olarak yorumlamaya çalışılsın. Bu yapıldığında yalnızca tamamen elektromanyetik durum için bir enerji denklemi elde edilecektir. Örneğin termal veya mekanik gibi herhangi bir etkileşim mevcut olduğunda bu bir enerji denklemi değildir. Ancak her durumda Maxwell denklemleriyle uyumlu olan matematiksel bir özdeşliktir.

"**h"** şu şekilde belirlensin,

$$\mathbf{h} = \frac{c}{4\pi}\mathbf{E}\times\mathbf{H} \tag{2.30}$$

ve $\left(\mathbf{E}\cdot\dot{\mathbf{D}}+\mathbf{H}\cdot\dot{\mathbf{B}}\right)/4\pi$ elektromanyetik enerjinin değişim oranıyla, $\dot{\mathbf{U}}$ ile özdeşleşsin. Bu son özdeşleştirme genel olarak şüphelidir, ancak amaç için yeterlidir. Dahası, elektromanyetik gövde kuvveti sorusuyla yakından ilişkili olan bu nitelikteki sorular, gövde kuvveti ve sonlu deformasyon soruları gibi ve aynı nedenlerle tamamen göz ardı edilecektir. Sonra bu tamamen elektromanyetik durumda Poynting'in teoremi (2.29) şunu verir

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V U\,dV = -\int_S \mathbf{n}\cdot\mathbf{h}\,dS - \int_V \mathbf{E}\cdot\mathbf{J}\,dV \tag{2.31}$$

Kullanılan yoruma göre, $\mathbf{E}\cdot\mathbf{J}$ terimi olağan Joule ısı terimidir. Tamamen elektromanyetik durum için enerji denklemi (2.31) artık keyfi bir hacimdeki iç enerjinin değişim zaman oranının, elektromanyetik enerjinin hacmi çevreleyen yüzeyden dışarı aktığı hız eksi elektrik enerjisinin termal yollarla hacim içinde dağıldığı hıza eşit olduğunu ileri sürer.

Önceki değerlendirmeler denklem (2.30)'da tanımlanan "**h**" vektörünün bir yüzey boyunca enerji akısı vektörünü temsil ettiği ve kapalı bir yüzey boyunca dışarıya doğru yönlendirildiğinde pozitif kabul edildiği gerçeğini gösterdi. Poynting vektörü olarak adlandırılan bu denklem birim alan başına enerji/birim zaman veya birim alan başına güç birimlerine sahiptir.

Elektromanyetik potansiyeller **A** ve "φ" Poynting teoremini gerekli amaçlar için özellikle yararlı bir forma koyulmasını sağlar. Poynting'in diferansiyel denklemindeki terim ele alınırsa; bu terim, denklem (2.31)'deki Poynting enerji akısı vektörü "**h**"'den sorumludur. Denklem (2.28) $\frac{c}{4\pi}$ ile çarpılırsa

$$-h_{i,i} = -\left(\frac{c}{4\pi} e_{ijk} E_j H_k\right)_{,i}$$

sonucu elde edilir. Bu sonuç denklem (2.23)'ten çıkarılırsa

$$-h_{i,i} = \frac{c}{4\pi}\left[e_{ijk}\left(\varphi_{,j} + \frac{1}{c}\dot{A}_j\right)H_k\right]_{,i} = \frac{c}{4\pi} e_{ijk}\left[\varphi_{,j} H_{k,i} + \frac{1}{c}\left(\dot{A}_j H_k\right)_{,i}\right]$$

olur. Ve ardından denklem (2.21)'den çıkartılırsa

$$-h_{i,i} = \frac{c}{4\pi}\varphi_{,j}\left(\frac{1}{c}\dot{D}_j + \frac{4\pi}{c} J_j\right) + \frac{1}{4\pi}\left(e_{ijk}\dot{A}_j H_k\right)_{,i} = -\frac{1}{4\pi}\left[\left(\varphi\dot{D}_j\right)_{,j} - \varphi\dot{D}_{j,j}\right] - \left(\varphi J_j\right)_{,j} + \frac{1}{4\pi}\left(e_{ijk}\dot{A}_j H_k\right)_{,i}$$ olur.

Son olarak denklem (2.21) ile birleştirilip diverjans teoremi uygulandığında aşağıdaki formu alır.

$$-h_{i,i} = -\left[\varphi\left(\frac{\dot{D}_i}{4\pi} + J_i\right) - \frac{1}{4\pi} e_{ijk}\dot{A}_j H_k\right]_{,i}. \tag{2.32}$$

Denklem (2.32), denklem (2.28)'e ikame ederek ve keyfi bir hacim üzerinden integral alarak diverjans teoremi uygulanırsa, denklem (2.29)'daki Poynting teoremi şu şekli alır:

$$-\int_S n_i\left[\varphi\left(\frac{\dot{D}_i}{4\pi} + J_i\right) - \frac{1}{4\pi} e_{ijk}\dot{A}_j H_k\right] dS = \int_V \frac{1}{4\pi}\left(E_i\dot{D}_i + H_i\dot{B}_i\right)dV + \int_V E_i J_i dV \tag{2.33}$$

Ve sonuç olarak, tamamen elektromanyetik durum için denklemler (2.32) ve (2.33)'ten önceki enerji denklemi olan denklem (2.31) elde edilir.

$$h_i = \varphi\left(\frac{\dot{D}_i}{4\pi} + J_i\right) - \frac{1}{4\pi} e_{ijk}\dot{A}_j H_k \tag{2.34}$$

Şimdi, $h_i(c/4\pi)e_{ijk}E_j H_k$ tek iken, (4.34)'teki mevcut "h_i" tek değildir, çünkü "φ" ve "A_j" tek değildir. Yine de mevcut durumda $\int_S n_i h_i\, dS$, burada "S" herhangi bir kapalı yüzey olduğunda, tek olduğu biliniyor ve önemli olan tek şey budur. Dahası, "**h**" tek formu, Poynting teoremini ihlal etmeden, **V**'yi herhangi bir vektör olduğu $\nabla \times \mathbf{V}$'ye eklenebilir. Çünkü $\int_S \mathbf{n} \cdot \nabla \times \mathbf{V}\, dS = 0$. Burada "**S**" keyfi bir kapalı yüzeydir. Yani, tek olmayan "**h**"'lerin hepsi bir vektörün rotasyoneline göre farklılık gösterir ve bu önemli değildir çünkü yüzey integrali sıfır olur.

Yarı statik elektrik alanı varsayımı: Tiersten (1969) kitabında, piezoelektriklik düşünüldüğünde, iyi bir yaklaşımla aynı denklemleri veren, yalnızca polarize edilebilir

(ancak mıknatıslanabilir değil) dielektrikleri ele alındığı takdirde, bütün denklemlerde şu durumun belirlendiğini belirtmiştir:

$$\rho_e = J_i = M_i \equiv 0 \tag{2.35}$$

Bu durumda denklemler (2.35) ve (2.24)'ten

$$H_i \equiv B_i \tag{2.36}$$

ve H_i (ve dolayısıyla A_i) sıfır olamaz, çünkü denklemler (2.21) ve (2.35)'ten

$$\boldsymbol{\nabla} \times \mathbf{H} = \frac{1}{c}\dot{\mathbf{D}} \tag{2.37}$$

Dolayısıyla

$$\dot{\mathbf{D}} \neq 0 \tag{2.38}$$

Bu durumda Maxwell denklemleri (2.21) -(2.23) şu biçimi alır:

$$e_{ijk}H_{k,j} = \frac{1}{c}\dot{D}_i \tag{2.39}$$

$$H_k = e_{klm}A_{m,l} \tag{2.40}$$

$$E_i = -\varphi_{,i} - \left(\frac{\dot{A}_i}{c}\right) \tag{2.41}$$

Ve denklem (2.24)'ten

$$D_i = E_i + 4\pi P_i \tag{2.42}$$

Ve son olarak, denklemler (2.25) ve (2.35)'ten yardımcı denklem olarak aşağıdaki ilişki vardır:

$$D_{i,i} = 0. \tag{2.43}$$

Piezoelektrik denklemleri elde etmek için kullanılan temel basitleştirici varsayım, bir probleme giren $\varphi_{,i}$'ın her bir bileşeninin aşağıdaki koşulları sağlamasıdır:

$$\left|\frac{\dot{A}_i}{c}\right| \ll \left|\varphi_{,i}\right| \tag{2.44}$$

Bu varsayım deneysel olarak ortaya çıkmıştır. Temel olarak elektromanyetik dalgalar, elastik dalgalardan ayrıldığında ve aynı frekanstaki elektromanyetik dalga boyundan çok daha kısa olan elastik dalgaya yakın dalga boyları düşünüldüğünde geçerlidir (Tiersten (1969)). Denklem (2.44)'ün geçerliliği için koşul şudur (Tiersten (1969)):

$$\omega/c \ll |k_i| \tag{2.45}$$

burada "k_i"; denklemler (2.39) -(2.41)'in dalga benzeri bir çözümü için dalga sayısının bir bileşenini temsil eder. Denklem (2.45)'in ve denklem (2.44)'ün geçerliliği için koşul olduğu, denklemler (2.39) -(2.41)'in dalga benzeri bir çözümünü $\frac{\dot{A}_i}{c} = 0$ hakkında ardışık bir yaklaşım biçiminde ele alarak kolayca görülebilir (Tiersten (1969)). Yine Tiersten (1969) denklem (2.41)'de $\frac{\dot{A}_i}{c}$ ihmal edildiğinde, yardımcı denklem (2.43) "φ"′yi bulmak için kullanılabileceğini ve bu şekilde belirlendiğinde, $\dot{A}_i$ (2.39) ve (2.40) kullanılarak, artık bilinen D_i ile denklem (2.39)'un sağ tarafında belirlenebileceğini ve sonuç olarak her biri için şartın şu ilişki olduğunu ifade etmiştir:

$$|A_i| \ll |\varphi|. \tag{2.46}$$

Denklem (2.45) geçerli olması, denklem (2.44)'ün de geçerli olduğunu ve bu ardışık yaklaşım prosedürüne artık bilinen sıfır olmayan A_i ile devam edebilir ve "φ"′ için ikinci bir yaklaşım belirlenebilir (Tiersten H.F. (1969)). Dahası, denklem (2.45) geçerli olduğunda, denklemler (2.39) ve (2.46)'dan denklem (2.34)'teki Poynting enerji akısının manyetik kısmının elektrik kısmına kıyasla ihmal edilebilir olduğu açıktır ve bu gerçek ve denklem (2.35) sayesinde, bu yarı statik elektrik durumunda Poynting enerji akısının dejeneratif formu denklem (2.34)'ten şu şekilde yazılabilir (Tiersten H. F. (1969)):

$$h_i = \varphi \dot{D}_i/4\pi \tag{2.47}$$

Ek olarak, denklem (2.45)'in piezoelektrik gövdenin hemen dışındaki vakumda (veya havada) ve aynı zamanda içinde tutulması gerektiğinden denklemler (2.44), (2.46) ve (2.47) arayüzündeki elektriksel sınır koşullarını karşılamak için aynı bölgede tutulur ve sonuç olarak piezoelektrik gövdenin hemen yakınındaki vakumda elektrik denklemi şu şekildedir:

$$\varphi_{,kk} = 0 \tag{2.48}$$

Bu denklemler kullanılarak artık doğrusal bir PZT süreklilik için enerjinin korunumu yazılabilir.

Tiersten (1969) piezoelektrik bir ortam için enerjinin korunumu ilkesinin, birim dışa doğru normali "**n**" olan bir "S" yüzeyi ile sınırlanmış herhangi bir hacim "V" deki enerji artış hızının (kinetik artı içsel), "S" boyunca etki eden yüzey çekişlerinin "S"

boyunca dışarıya doğru elektrik enerjisi akısının çıkarılmasına eşit olduğunu ifade ederek, aşağıdaki ilişkinin,

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V \left(\frac{1}{2}\rho\dot{u}_j\dot{u}_j + U\right) dV = \int_S \left(t_j\dot{u}_j - n_j\varphi\dot{D}_j\right) dS \tag{2.49}$$

enerjinin korunumunun denklemi olarak yazılabileceğini açıklamıştır.

Hareketin gerilim denklemleri,

$$T_{ij,i} = \rho\ddot{u}_j \tag{2.50}$$

(burada T_{ij} simetriktir). Elektrostatiğin yük denklemi, (denklem (2.43);

$$D_{i,i} = 0 \tag{2.51}$$

Elektrik alanı-elektrik potansiyeli ilişkileri, (2.41), (2.44) ile,

$$E_k = -\varphi_{,k} \tag{2.52}$$

Gerinim-mekanik yer değiştirme ilişkileri,

$$S_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \tag{2.53}$$

Ayrıca aşağıdaki ilişkiler yapılan çıkarımlardan elde edilmiştir:

$$dV = dV_0(1 + \Delta) \approx dV_0 \tag{2.54}$$

Burada

$$\Delta = u_{k,k} \ll 1 \tag{2.55}$$

Böylece

$$\rho = \rho_0(1 - \Delta) \approx \rho_0 \tag{2.56}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} dV \approx \dot{\Delta V}_0 \approx \dot{\Delta V} \tag{2.57}$$

$t_j = n_i T_{ij}$'i Denklem (2.49)'un içine atıp diverjans teoremi uygulanırsa aşağıdaki şekli alır,

$$\rho\ddot{u}_j\dot{u}_j + \dot{U} = \left(T_{ij}\dot{u}_j\right)_{,i} - \left(\varphi\dot{D}_i\right)_{,i}$$

$$\dot{U} = \left(T_{ij,i} - \rho\ddot{u}_j\right)\dot{u}_j + T_{ij}\dot{u}_{j,i} - \varphi\dot{D}_{i,i} - \varphi_{,i}\dot{D}_i$$

Tiersten (1969) denklemler (2.50) -(2.53)'ü bu denklemin içinde yer değiştirerek aşağıdaki formu aldığını ifade etmiştir ve bu formun PZT bir malzeme için termodinamiğin birinci yasası olduğunu ileri sürmüştür.

$$\dot{U} = T_{ij}\dot{S}_{ij} + E_i\dot{D}_i \tag{2.58}$$

Tiersten (1969) entalpinin "H" aşağıdaki gibi belirlendiğinde:

$$H = U - E_iD_i \tag{2.59}$$

ve ardından zamana göre türevi alındığında aşağıdaki sonucu elde etmiştir,

$$\dot{H} = T_{ij}\dot{S}_{ij} - E_i\dot{D}_i \tag{2.60}$$

Ve denklem (2.58) ile birleştirilirse

$$\dot{H} = T_{ij}S_{ij} - D_i\dot{E}_i \text{ olur.} \tag{2.61}$$

Denklem (2.61) şu durumu ifade etmektedir;

$$H = H(S_{kl}, E_k) \tag{2.62}$$

Denklem (2.62)'nin zamana göre türevi alındığında,

$\dot{H} = \frac{\partial H}{\partial S_{ij}}\dot{S}_{ij} + \frac{\partial H}{\partial E_i}\dot{E}_i$ olur.

Denklem (2.60) bu denkleme uygulanırsa aşağıdaki sonuç elde edilir:

$$\left(T_{ij} - \frac{\partial H}{\partial S_{ij}}\right)\dot{S}_{ij} - \left(D_i - \frac{\partial H}{\partial E_i}\right)\dot{E}_{ij} = 0 \tag{2.63}$$

Denklem (2.63), keyfi S_{ij} ve $\dot{E}_{ij}$ için geçerli olması gereken bir özdeşlik olduğundan ve $\dot{S}_{ij} = \dot{S}_{ji}$ koşuluyla tutarlı olduğundan, sonuç olarak aşağıdaki denklem elde edilir:

$$T_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial H}{\partial S_{ij}} + \frac{\partial H}{\partial S_{ji}}\right) \tag{2.64}$$

$$D_i = -\frac{\partial H}{\partial E_i} \tag{2.65}$$

$S_{ij} = S_{ji}$ şeklinde simetrik tensör kabulüyle

$T_{ij} = \frac{\partial H}{\partial S_{ij}}$ olur. (2.66)

Tiersten H. F. (1969) sadece doğrusal teori gerektiği için "H" için homojen bir ikinci dereceden formun aşağıdaki gibi oluşturulması gerektiğini ifade etmiştir;

$$H = \frac{1}{2} c_{ijkl}^{E} S_{ij} S_{kl} - e_{kij} E_k S_{ij} - \frac{1}{2} \varepsilon_{ij}^{S} E_i E_j \tag{2.67}$$

Burada

$c_{ijkl} = c_{ijlk} = c_{jikl} = c_{klij}$

$e_{ijk} = e_{ikj}$

$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$

Malzemenin hiçbir simetri ekseni olmadığı durumda (simetri merkezi olmayan anizotropik malzeme) 21 bağımsız elastik sabit, 18 bağımsız piezoelektrik sabit ve altı bağımsız dielektrik sabiti vardır. "**e**" birinci dereceden bir polar tensördür ve simetri merkezi olan herhangi bir malzemede var olamaz.

Denklemler (2.65) -(2.67) kullanılarak doğrusal piezoelektrik yapısal denklemleri şu şekilde ifade edilir,

$$T_{ij} = c_{ijkl}^{E} S_{kl} - e_{kij} E_k \tag{2.68}$$

$$D_i = e_{ikl} S_{kl} - \varepsilon_{ij}^{S} E_k \tag{2.69}$$

Tensör notasyonunda ifade edilen piezoelektriklik bünye denklemleri sıkıştırılmış notasyonda matris şeklinde yazılabilir. Piezoelektrik (veya elastik) titreşim problemlerinin çözümünü belirlemek için ele alınan malzemenin belirli simetrisi için malzeme katsayılarının dizilerinin bilinmesi gerekir. Malzeme simetrileri ele alınırken, matris notasyonundaki gösterim, genişletilmiş tensör gösteriminden daha anlaşılır olur.

Bu matris gösterimi, "ij" veya "kl" yi "p" veya "q" ile değiştirmekten oluşur, burada "i, j, k, l", 1, 2 ve 3 değerlerini alır ve "p" ve "q", Çizelge.2.1.'de gösterildiği gibi 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 değerlerini alır.

Çizelge 2.1. PZT Bünye Denklemlerini Matris Notasyonu ile İfadesi

ij* veya *kl	***p* veya *q***
11	1
22	2
33	3
23 veya 32	4
31 veya 13	5
12 veya 21	6

$$c_{ijkl} = c_{pq}, \quad e_{ikl} = e_{ip}, \quad T_{ij} \equiv T_p$$

Yukarıdaki tanımlamalar ile denklemler (2.68) ve (2.69)'daki kurucu ilişkiler şu şekilde yazılır:

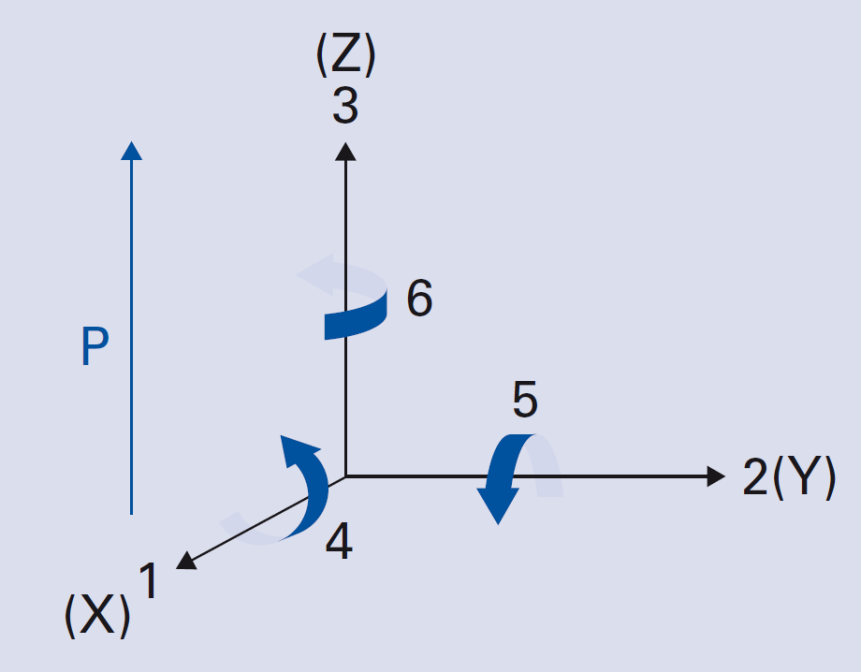
$$T_p = c_{pq}^E S_q - e_{kp} E_k \tag{2.70}$$

$$D_i = e_{iq} S_q - \varepsilon_{ik}^S E_k \tag{2.71}$$

$$S_{ij} = S_p \ \ when\ i = j, \ \ p = 1, 2, 3$$

$$2S_{ij} = S_p \ \ when\ i \neq j, \ \ p = 4, 5, 6 \tag{2.72}$$

Yukarıdaki benzerlikler kullanılarak elastik, piezoelektrik ve dielektrik sabitleri matrisler olarak yazılabilir, çünkü hepsi iki indisle tanımlanmıştır.



Şekil 2.8. Bir malzemenin özelliklerini tensör formatında tanımlamak için ortogonal koordinat sistemi.

Simetri merkezi olmayan anizotropik bir malzeme için matris ifadesi şu şekildedir:

$$c_{pq}^{E} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{14} & c_{24} & c_{34} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{15} & c_{25} & c_{35} & c_{45} & c_{55} & c_{56} \\ c_{16} & c_{26} & c_{36} & c_{46} & c_{56} & c_{66} \end{bmatrix} \tag{2.73}$$

$$e_{ip} = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & e_{14} & e_{15} & e_{16} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & e_{24} & e_{25} & e_{26} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & e_{34} & e_{35} & e_{36} \end{pmatrix} \tag{2.74}$$

$$\varepsilon_{ij}^{S} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \tag{2.75}$$

Denklemler (2.73), (2.74) ve (2.75)'te 21+18+6 = 45 bağımsız sabit vardır.

"x_1"in diyagonal eksen olduğu monoklinik simetriye sahip bir malzeme için matris formundaki ifade ise şu şekildedir:

$$c_{pq}^{E} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & c_{34} & 0 & 0 \\ c_{14} & c_{24} & c_{34} & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & c_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{56} & c_{66} \end{bmatrix} \tag{2.76}$$

$$e_{ip} = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & e_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{25} & e_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{35} & e_{36} \end{pmatrix} \tag{2.77}$$

$$\varepsilon_{ij}^{S} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ 0 & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \tag{2.78}$$

Denklemler (2.73), (2.74) ve (2.75)'te görüldüğü gibi monoklinik bir kristal için toplam 13+8+4= 25 bağımsız sabit vardır.

"x_3" ekseni ve "x_1" diyagonal eksende simetrik olan bir piezo kristali göz önüne alındığında ise matris formları şu biçimi alır:

$$c_{pq}^{E} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & -c_{14} & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ c_{14} & -c_{14} & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & c_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{14} & c_{66} \end{bmatrix} \tag{2.79}$$

$c_{66} = \frac{1}{2}(c_{11} - c_{12})$,

$$e_{ip} = \begin{pmatrix} e_{11} & -e_{11} & 0 & e_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{14} & -e_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \tag{2.80}$$

$$\varepsilon_{ij}^{S} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \tag{2.81}$$

Böylece bu tür üçgen simetriye sahip bir malzemenin 6+2+2 = 10 bağımsız malzeme sabiti ile tanımlandığı görülmektedir.

PZT malzemelerin özelliklerini belirten bazı katsayılar vardır. Bu özellikler göz önünde bulundurularak arzu edilen uygulamaya uygun piezo kristal malzeme seçimi yapılır. Bu katsayılar açıklaması aşağıdaki gibidir.

a) Geçirgenlik (ε): Bağıl geçirgenlik veya bağıl dielektrik katsayısı, ε, seramik malzemenin mutlak geçirgenliği ile vakumdaki geçirgenliğin oranıdır (ε_0 = 8,85 x 10 -12 F/m), burada mutlak geçirgenlik polarize edilebilirliğin bir ölçüsüdür. İletkenliğin elektrik alanının yönelimine ve akı yoğunluğuna olan bağımlılığı indekslerle açıklanmaktadır. Mesela;
ε_{33}^{T} : sabit mekanik stres koşulları altında (T = 0: "serbest" geçirgenlik) bir elektrik alanı polarite yönüne paralel olarak uygulandığında (yön 3) polarizasyon yönündeki geçirgenlik değeridir.
ε_{33}^{T} : elektrik alanı ve dielektrik yer değiştirme sabit deformasyonda 1 yönündeyse geçirgenlik (S = 0: kenetlenmiş geçirgenlik).

b) PZT Yük veya Gerinim Katsayısı, PZT Modülü (d_{ij}): PZT modülü, indüklenen elektrik yükünün mekanik strese veya elde edilebilir mekanik gerginliğin uygulanan elektrik alanına oranıdır (T = sabit). Örneğin:
d_{33}: V/m cinsinden uygulanan elektrik alanı birimi başına indüklenen mekanik gerilim veya N/m2 cinsinden birim basınç başına yük yoğunluğu C/m2, her ikisi de polarizasyon yönündedir.

c) PZT Gerilim Katsayısı (g_{ij}): Piezoelektrik voltaj katsayısı g, elektrik alanı E'nin etkin mekanik gerilime T oranıdır. İlgili piezoelektrik yük katsayısı d_{ij}'yi karşılık gelen geçirgenliğe bölerek karşılık gelen g_{ij} katsayısı elde edilir. Örneğin;
g_{31}: 1 Yönünde etki eden mekanik gerilim birimi başına 3 yönünde indüklenen elektrik alanını tanımlar. Gerilim = birim alan başına kuvvet, mutlaka ortogonal değildir.

d) Elastik Uyumluluk (s_{ij}): Elastik uyum katsayısı s, bağıl deformasyon S'nin mekanik gerilime (T) oranıdır. Mekanik ve elektrik enerjisi karşılıklı olarak bağımlıdır, elektrik sınır koşulları, örneğin elektrik akısı yoğunluğu D ve alan E, bu nedenle dikkate alınmalıdır. Örneğin;

s_{33}^{E}: sabit elektrik alanında (E = 0 için: kısa devre) 3 yönündeki mekanik gerginliğin 3 yönündeki mekanik gerilime oranı,

s_{55}^{E}: Sabit dielektrik yer değiştirmede kesme geriliminin etkili kesme gerilimine oranı (D = 0: açık elektrotlar için).

Sıkça kullanılan elastikiyet veya Young modülü Y_{ij} ilk yaklaşımda karşılık gelen elastikiyet katsayısının karşılıklı değerine karşılık gelir.

e) Frekans Katsayısı (N_i): Frekans katsayısı N, bir cismin geometrik boyutu A ile karşılık gelen rezonans frekansı arasındaki ilişkiyi tanımlar. Endeksler, salınımın karşılık gelen yönünü belirtir $N = f_s A$. Örneğin;

N_3: Uzunlamasına yönde polarize edilmiş ince bir çubuğun uzunlamasına salınımı için frekans katsayısını açıklar,

N_1: 3-yönünde polarize edilmiş ince bir çubuğun enine salınımının frekans katsayısıdır,

N_5: İnce bir diskin kalınlık kayma salınımının frekans katsayısıdır,

N_P: yuvarlak bir diskin düzlemsel salınımının frekans katsayısıdır,

N_t: kalınlık yönünde polarize edilmiş ince bir diskin kalınlık salınımının frekans katsayısıdır.

f) Mekanik Kalite Faktörü (Q_m): Mekanik kalite faktörü Q_m, bir PZT gövdenin veya rezonatörün "rezonans netliğini" karakterize eder ve Şekil.2.22. de ifade edildiği gibi esas olarak sistemin seri rezonansının 3 dB bant genişliğinden belirlenir ki bu salınım yapabilir. Mekanik kalite faktörünün karşılıklı değeri, bir PZT rezonatörün eşdeğer devre şemasında reaktansa etkili direncin oranı olan mekanik kayıp faktörüdür.

g) Bağlantı Faktörleri (k): Bağlantı faktörü k, PZT etkinin büyüklüğünün nasıl olduğunun bir ölçüsüdür. PZT bir malzemenin elektrik enerjisini mekanik

enerjiye ve tam tersine dönüştürme yeteneğini açıklar. Bağlantı faktörü, depolanan mekanik enerjinin emilen toplam enerjiye oranının kareköküdür. Rezonansta k, piezoelektrik gövdenin salınımının karşılık gelen biçiminin bir fonksiyonudur. Örneğin;

k_{33}: uzunlamasına salınım için bağlantı faktörü,

k_{31}: enine salınım için bağlantı faktörü,

k_p: yuvarlak bir diskin düzlemsel radyal salınımı için bağlantı faktörü,

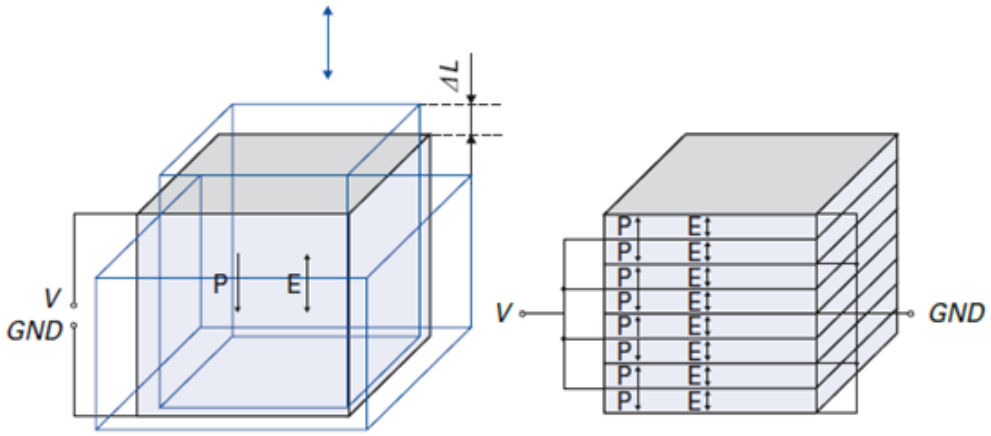
k_t: Bir plakanın kalınlık salınımı için bağlantı faktörü,

k_{15}: Bir plakanın kalınlık kesme salınımı için bağlantı faktörü.

2.1.3. Çok Katmanlı Piezoelektrik Aktüatörler

2.1.3.1. Uzunlamasına Çok Katmanlı Aktüatörler

Uzunlamasına PZT aktüatörlerin boyuna uzayabilmesi için PZT seramiklerin polarizasyon yönü ile uygulanan elektriksel alan aynı yönde olmalıdır. Bu, polarizasyon yönünde bir genleşme veya yer değiştirmeye neden olur. Çok katmanlı olma durumunda da bu durum böyledir. Uzunlamasına çok katmanlı aktüatörde Şekil 2.9. da olduğu gibi her bir katmanın polarizasyon yönü ile uygulanan elektriksel alan yönü aynı olmalıdır. Her bir katmanın küçük deplasmanları birleşerek tek bir seramikten oluşan aktüatöre kıyasla daha fazla bir deplasman üretirler.



Şekil 2.9. Uzunlamasına yığın aktüatör (Piceramic (2023))

Burada,

$$\Delta L = n \times d_{33} \times V \tag{2.82}$$

ΔL: Boylamsal yer değiştirme $[m]$,

d_{33}: Boylamsal PZT gerinim katsayısı $\left[\frac{m}{V}\right]$,

n: Yığılmış seramik katmanların sayısı,

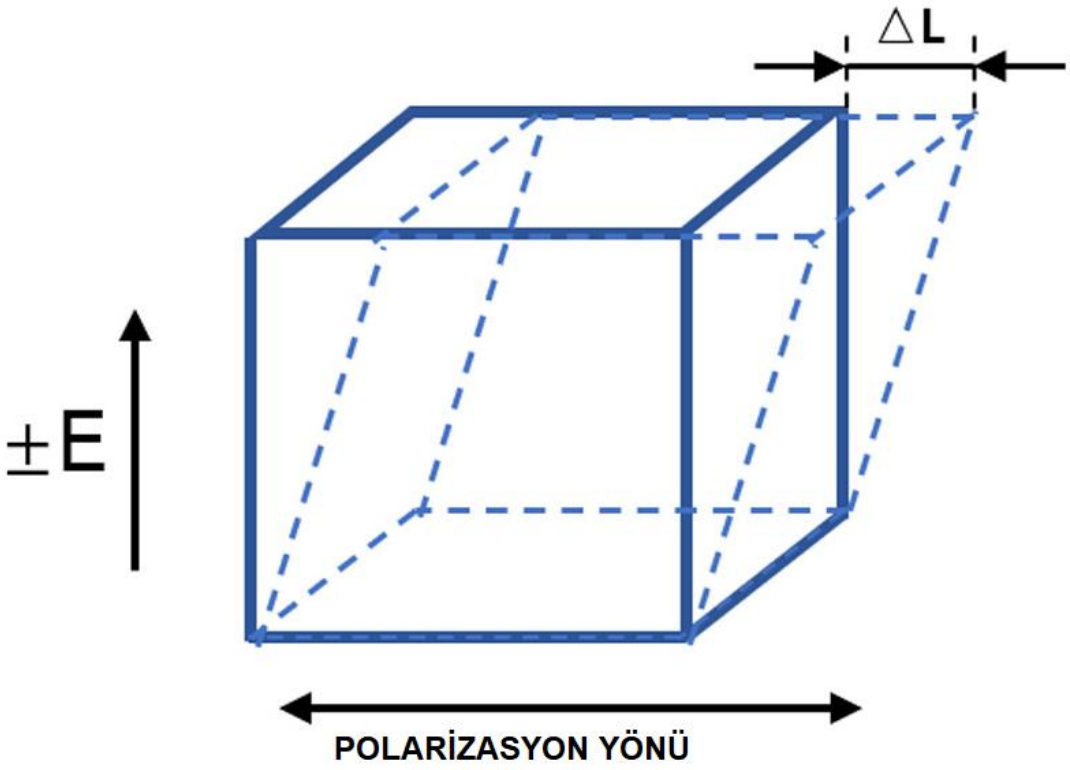
V: Çalışma gerilimi $[V]'$dir.

Boylamasına aktüatörlerle kullanılan polarizasyon yönündeki genişlemeye ek olarak, PZT aktüatörde polarizasyon yönüne paralel bir elektrik alanıyla çalıştırıldığında polarizasyonuna dik olan bir daralma her zaman meydana gelir.

Piceramic (2023) ifade ettiği gibi uzunlamasına yığın aktüatörleri, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmede oldukça verimlidir ve aktüatör uzunluğunun yaklaşık %0,1 ila %0,15'i kadar nominal yer değiştirmelere ulaşırlar böylece nominal blokaj kuvvetleri, aktüatörün kesit alanına göre 30 N/mm2 mertebelerine kadar ulaşır. Uzunlamasına yığın aktüatörleri, en yüksek deplasmana rezonans frekansında ulaşırlar. yüksek rezonans frekansları nedeniyle son derece dinamik operasyonlar için mükemmel şekilde uygundur.

2.1.3.2. Kesme Çok Katmanlı Aktüatörler

Kesme aktüatörleri DİM ve yapışmalı kaymalı motorlar için tahrik elemanı olarak kullanılabilirler. PZT kesme aktüatörlerinde, Şekil 2.10. daki gibi polarizasyon yönü uygulanan elektriksel alan yönüne dik olmalıdır. Kesme aktüatörlerinin performansını veya mekanik gerinimini kesme gerinim katsayısı (d_{15}) domine eder. Dünya'daki önde gelen Alman PZT seramik üreticisi Piceramik (2013) nominal voltajlarla kontrol edildiğinde, PZT seramiklerin 2000 pm/V'a kadar d_{15} değerlerine ulaştığını ifade etmektedir ayrıca izin verilen elektriksel alan gücünün, dikey yönelimli polarizasyonun tersine dönmesini önlemek için sınırlandırılması gerektiğini ifade etmektedir.



Şekil 2.10. Kesme yığın aktüatörü (Gao T. vd. (2024))

Burada,

$$\Delta L_{kesme} = n \times d_{15} \times V \qquad 2.83$$

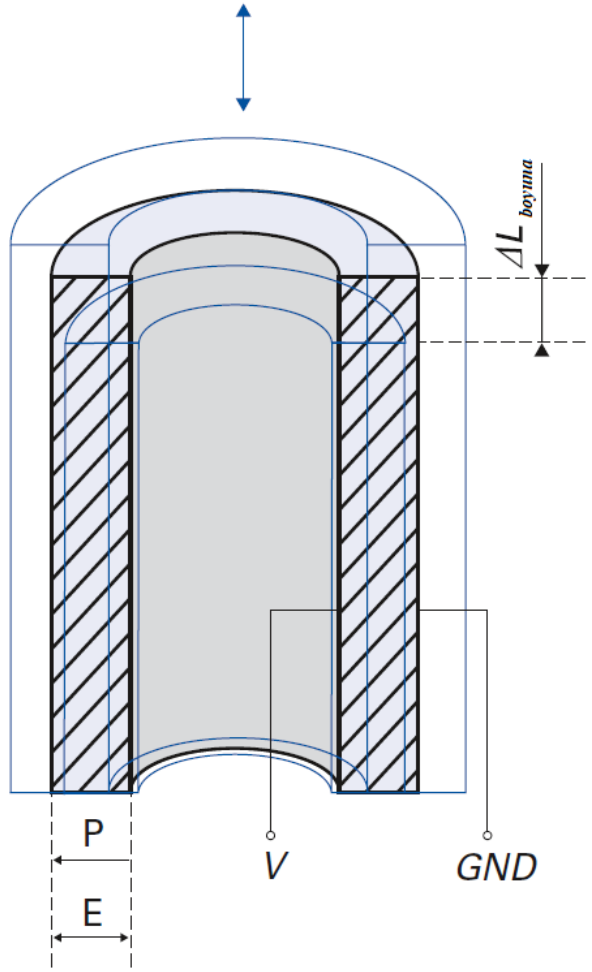
Yanal kuvvetler aktüatöre etki ettiğinde, kesme hareketi ayrıca bir bükülme ile üst üste bindirilir. Aynı etki, rezonans frekansına yakın dinamik işlemde de meydana gelir. Ayrıca, kesme gerilimleri mekanik bir ön yükleme ile telafi edilemez. Her ikisi de kesme yığınlarının pratik istifleme yüksekliğini sınırlar.

İstenilen uygulamaya göre Kesme aktüatörleri ile uzunlamasına aktüatörler seri veya paralel olarak birleştirilerek, yüksek rezonans frekanslarına sahip kompakt üç serbestlik dereceli çok katmanlı aktüatörler oluşturulabilir.

2.1.3.3. Boru Aktüatörleri

Boru aktüatörlerinin polarizasyon yönü boyuna veya radyal olabilir. Polarizasyon yönü radyal olup, radyal yönde elektriksel alan uygulanırsa Şekil 2.11. deki gibi radyal yönde genişleme ve büzülme meydana gelir. Şekil 2.12. de ise radyal yönde polarizasyona

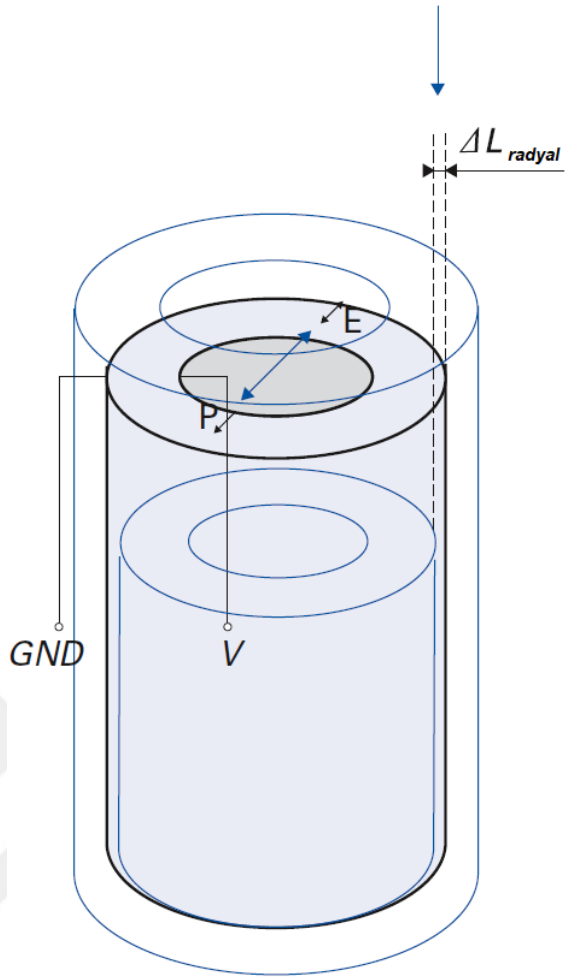
sahip bir boru PZT seramiğe radyal yönde uygulanan elektriksel alanının yarıçapta meydana getirdiği değişimi göstermektedir. Eğer polarizasyon yönü radyal ve uygulanan elektriksel alan boyuna olursa Şekil 2.13. deki gibi bükülme davranışı sergiler. Tüp aktüatörleri, yer değiştirmeler üretmek için enine PZT etkiyi kullanır.



Şekil 2.11. Boru aktüatör boyuna uzaması (Piceramic (2023))

Burada,

$$\Delta L_{boyuna} = d_{31} \times \frac{1}{t} V \tag{2.84}$$

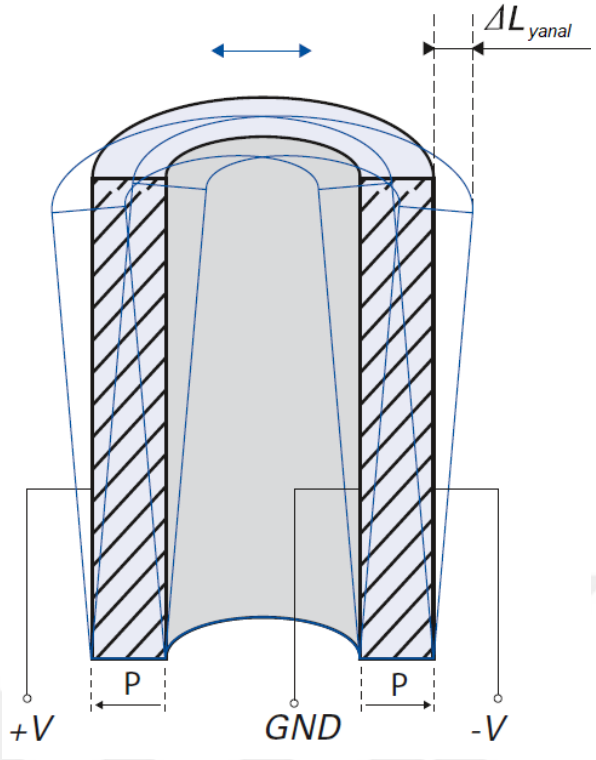


Şekil 2.12. Boru aktüatörler için radyal yer değiştirme (yarıçap değişimi).

Bir boru aktüatörün radyal yer değiştirmesinin hesabı, Denklem (2.85) kullanılarak yapılabilir. Bu denklem büyük yarıçaplar için geçerlidir.

$$\Delta L_{radyal} = d_{31} \times \frac{D_{İç} \times t}{2t} V \tag{2.85}$$

Bir boru tipi aktüatörün eğilmesini sağlamak için öncelikle radyal yönde polarizasyona sahip olup, elektriksel alanda dış yüzeyin belirli bölgelerine radyal yönde uygulanmalıdır. Örneğin borunun dış yüzeyi iki parçaya ayrılarak bir yüzeye negatif diğer yüzeye pozitif elektrik yüklenirse eğilme sağlanır. Bu işlem sırasında oluşan istenmeyen eğilme veya eksenel hareketler daha karmaşık elektrot düzenlemeleriyle önlenebilir.



Şekil 2.13. PZT Boru aktüatörlerin bükülmesi

Boru tip aktüatörler birçok uygulamada kullanılırlar. Bunlar; tarama prob mikroskoplarında ve fiber gerdirici, nano-litre pompalarının yapımında veya mürekkep püskürtmeli yazıcılarda mikro dozajlama aktüatörleridir.

Bükülme için Denklem (2.86) geçerlidir:

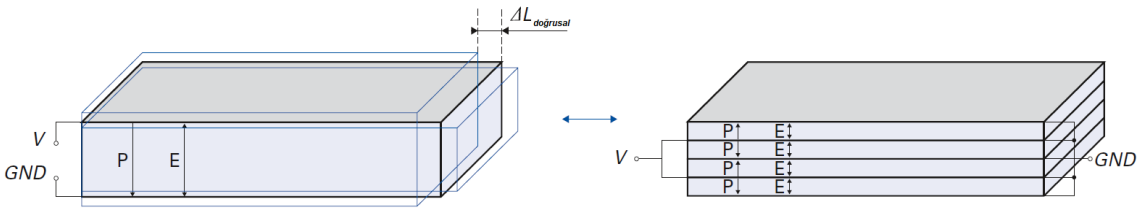
$$\Delta L_{yanal} = 0.9 d_{31} \times \frac{l^2}{D_{\text{İÇ}}+t} V \tag{2.86}$$

Tüm denklemler için, $D_{\text{İÇ}} >> t$.

2.1.3.4. Büzülme Aktüatörleri

Tipik olarak, PZT büzülme aktüatörleri düşük profilli bileşenlerdir. Yer değiştirmeleri polarizasyon yönüne ve elektrik alanına dik olarak gerçekleşir. Büzülme aktüatörlerinin yer değiştirmesi, yaklaşık 20 µm'ye kadar nominal olarak elde edilen enine piezoelektrik etkiye dayanır.

Çok katmanlı elemanlar, teknik gerçekleştirme açısından tek katmanlı PZT elemanlara göre belirleyici avantajlar sunar: Daha büyük kesit alanı nedeniyle daha yüksek kuvvetler üretirler ve daha düşük voltajla çalıştırılabilirler (Şekil.2.14.).



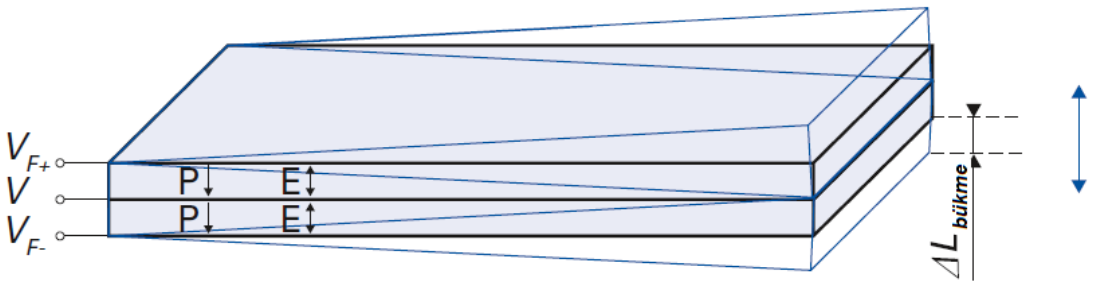
Şekil 2.14. Büzülme aktüatörü

$$\Delta L_{doğrusal} = d_{31} \times \frac{l}{h} V \tag{2.87}$$

Büzülmenin bir sonucu olarak, kırılgan PZT seramiğe zarar verebilecek çekme gerilimleri oluşur. Bu nedenle bir ön yükleme yapılması PZT seramiğin zarar görmesi engellenebilir.

2.1.3.5. Bükülme Aktüatörleri

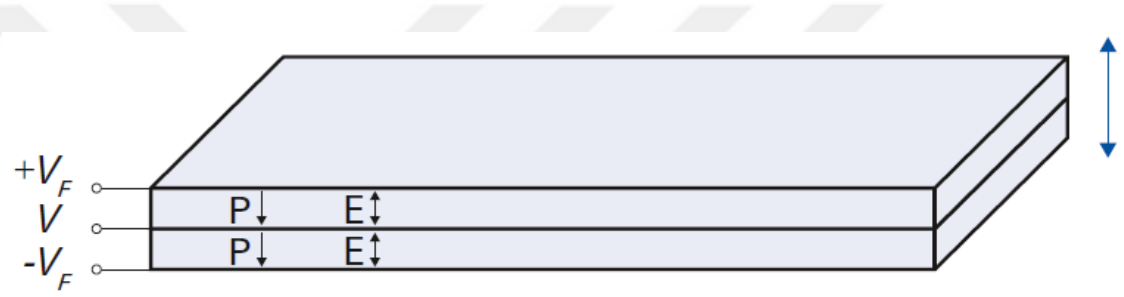
Bir alt tabakaya tutturulmuş olan büzülme aktüatörleri bükme aktüatörleri olarak işlev görür (Şekil.2.15.). Tüm seramik bükücülerin inşası için iki aktif PZT eleman birleştirilir ve elektriksel olarak kontrol edilir. Örneğin, metal veya seramik malzemeden yapılmış pasif bir alt tabaka kullanılırsa, kompozit bükücülerden bahsedilir. PZT elemanlar ayrı katmanlar veya çok katmanlı elemanlar olarak tasarlanabilir.



Şekil 2.15. Bükülme aktüatörü

Piezoelektrik bükme aktüatörleri, termostatik bimetallerin prensibine göre çalışır. Düz bir PZT büzülme aktüatörü bir alt tabakaya bağlandığında, seramiğin tahriki ve büzülmesi, küçük enine uzunluk değişimini büzülmeye dik büyük bir bükülme yer değiştirmesine dönüştüren bir bükülme momenti yaratır. Geometriye bağlı olarak, 30 ila 40 arasında çeviri faktörleri elde edilebilir, ancak bu, dönüşüm verimliliği ve kuvvet üretimi pahasına olur.

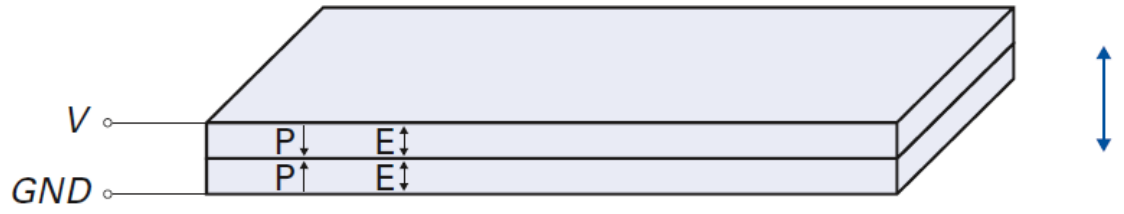
Piezoelektrik bükme aktüatörleriyle, milisaniye aralığındaki tepki süreleriyle birkaç milimetreye kadar yer değiştirmeler elde edilebilir. Ancak, blokaj kuvvetleri nispeten düşüktür. Genellikle mili-Newton ile birkaç Newton aralığındadır.



Şekil 2.16. Paralel bağlı tüm seramik bükme aktüatörü

Paralel bağlı tüm seramik bükme aktüatörlerinin yer değiştirmesini ifade eden denklem şu şekilde ifade edilebilir:

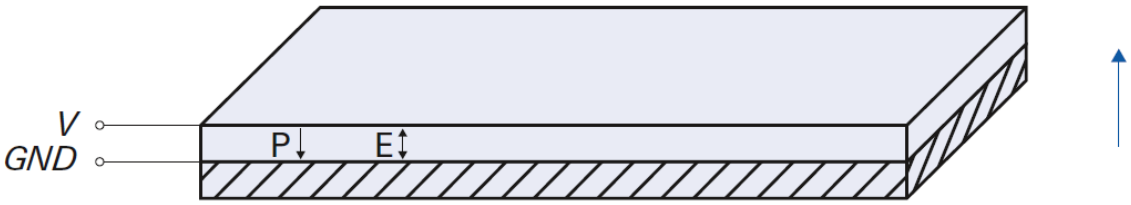
$$\Delta L_{\text{bükülme}} = \frac{3}{8} n \times d \times \frac{l_f^2}{h_p^2} V \qquad (2.88)$$



Şekil 2.17. Seri bağlı tüm seramik bükme aktüatörü

Seri bağlı tüm seramik bükme aktüatörlerinin hareketini ifade eden denklem ise şu şekilde ifade edilebilir:

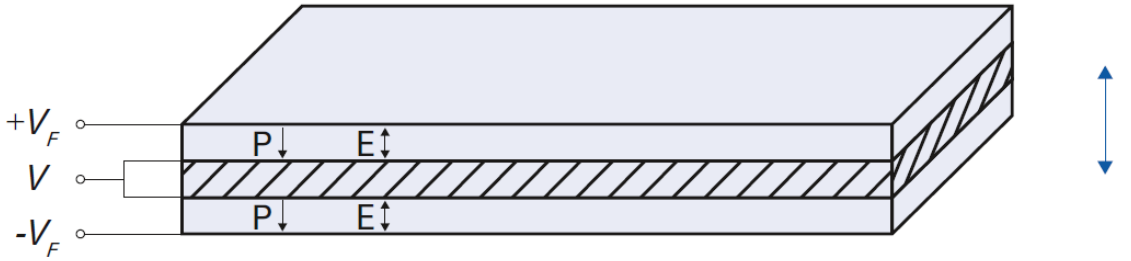
$$\Delta L_{bükülme} = \frac{3}{8} n \times d_{31} \times \frac{l_f^2}{h_p^2} \times V \quad (2.89)$$



Şekil 2.18. İki katmanlı kompozit bükme aktüatörü (Piceramic (2023))

İki katmanlı kompozit bükme aktüatörlerin yer değiştirmesini ifade eden denklem şu şekildedir:

$$\Delta L_{bükülme} = \frac{3}{8} n \times d_{31} \times \frac{l_f^2}{h_p^2} \times \frac{2R_h R_E (1+R_h)}{R_h R_E (1+R_h)^2 + 0.25(1-R_h^2 R_E)^2} V \quad (2.90)$$

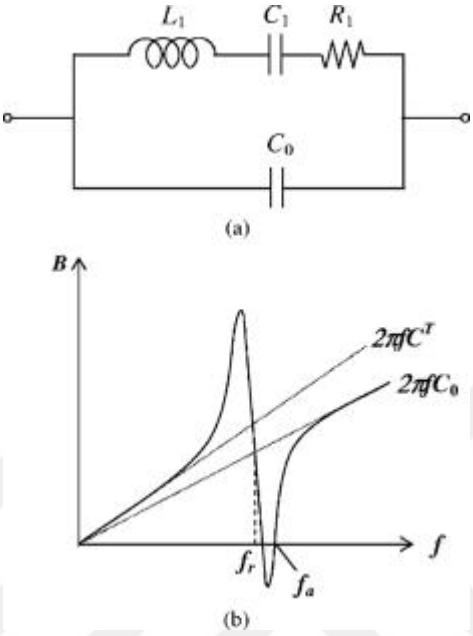


Şekil 2.19. Simetrik, Paralel bağlı 3 katmanlı kompozit bükme aktüatörü (Piceramic (2023))

$$\Delta L_{bükülme} = \frac{3}{8} n \times d_{31} \times \frac{l_f^2}{h_p^2} \times \frac{(1+R_h)}{1+1.5R_h+0.75R_h^2+0.125R_E R_h^3} V \quad (2.91)$$

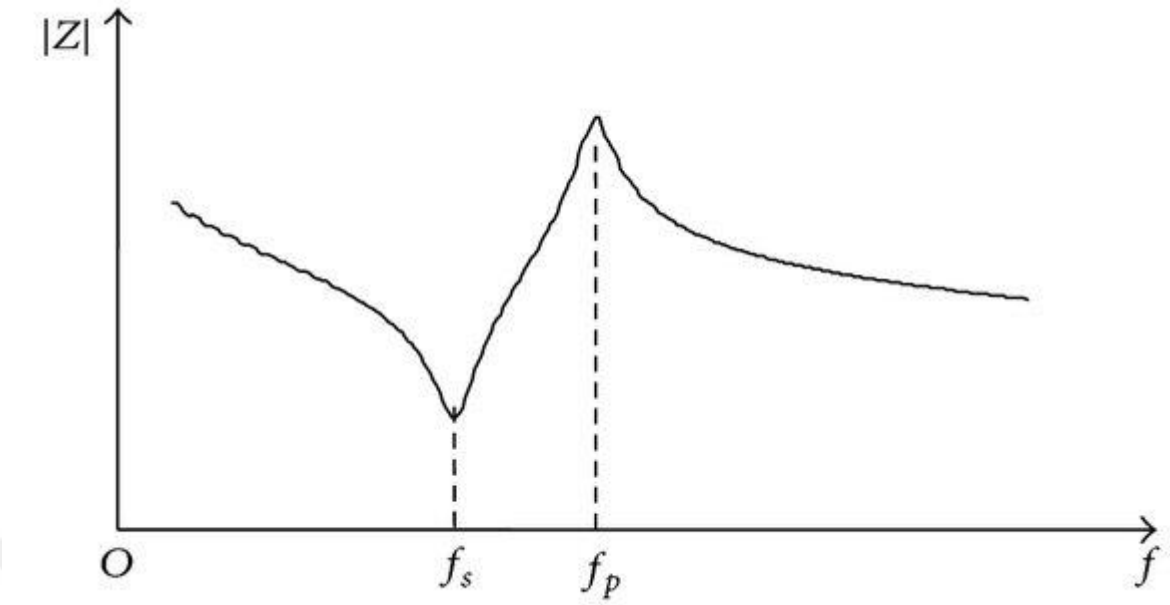
Piezoelektrik rezonatör, eşdeğer devre teorisine dayanarak, rezonans frekansında Şekil.2.20. de gösterildiği gibi bir endüktans, direnç ve kapasitans rezonans devresi ile modellenebilir. Burada C_0, sabitlenmiş kapasitanstır. C_1 ise etkin endüktansla seri bağlı kapasitanstır. endüktans, direnç ve kapasitanstan oluşan seri devre; elastik deformasyon,

ve iç sürtünmeden kaynaklanan mekanik kayıplar gibi mekanik özelliklerdeki değişimi açıklar.



Şekil 2.20. Piezoelektrik rezonatörün eşdeğer devre şeması (Kim M. vd. (2006)).

PZT seramiklerin parametre ve özellikleri uluslararası standartları karşılayacak şekilde akredite muayene kuruluşlara test ettirilerek belirlenmesi gereklidir. Parametre ve özelliklerin belirlenmesinde kabul gören uluslararası standartlar "Amerikan Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (IEEE)" tarafında hazırlanan "ANSI/IEEE Std. 176-1987" ve Avrupa Standardı EN 50324-2'dir. Yapılan testlerde bazı empedans ölçümleri de yapılmaktadır. Şekil.2.21. tipik bir empedans eğrisi görülmektedir. Seri ve paralel rezonans titreşim değerleri olan f_s ve f_p, PZT parametreleri belirlemekte kullanılan frekans değerleridir.

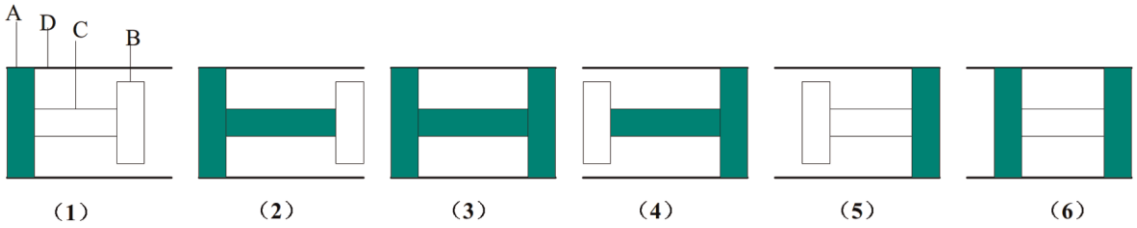


Şekil 2.21. Bir PZT malzemenin tipik empedans eğrisi (Lu Y. (2016))

PZT seramiklerin malzeme özellikleri, üreticinin teknolojik seviyesine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. PZT malzeme özellikleri tedarikçiler tarafından yapılan testlerle saptanarak kullanıcılara sağlanır.

2.1.4. Tırtıl Tipi Aktüatörler

Tırtıl tipi aktüatörler, elektriksel olarak birbirinden izole edilmiş üç veya daha fazla PZT elemanının bir kombinasyonudur. Bunlardan bazıları tahrik ünitesi olarak, diğerleri ise sıkıştırma üniteleri olarak işlev görür. Ma, Sun, Xiao, Zhou (2014) yaptıkları çalışmada tırtıl mekanizmasının mekanizmasını ayrıntılı olarak anlatmışlardır.



Şekil 2.22. Tırtıl mekanizması çalışma döngüsü elektrik düzeni.

Tırtıl mekanizmasının en basit şekli ve elektriksel bağlantı düzeni Şekil.2.22.'de gösterilmiştir. Burada, üç PZT elemanı H şekli oluşturacak şekilde birbirine bağlanmış veya yapıştırılmış ve dikey iki elemandan birkaç mikrometre daha geniş olan hassas işlenmiş bir kanala yerleştirilmiştir. İki dikey eleman sıkıştırma üniteleri iken, yatay olan tahrik ünitesidir. İlk dikey veya sıkıştırma elemanı elektrikle uzadığında, kanalın duvarlarına temas eder ve sürtünme yaratarak kendisini sabitler. Ardından, yatay veya tahrik elemanının elektrikle uzaması gerçekleşir, bu da ikinci sıkıştırma elemanının pozisyonunu değiştirir. Sonrasında, elektrik ikinci sıkıştırma ünitesine uygulanarak yeni pozisyonunda sabitlenir ve nihayetinde, ilk sıkıştırma ünitesi ve tahrik ünitesi elektriksiz hale gelir, böylece her ikisi de ikinci sıkıştırma ünitesine doğru hareket eder. Bu döngü, Tırtıl aktüatörünün doğrusal hareketini hassas işlenmiş kanal boyunca sağlar.

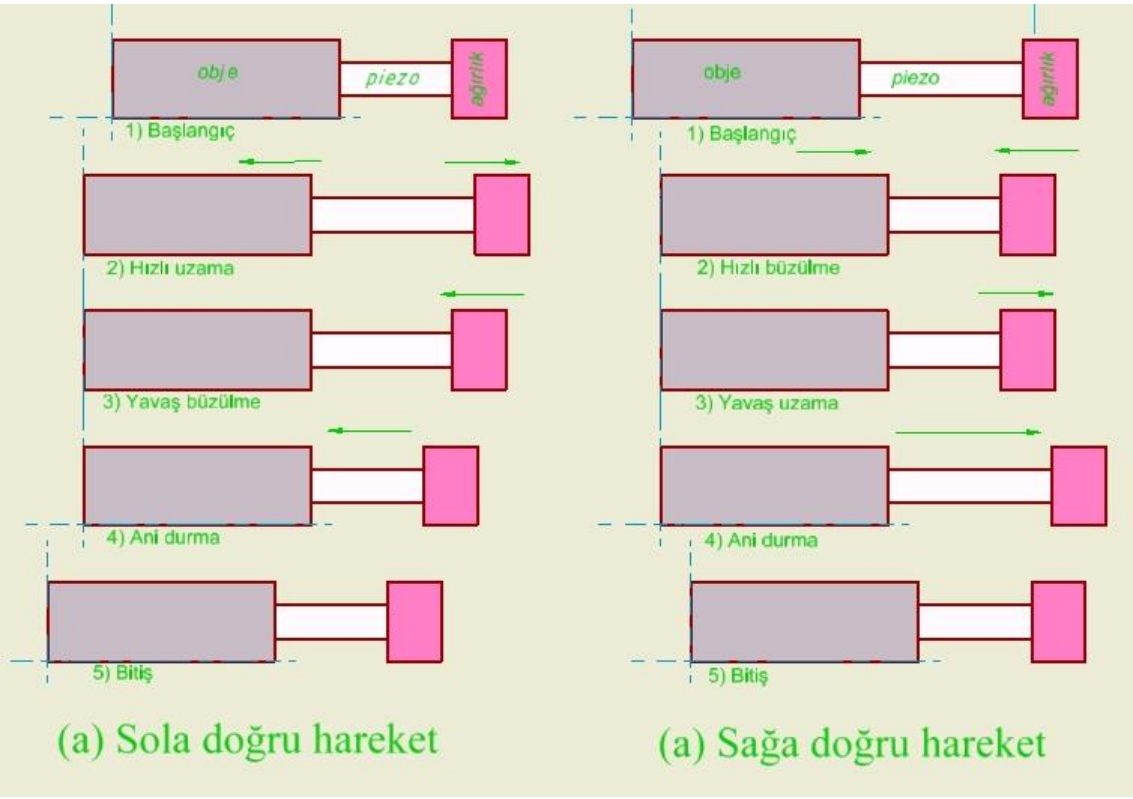
Tırtıl aktüatörlerinin dezavantajı, hassas işlenmiş kanalın sıcaklık dalgalanmaları ile termal genleşme nedeniyle boyutlarının sapabilmesidir; bu da sıkıştırma ünitelerinin kendilerini sabitlemelerini engelleyebilir.

2.1.5. Darbeli İtki Mekanizması DİM

Diğer taraftan, DİM prensibine dayalı çalışan mekanizmalar, piezoelektrik elemanlarının hızlı deformasyonları nedeniyle oluşan sürtünme ve atalet kuvvetlerini kullanır. DIM prensibiyle çalışan ilk mekanizma Higuchi, Kudou, Watanabe (1988) tarafından bir robot geliştirilmesi projesinde hassas konumlandırıcı olarak kullanılan aktüatörde kullanılmıştır. Kuşçu H. & Kaya U. yaptıkları çalışmada DİM'e dayalı bir mekanizmanın, birbirine tutturulmuş bir PZT elemanı, obje ve ağırlıktan oluşur ve Şekil.2.8.'de olduğu gibi düz bir yüzeye yerleştirilir. PZT elemanının büzülme ve uzama hızını kontrol ederek, düz yüzey ile ana nesne arasındaki sürtünme kuvvetinden daha büyük bir darbe kuvveti oluşturulabilir ve bu tüm gövdenin hareketini sağladığını ifade etmişlerdir.

Sola doğru hareket: a) Hareket döngüsü, piezoelektrik elemanın büzülmüş durumda olmasıyla başlar, b) Dik bir şekilde yükselen bir gerilim uygulandığında, piezoelektrik eleman hızlı bir genişleme yapar. Bu esnada obje sola, ağırlık ise sağa doğru hareket eder, c) Piezoelektrik eleman yavaşça büzülerek ağırlık başlangıç pozisyonuna geri döndürülür. Ağırlık geri dönerken statik sürtünme kuvvetinden daha düşük bir eylemsizlik kuvveti oluşturacak şekilde sabit bir ivme ile hızlandırılmalıdır. Aksi takdirde

obje ters yönde hareket eder. d) Piezoelektrik eleman başlangıçtaki uzunluğuna kadar büzüldüğünde ani bir durma gerçekleşir. Bu hareket, ağırlık ile obje arasındaki çarpışmaya benzer. Bu nedenle, tüm sistem sürtünme kuvvetine karşı sola doğru hareket eder. Hareket eden sistem, kinetik enerjisini kaybedene kadar dinamik sürtünme kuvvetine karşı hareket etmeye devam eder. Böylece hareket döngüsü tamamlanmış olur. Bu döngü tekrarlandığında, sistem uzun mesafeler boyunca hareket edebilir.



Şekil 2.23. DIM hareket prensibi

Aynı yöntem kullanılarak sağa doğru hareket de gerçekleştirilebilir. Bu, Şekil 2.23.'de gösterildiği gibi piezoelektrik elemanın büzülme ve genişleme işlemlerinin yer değiştirilmesiyle sağlanabilir. Gerilimin artışı ve ağırlıkların geri dönüşü için uygulanan sabit ivme hareket üzerinde etkili olur. Genel olarak bir adımda gerçekleşen hareket gerilimin yükselme süresi kısaldıkça artar. Bunun nedeni, piezoelektrik elemanın daha hızlı deformasyonuyla daha güçlü bir eylemsizlik kuvvetinin üretilmesidir. Verimli



Şekil 2.24. DIM sol ve sağa hareket için elektriksel gerilim grafik paterni

bir sürekli hareket için uygulanan elektriksel sinyalin testere dişi formunda olması gerekir. Ani durmalara elektriksel gerilimin aniden sıfır olması neden olur.

Peng Y., Li L., Zhang Y., Cao J., Cheng Y., Wang J (2017) yaptıkları çalışmada DIM prensibi ile bir PZT'nin boyuna uzama ve kısalmasını tasarladıkları MHA'da itki mekanizması olarak kullanmışlardır. Yine Sun W. Liu Y. Li X. Xu Z. Yang Z. (2013) yaptıkları çalışmada bir lazer tekstüre makinesinin hassas konumlandırma gereksinimi için DIM prensibi temelinde PZT malzemenin boyuna uzama ve kısalmasını eyleyici olarak kullanmışlardır.

Kuşçu H., Kaya U. (2023) yaptıkları deneysel çalışmada tek, boyuna çift seri bağlı ve boyuna üçlü seri bağlı PZT kirişlerin DIM prensibi temelinde eğilme ve burulma titreşimlerini kullanarak sürekli doğrusal hareket elde etmiştir.

Son olarak, Kuşçu H., Kaya U. (2024) bu tezin de konusu olan eğilme ve burulma titreşimlerini kullanarak DIM prensibi ile tahrik edilen PZT kristalleri, MHA kanat mekanizması tasarımında kullanmışlardır.

2.2. Yusufçuk Uçuş Mekaniği

Yusufçuklar şüphesiz olağanüstü uçuculardır. Hızlıca ileri uçabilirler, havada asılı kalabilirler, geriye uçabilirler ve birkaç kanat çırpışıyla bunların herhangi biri arasında geçiş yapabilirler. Ayrıca 54 km/s hıza kadar ulaşabilirler, birkaç kanat çırpışıyla 180° dönebilirler, yanlara doğru uçabilirler, süzülebilirler ve hatta geriye doğru uçabilirler. Şekil 2.29.'daki gibi yusufçukların 4 kanadı vardır. Bu kanatlar vasıtasıyla, havada asılı kalma, gezinme ve dönüş gibi farklı uçuş tarzları için kanat hareket kinematiğini değiştirebilirler.



Şekil 2.25. Doğada bir yusufçuk resmi

Bu kinematik parametreler arasında en önemlisi ön kanat ile arka kanat arasındaki faz farkıdır. Tanım olarak, arka kanadın ön kanada göre faz açısıdır. Yusufçuklar havada asılı kaldıklarında 180° faz farkından yararlanırlar. İleri uçarken 54° ile 100° arasında faz farkı açıları kullanırlar. Hızlanma veya agresif manevralar yaparken ise 0° (eş fazlı) faz farkını kullanırlar.

Sabit kanatlı uçaklar için geliştirilen kararlı aerodinamik teorisi, havada sabit bir hızla hareket eden uçak kanatları üzerinde kaldırma kuvvetinin nasıl üretildiğini açıklayabilir. Ancak yusufçuklar kanatlarını dengesiz bir şekilde çırparlar, kanatları tekrar tekrar hızlanır ve yön değiştirir. Bu yüzden çırpan kanatlı uçuşun aerodinamiği, kararsız Navier-Strokes (NS) denklemleri çerçevesinde modellenir. Shyy W., Aono H. ve Liu H. (2010) yazdıkları kitabın çırpan kanatlı biyolojik uçucular ile ilgili bölümünde çırpan kanat korunum denklemlerini, kanat esnekliğinin uçuşa etkilerini ve çırpan ve esnek kanatlar için boyutsuz parametreleri aşağıdaki gibi ayrıntılı bir şekilde anlatmışlardır.

Çırpan kanatlı uçuşta, çoklu değişkenli (hız, basınç) ve zamanla değişen geometrilere sahip doğrusal olmayan fizik, birincil araştırma alanlarıdır. Bu nedenle,

öncelikle çırpan kanat kinematiğinin ele alınması, biyolojik bir uçuşun kapsamlı bir şekilde anlaşılması için çok önemlidir. Ölçekleme yasaları akışkan fiziğini belirlemeye yardımcı olur ve biyolojik bir uçuşun aerodinamiğini tahmin veya ifade etmek için uygun modeller oluşturmaya yönelik modeller sunabilir. Shyy W., Aono H. ve Liu H. (2010) kitabında, çırpan kanat uçuşu ölçeklemesindeki üç ana boyutsal olmayan parametre şunlar olduğunu ifade etmiştir: (i) eylemsiz ve viskoz kuvvetler arasındaki oranı temsil eden Reynolds sayısı (Re), (ii) ileri uçuş için Strouhal sayısı (St), ileri uçuşun çırpınma hızlarına göre göreceli etkisini tanımlar ve (iii) çırpan kanat hareketi sırasında dönme ve öteleme hızlarını tanımlayan azaltılmış frekans (k). Geometrik ve kinematik benzerliklerle birlikte, Reynolds sayısı, Strouhal sayısı ve azaltılmış frekans, katı bir kanat için aerodinamik benzerliği tanımlamak için yeterlidir.

2.2.1. Reynolds Sayısı

Bir referans uzunluğu "L_{ref}" ve bir referans hızı "U_{ref}" verildiğinde,

Reynolds sayısı Re şu şekilde tanımlanır:

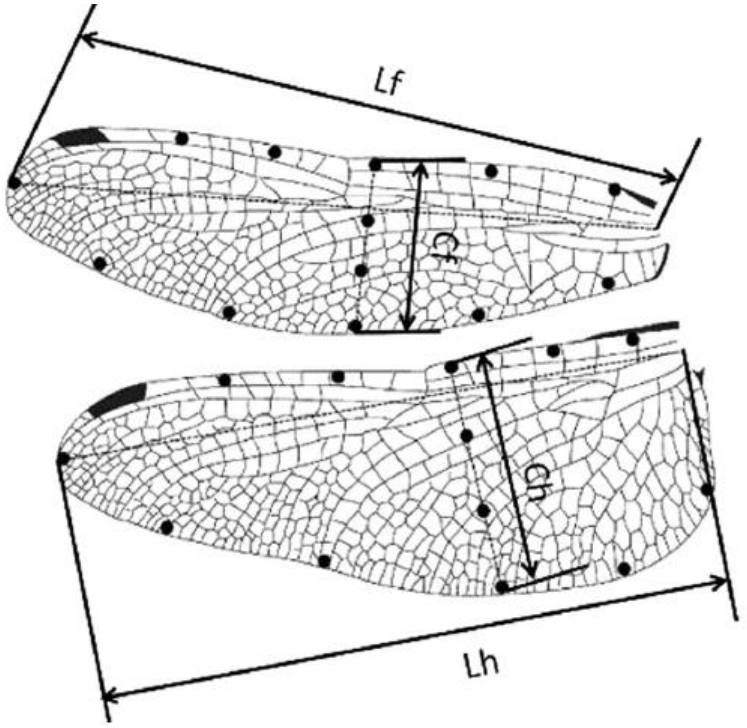
$$Re = \frac{L_{ref} U_{ref}}{\upsilon} \tag{2.48}$$

Burada "υ" kinematik viskozite katsayısıdır. Biyolojik uçuşta, kaldırma kuvveti ve itme kuvveti çırpan kanatlar tarafından üretilir. Dolayısıyla kanat kord uzunluğu referans uzunluğu "L_{ref}" olarak tanımlanabilir.

Bir yusufçuğun ön ve arka kanatlarının kord ve referans uzunlukları Şekil 2.26.'daki gibidir. Shyy W. vd. (2018) referans hızı "U_{ref}" için havada asılı kalma ve ileri uçuş için farklı şekilde tanımlanması gerektiğini ve havada asılı kalma uçuşunda, ortalama kanat ucu hızı referans hızı olarak kullanılması gerektiğini ifade etmişlerdir.

$$U_{ref} = \omega R \tag{2.49}$$

Burada "ω" kanadın ortalama açısal hızıdır ($\omega = 2\phi f$, burada "ϕ" radyan cinsinden ölçülen kanat çırpma genliği ve "f" çırpma frekansıdır), ve "R" kanat yarı açıklığıdır.



Şekil 2.26. Yusufçuk ön ve arka kanadının kord (c_f, c_h) ve referans (L_f, L_h) uzunlukları (Qiushi Li, Mengzong Zheng, Tianyu Pan (2017)).

Bu nedenle, havada asılı kalma uçuşu için Re şu şekilde ifade edilir:

$$Re = \frac{L_{ref}U_{ref}}{\upsilon} = \frac{c_m(2\phi f R)}{\upsilon} = \frac{\phi f R^2}{\upsilon}\left(\frac{4}{AR}\right) \tag{2.50}$$

Burada, kanat açıklığının korda oranı $AR = b^2/S$'dir ve kanat alanı "S" , kanat açıklığı "b" ile kord uzunluğunun "c_m" çarpımıdır. Shyy W. vd. (2018) Reynolds sayısının kanat çırpma genliği "ϕ" kanat çırpma frekansı "f" ve kanat yarı açıklığının karesi "R" ile orantılı olduğunu, ancak kanadın $AR'si$ ile ters orantılı olduğu çıkarımını yapmışlardır. El-Latief M. E. A., Elsayed K. Abdelrahman M. M. (2019) "Fluent" hesaplamalı akışkanlar dinamiği programını kullanarak yaptıkları nümerik çalışmada yusufçuk için tipik Reynolds sayısının, ultra düşük Reynolds sayısı olarak sınıflandırılabilecek aralıkta $(100 < Re < 2400)$ olabileceğini iddia etmişlerdir.

İleri uçuşta, ileri uçuş hızı "U" referans hızı "U_{ref}" olarak kullanılır. Bu nedenle, ileri uçuş için Reynolds sayısı şu şekli alır (Shyy W. vd. 2018),

$$Re = \frac{L_{ref}U_{ref}}{\upsilon} = \frac{c_m U}{\upsilon} = \frac{UR}{\upsilon}\left(\frac{4}{AR}\right) \tag{2.51}$$

"R^2" İle orantılı olan havada asılı kalma uçuşu Reynolds sayısıyla karşılaştırıldığında, ileri uçuş Reynolds sayısı "R" ile orantılıdır ve kanat çırpma frekansı ve kanat çırpma genliği ile ilişkili değildir.

2.2.2. Strouhal Sayısı ve Azaltılmış Frekans

Strouhal sayısı "St" düzgün akıştaki yunuslama ve yukarı-aşağı doğru hareket eden kanat profilinin, girdap dinamiklerini ve salınımlı akış davranışını karakterize etmek için kullanılır. Biyolojik uçuş için, Strouhal sayısı "St", çırpma frekansına "f", tam çırpma genliğine "$2h_a=180(2\phi)\ /\pi$" ve ileri uçuş hızı "U"ya göre tanımlanır, yani:

$$St = \frac{fL_{ref}}{U_{ref}} = \frac{2fh_a}{U} \tag{2.52}$$

Bu denklem, çırpma hızı ile ileri veya seyir uçuş hızı arasındaki oranı açıklar ve bu oran, bir çırpan kanatlı uçucunun itki verimliliğinin bir ölçüsüdür. Bhattacharjee D. Subbarao K. A yaptıkları nümerik çalışmada, kanatların üst yüzeyleri üzerindeki belirli bir akış düzeni için çevrim-ortalamalı net itme, kaldırma ve kaldırma-sürükleme oranının optimum olduğu dar bir Strouhal sayısı aralığının var olduğunu iddia etmişlerdir. Ve 0,1 ile 0,3 arasında olduğu bulunan bu dar Strouhal sayı aralığının yusufçuk dahil çok sayıda biyolojik uçucunun uçuş aralığına karşılık geldiğini ifade etmişlerdir.

Azaltılmış frekans "k", açısal hız "$2\pi f$", ortalama kord uzunluğunun yarısı "$c_m/2$" ve havadaki referans uçuş hızı U_{ref} temel alınarak tanımlanır.

$$k = \frac{2\pi f L_{ref}}{2U_{ref}} = \frac{\pi f c_m}{U_{ref}} \tag{2.53}$$

Havada asılı kalma uçuşunda, referans hızı ortalama kanat ucu hızı "$U_{ref} = 2\phi f R$" olarak tanımlanır, bu nedenle azaltılmış frekans şu şekilde formüle edilebilir:

$$k = \frac{\pi f c_m}{2U_{ref}} = \frac{\pi c_m}{2\phi R} = \frac{\pi}{\phi(AR)} \tag{2.54}$$

burada "AR" kanat açıklığının korda oranıdır. Bir önceki denklemde kanat ucu hızı referans hız olarak kabul edilmişti, eğer ileri doğru uçuş referans hız olarak kabul edilirse, azaltılmış frekans formülü şu şekilde ifade edilir:

$$k = \frac{2\pi f L_{ref}}{2U_{ref}} = \frac{\pi f c_m}{U} = \frac{2\pi f R}{U(AR)} \tag{2.53}$$

2.2.3. Çırpan Kanat Korunum Denklemleri

Akışkanların yönetim denklemleri, denklem (2.54)'teki gibi indis gösteriminde ifade edilen, kararsız, sıkıştırılamaz üç boyutlu Navier-Stokes denklemleri ve süreklilik denklemidir:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_f}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\mu_f}{\rho_f}\frac{\partial^2 u_i}{\partial^2 x_j^2}, \tag{2.54}$$

burada ρ_f akışkan yoğunluğu, μ_f dinamik viskozite katsayısı, u_i hız vektörü, t zaman, x_i konum vektörü ve p basınçtır. Ayrıca, ileri uçuş hızı hız ölçeği olarak kullanılırsa, NS denkleminin ortaya çıkan boyutsuz formu Reynolds sayısını ve Strouhal sayısını içerir:

$$St\frac{\partial \overline{u_\imath}}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{u_\imath}\overline{u_j})}{\partial \overline{x_j}} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial \overline{x_\imath}} + \frac{1}{Re}\frac{\partial^2 \overline{u_\imath}}{\partial^2 \bar{x}_j^2}, \tag{2.55}$$

üstteki çizgi boyutsuz değişkeni belirtir.

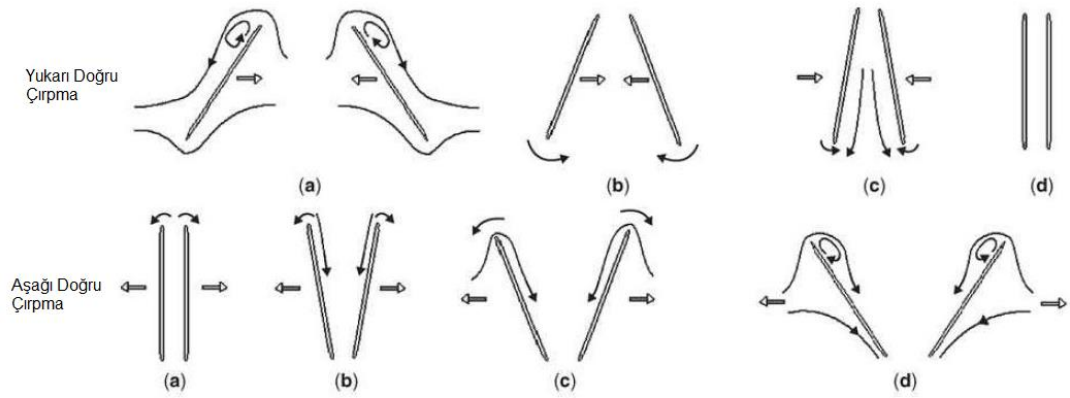
Eğer kanadın çırpma hızı referans hız olarak kabul edilirse Navier-Stokes denklemi Reynolds sayısını ve indirgenmiş frekansı içerir:

$$\frac{k}{\pi}\frac{\partial \overline{u_\imath}}{\partial t} + \frac{\partial (\overline{u_\imath}\overline{u_j})}{\partial \overline{x_j}} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial \overline{x_\imath}} + \frac{1}{Re}\frac{\partial^2 \overline{u_\imath}}{\partial^2 \bar{x}_j^2}. \tag{2.56}$$

2.2.4. Çırpan Kanat Uçuşun Kararsız Aerodinamiği

Çırpan kanatlı uçuşun aerodinamiği, Reynolds Sayısına bağlı olarak kanat ön kenarı, arka kenarı ve kanat ucundaki girdapların birbirleri ile olan etkileşimlerinden etkilenir. Girdap oluşumu ve kopması, doğru şekilde kullanıldığında, sabit bir kanat profiline kıyasla daha fazla kaldırma kuvveti üretebilir. Çırpan kanatların kanat ön, arka ve ucunda oluşan girdapların, boyutsuz parametreler olan Reynolds Sayısı ve Strouhal Sayısı arasındaki ilişkileri anlamak çırpan kanat aerodinamiğin çözümlenmesi açısından büyük önem taşır.

Weis-Fogh (1973) küçük bir uçan chalcididae familyasına ait yaban arısının iki kanadını birbirine çırptığını ve sonra onları yatay temas çizgisi etrafında açarak boşluğu havayla doldurduğunu buldu. Daha anlaşılır olması için numerik bir çalışmadan elde edilen çırpma-fırlatma mekanizmasının videosu Shannon J. (2012) https://www.youtube.com/watch?v=kEUmWY1WvqY web adresinden izlenebilir.



Şekil 2.27. Çırpma fırlatma mekanizması Weis-Fogh (1973).

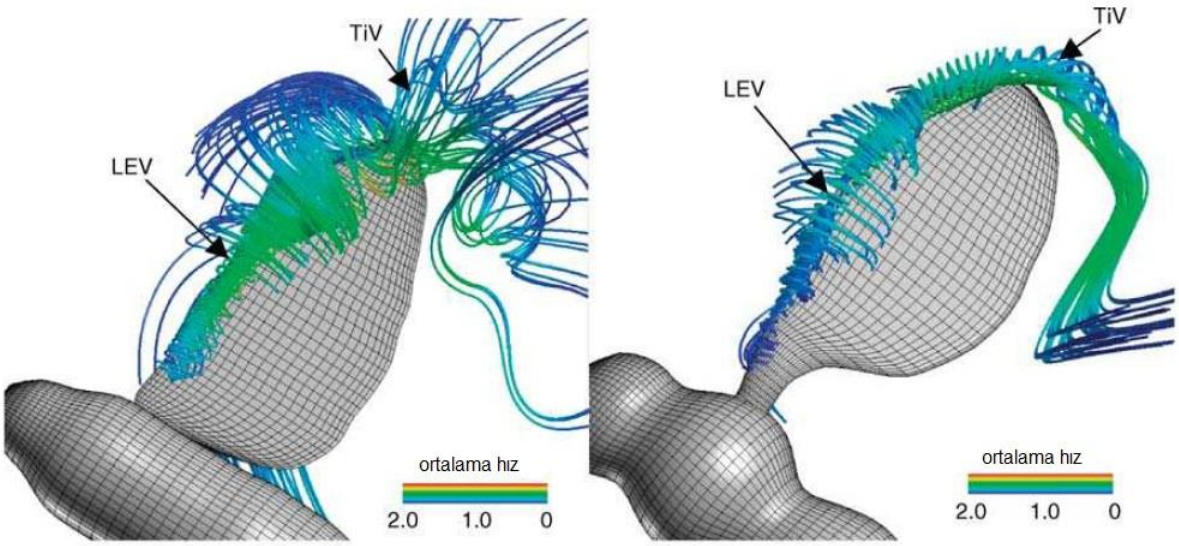
Yusufçuklar, şahin güveleri, kelebekler, meyve sinekleri, eşek arıları, tütün yaprak bitleri, yarasalar ve kuşlar gibi çok sayıda biyolojik uçucu, aerodinamik kuvvet üretimini çırp-fırlat mekanizmasıyla artırır (Weis-Fogh, 1973; Ellington ve diğerleri, 1996; Srygley ve Thomas, 2002; Dickinson, Lehmann ve Sane, 1999; Wang, 2005; Lehmann, Sane ve Dickinson, 2005; Lehmann ve Pick, 2007; Shyy ve diğerleri, 2008a).

Çırpan kanatlıların diğer bir kararsız aerodinamik özelliği ise "dönüşlü yukarı doğru yunuslama" hareketidir. Çırpan kanatlı uçucular, aşağıda veya yukarıda her kanat vuruşunun sonunda kanadı döndürerek hücum açısını değiştirirler ve bu değişim kaldırma kuvvetinin yükselmesine neden olur. Kanadın hızla yukarı doğru dönmesi, kanat etrafındaki girdapta hızlı bir artışa yol açar ve böylece üretilen kaldırma kuvvetini artırır (Shyy,W., Lian, Y., Tang, J., Viieru, D. and Liu, H. (2008a)).

Çırpan kanatların girdap yakalama özelliği uçuş performansını iyileştiren kararsız aerodinamik akışlardan biridir. Her vuruşun başlangıcında, kanatlar kanat uzunluğu boyunca olan ekseni etrafında dönerken hareket yönlerini tersine çevirdiğinde ortaya çıkar (Dickinson, Lehmann ve Sane, 1999). Kanatlar, yönlerini tersine çevirdikten sonra

bir önceki vuruş sırasında oluşan dalgayla karşılaşırlar, bu sayede etkili akış hızı artar ve ek bir aerodinamik kuvvet tepe noktası oluşur. Dickinson, Lehmann ve Sane, (1999) girdap yakalama mekanizmasının etkisinin, kanat kinematiği ve çırpınan kanatlar etrafındaki akış yapılarının bir fonksiyonu olduğunu belirtmişlerdir.

Çırpan kanatlılar kanat hücum kenarı girdaplarını irtifa kaybını geciktirmek için kullanırlar. Kanatlar çırpılıp birkaç kord uzunluğu boyunca hareket ettiğinde, hücum ve arka kenardan ve ayrıca kanat ucundan ayrılır, sonuç olarak hücum kenarı, arka kenar ve kanat ucu girdaplarını oluşturur. Biyolojik uçuşta hücum kenarı girdabı, irtifa kaybını geciktirmek ve çırpan kanatların çevrilmesi sırasında aerodinamik kuvvet üretimini artırmak için gereklidir. Temel olarak, LEV; NS denklemindeki basınç gradyanı, santrifuj kuvveti ve Coriolis kuvveti arasındaki dengeyle üretilir. Bir çırpan kanatlı uçucunun boyutu ve Reynolds sayısı değiştiğinde; viskoz, konvektif ve basınç terimleri arasındaki ilişki değişir ve bu da hücum açısı girdaplarının yapılarını önemli ölçüde etkiler. Şekil 2.28. de kanat çırpma esnasında iki farklı Reynolds sayısındaki akım çizgileri görülmektedir. Şekil 2.28b. de görüldüğü gibi Reynolds sayısının çok düşük değerlerinde (Re<120), hücum kenarı girdabı ile kanat uç girdabı birbirine bağlıdır. Dahası, Reynolds sayısı azaldıkça girdap çekirdeğindeki kanat boyunca akış zayıflar.



Şekil 2.28. Aşağı doğru kanat vuruşun ortasında kanat yüzeyinden gelen akım çizgileri (Shyy W., Aono H. ve Liu H. (2010)).

2.2.5. Yapısal Kanat Esnekliği

Biyolojik uçucuların esnek kanatları vardır. Çırpan ve aynı zamanda esnek kanatların ürettiği kaldırma ve itki kuvvetlerinin analiz edilebilmesi ÇKMHA geliştirilmesinde önemli rol oynamaktadır. Doğrusal olmayan fiziği nedeniyle esnek ve çırpan kanatların araştırılması her dönemde güncelliğini korumuştur. Esnek kanatlar için, çırpan kanat aerodinamiğini ölçeklendirmek amacıyla ek boyutsuz parametreler gereklidir. Esnek ve çırpan kanatları analiz edebilmek için esnek cisimlerin dinamiği, akışkanlar mekaniği ve çırpan kanatların kinematiği arasındaki etkileşim veya parametreler ortaya konulmalıdır. Bu parametreler bir önceki bölümde ifade edildiği gibi Reynolds Sayısı, Strouhal Sayısı ve azaltılmış frekanstır. Yapısal parametreler için, c_m, ortalama kord uzunluğu, ω, çırpan kanadın ortalama açısal hızı (radyan), h_a, çırpan kanadın genliği, U_{ref} referans hızı, ρ_f, akışkan yoğunluğu, D, plaka eğilme rijitliği (doğrudan malzemenin Young modülü ve kanat kalınlığının küpüyle orantılıdır), I_B, (çırpınan) atalet momenti ve ω_B, kanadın doğrusal doğal eğilme frekanslarını ele alalım. Shyy,W. vd. (2018) geometrik benzerliğin korunduğunu varsayarak, ileri ve havada asılı uçuş için esnek çırpan kanat aerodinamiğinin ölçekleme yasalarını Çizelge 2.1.'deki gibi özetlenmişlerdir.

Son zamanlarda, kanat esnekliğinin (hem kanat açıklığı hem de kord açısından) çırpan kanat aerodinamiği üzerindeki etkisi ve rolü, sayısal ve deneysel yaklaşımlarla ayrıntılı olarak çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Örneğin, Heathcote ve Gursul (2007) düşük Reynolds sayılarında bir kanat profilinin kiriş yönündeki esnekliğinin saf dalgalanma üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırdı. Görselleştirdikleri girdapları, katı kanat durumundan daha güçlü yoğunlukta bir jet girdap deseni gösteriyor; dolayısıyla, kord yönündeki esnekliğin verimlilik avantajları sağladığı bulundu. Özellikle, çırpınma hareketinin yarattığı aerodinamik yüklemeye, uçuş hızına ve rüzgâr esintisi gibi çevresel etkilere yanıt olarak kanat şeklini bozar ve aslında yunuslama açısını değiştirir. Böyle uyarlanabilir şekilde ayarlanmış bir yunuslama ve dalış kombinasyonu, potansiyel olarak çırpınan bir kanatta daha elverişli kaldırma ve itme kuvveti oluşturur.

Çizelge 2.2. Çırpan kanat aerodinamiği için boyutsal olmayan parametreler ve ölçekleme bağımlılığı (Shyy W., Aono H. ve Liu H. (2010)).

	Havada asılı kalma "Çırpınan kanat hızına göre"		*İleri uçuş "Seyir hızına göre"*	
Boyutsuz Parametreler	*Uzunluk*	*Frekans*	*Uzunluk*	*Frekans*
Reynolds Sayısı $Re = \frac{U_{ref} c_m}{\upsilon}$	R^2	f	R	Bağımsız
Strouhal Sayısı $St = \frac{\omega h_a}{\pi U_{ref}}$	Bağımsız	Bağımsız	R	f
Azaltılmış Frekans $k = \frac{\omega c_m}{2U_{ref}}$	Bağımsız	Bağımsız	R	f
Elastik Parametre $\Pi_1 = \frac{D}{\rho_f U_{ref}^2 c_m^3}$	R^{-2}	f^{-2}	Bağımsız	Bağımsız
Atalet Parametresi $\Pi_2 = \frac{I_B}{\rho_f c_m^5}$	R^{-1}	Bağımsız	R^{-1}	Bağımsız
Frekans Oranı $\Pi_3 = \frac{\omega_B}{\omega}$	R^{-1}	f^{-1}	R^{-1}	f

Heathcote ve Gursul (2007) yaptıkları çalışmalarından birkaç önemli sonuç çıkarmışlardır ve aşağıdaki gibi özetlemişlerdir:

a) Uygun şekilde seçilmiş bir kanat açıklığı esnekliği aralığında, bir dalan kanadın hem ortalama hem de anlık itme kuvvetleri, kanat deformasyonu nedeniyle artırılabilir.

b) Hem enine hem de kord boyunca kanat esnekliği, şekil deformasyonu nedeniyle etkili hücum açısını değiştirebilir. Kanat hücum açısının tam zamanlı kontrolü ve değişkenliği daha verimli bir uçuş sağlayarak itki kuvvetinin geliştirilmesini sağlar. Özellikle, kord yönünde esneklik durumu için, kord yönünde şekil deformasyonu nedeniyle etkili hücum açısı ve net aerodinamik kuvvetler azaltılmış olsa da hem ortalama hem de anlık itme, öngörülen alanın uçuş yörüngesine göre ayarlanmasıyla artırılır.

c) Kanat ucu tepkisinin öngörülen bir harekete göre faz gecikmesi, itki üretimi için kritik bir faktördür. Örneğin, kanat ucundaki faz gecikmesi 90 dereceden az olduğunda, kanat açıklığı esnekliğinin itme üretimi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu gösterilmiştir.

d) Kanat ucundaki etkili hücum açısı aerodinamiği önemli ölçüde etkileyebilse de, etkisi yalnızca kanat deformasyonu ve çırpma hareketi tutarlı yönlerde olduğunda olumludur. Kısacası, en yüksek ortalama itki kuvveti, iki koşul aynı anda sağlandığında ortaya çıkar: kanadın aynı fazda hareketi ve kanat ucundaki etkili hücum açısının artması. Öte yandan, kanat ucundaki etkili hücum açısı artırılsa bile, kanat ucundaki kanat hareketi kanat tabanına göre faz dışı olduğunda itki kuvvetlerinin azaldığı görülür ve bu nedenle bu durumda kanatta daha düşük bir ortalama itki görülür.

Doğal uçucuların kanatlarının anizotropik mekanik özellikler sergilediği, kanat açıklığı yönündeki eğilme sertliğinin kiriş yönündeki eğilme sertliğinden yaklaşık bir ila iki büyüklük sırası daha büyük olduğu belirtilmektedir (Shyy,W., Lian, Y., Tang, J., Viieru, D. and Liu, H. (2008a)). Bununla birlikte, Shyy W., Aono H. ve Liu H. (2010) yaptıkları çalışmada çırpan kanat aerodinamiğiyle ilişkili olağanüstü özellikleri şu şekilde ifade etmişlerdir:

- ✓ Çeşitli kararsız kaldırma kuvveti arttırıcı mekanizmaları vardır, bunlara hücum kenarı girdaplarının gecikmeli durması, yunuslama dönme, anafor yakalama, çırpma ve fırlatma ve uç girdapları dahildir.

- ✓ Biyolojik uçucuların çeşitli kanat çırpma kinematiği, kanat vuruş ve vücut genlikleri, Reynolds sayısı, Strouhal sayısı ve azaltılmış frekansı vardır; bu da yukarıda belirtilen kaldırma kuvveti iyileştirmelerine katkıların, uçucunun boyutu, şekli, uçuş ortamı ve kanat yapısının belirli kombinasyonlarına bağlı olduğu anlamına gelir.

- ✓ Kanat açıklığı ve kord yönünde uygun yapısal kanat esnekliği aralığı aerodinamik kuvvet üretimini arttırır.

BÖLÜM 3

MATERYAL VE DENEYSEL ARAŞTIRMA

Bu bölümün ilk kısmında DİM prensibi temelinde tahrik edilecek ÇKMHA'nın kanat itki sisteminin deneysel olarak geliştirilmesi için hazırlanan deney ve ölçüm düzenekleri anlatılmıştır, daha sonra sonlu eleman analizi metodu ile PZT test numunelerinin rezonans frekanslarının hesabı yapılmış ve bu veriler kullanılarak en iyi itki kuvveti elde edilmiştir. Son olarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen çıktılar karşılaştırılarak en verimli deney numunesi saptanmış ve üretilen çırpan kanat mekanizmasında kullanılmak üzere bir sonraki kısma geçilmiştir.

Bölümün ikinci kısmında, öncelikle tasarlanan kanat çırpma mekanizmaları sunulmuş ve bu tasarımlardan biri üretilerek, bir önceki bölümde deneysel olarak geliştirilen en verimli test numunesi itki sistemi olarak kullanılmıştır. Son olarak kanat çırpma mekanizması üretimi gerçekleştirilmiş, testlerle doğrulanmış ve sonuç bölümü yazılmıştır.

3.1. DIM Prensibi Temelinde İtki Mekanizması Geliştirilmesi İçin Deney düzeneği

Bu çalışmada, bir PZT elemanın enine titreşimleri ve eğilme kaynaklı kuvvetleri, DİM prensibi temelinde ÇKMHA'nın kanat mekanizmasını tahrik etmek için kullanılmıştır. Kare kesitli PZT çubukları, bir sürtünme elemanı (Neodim mıknatıs) ile birleştirilmiş ve sabitlenmiş, ardından taşlanmış bir çelik yüzeye yerleştirilmiştir. Burada en önemli nokta, test numunesinin düzgün doğrusal hareketini sağlamak için, mıknatıs tarafından oluşturulan reaksiyon kuvvetlerinin optimum bir değere sahip olması gerektiğidir; eğer mıknatıs yeteri kadar reaksiyon kuvveti oluşturmazsa (gereğinden

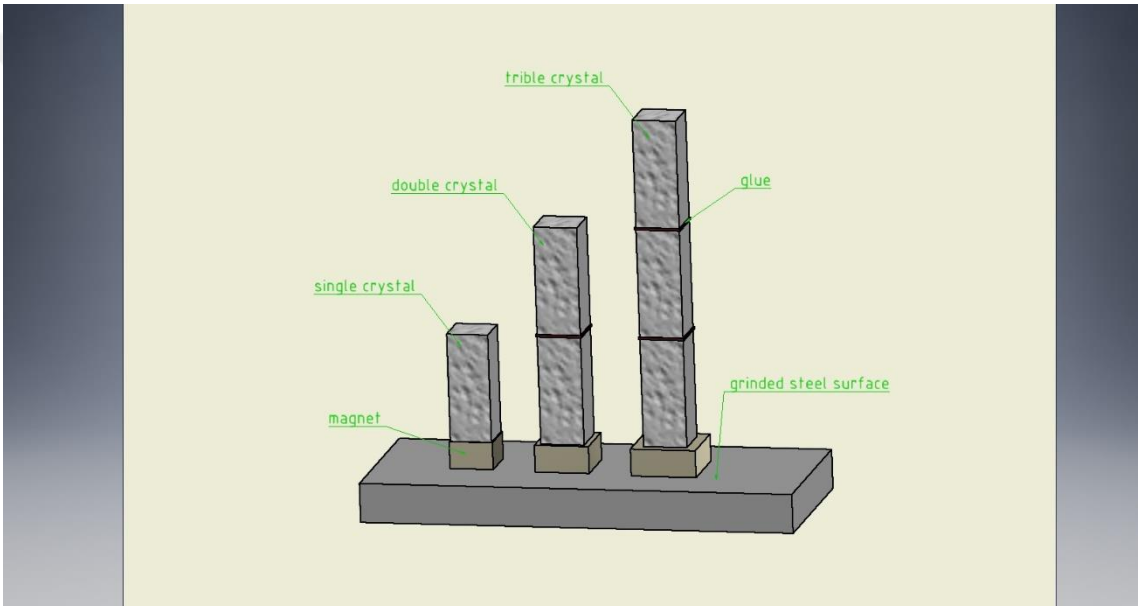
küçükse), sert titreşimler mıknatısın çelik yüzeyden ayrılmasına neden olur, böylece test numunesinin doğrusal hareketini önler.

Çizelge.3. 1. PZT Seramiklerin özellikleri ve katsayıları.

No.	*Özellik*	*Sembol*	*PZT Kristaller*		
			P-5HB	*P-53*	*P-5X*
1	Birleştirme Katsayıları	k_p	0.67	0.66	0.67
		k_{31}	0.38	0.36	0.38
		k_{33}	0.76	0.76	0.76
		k_t	0.49	0.52	0.53
2	Dielektrik Sabitleri (1 kHz)	ε_{r1}^T	3700	4500	6500
		ε_{r1}^T	4100	5100	
3	Dielektrik Kayıp Faktörü (1 kHz)	$tg\delta$	0.019	0.018	0.023
4	Elastik Sabitleri (x10-12m2/N)	S_{11}^E	16.5	15.1	
		S_{33}^D	9.0	9.0	
5	Piezoelektrik Yük (Deplasman Katsayıları) (x10-12C/N)	d_{31}	-270	-300	-410
		d_{33}	650	680	900
6	Piezoelektrik Gerilim Sabitleri (x10-3 V.m/N)	g_{31}	-9.5	-6.7	
		g_{33}	19.8	17.8	
7	Mekanik Kalite Faktörü	Q_M	70	50	40
8	Frekans Sabitleri (Hz.m)	N_d	1930	2030	2000
		N_1	1450	1430	1430
		N_3	1900	1870	1870
		N_t	2300	2220	2220
9	Yoğunluk ($x10^3 kg/m^3$)	ρ	7.70	7.60	7.70
10	Curie Noktası (°C)	T_c	210	180	150
11	10 Yılda Özelliğini Kaybetme Oranı (%)	A_{Nd}	0.35	0.10	
		A_{kp}	-0.25	-0.37	
		$A\varepsilon$	-2.0	-1.4	

Mıknatısın optimum değerin üstünde bir reaksiyon kuvveti oluşturması durumunda ise (mıknatıs gereğinden büyükse) bu kez titreşimlerin etkisi numuneyi hareket ettiremez veya hareketi sınırlar.

Tasarımı yapılan PZT test numuneleri P-5X kalite askeri standartlarda malzemeden seçilmiştir. Tek kristal, çift seri bağlı ve üçlü seri bağlı test numunelerinin üç boyutlu çizimleri Şekil 3.1. de görülmektedir. P-5X ve diğer kalite PZT malzemelerin özellikleri, teknik verileri ve PZT yapısal denklemlerindeki katsayılar Çizelge 3.1.'deki üreticinin verdiği tablodan görülebilir.



Şekil 3.1. Tek kristal, çift seri bağlı ve üçlü seri bağlı test numunelerinin üç boyutlu çizimleri

Şekil 3.2.'de test numunesi olarak kullanılacak tekli, çift ve üçlü seri bağlı PZT kristaller gösterilmiştir. Yüzey ile PZT kristal arasında sürtünme oluşturabilmesi, dolayısıyla DİM prensibinin uygulanması için test numunelerinin alt uçlarına neodim mıknatıs tutturulmuştur. Test numunesine homojen bir elektriksel alan uygulayabilmek için kutup yönüne göre kristalin iki yüzeyi (+ ve – kutuplar) gümüş boya ile kaplanmıştır. Seri bağlı PZT kristaller ve neodim mıknatısları birleştirmek için ilk etapta epoksi bazlı yapıştırıcı kullanılmıştır. Fakat yapılan deneyler sonucunda belli bir süre çalışan PZT kristallerin ısındığı görülmüş ve bu ısı kristalleri birbirine bağlayan epoksi bazlı

yapıştırıcıyı yumuşatarak PZT kristallerin ayrılmasına neden olmuştur. Isınma durumunda tek kristalin de itki üretmediği gözlemlenmiştir. Buradan, bir yapıştırıcı ile seri bağlanmış veya tek bir kristalin, Curie sıcaklığının üstüne çıktığı takdirde PZT özelliğini kaybettiği deneysel olarak gözlemlenmiştir.



Şekil 3.2. Tek ve birleştirilmiş çift seri bağlı ve üçlü seri bağlı test numunelerinin resmi

Deney düzeneği test ve ölçüm bölümlerinden oluşmaktadır:

Test bölümünde, PZT test numunelerine değişik frekans ve gerilimlerde sinyal gönderilerek, bir osiloskop ile gönderilen sinyalin; dalga formu, frekansı ve gerilimin doğrulaması görsel olarak yapılmıştır. Sinyal jeneratörünün tarama özelliği kullanılarak belli aralıktaki frekanslarda PZT test numunelerinin davranışları gözlemlenmiş ve bant genişliği daraltılarak en iyi hareketin elde edildiği frekans ve gerilim değeri saptanmıştır. 10-220 Volt aralığındaki tam sayı gerilimlerde tarama işlemi yapılmıştır. Şekil 3.4.'teki test düzeneği akış şemasına bakıldığında, sinyal jeneratöründe üretilen sağa ya da sola eğik testere dişi sinyal (5 V ve doğru akım) işlevsel yükselticiye gitmektedir. Ayrıca güç kaynağından, işlevsel yükseltici 12V / 3A'lik bir güç harcamaktadır. İşlevsel yükselticide, sinyal jeneratöründen gelen sinyalin gücü, güç kaynağından gelen enerji ile yükseltilir ve buradan çıkan güçlü sinyalin geriliminin yükseltilmesi ve akımın düşürülmesi trafoda gerçekleşir. İşlevsel yükselticiden gelen enerji; trafonun primer (ilk sargı) tarafından

girdiği takdirde gerilimi düşüp akım yükselir, sekonder (ikinci sargı) tarafından bağlandığında ise gerilimi yükseltip akımı düşürür. Buradaki uygulamada 5-10 V aralığındaki bir gerilim 150-200 V arası gerilime yükseltme ihtiyacı olduğu için trafoya enerji girişi sekonder (ikinci sargı) tarafından yapılmıştır. Son olarak, trafoda gerilimi yükseltilen enerji PZT kristallere transfer edilir. Sinyal jeneratöründen gelen sağa veya sola eğik testere formu sinyalin, transformatörün çıkışında da aynı formu koruması gerekir. Bunun kontrolü bir osiloskop ile yapılmış, sinyal formu ve frekans istenen değerlerde olmadığı takdirde sinyal jeneratöründen ayarlamalar yapılabilmektedir. Test düzeneğinin montajlı hali Şekil 3.3.'ten incelenebilir.



Şekil 3.3. Test ve ölçme düzeneği resmi

Test numunelerine bağlı olan neodim mıknatısların yapıştığı yüzey taşlanmış dolayısıyla olabildiğince pürüzsüz olmalıdır. İlk etapta freze ile işlenmiş yüzeyler, üzerlerindeki freze çakısı izleri nedeniyle test numunelerinin düz ilerlemesini saptırarak başka yönlere doğru gitmesine sebep olmaktadır. Bu yüzden testlerin yapıldığı yüzey taşlama metodu ile olabildiğince pürüzsüz hale getirilmelidir.



Şekil 3.4. Test düzeneği sinyal akış diyagramı

Test düzeneğinde kullanılan sinyal jeneratörü "JOY-IT" marka ve JDS6600 model (Şekil 3.5.) olup çift kanallı ve ihtiyaç duyulan testere dişi sinyal gönderebilecek kapasitededir. Sinyal jeneratörünün testlerdeki amacı istenilen sinyal formunu ve frekansını test numunesine sağlamaktır.

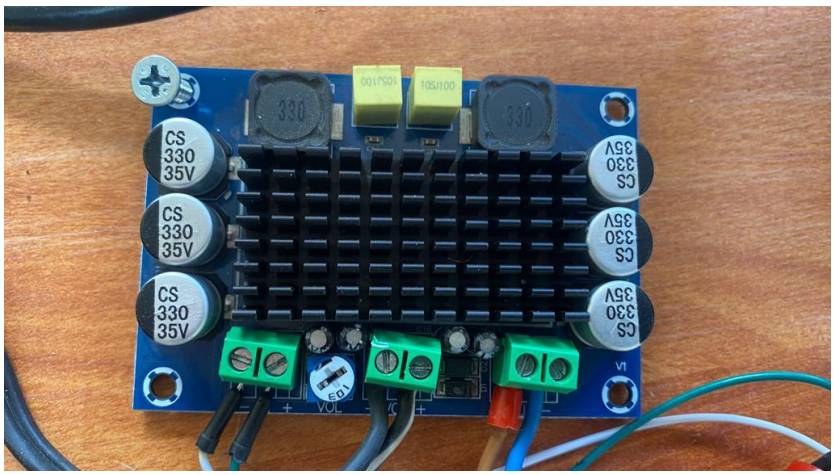


Şekil 3.5. Sinyal jeneratörü

Çizelge 3.2. Sinyal Jeneratörü Özellikleri

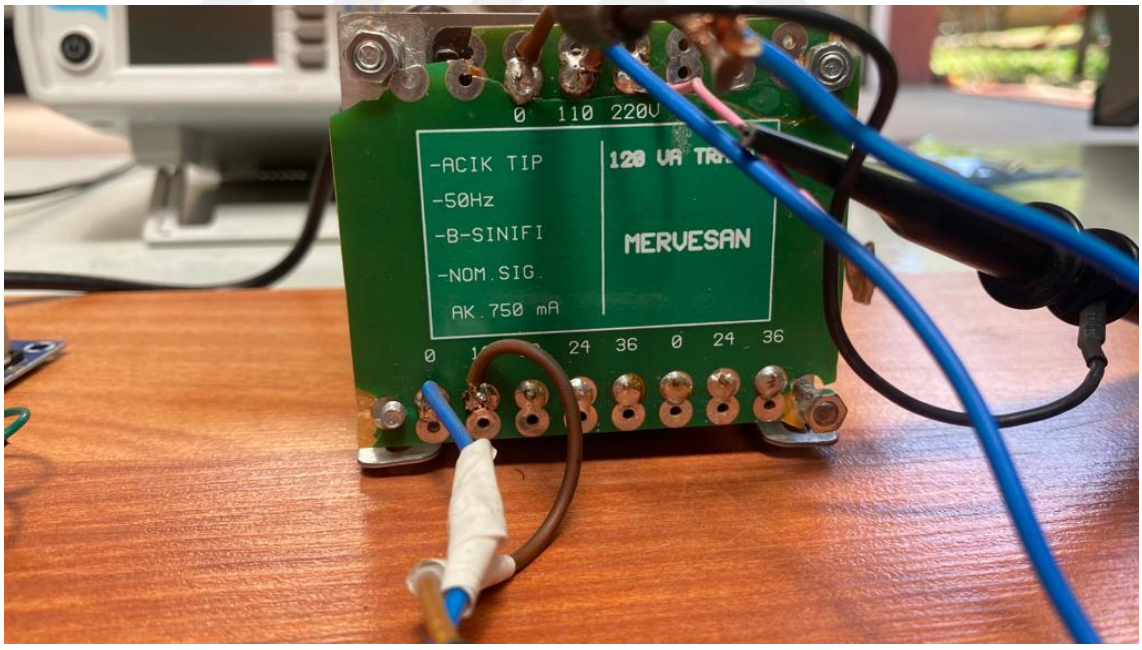
JOY-IT JDS6600 SİNYAL JENERATÖRÜ ÖZELLİKLERİ	
Frekans Aralığı Sinüs: Kare ve Üçgen: Keyfi Dalga Biçimi:	 0-60 MHz. 0-15 MHz. 0-6 MHz.
Frekans Çözünürlüğü:	0,01 µHz.
Frekans Doğruluğu:	±20 ppm
Çıkış Yük Kapasitesi	150 mA (En fazla)
Genel Özellik	Çift Kanallı Sinyal Jeneratörü ve Tek Kanallı Frekans Sayıcı

İşlevsel yükselticinin test düzeneğindeki görevi ise sinyal jeneratöründen gelen testere dişi formundaki sinyalle güç kaynağından gelen enerjiyi, sinyal formunu bozmadan birleştirerek trafoya transfer etmektir. Şekil 3.6.'da görüldüğü gibi işlevsel yükselticinin iki girişi ve tek çıkığı vardır. Girişlerde güç kaynağından ve sinyal jeneratöründen gelen enerjinin toplamı, çıkıştaki yani trafoya giden enerjiye eşittir. İşlevsel yükselticinin çıkışında her ne kadar çıkış sinyalinin bozulmaması gerekse de sapmalar olmaktadır. Bu durumda sinyal osiloskop ile gözlemlenerek, sinyal jeneratörünün ayar düğmeleri ile sinyal formu düzeltilebilmektedir.



Şekil 3.6. İşlevsel yükseltici

Şekil 3.7.'de görüldüğü gibi trafodan çıkış gerilimi için iki opsiyon vardır. Bunlar 100 V ve 220 V'dir. Fakat sinyal jeneratöründen gelen sinyalin genliği kontrol edilerek ara değerlerdeki gerilimler elde edilerek testler yapılabilmiştir. Bilindiği gibi trafolar, giriş alternatif akım gerilimini, çıkışta bir seviyeden diğerine dönüştürmek için elektromanyetik indüksiyon prensibiyle çalışan statik elektrik cihazıdır. Trafo, frekansı değiştirmeden giriş alternatif akım gerilim seviyesini artırabilir veya azaltabilir. Burada, trafonun yalnızca alternatif akım gerilimini artırdığı veya azalttığı unutulmamalıdır. Bir trafo alternatif akım gerilimini doğru akım gerilimine dönüştürmez. Şekil 3.8.'de ifade edildiği gibi trafoların ilk ve ikinci bobindeki sargı adetine bağlı olarak gerilimi arttırma veya azaltma özelliği vardır. Gerilim arttırıcı trafolar, giriş alternatif akım gerilimini "arttıran" bir cihazdır. Örneğin, gerilim arttırıcı trafolar, girişteki düşük voltaj ve yüksek akım alternatif akım sinyalini çıkış tarafında yüksek voltaj ve düşük akım alternatif akım sinyaline dönüştürürler.



Şekil 3.7. Trafo

PZT kristalin ısınmaması veya Curie sıcaklığının üzerine çıkarak PZT özelliğini kaybetmemesi veya Şekil 2.7.'deki grafikte ifade edildiği gibi satürasyon noktasının altında kalan gerilim değerlerinde kalması için, trafo çıkış gerilimi belli aralıkta tutularak

testler yapılmıştır. Satürasyon noktasının üzerinde test numuneleri hızlıca ısınarak işlevsiz hale gelmektedir.



Şekil.3. 8. Trafo enerji akış diyagramı

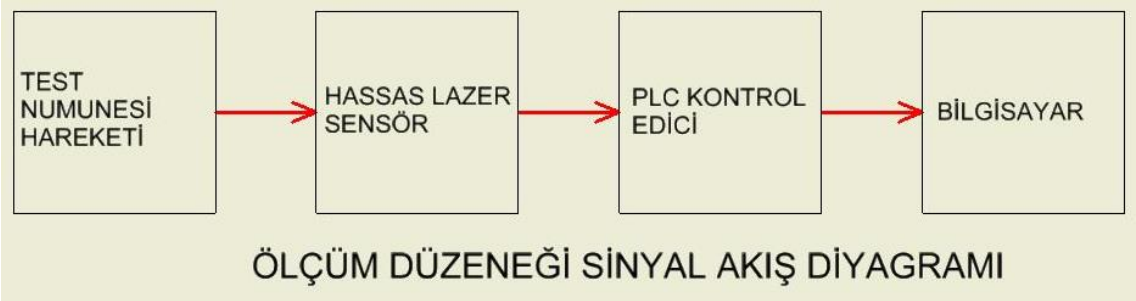
İşlevsel yükselticiye enerji sağlayan güç kaynağı "SONYA" marka olup sabit 12 V ve 3 A enerji sağlamaktadır.



Şekil 3.9. Güç kaynağı

Ölçüm sisteminde ise hassas lazer sensörü ile alınan analog veri PLC kontrol ediciye transfer edilir ve burada işlenerek bilgisayarda yazılan yazılım hız-konum grafikleri çizilmesini sağlar. Şekil 3.9.'da ölçüm düzeneği akış diyagramı çizilmiştir.

Burada PLC kontrol edici ve bilgisayarda hız-konum grafiklerini çizmek için iki yazılım yapılarak birbirleri ile haberleştirilmişlerdir.



Şekil 3.10. Ölçüm düzeneği akış diyagramı

Hassas lazer sensörü Şekil 3.11.'de görülebilir. Teknik özellikleri şu şekildedir:

Maksimum ölçme mesafesi: 10 mm,

Tekrarlanabilirlik: 1 µm

Doğrusallık: ± 10 µm,

Yanıt süresi: ≥ 2 ms ,

Ölçülebilen frekans: ≤ 2 kHz,

Işık kaynağı: Lazer, kırmızı görülebilen ışık,

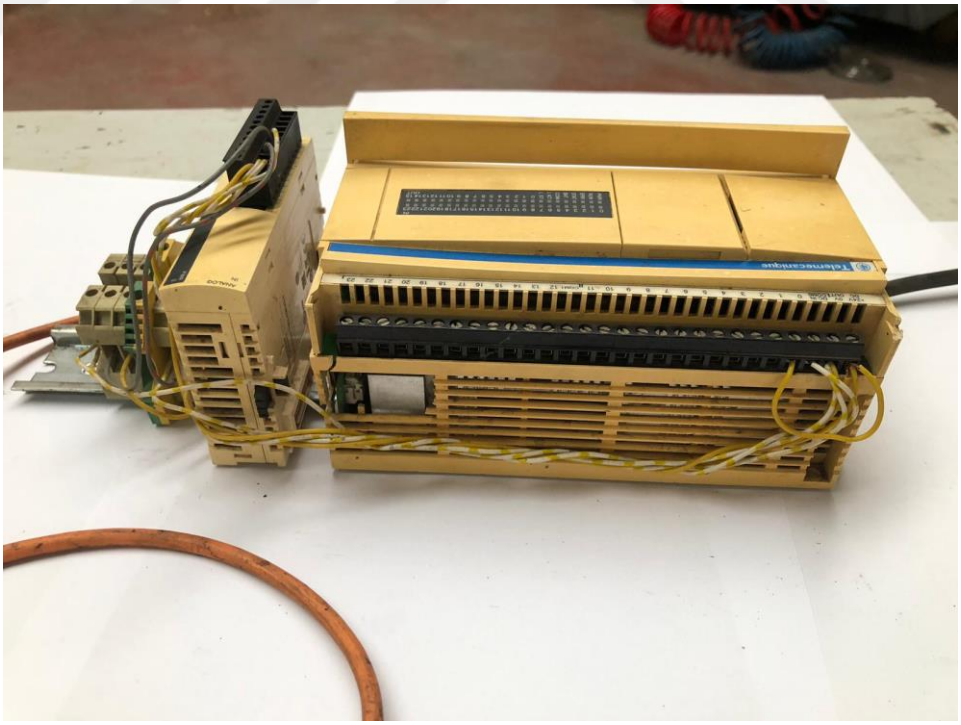
Veri çıkış süresi: ≥ 0.5 ms.

Yukarıdaki lazer sensörünün özelliklerinden ölçülebilen frekansın 2 kHz olduğu görülmektedir., fakat test numuneleri yaklaşık 20 kHz'de çalışmaktadır. Bu yüzden veriler eğik ve doğru bir grafik yerine basamak şeklinde ölçülebilmiştir.



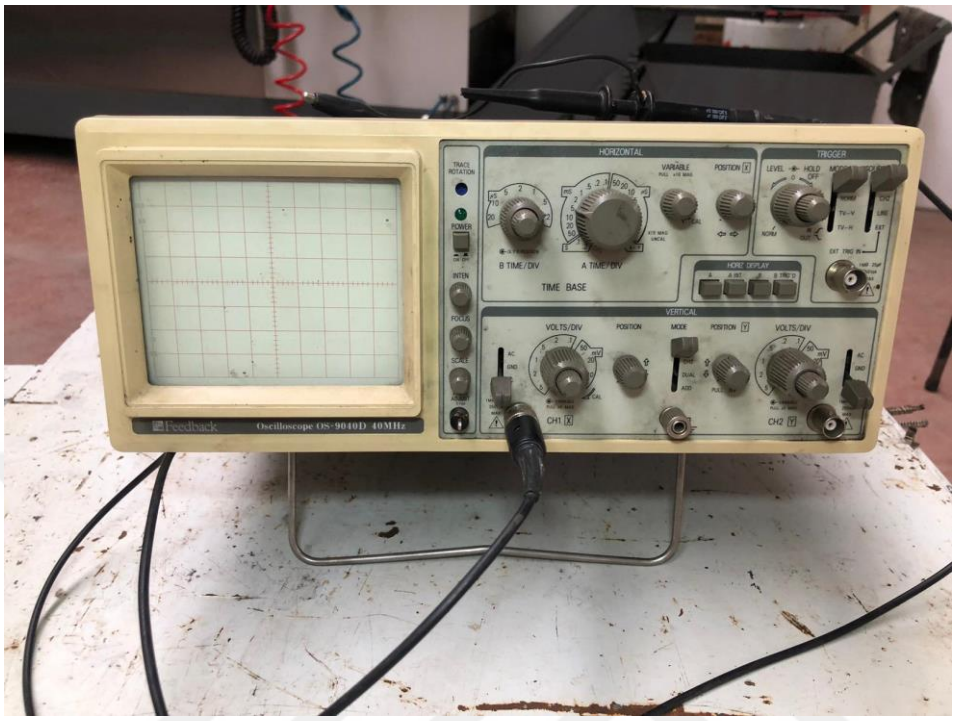
Şekil 3.11. Hassas lazer sensörü

Ölçüm düzeneğindeki PLC kontrol edici "Schneider" marka kullanılmıştır ve Şekil 3.12.'den incelenebilir.



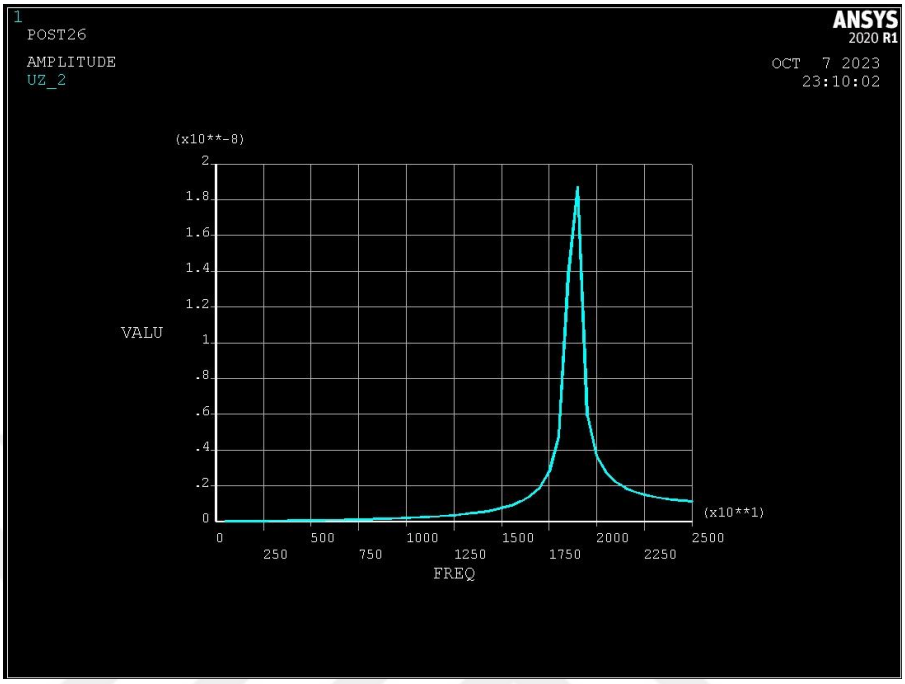
Şekil 3.12. PLC kontrol edici

Son olarak osiloskop test numunelerine giden sinyalin formunu doğrulamak ve gerektiğinde sinyal jeneratöründen ayarlamak amacıyla kullanılmıştır.

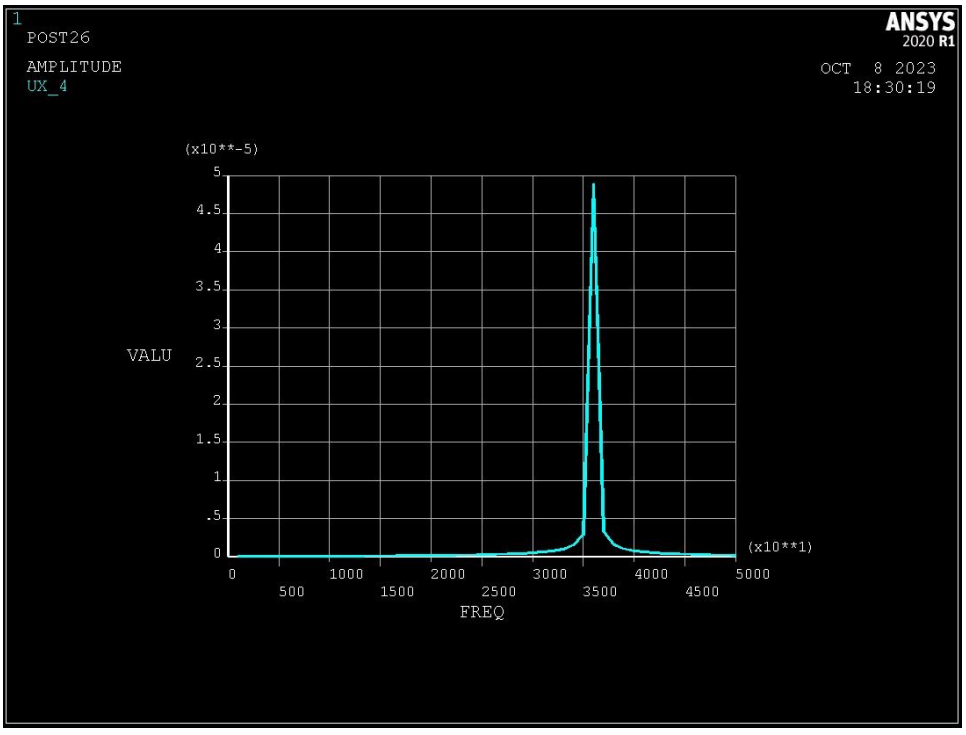


Şekil 3.13. Osiloskop

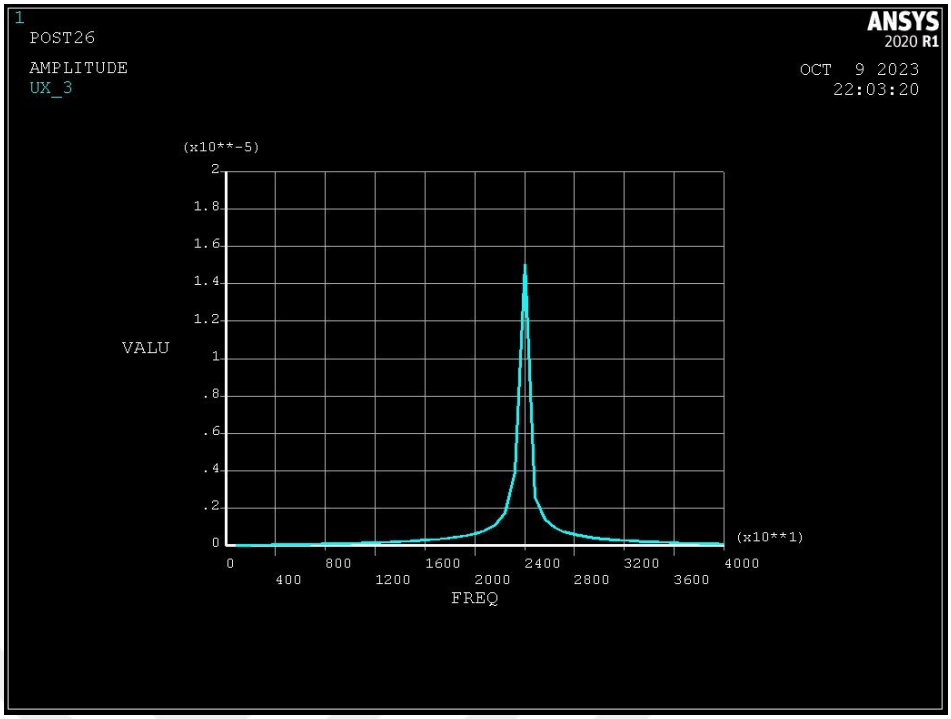
3.2. Sonlu Eleman Analizi Yazılımı ile Test Numunelerinin Rezonans Frekans ve Eğilme Uzama Miktarlarının Hesaplanması



Şekil 3.14. Tek kristal rezonans frekansı



Şekil 3.15. Çift seri bağlı kristal rezonans frekansı



Şekil 3.16. Üçlü seri bağlı kristal rezonans frekansı

Rezonans frekansları ve eğilme ve uzama deplasmanları "ANSYS" sonlu eleman analizi paket programı ile yapılmıştır. Bu program arka planda PZT yapısal denklemlerini kullanmaktadır ve ototrofik (üç düzlemde simetri) malzeme koşulu altında sonlu hacim metodu ile nümerik çözüm yapmıştır. PZT malzeme özellikleri Çizelge 3.1.'den bakılarak programa girilmiştir.

Yapılan analizler sonucunda;

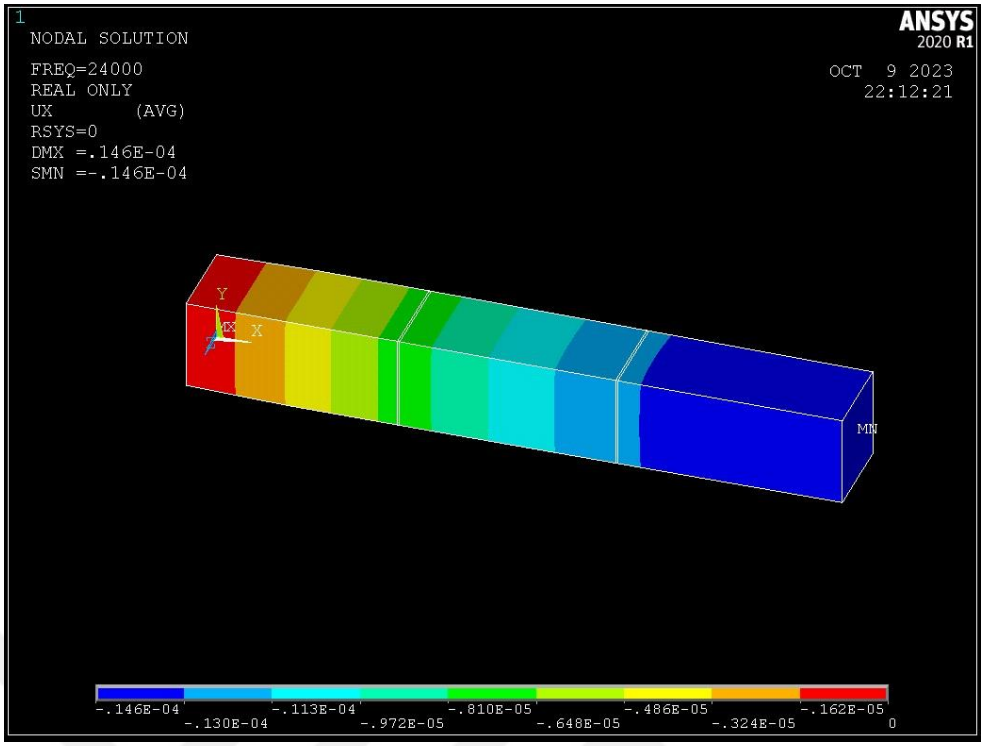
Tek PZT kristalli test numunesi rezonans frekansı: 18 kHz,

Çift PZT kristalli test numunesi rezonans frekansı: 36 kHz ve

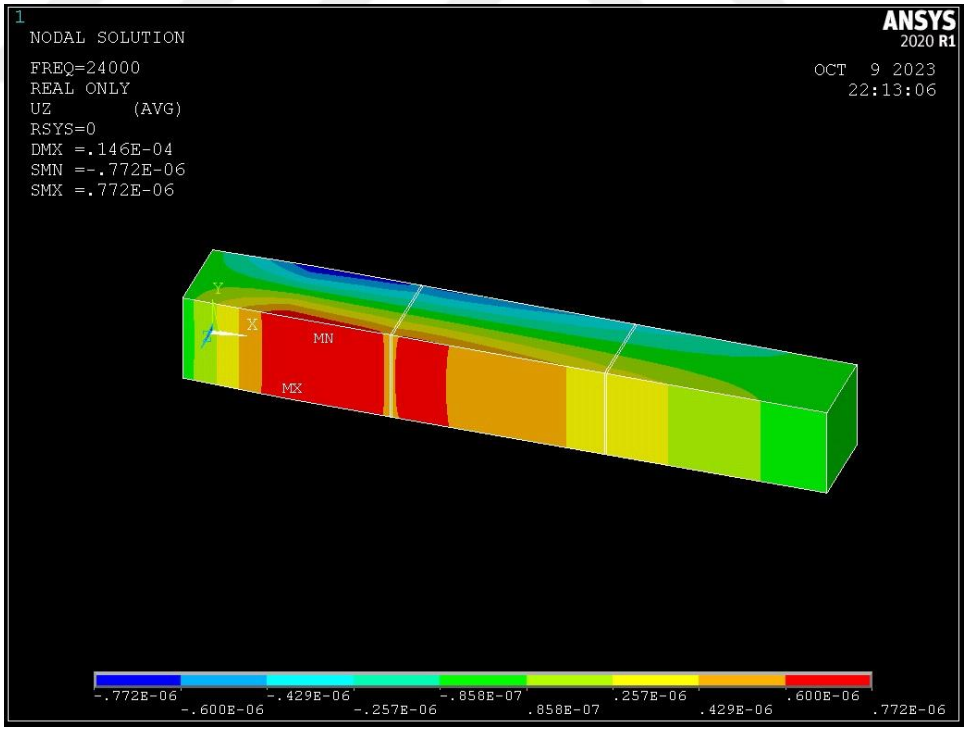
Üçlü PZT kristalli test numunesi rezonans frekansı: 23 kHz, olarak hesaplanmıştır.

Test numunelerinden maksimum verimi alabilmek için testlerde burada hesaplanan rezonans frekansları kullanılacaktır. Ayrıca sinyal jeneratörünün sinyal tarama özelliği kullanılarak deneysel olarak da rezonans frekansları gözlemlenebilir. Rezonans frekansına geldiği anda test numunesinin titreşimi artmakta ve hareket etmektedir.

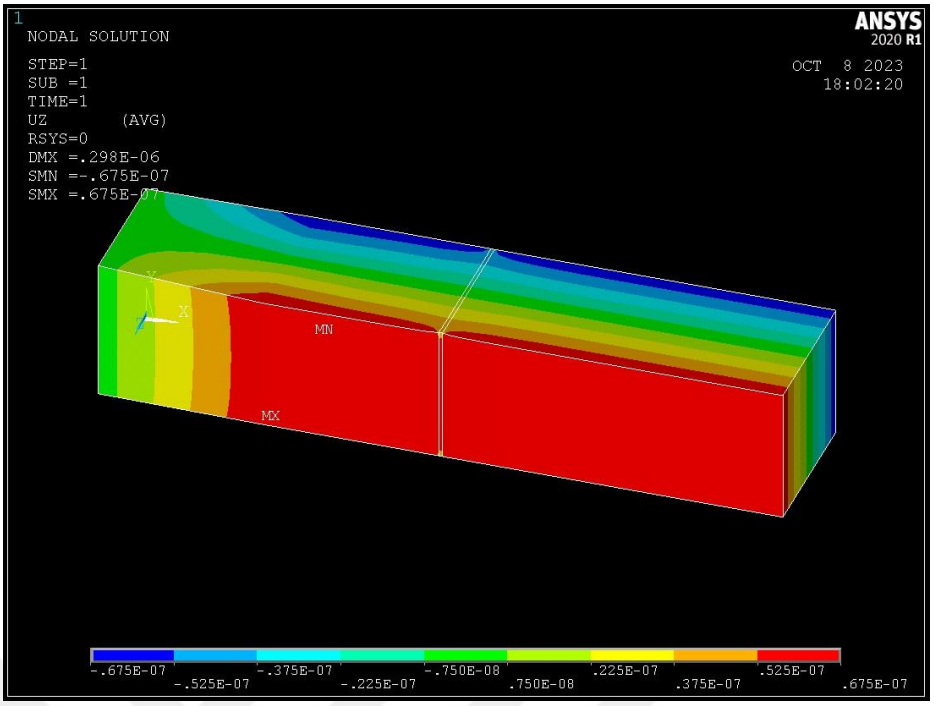
Hesaplanan rezonans frekansları "ANSYS" sonlu eleman analizi programında tüm test numunelerine uygulanarak enine ve boyuna sapmalar hesaplattırılmıştır.



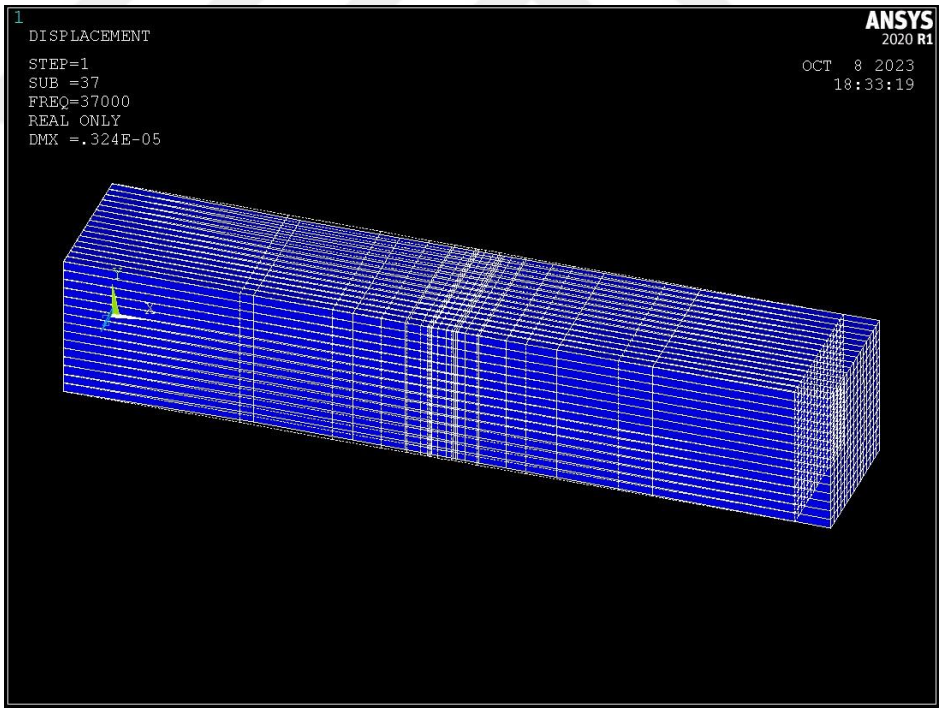
Şekil 3.17. Üçlü seri bağlı kristal boyuna uzaması (x-ekseni)



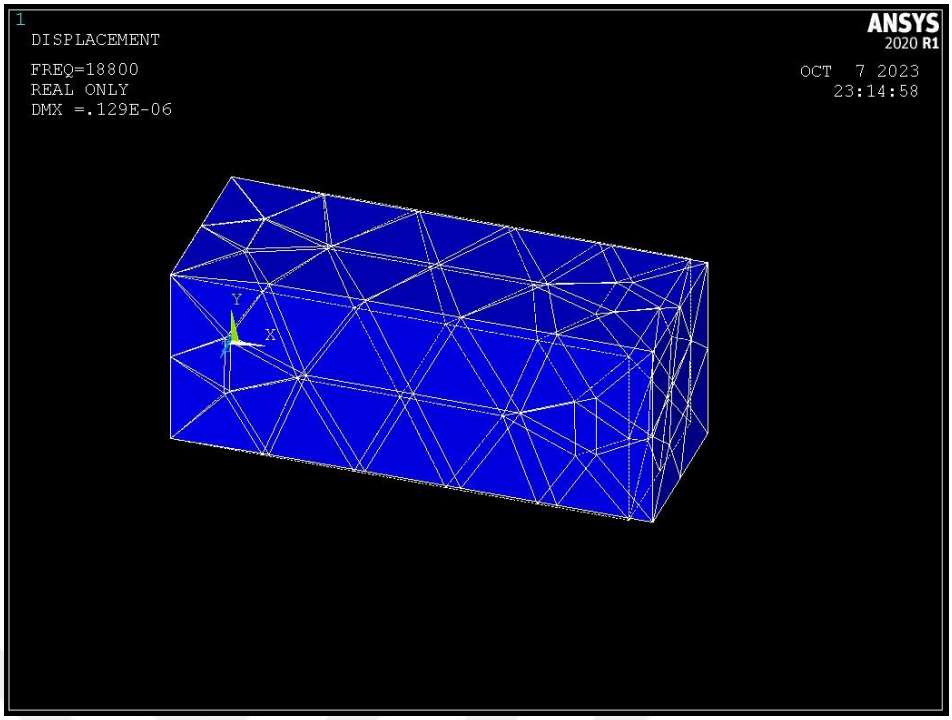
Şekil 3.18. Üçlü seri bağlı kristal enine uzaması (z-ekseni)



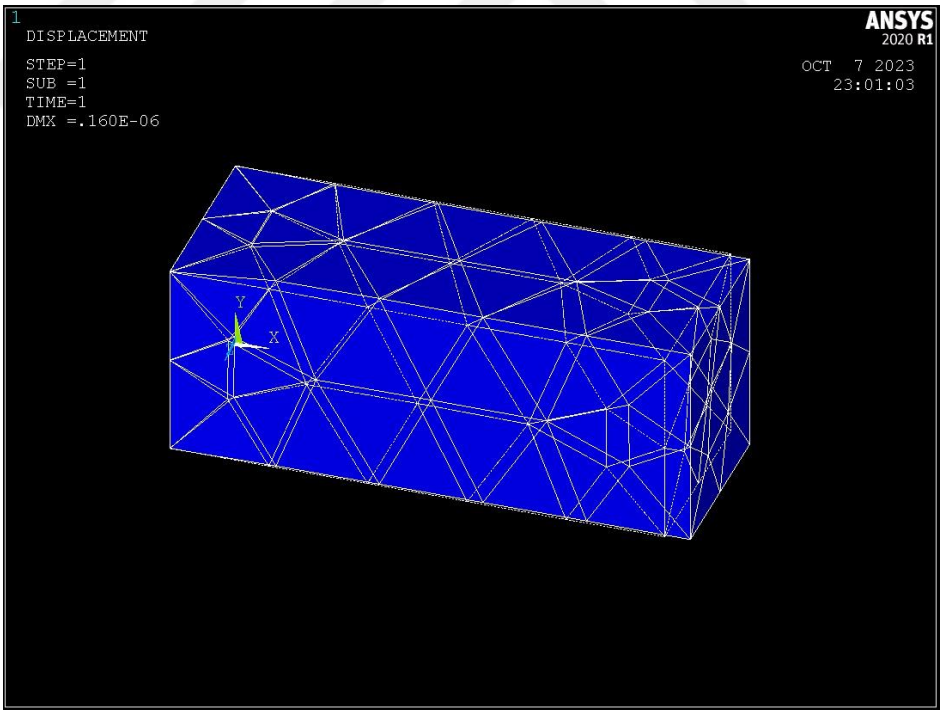
Şekil 3.19. Çift seri bağlı kristal enine uzaması (z-ekseni)



Şekil 3.20. Çift seri bağlı kristal boyuna uzaması (x-ekseni)



Şekil 3.21. Tek kristal enine uzaması (z-ekseni)



Şekil 3.22. Tek kristal boyuna uzaması (x-ekseni)

Sonlu eleman analizi programının verdiği sonuçlar karşılaştırıldığında beklendiği gibi boyuna en çok uzayan test numunesi üçlü seri bağlı PZT kristal (0.0146 mm),

ardından çift seri bağlı PZT kristal 0.00324 mm ile ikinci sırada ve en az uzayan tek PZT kristalli test numunesi 0.00019 mm uzamıştır. Benzer şekilde enine sapmalarda da üçlü seri bağlı, çift seri bağlı ve tek kristal şeklinde sıralama olmuştur.

3.3. Deneysel Sonuçlar ve Diğer Numerik Sonuçlarla Karşılaştırma

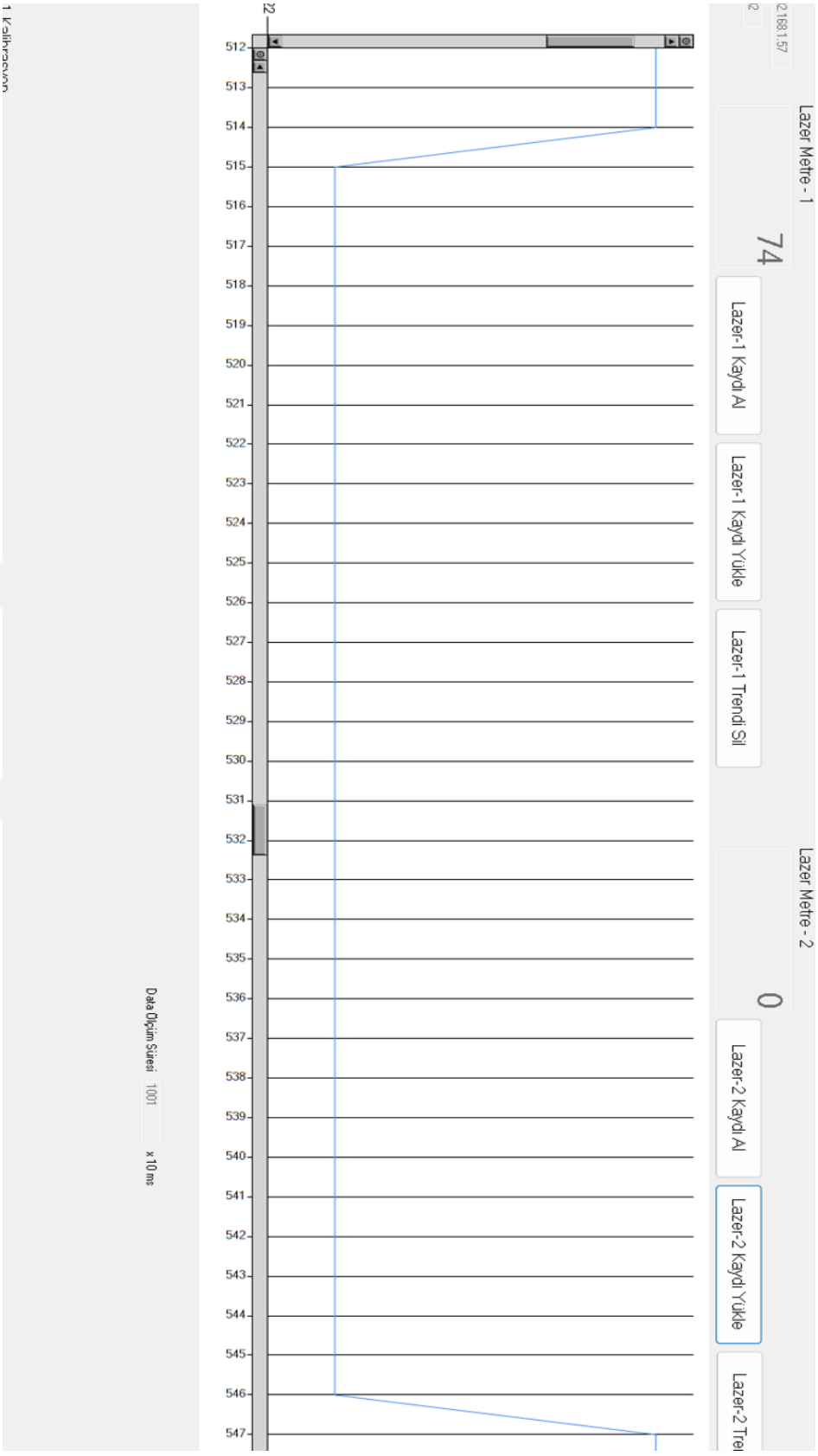
Şekil 3.23.'deki grafiğin ifade ettiği gibi çift PZT kristalli test numunesinin 360 ms'de (0.36 s) 7.2 mm yol aldığı görülüyor. Burada yol zamana bölündüğünde hız elde edilir:

$$\text{Hız} = \frac{\text{yol}}{\text{zaman}} = \frac{7.2\ \text{mm}}{0.36\ \text{s.}} = 20\,\frac{\text{mm}}{\text{s}}\,\text{olur.}$$

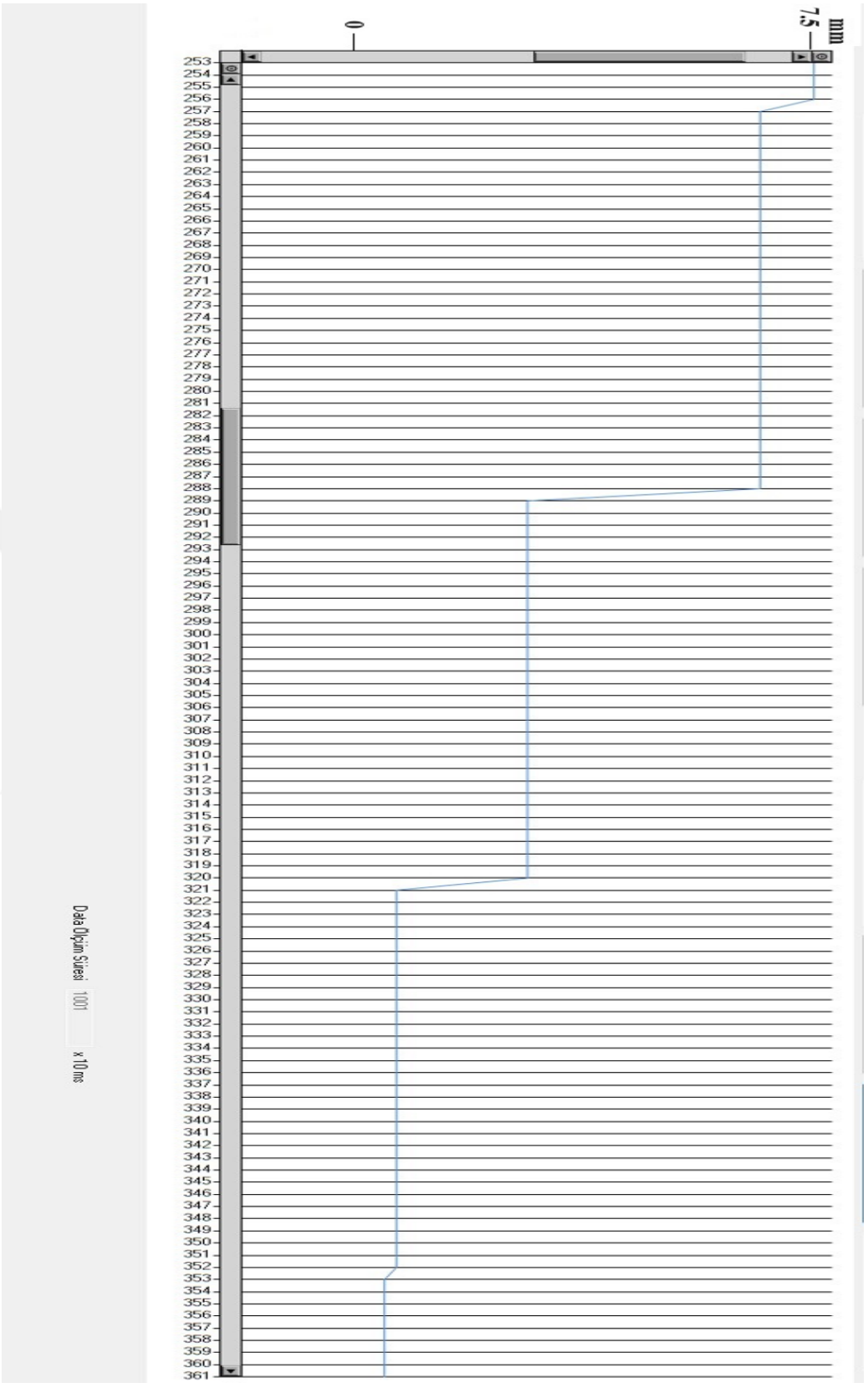
Benzer şekilde tek ve üçlü seri bağlı test numunelerinin de hızları hesaplanabilir. Örneğin üçlü seri bağlı test numunesi Şekil.3.24.'te gösterildiği gibi 7.2 mm mesafeyi 1008 ms'de tamamlamış, dolayısıyla hızı 7,14 m/s olur.

Son olarak tek kristalli test numunesi 7.2 mm mesafeyi 775 ms'de (0.775 s) tamamlamıştır. Tek kristalli test numunenin hızı da 9.3 mm/s olur.

Üç test numunesinin hızları karşılaştırıldığında çift PZT kristalli test numunesi en iyi performansı göstermiştir. Bu sonuç bir test numunesinde seri bağlı PZT kristallerin sayısının fazlalığı ile hız arasında doğrusal bir ilişki olmadığını göstermektedir. Çift PZT kristalli test numunesinin hızı ve itme gücü hem tek kristalliden hem de üçlü seri bağlı test numunesinden yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Fakat dikey konumlandırılmış test numunesinin eğilme ve burulma titreşimini kullandığı durumda, testere dişi formundaki sinyal sağa veya sola eğik olsa da aynı doğrultuda hareket ettiği gözlemlenmiştir. Dolayısıyla eğilme ve burulma titreşimlerini kullanan mekanizmalarda sürekli bir yüzeye ihtiyaç vardır.



Şekil 3.23. Çift seri bağlı kristal hız-zaman grafiği



Şekil 3.24. Üçlü seri bağlı kristal hız-zaman grafiği

Şekil 3.25. Tek kristal hız-zaman grafiği

Çizelge 3.3. Üçlü seri bağlı PZT kristal deneysel ve numerik sonuçları

Üçlü seri bağlı kristal deneysel ve numerik sonuçları			
Rezonans Frekansı (numerik sonuç – Deneysel Sonuç)	Boyuna sapma (x-yönü) (numerik sonuç)	Enine sapma (z-yönü) (numerik sonuç)	Hız (deneysel sonuç)
23 KHz-24 KHz	0.0146 mm	0.772 μm	7.14 mm/s

Çizelge 3.4. Çift seri bağlı PZT kristal deneysel ve numerik sonuçları

Çift seri bağlı kristal deneysel ve numerik sonuçları			
Rezonans Frekansı (numerik sonuç – Deneysel Sonuç	Boyuna sapma (x-yönü) (numerik sonuç)	Enine sapma (z-yönü) (Numerik sonuç)	Hız (deneysel sonuç)
36 KHz-22 KHz	0.00324 mm	0.0675 μm	20 mm/s

Çizelge 3.5. Tek PZT kristal deneysel ve numerik sonuçları

Tek PZT kristal deneysel ve numerik sonuçları			
Rezonans Frekansı (numerik sonuç – Deneysel Sonuç	Boyuna sapma (x-yönü) (numerik sonuç)	Enine sapma (z-yönü) (Numerik sonuç)	Hız (deneysel sonuç)
18 KHz-16 KHz	0.00019 mm	0.000129 mm	9.3 mm/s

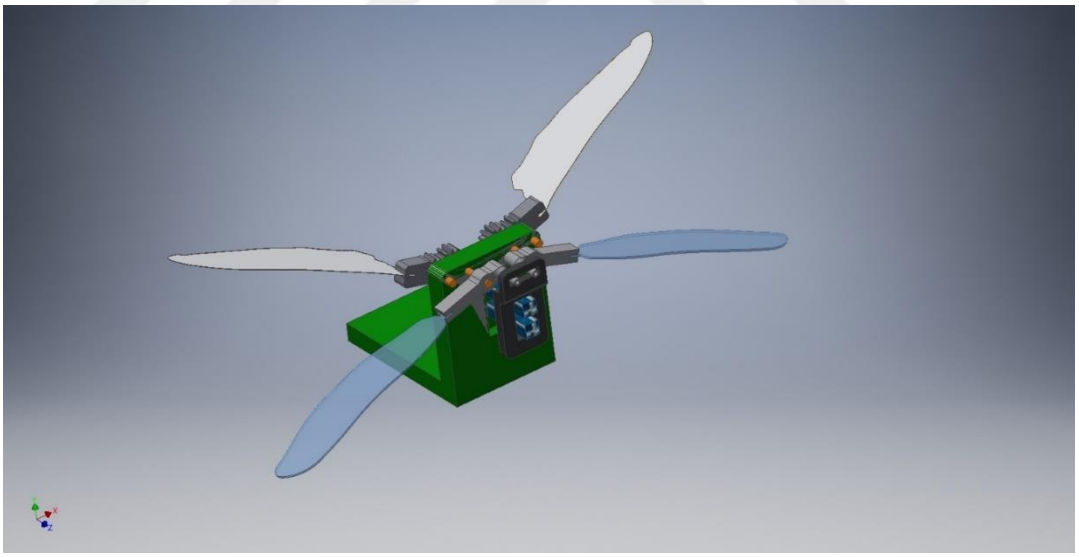
Çizelgeler 3.3., 3.4., ve 3.5.'te test numunelerinin numerik ve deneysel sonuçları ayrı ayrı gösterilmiştir. Bu çizelgeler incelendiğinde çift kristalli test numunesinin en hızlı olan olduğu gözlemlenmektedir. Dolayısıyla tasarlanıp testlerinin yapılacağı MHA kanat mekanizmasında çift kristalli test numunesi itici güç olarak kullanılacaktır.

Yapılan testlerde gözlemlenen bir diğer önemli nokta, yatay konumlandırılmış DIM prensibinde hareket için boyuna uzamayı kullanan test numuneleri testere dişi sinyalin sağa veya sola eğik olmasına göre her iki yöne hareket edebilmektedir. Yani geri ve ileri hareket edebilmektedir.

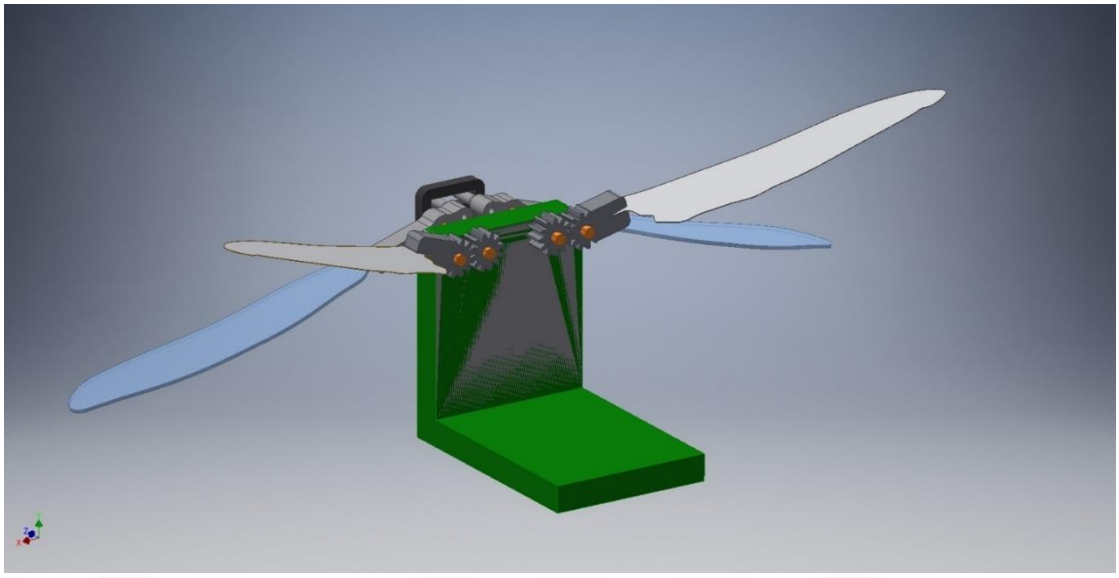
3.4. Kanat Çırpma Mekanizmaları Tasarımı ve Deneysel Geliştirilmesi

Bir önceki bölümde yapılan deneysel tasarım çalışmaları doğrultusunda; kanat çırpma mekanizması itki sisteminde, en yüksek doğrusal hızın elde edildiği çift PZT kristalli deney numunesinin kullanılmasına karar verilmiştir. Üretimi yapılacak kanat mekanizmalarında, yusufçuğun ön ve arka çift kanatlarının uçuş tarzlarına göre faz farkları göz önünde bulundurulmuştur. Bunlar, fazlı çırpma, eşzamanlı çırpma ve karşıt çırpma modlarıdır. Fazlı ve karşıt çırpma tarzları için yapılan testler aynı kanat çırpma mekanizması ile yapılmıştır. Eşzamanlı çırpma için ise diğer bir mekanizma üretilmiştir.

Karşıt çırpma tarzının deneysel olarak test edilmesi için üretilen prototipin tasarımı Şekil.3.26. ve Şekil.3.27.'de görülmektedir. Bu tarz çırpmada ön ve arka çift kanatlar arasında 180 derece faz farkı vardır ve bölüm 2.2.'de ayrıntılı şekilde ifade edildiği gibi yusufçuğun havada asılı kalma, yavaş ileri uçuş vb. gibi yüksek kaldırma kuvveti gerektiği durumlarda kullandığı kanat çırpma şeklidir.



Şekil 3.26. Ön-arka kanat çiftinin karşıt vuruş tarzı için üretilecek kanat çırpma test düzeneği tasarımının önden görünüşü.

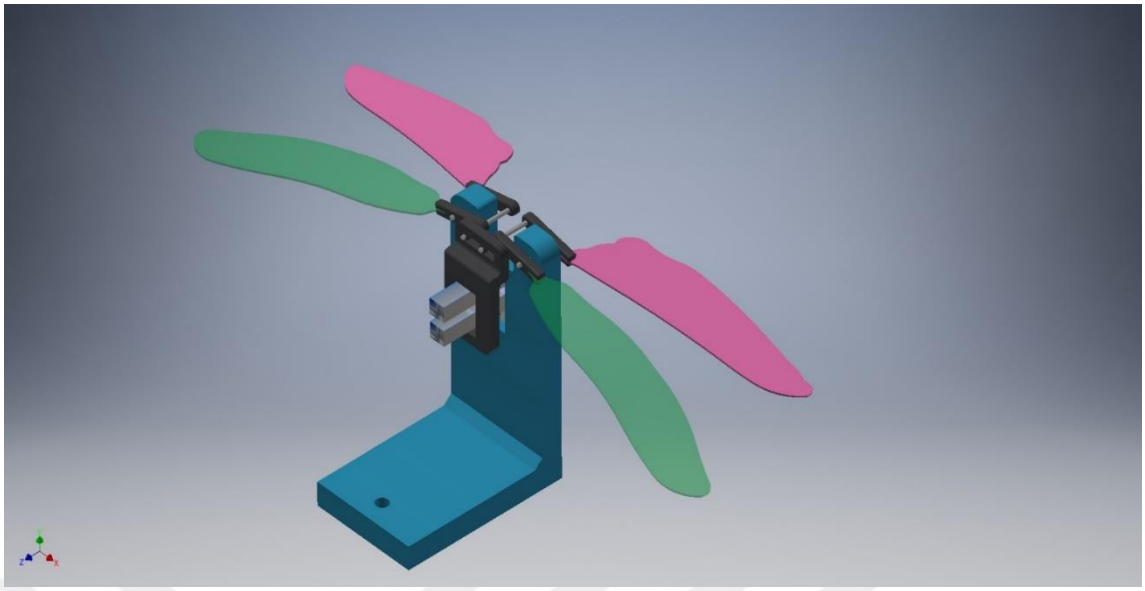


Şekil 3.27. Ön-arka kanat çiftinin karşıt vuruş tarzı için üretilecek kanat çırpma test düzeneği tasarımının arkadan görünüşü.

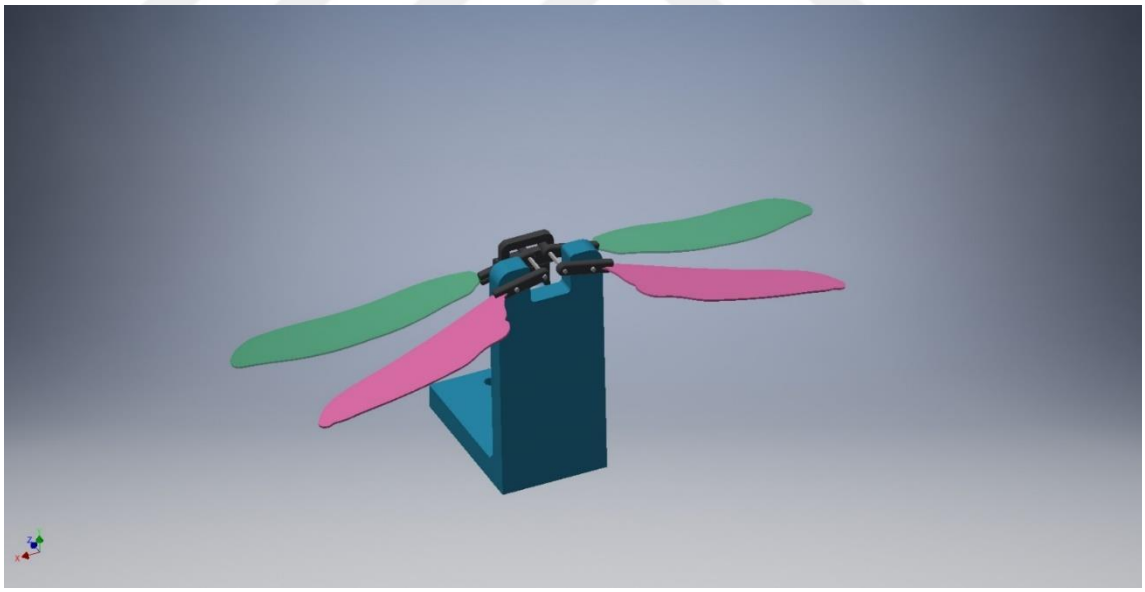
Şekil 3.26.'da görüldüğü gibi karşıt vuruş tarzı için tasarlanan kanat çırpma düzeneğinde, ön çift kanatın hareketi bir çift düz dişli ile arka kanatlara aktarılmıştır. Bu şekilde ön ve arka kanat çiftlerinin ters yönde hareket etmeleri sağlanarak 180 derece faz farkı ile çırpmaları gerçekleştirilmiştir.

Ön ve arka kanat çiftlerinin eşzamanlı ve fazlı vuruş tarzları için tasarlanan kanat çırpma düzeneğinin önden ve arkadan görüntüsü Şekil 3.28 ve Şekil 3.29.'daki gibidir. Yusufçuklar eşzamanlı vuruş tarzını ivmelenme ve ani yön değiştirme uçuş stillerinde kullanırlar. Eşzamanlı vuruş tarzını sağlayabilmek için ön ve arka çift kanatlar iki adet pin ile birbirlerine sabitlenmişlerdir. Dolayısıyla ön kanatlar tahrik edildiğinde aynı anda arka kanatlarda aynı yönde hareket ederler.

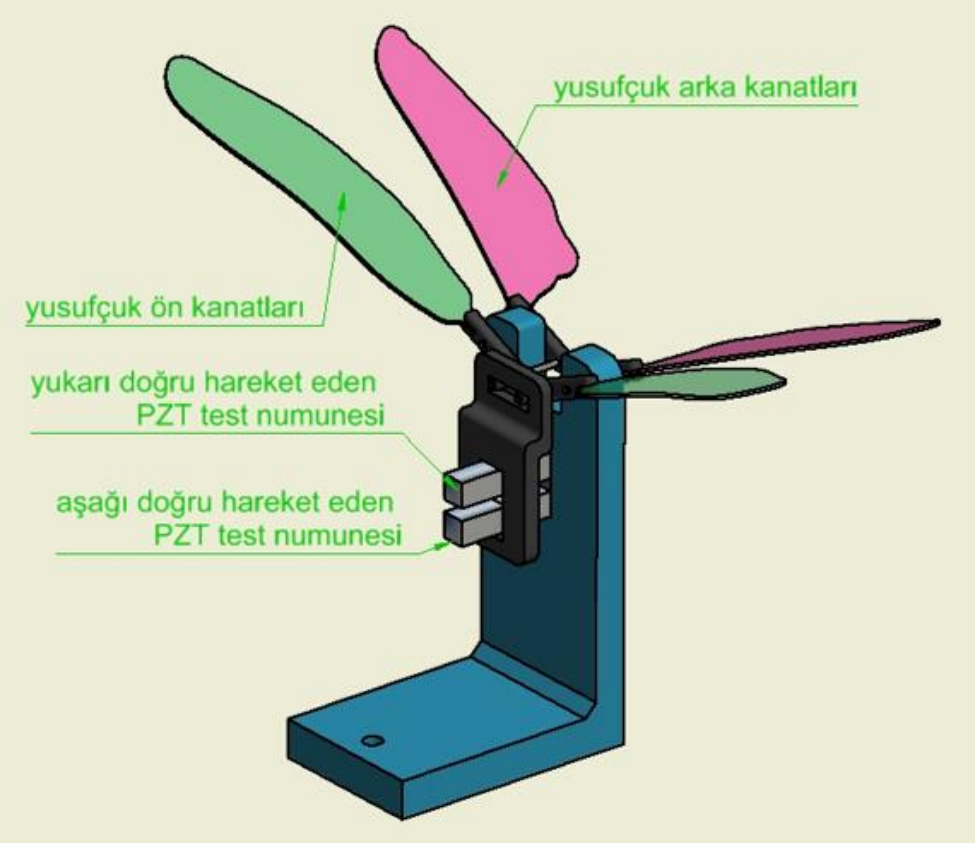
Fazlı vuruş tarzında ise arka kanatlar ön kanatların, 50-100 derece arası önünde hareket ederler. Yusufçuklar yüksek itme kuvveti gereken hızlı uçuş stilinde fazlı vuruş tarzını kullanırlar.



Şekil 3.28. Ön-arka kanat çiftinin eşzamanlı vuruş tarzı için üretilecek kanat çırpma test düzeneği tasarımının önden görünüşü.



Şekil 3.29. Ön-arka kanat çiftinin eşzamanlı vuruş tarzı için üretilecek kanat çırpma test düzeneği tasarımının arkadan görünüşü.

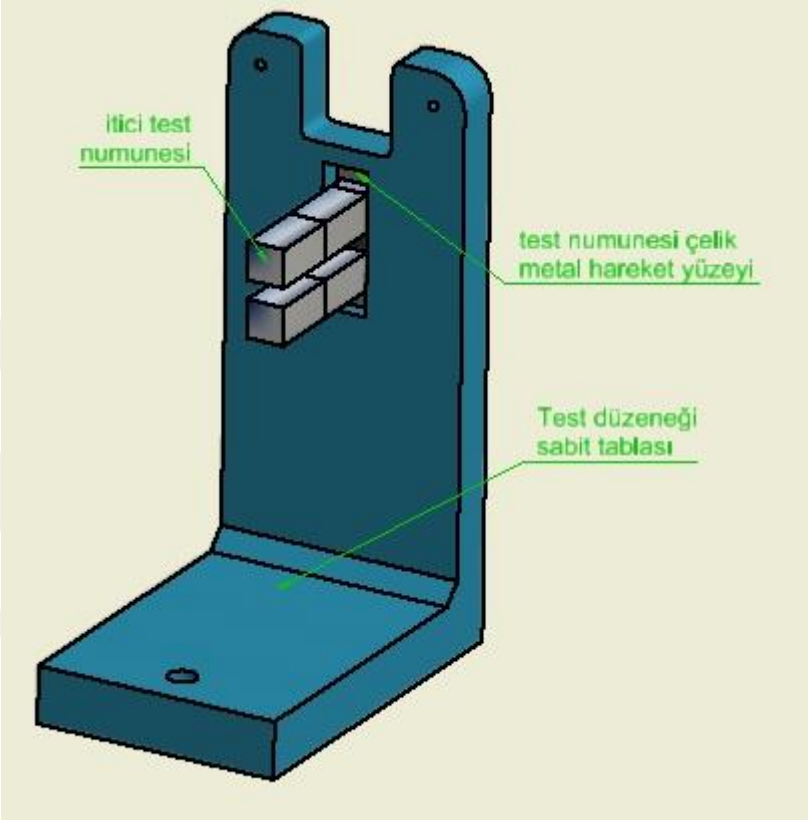


Şekil 3.30. Kanat çırpma test düzeneğini oluşturan parçalar

Şekil 3.30.'da kanat çırpma test düzeneğini oluşturan parçalar ayrıntılı olarak görülmektedir. Kanat çırpma test düzeneğini oluşturan parçalar: Yusufçuk ön ve arka kanatları, PZT itki mekanizması ve ana gövdeden oluşmaktadır. Şekil 3.31.'de ise kanat PZT itki mekanizmasını oluşturan parçaların montajlı kavramsal tasarımı görülmektedir. PZT itki mekanizmasında biri yukarı biri aşağı doğru hareketi sağlamak üzere iki adet PZT test numunesi, PZT kristallerin alt uçlarına tutturulmuş neodim mıknatıslar ve hareketin yolunu oluşturan taşlanmış metal plaka vardır.

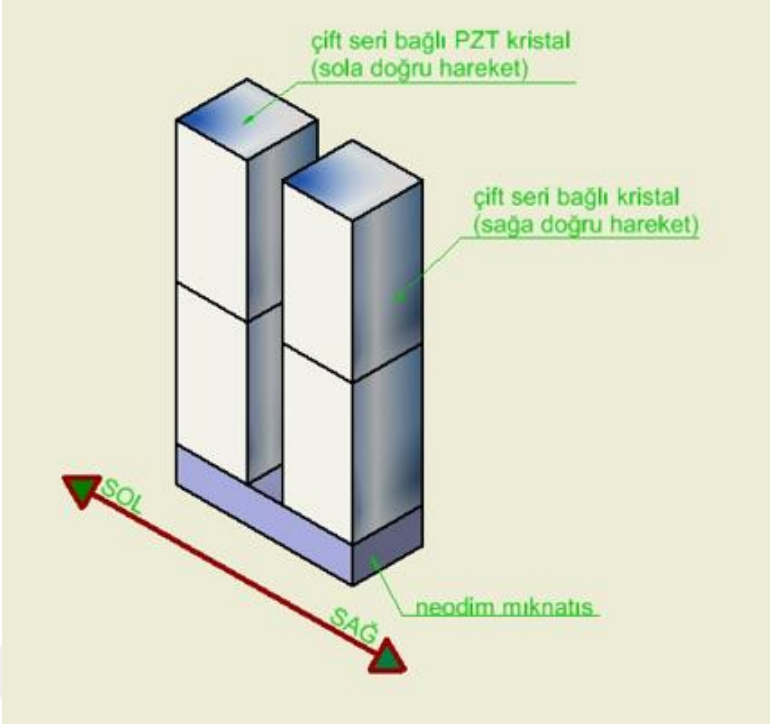
Bu çalışmanın başında, literatürdeki teorik çalışmalar göz önünde bulundurularak, DİM prensibi temelinde eğilme ve burkulma titreşimini kullanarak hareket eden mekanizmanın sinyal jeneratöründen gelen testere dişi sinyalin sağa veya sola eğik olduğu duruma göre her iki yöne hareket etme kabiliyeti olacağı düşünülmüş ve tasarım ilk etapta bu durum göz önünde bulundurularak yapılmıştı. Fakat yapılan testlerde testere dişi sinyalin sağa veya sola eğik olma durumu PZT test numunesinin her iki yöne hareketini sağlamadı. Her durumda PZT test numunesi aynı yöne hareket

ediyordu. Bu tek yön hareket kanat çırpma mekanizmasının tasarımını tamamen değiştirilmesine sebep olmuştur. Halbuki boyuna titreşimleri kullanan deney numuneleri her iki yöne hareket edebilmekteydi, bununla beraber eğilme ve burkulma titreşimlerinin oluşturduğu itme kuvveti ve hız dramatik şekilde daha yüksekti.



Şekil 3.31. PZT itki mekanizmasını oluşturan parçaların montajlı hali.

Bu tek yönlü hareket, tasarlanacak kanat çırpma mekanizmasında, test numunesinin sürekli bir yüzeye ihtiyacı olması ya da Şekil 3.32.'de olduğu gibi belli bir mesafede biri bir yöne diğeri diğer yöne hareketi sağlayan iki adet PZT test numunesinden oluşan itki mekanizmasının kullanılma gerekliliği anlamına gelmiştir.



Şekil 3.32. Çift zıt yöne hareket sağlayan PZT itici test numunesi

Kanat çırpma düzeneği için tasarlanan test numunesi Şekil.3.31.'de ifade edildiği gibi iki adet çift seri bağlı PZT kristal ve bir adet neodim mıknatıstan oluşmaktadır. Burada bir yöne ve aksi yöne doğru hareketi sağlamak için elektrik alan sırasıyla her iki çift seri bağlı PZT test numunesine uygulanmaktadır. Çift seri bağlı PZT test numunelerinden birine elektrik alan uygulandığında diğerinde herhangi bir elektriksel yük olmadığından etkisiz kalmaktadır. Dolayısıyla elektrik alan uygulanan çift seri bağlı test numunesi, kanat çırpma test düzeneğinin bir yana hareket etmesini sağlamaktadır. Ardından mevcut elektrik yüklü çift seri bağlı test numunesindeki yük kesilmekte ve diğerine uygulanarak aksi yöne hareket sağlanmaktadır. Bu döngü Şekil 3.33.'deki zaman rölesi ile sağlanmıştır. Zaman rölesinin frekansına bağlı olarak (kullanılan zaman rölesi 20 Hz. kapasitesindedir) PZT itici test numunesi sağa-sola hareketinin frekansı ayarlanabilmektedir.

Bu çalışma kapsamında yapılan deneysel çalışmalar Youtube adlı sosyal paylaşım platformunda yayınlanmıştır. Bu kapsamda Kaya U. (2024) tarafından yayınlanan kanat çırpma için üretilen PZT itici test numunesinin deneysel videosu aşağıdaki web sitesinden izlenebilir.

https://www.youtube.com/shorts/fJbdYI9fSME



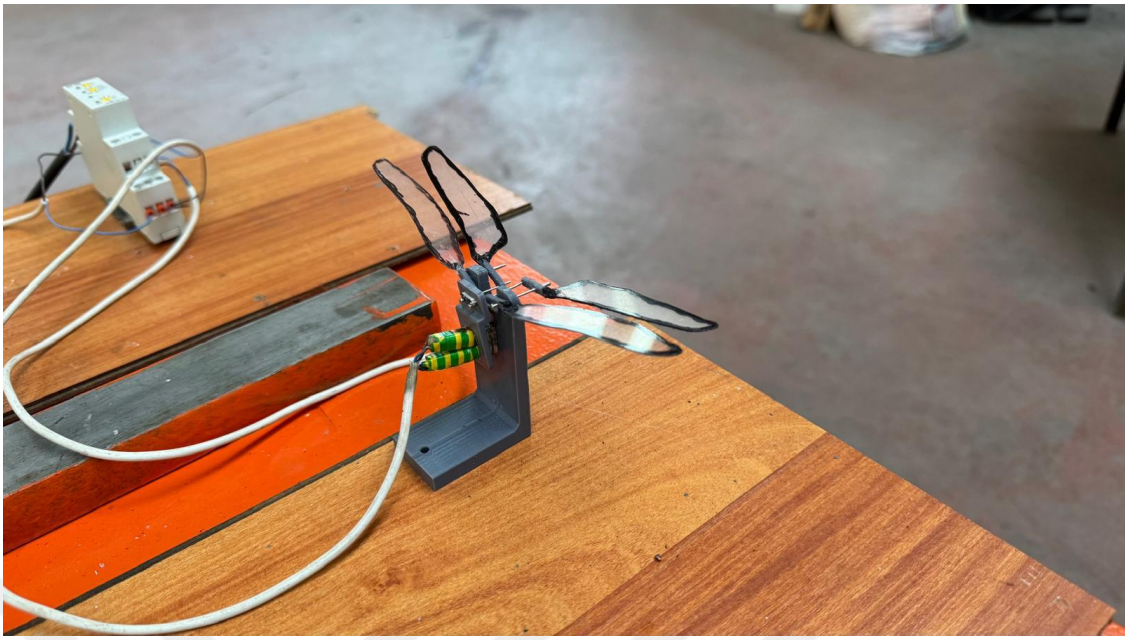
Şekil 3.33. Zaman rölesi (20 Hz. kapasiteli).

Çizelge 3.6. Zaman Rölesi Teknik Özellikleri

MCB-20-2C ZAMAN RÖLESİ TEKNİK ÖZELLİKLERİ	
Zaman Aralığı	0,1 sn. – 100 saat
Zaman Fonksiyon Sayısı	7
İşletme Gerilimi	12-240 VAC/DC
İşletme Frekansı	50/60 Hz.
Kontak Çıkışı	2 CO, 8 A, 2000 VA ($\cos\varphi = 1$)
Çalışma Sıcaklığı	-5 °C / +50 °C

Doğada bulunan bir yusufçuğun bir kanat ucundan diğer kanat ucuna olan uzunluğu türüne göre değişiklik göstermektedir. Genel olarak çoğu yusufçuk türlerinin bir kanat ucundan diğer kanat ucuna uzunluğu 5-5,5 cm aralığındadır ve kanat çırpma frekansları 30 Hz'e kadar çıkmaktadır. Bir ÇKMHA'nın 15 cm'den küçük olması gerçeği göz önünde bulundurularak üretilen kanat çırpma mekanizmasında yusufçuk kanatları 2,5 kat ölçeklendirilmiştir.

Kanatların tahriki için geliştirilen PZT itici test numunesinin tasarımı ve deneylerle doğrulanmasının ardından daha önce tasarımı yapılan ÇKMHA kanat çırpma test düzeneğinin üretim çalışmalarına geçilmiştir. Öncelikle Şekil 3.28. ve Şekil 3.29.'da tasarımı görülen eşzamanlı kanat çırpma test düzeneğinin Şekil 3.34.'deki gibi üretimi yapılmıştır.



Şekil 3.34. Eşzamanlı vuruş tarzı kanat çırpma test düzeneği

Eşzamanlı kanat çırpma test düzeneğini oluşturan parçaların malzemeleri ve üretim metotları şu şekildedir:

Kanatlar: Poliüretan filmden yusufçuk ön ve arka kanatları ölçeklendirilerek kesilmiştir. Poliüretanın; esnek yapısı, toksik olmaması, kolay yapıştırılabilir olması gibi iyi özellikleri kanat malzemesi olarak kullanmamıza neden olmuştur.

Ana Gövde: Polilaktik asitten yapılmış filamentten üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Kanatların yataklanması için ana gövde üzerine 0.5 mm iç çapında metal kovanlar yerleştirilmiştir. Ön ve arka kanatların yataklanması ve birleştirilmesi 0.5 mm çapında metal çubuklar ile sağlanmıştır.

PZT kristaller ve neodim mıknatısın birleştirilmesi silikon bazlı reçine yapıştırıcı ile yapılarak test düzeneğine montajı yapılmıştır.

Deneyler için eşzamanlı test düzeneği, deney düzeneğine bağlantısı yapılmıştır. Deney düzeneği; sinyal jeneratörü, güç kaynağı, yükseltici, trafo, zaman rölesi ve bağlantısı yapılan test düzeneğinden oluşmaktadır. Sinyal jeneratörü, güç kaynağı ve trafo PZT kristallerin tahriki için gerekli olan sinyali hazırlayarak zaman rölesine transfer eder. Zaman rölesi ile istenen kanat çırpma frekans ayarı yapılarak yukarı ve aşağı kanat hareketini sağlayan PZT test numunelerine sırasıyla sinyal gönderilir.

Eşzamanlı kanat çırpma deney düzeneği ile çeşitli frekanslarda deneyler yapılmıştır. Kanat çırpma frekans ve kanat ucu genlik ayarı zaman rölesi ile yapılmıştır. 5-20 Hz. arası frekans ve 0-41° arası genlik için birçok deney yapılmıştır. Kayıt altına alınan deneyler aşağıdaki web sitelerinden izlenebilir.

15 Hz. frekans ve 22° genlik (Kaya U. (2024a)):

https://www.youtube.com/watch?v=oAzjg5oECLY

Düşük frekans ve yüksek genlik (Kaya U. (2024b)):

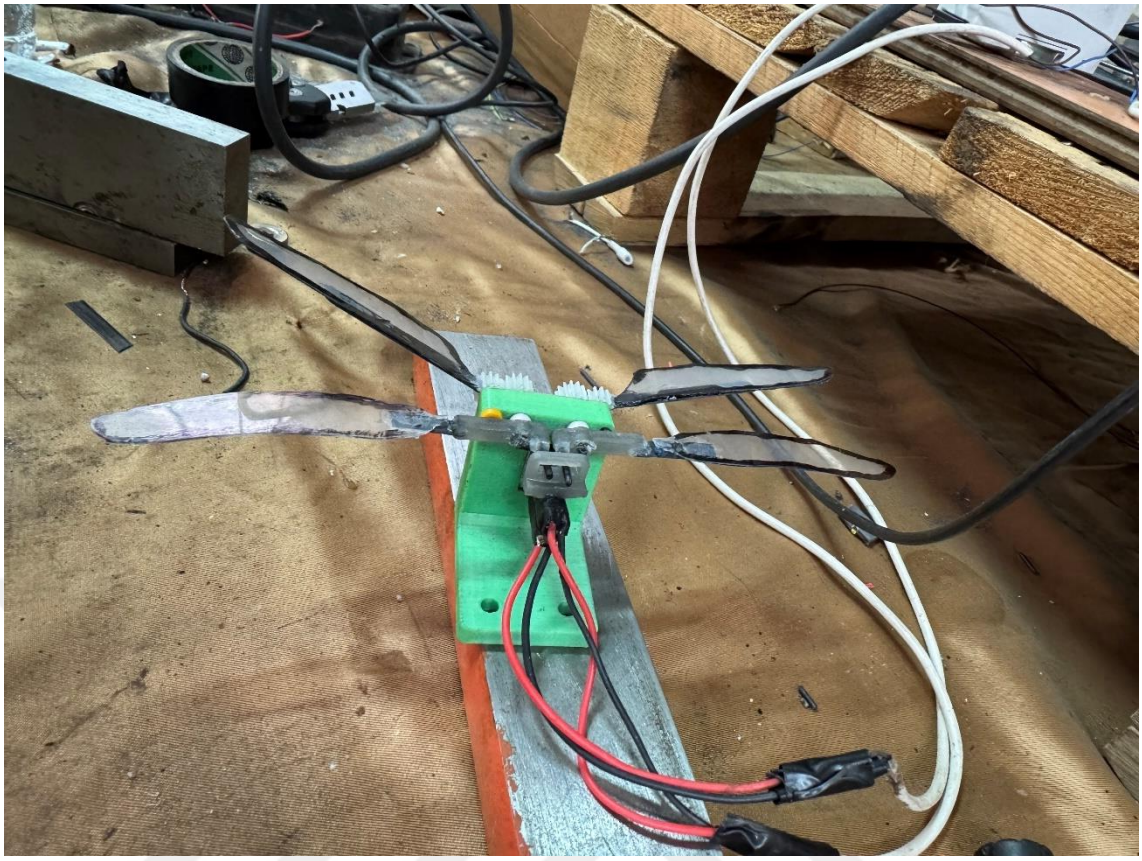
https://www.youtube.com/watch?v=85doccLDJ8I

https://www.youtube.com/watch?v=DD4-zpciSuI (Kaya U. (2024c))

Şekil 3.26. ve Şekil 3.27.'de tasarımı görülen karşıt vuruş tarzı için yapılan kanat çırpma test düzeneğinin üretilmiş hali Şekil.3.35. ve Şekil.3.36.'ten incelenebilir. Burada kanatların karşıt vuruşunu veya ön ve arka kanatların zıt yönde çırpmalarını sağlamak için ön kanatların hareketi dişliler ile arka kanatlara aktarılmıştır.



Şekil 3.35. Eşzamanlı vuruş tarzı kanat çırpma deney düzeneği



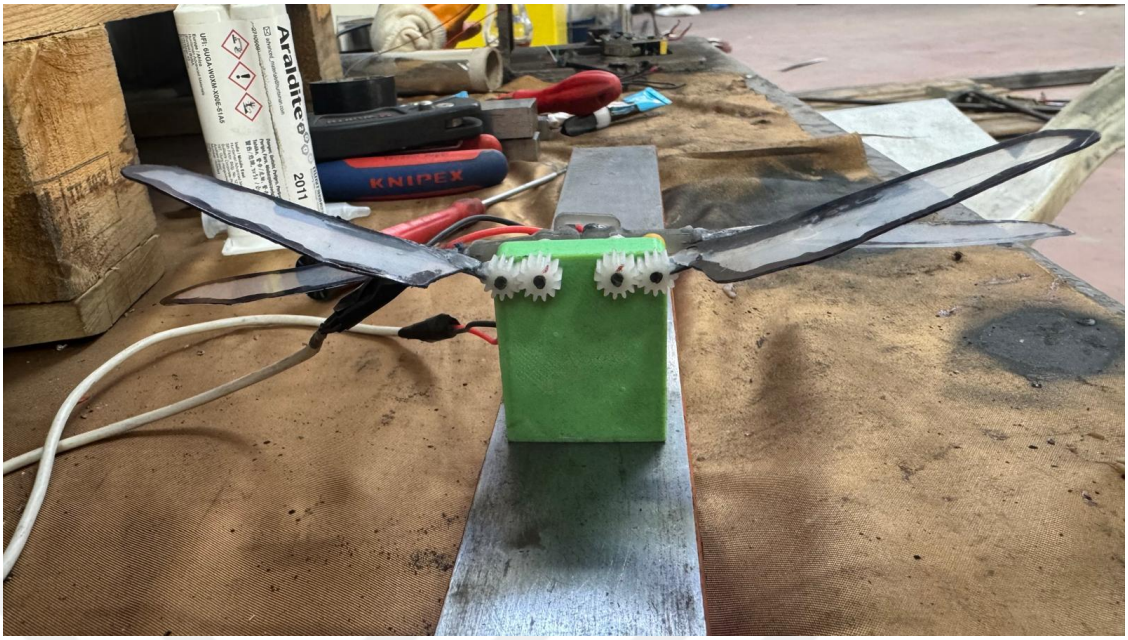
Şekil 3.36. Karşıt vuruş tarzı kanat çırpma test düzeneği önden görünüşü

Karşıt vuruş tarzı kanat çırpma test düzeneğindeki parçaların malzemeleri ve üretim şekilleri şu şekildedir:

Naylon plastik dişliler: Hazır olarak satın alınmıştır, ön kanatların hareketini arka kanatlara transfer etmek için kullanılmıştır.

Ana Gövde: Polilaktik asitten yapılmış filamentten üç boyutlu yazıcı ile üretilmiştir. Yataklama ve ön kanatla arka kanatların birleşimi karbon fiber çubuklar ile yapılmıştır.

Kullanılan diğer parçalar, eşzamanlı vuruş tarzı kanat çırpma test düzeneği ile aynıdır.



Şekil 3.37. Karşıt vuruş tarzı kanat çırpma test düzeneği arkadan görünüşü

Şekil 3.38.'de görülen karşıt vuruş tarzı kanat çırpma deney düzeneği ile çeşitli frekanslarda deneyler yapılmıştır. Kanat çırpma frekans ve kanat ucu genlik ayarı zaman rölesi ile yapılmıştır. 5-20 Hz. arası frekans ve 180° faz farkı dahil birçok deney yapılmıştır. Kayıt altına alınan deneyler aşağıdaki web adreslerinde yayınlanmıştır.

Karşıt vuruş tarzı ve 20 Hz. 'de kanat çırpma (Kaya U. (2024d)),

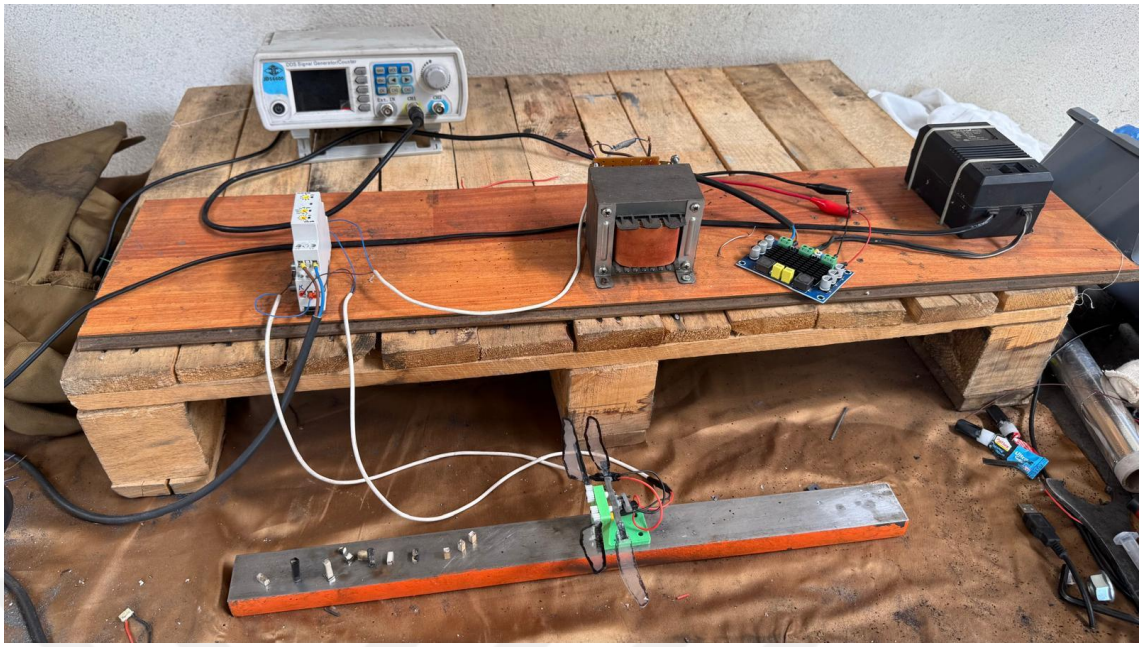
https://www.youtube.com/watch?v=eqUUhjlc3cI

Karşıt vuruş tarzı ve ani rüzgâr vb. durumunda havada asılı kalma için kanat çırpma (Kaya U. (2024e)),

https://www.youtube.com/watch?v=YDYAUkWWJ_g

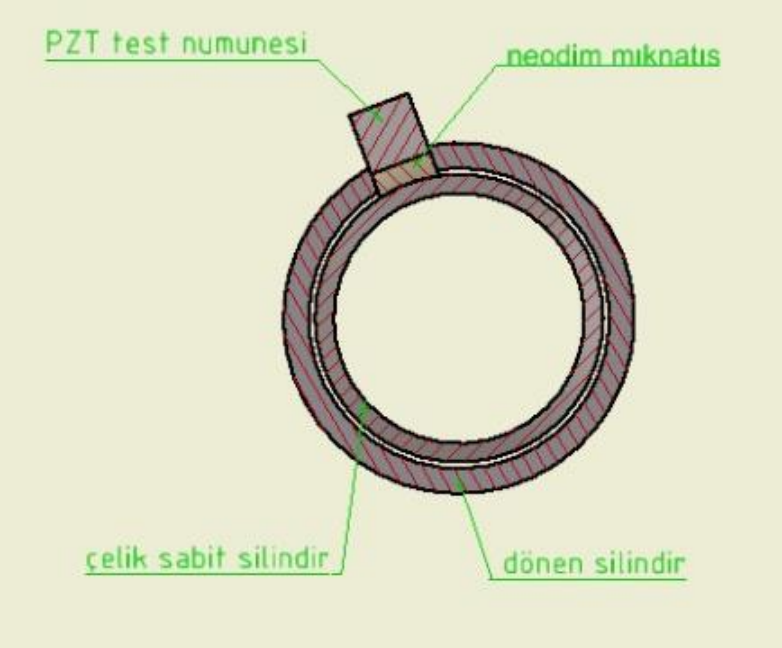
Karşıt vuruş tarzı düşük frekans yüksek genlik kanat çırpma (Kaya U. (2024f)),

https://www.youtube.com/watch?v=WJ232MoTYRo



Şekil 3.38. Karşıt vuruş tarzı kanat çırpma deney düzeneği

Yapılan bir diğer tasarımda ise Şekil 3.39.'daki gibi çift seri bağlı test numunesi, sürekli bir yüzey olan metal bir silindirin dış yüzeyine konumlandırılmış ve sürekli aynı yöne hareketi olacak şekilde düşünülmüştür. Dıştaki silindir ise hafif bir malzemeden imal edilip sabit çelik silindirin etrafında rahatça dönebilmektedir. Hafif silindir PZT test numunesine tutturulmuş, dolayısıyla PZT test numunesi çelik silindirin etrafında döndükçe hafif silindirde dönmektedir.



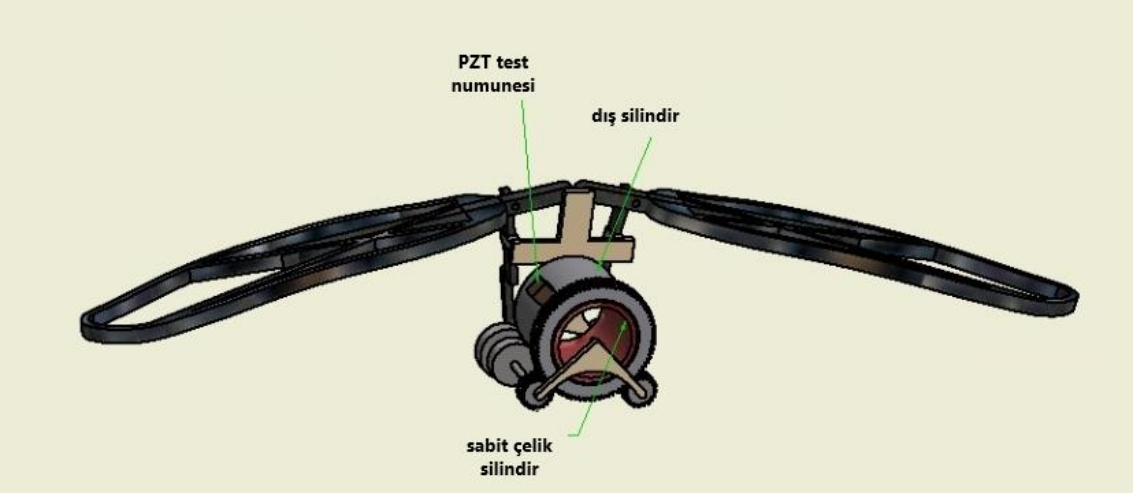
Şekil 3.39. Döngüsel kanat çırpma mekanizması itki mekanizması kavramsal çizimi

Bu tasarım ilk etapta kanat montajı yapılmadan üretilerek test edilmiştir. Yapılan testler aşağıdaki web adreslerinde yayınlanmıştır.

https://www.youtube.com/watch?v=CPLcvsxR7eE (Kaya U. (2024g)).

https://www.youtube.com/watch?v=gde41mfZa5o (Kaya U. (2024h)).

Bu döngüsel hareketi kanatlara iletebilmek için hafif silindirin bir başına düz dişli tutturulmuştur. Kanatları çırpmak için, hafif silindir üzerindeki dişlinin hareketi diğer bir dişliye aktarılmakta ve bu ikinci dişli üzerindeki krank kolu mekanizması ile kanatların çırpması sağlanması hedeflenmiştir. Bu döngüsel hareketi kanatlara transfer eden mekanizmanın kavramsal tasarımı Şekil 3.40.'tan incelenebilir.



Şekil 3.40. Döngüsel kanat çırpma mekanizması 3b kavramsal tasarımı



Şekil 3.41. Döngüsel kanat çırpma mekanizması 3b kritik tasarımı önden görünüşü

Kanat çırpma mekanizmasında, kanat çırpma frekansına göre dişlilerin boyutları seçilebilmektedir. Ayrıca kanadın amplitüdünü istenilen açıda ayarlayabilmek için krank kolu mekanizmasında, kolun uzunluğu istenilen ölçülerde tasarlanabilir. Çift seri bağı test numunesinin doğrusal hızı 20 mm/s idi. Dolayısıyla test numunesinin çelik silindir etrafındaki döngüsel hızı, çelik silindirin yarı çapı ile test numunesinin doğrusal hızı çarpıldığında elde edilebilir. Elde edilen döngüsel hız verisi kullanılarak kanat çırpma

frekansı hesaplanabilir. Şekil 3.41.'da kanat çırpma mekanizması kritik tasarımının önden görünüşü, Şekil 3.42.'de ise arkadan görünüşünün resimleri vardır.



Şekil 3.42. Döngüsel kanat çırpma mekanizması 3b kritik tasarımı arkadan görünüşü



Şekil 3.43. 3b Yazıcıda üretilen kanatlar (yusufçuk ön kanatları)

Şekil 3.44. ve Şekil 3.45.'te üretilen döngüsel kanat çırpma mekanizması görülmektedir. Bir kanat ucundan diğer kanat ucuna olan mesafe yaklaşık 14 cm'dir. Üretilen döngüsel kanat çırpma mekanizmasında kanat çırpma frekansı şu şekilde hesaplanabilir:

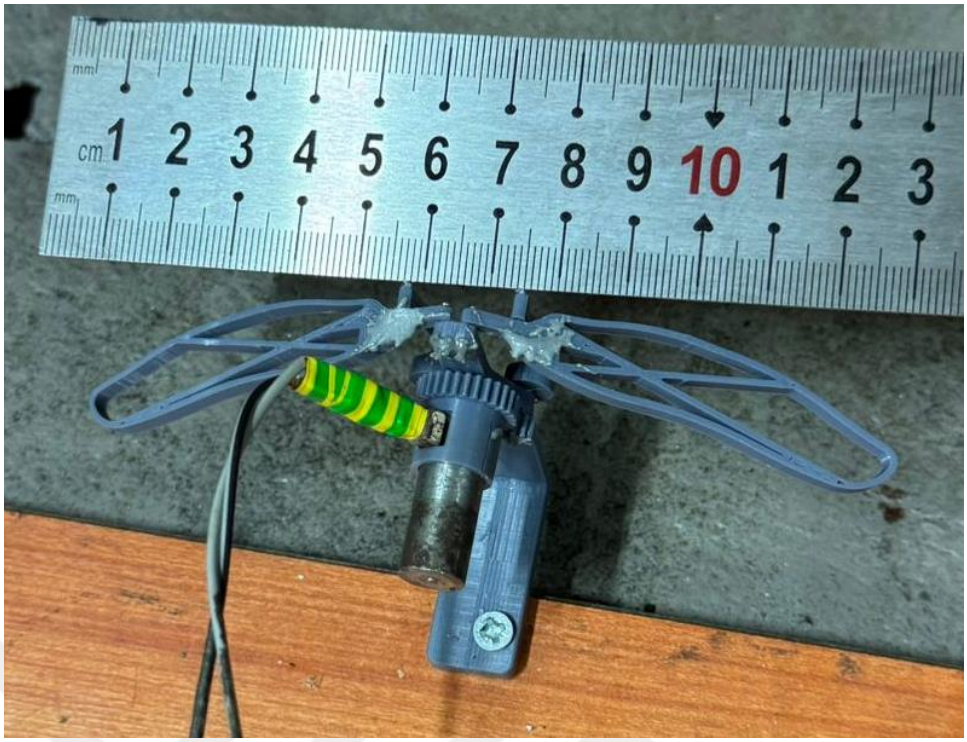
D_d (Tahrik dişlisi bölüm dairesi çapı) =16 mm,
V_d (Tahrik dişlisi hızı) =V_{pzt},
ω_d (Tahrik dişlisi döngüsel hızı)
D_p (Küçük dişli bölüm dairesi çapı) =2 mm,
V_p (Küçük dişli hızı)
ω_d (Küçük dişli döngüsel hızı)
V_{pzt} (PZT numunenin hızı) =20 mm/s.
ω_c (Krank döngüsel hızı) = ω_d
f_{kanat} (Kanat çırpma frekansı)
$\omega_d = V_{pzt} \div \left(\frac{D_d}{2}\right)$

$$\omega_d = (20\ \text{mm/s}) \div \left(\frac{16\ \text{mm}}{2}\right) = 2.5\frac{\text{rad}}{\text{s}} = \left(\frac{60}{2\pi}\right) \times 2.5\frac{\text{rad}}{\text{s}} = 23.9\ \text{rpm} \quad (3.1)$$

$$\omega_p = \left(\frac{D_d}{D_p}\right) \times \omega_d = 8 \times 23.9 = 191\ rpm \quad (3.2)$$

Küçük dişlinin bir tam durunda kanat iki defa çırpılmaktadır

$$f_{kanat} = \frac{2 \times 191}{60} = 6.4\ Hz$$



Şekil 3.44. Döngüsel kanat çırpma mekanizması komplesi önden görünüşü

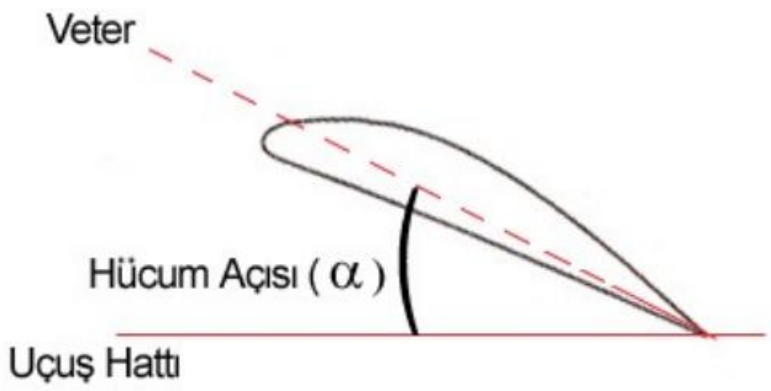


Şekil 3.45. Döngüsel kanat çırpma mekanizması komplesi arkadan görünüşü

Döngüsel kanat çırpma mekanizması testlerinde istenilen başarı elde edilememiştir. Bunun nedenleri;

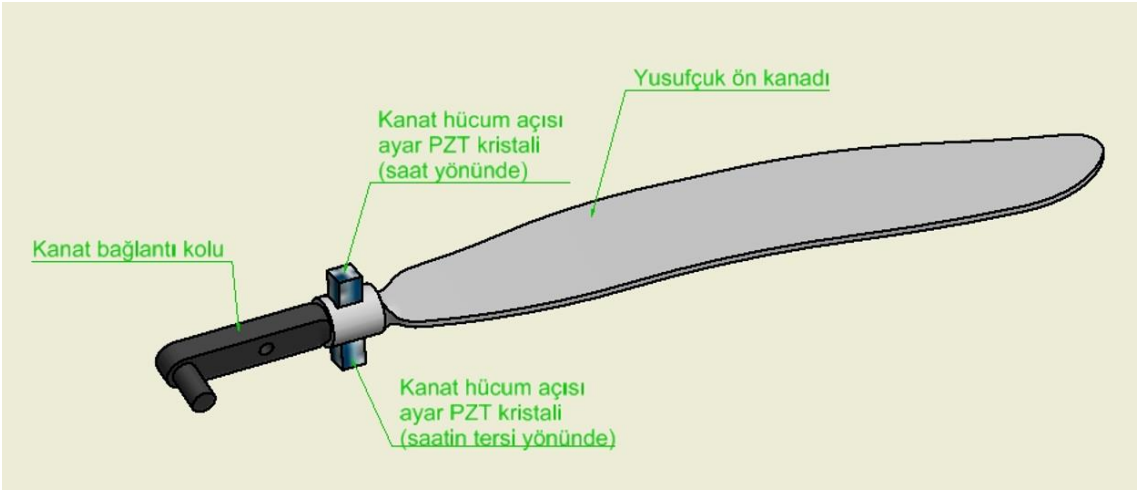
a) PZT kristaller sürekli silindirin etrafında döndükleri için, PZT malzemelere bağlı kablolarda silindir etrafında sürekli dönmekte ve bu sürekli dönüş kristallere ekstra yük yüklemekte ve kabloların dolanmasına neden olmuştur.
b) Aktarım organlarının çokluğu sürtünme katsayısını arttırmış ve mevcut üretim teknikleri ile yataklamalar hassas işlenememiştir.

Bununla birlikte sürekli döngüsel hareket kanat çırpma eyleyicisi olarak verimsiz olsa da belli açı aralığındaki dönüş, test videolarında görülebileceği gibi oldukça başarılıdır. Dolayısıyla bu döngüsel hareket kanatların hücum açısını belli aralıkta ayarlamak için kullanılabilir.



Şekil 3.46. Kanat hücum açısı temsili resmi

Şekil.3.46.'da kanat hücum açısı şekli temsili olarak görülmektedir. Kanat aşağı doğru çırpılırken yeterli kaldırma kuvvetinin oluşması için hücum açısı düşük olmalıdır. Yukarı doğru çırpılırken ise hem itki üretmek hem de üretilen kaldırma kuvvetini kaybetmemek için kanat hücum açısı yüksek olmalıdır. Döngüsel hareket itki mekanizması, tam zamanlı olarak kanat hücum açılarını kontrol ederek, uçuşun verimini yükseltecektir. Dolayısıyla döngüsel hareket itki mekanizması, Şekil 3.47.'de görüldüğü gibi ÇKMHA'larında kanat hücum açısı kontrolü için aktüatör olarak kullanılması verimli olacaktır.



Şekil 3.47. Kanat hücum açısı ayarı için mekanizma çizimi

BÖLÜM 4

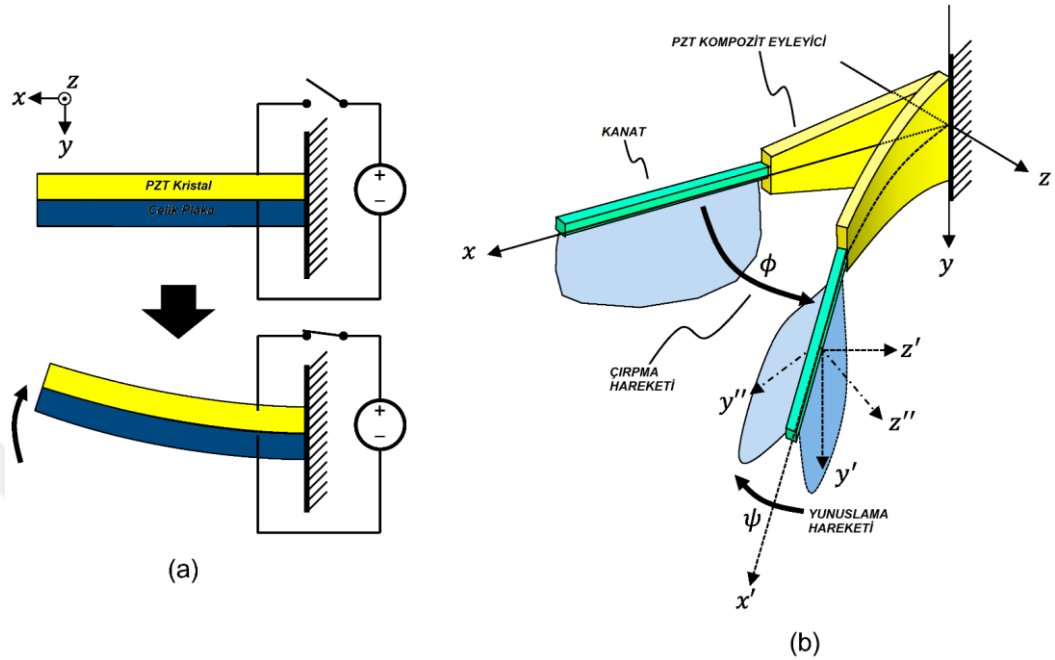
SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Yapılan bu çalışmanın hedefi, tezin adında da ifade edildiği gibi "PZT tahrikli esnek ve çırpan kanatlı MHA tasarımı ve deneysel incelenmesi" idi. Geliştirilmesi hedeflenen ÇKMHA'nda kanat ve itki sistemi olarak doğadaki en karmaşık uçuş tarzlarına sahip olan yusufçuk, biyobenzetim yoluyla örnek alınmıştır. Dolayısıyla, kanatların çırpılmasını sağlayacak PZT eyleyici geliştirilmesi, yusufçuk uçuş tarzlarına göre kanat çırpma mekanizmalarının geliştirilmesi ve deneylerle doğrulanması çalışmaları yapılmıştır. Bu deneylerden elde edilen çıktılar ile biyobenzetim yoluyla yusufçuktan örnek alınan ÇKMHA son tasarım şeklini almıştır.

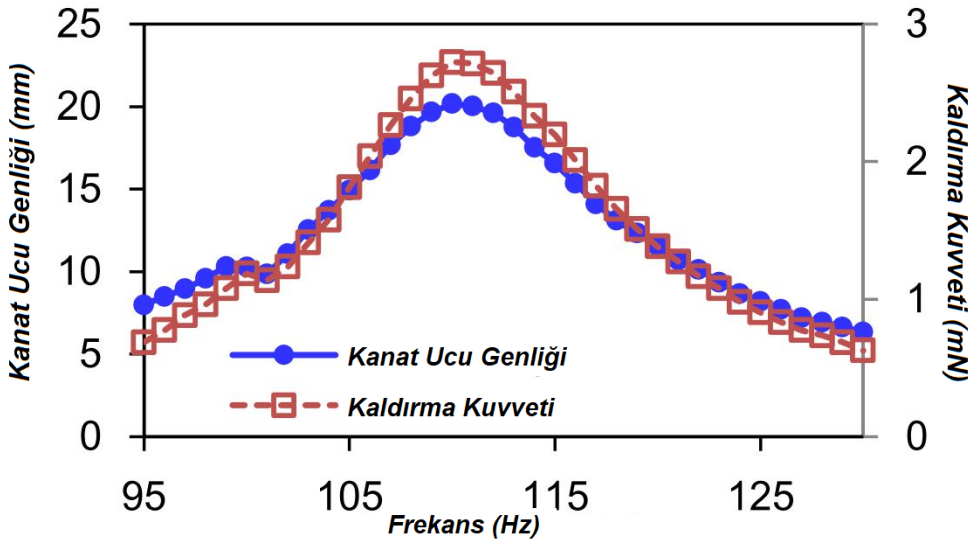
İlk etapta, çalışmalar, kanatların tahrikini ve tam zamanlı hücum açısı ayarını sağlayacak PZT eyleyicinin geliştirilmesine odaklanmıştır. Bu kapsamda literatürdeki tüm PZT eyleyici tiplerinin performansları, çalışma şartları ve uygulanabilirliği incelenmiş ve en uygun olan seçilmiştir. Bu PZT eyleyici tipleri; doğrudan PZT kristal tahrikli sistemler, tırtıl modeli temelli PZT eyleyiciler ve DİM prensibi temelinde çalışan PZT eyleyicilerdi.

Doğrudan PZT kristal tahrikli eyleyicilerin mikrometre seviyesindeki deplasmanları, genlik ve hız kontrolündeki belirsizlikler nedeniyle tercih edilmemiştir. Örneğin, Ozaki T., Hamaguchi H. (2018) yaptıkları doğrudan PZT tahrikli çalışmada Şekil.4.1.'deki tasarımı ve kanatlardan birinin üretimini yaparak testler yapmışlardır. Yaptıkları deneyler sonucunda Şekil.4.2.'deki grafikteki kanat ucu genliği ve kanat çırpma frekanslarını elde etmişlerdir. Bu grafikte en yüksek kanat ucu genliği olarak 15 mm'ye, 112 Hz. kanat çırpma frekansında ulaşılmıştır. Bir yusufçuğun kanat çırpma frekansının 0-30 Hz.

arasında olması ve 45 mm'ye kadar kanat ucu genliği olması gerçeği nedeniyle doğrudan tahrikli PZT eyleyiciler tercih edilmemiştir.

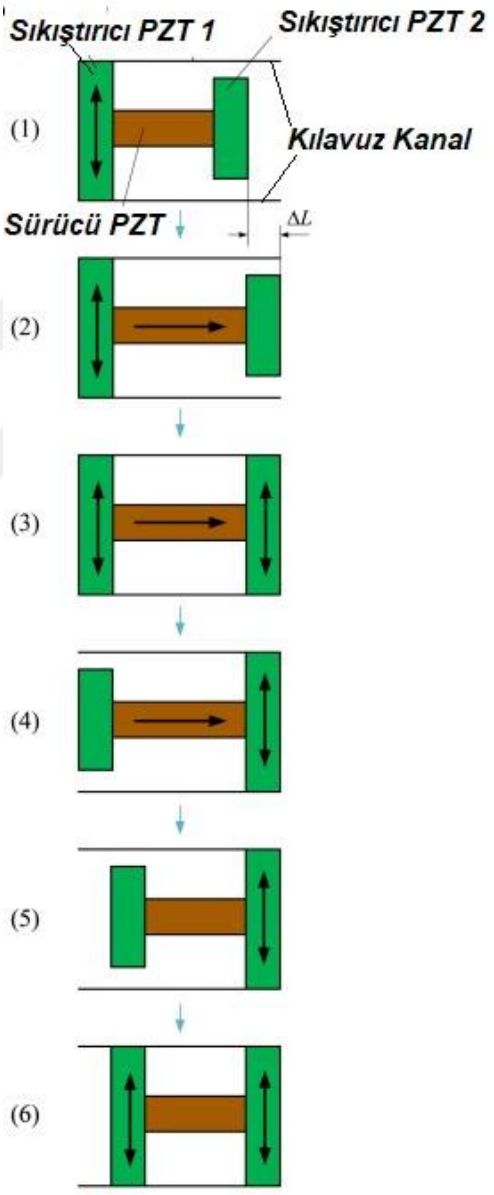


Şekil 4.1. Doğrudan PZT eyleyici tahrikli MHA kanadı (Ozaki T., Hamaguchi H. (2018))



Şekil 4.2. Doğrudan PZT eyleyici tahrikli MHA kanadı deneysel verileri (Ozaki T., Hamaguchi H. (2018)).

Tırtıl tipi PZT eyleyiciler ise Şekil 4.3.'te gösterildiği gibi mikrometre seviyesinde hassas işlenmiş kılavuz kanal içinde hareket etmekte ve birleştirilmiş fakat elektriksel olarak izole edilmiş en az üç adet PZT kristal çubuktan oluşmaktadır. Bu kristallere sırasıyla elektriksel alan uygulanarak kılavuz kanal içerisinde hareket etmeleri sağlanmaktadır. Termal genleşmenin yol açacağı en ufak uzamanın eyleyiciyi çalışmaz kılacağı ve tırtıl tipi eyleyicilerin hantal yapıları nedeniyle tercih edilmemişlerdir.



Şekil 4.3. Tırtıl tipi PZT eyleyici hareket prensibi (Ling J. Chen L. Feng Z. Zhu Y. (2021))

Sonuç olarak sürekli doğrusal hareket edebilirliği, görece yüksek hızı, itme gücü ve kontrolünün kolaylığı nedeniyle Higuchi T., Yamagata Y., Furutani K., Kudoh K. (1990) tarafından keşfedilen DİM prensibi temelinde hareket eden PZT eyleyiciler kanat tahriki olarak kullanılmasına karar verilmiştir. Bu kapsamda literatürdeki çalışmalar incelenerek, Bölüm-3'te ayrıntılı bir şekilde ifade edilen deney düzenekleri kurularak DİM prensibi temelinde PZT kristaller test edilerek kanat çırpma eyleyicinin deneysel geliştirilmesi çalışmaları yapılmıştır. Literatürde yapılan çalışmaların hepsi PZT kristallerin boyuna uzamalarını kullanarak DİM prensibi temelinde sürekli harekete çevrilmesi şeklindeydi. Bu çalışma kapsamında hem PZT kristallerin boyuna titreşimlerinin hem de eğilme ve burkulma titreşimlerinin DİM prensibi temelinde doğrusal hareketi deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca PZT kristallerin seri olarak bağlandığında aynı boydaki tek bir kristale nazaran daha yüksek itme kuvveti oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmalardan enine ve burkulma titreşimlerini kullanarak hareket eden DİM prensibiyle hareket eden seri bağlı PZT kristallerle yapılan deneyler makale haline getirilerek bir dergide yayınlanmıştır (Kuşçu H., Kaya U. (2024)). Çizelge 3.2.'de de verileri bulunan en verimli hız ve itme kuvveti elde edilen seri bağlı çift PZT numunesi kanatların tahriki için uygun bulunmuştur. Yapılan deneylerden bazıları video paylaşım platformunda paylaşılmıştır.

Boyuna titreşimleri kullanan çift seri bağlı PZT test numunesi:

https://www.youtube.com/watch?v=w8lW6KtaqzU (Kaya U. (2024i)).

https://www.youtube.com/watch?v=-_pU_4Aphcs (Kaya U. (2024j)).

Eğilme ve burkulma titreşimlerini kullanan çift seri bağlı PZT test numunesi:

https://www.youtube.com/watch?v=rpUgZ0j3exM (Kaya U. (2024k)).

https://www.youtube.com/shorts/fJbdYI9fSME (Kaya U. (2024)).

Döngüsel hareket test videoları:

https://www.youtube.com/watch?v=1d84YtpqUzo (Kaya U. (2024l)).

https://www.youtube.com/watch?v=Z08pK-aO4ZM (Kaya U. (2024m)).

Son iki videodaki döngüsel eyleyicinin, son aşamada kritik tasarımı yapılan ÇKMHA'nın tam zamanlı kanat hücum açısı ayarı için kullanılması kararlaştırılmıştır.

Kanat tahriki için PZT eyleyici geliştirilmesi tamamlandıktan sonra kanat çırpma mekanizmaları tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Yusufçukların birçok uçuş tarzları vardır ve bunları gerçekleştirmek için ön ve arka çift kanatlarını eşzamanlı, karşıt ve 0-180° arası faz farkı gibi değişik şekillerde çırparlar. Ayrıca her kanadın hücum açısı bir çırpma esnasında sürekli değişmektedir. Dolayısıyla yusufçuğun değişik uçuş tarzlarını test etmek için Bölüm-3'te ayrıntılı bir şekilde anlatıldığı gibi iki farklı kanat çırpma mekanizması üretilmiştir. Bu kanat çırpma düzenekleri 0° hücum açısı ile kanatlarını çırpmışlardır. Bu deneysel sonuçlar nihai ÇKMHA tasarımında kullanılmıştır.

Öncelikle Şekil 4.3.'te görülen ön ve arka çift kanatların 0° hücum açısı ile eşzamanlı çırpması için kurulan deney düzeneği değişik frekans ve kanat ucu genliklerinde test edilmiş ve davranışları gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4. Eşzamanlı çırpma deney düzeneği

Eşzamanlı çırpma için testlerin bazıları kayıt altına alınarak video paylaşım sitesinde aşağıdaki bağlantılarda paylaşılmıştır:

https://www.youtube.com/watch?v=DD4-zpciSuI (Kaya U. (2024b)).

https://www.youtube.com/watch?v=85doccLDJ8I (Kaya U. (2024c)).

Üretilen diğer kanat çırpma test düzeneği ise Şekil.3.34.'te görülen karşıt vuruş tarzı kanat çırpılmasını sağlayan deney düzeneği idi. Karşıt vuruş tarzında ön ve arka

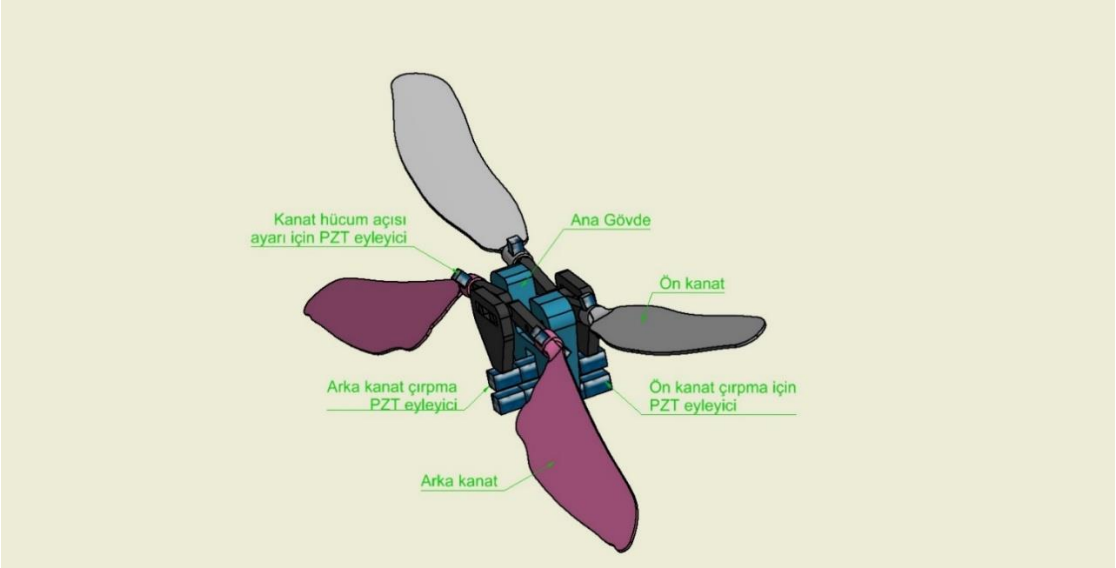
kanatlar arasında 180° faz farkı vardır. Yapılan deneylerden başarılı sonuçlar alınmış ve tasarımı yapılan ÇKMHA'nda kullanılmıştır. Karşıt vuruş tarzı için yapılan deneysel çalışmalardan bazıları aşağıdaki bağlantılardan izlenebilir.

https://www.youtube.com/watch?v=WJ232MoTYRo (Düşük frekans, yüksek genlik (Kaya U. (2024f))),

https://www.youtube.com/watch?v=eqUUhjlc3cI (Yüksek frekans, orta genlik (Kaya U. (2024d))),

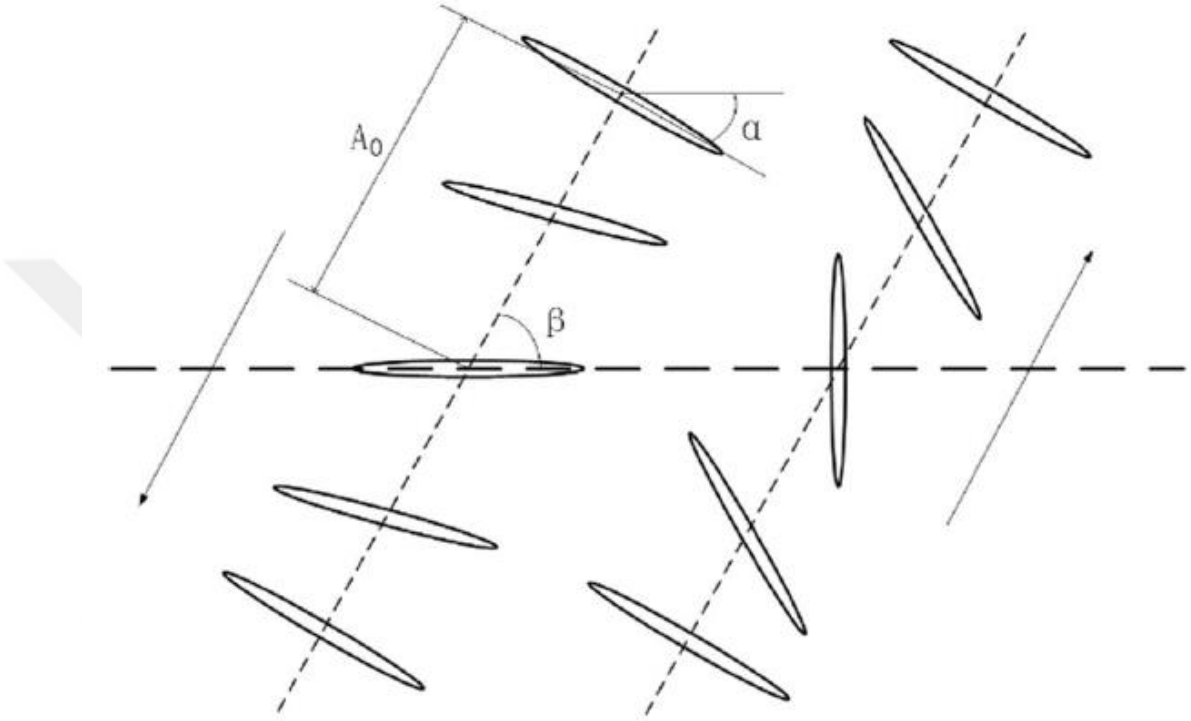
https://www.youtube.com/watch?v=YDYAUkWWJ_g (Havada aslı kalma durumu (Kaya U. (2024e))).

Yusufçuklar; aşağı, yukarı, ileri, geri, sağa ve sola doğru uçma yeteneğine sahip uçuculardır. Bir uçuş şeklinden diğer uçuş şekline hızlıca geçebilir veya havada asılı kalabilirler. Bunu yapabilmek için ön ve arka kanat çiftlerini 0-180° arası herhangi bir faz farkı ile çırpabilmekte veya fazlar arası geçiş yapabilmekte ve her bir kanadı farklı hücum açısına tam zamanlı ayarlayabilmektedir. Şekil 4.5.'te görülen ÇKMHA'nın kritik tasarımında bu yeteneklere sahip olması için ön ve arka çift kanatlar ayrı PZT kristaller ile modellenmiş birbirinden bağımsız şekilde çırpmaları sağlanmıştır.



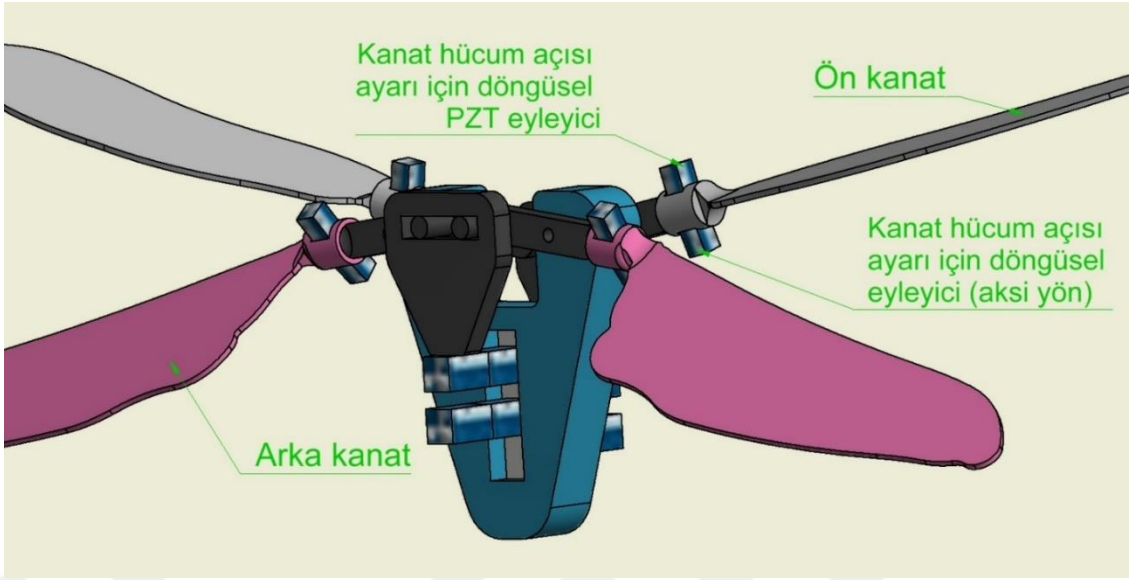
Şekil 4.5. ÇKMHA kritik tasarımı

Şekil 4.6.'da bir yusufçuğun kalkış esnasında ön kanatlarının bir çırpmada ön kanat hücum açısının değişkenliğini göstermektedir. Sağdaki resim aşağı doğru, sol taraf ise yukarı doğru çırpmadaki hücum açısı değişimini temsil etmektedir.



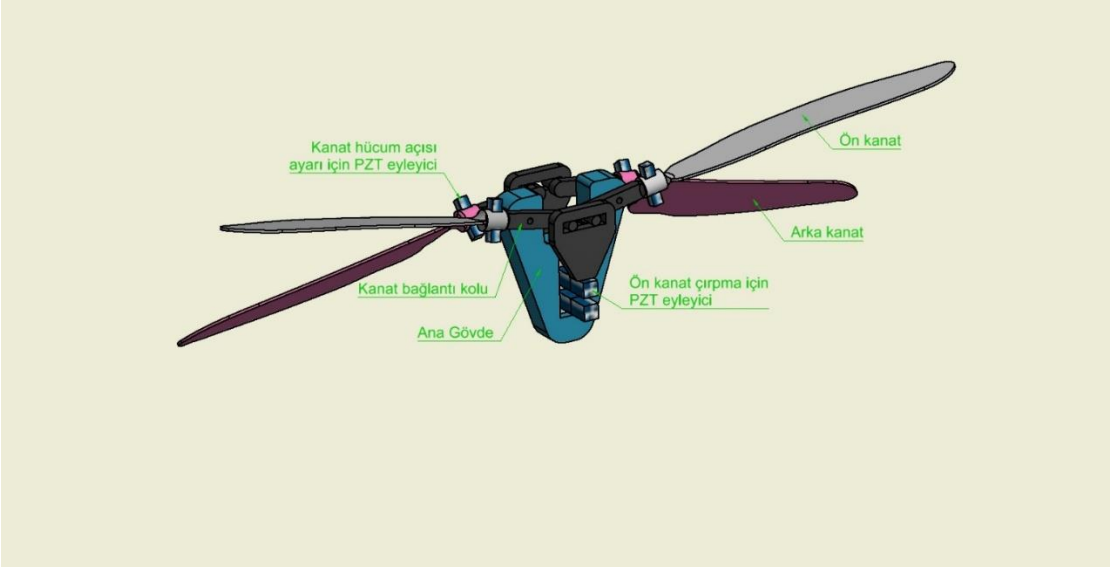
Şekil 4.6. Yusufçuğun kalkış esnasında, ön kanadının bir çırpmadaki hücum açısı değişimi (Qiushi Li, Mengzong Zheng, Tianyu Pan, Guanting Su).

Yusufçuklar özellikle sağa veya sola manevra yaptığı esnada tüm kanatların hücum açısı farklıdır. Kritik tasarımı yapılan ÇKMHA'nında aynı özelliklere sahip olabilmesi için Şekil 4.7.'deki gibi, tüm kanatlara, kanat hücum açısı ayarını sağlayan PZT eyleyiciler eklenmiştir.

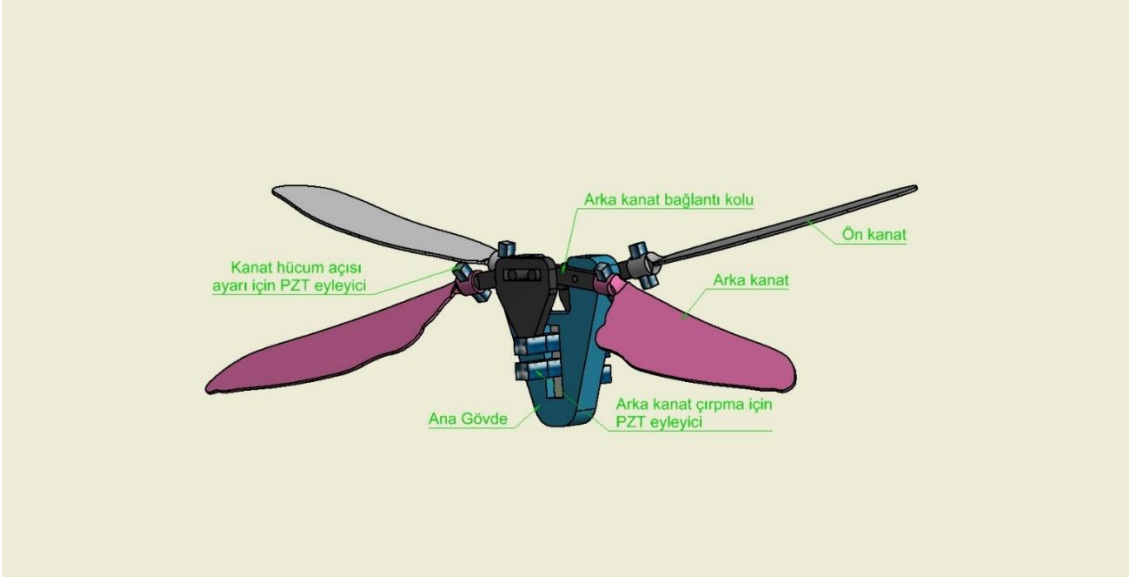


Şekil 4.7. Kanat hücum açısı ayarı PZT eyleyicileri

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak yapılan ÇKMHA kritik tasarımı Şekil 4.8. ve Şekil 4.9.'dan incelenebilir. Bu tasarımın üretilmesi halinde, gerçek bir ÇKMHA gibi uçabilmesi için her bir kanadın hücum açısını ve ön ve arka kanatların bulunduğu pozisyon verisini ölçen sensörler olmalı ve bu sensörler vasıtasıyla elde edilen veri bir mikro kontrol edicide işlenerek doğru komutlar üretmelidir. Elektronik donanım, ağır geldiği takdirde, kanatlar ölçekli olarak büyütülebilir, dolayısıyla ÇKMHA kanatlarının kaldırma kuvveti arttırılabilir.

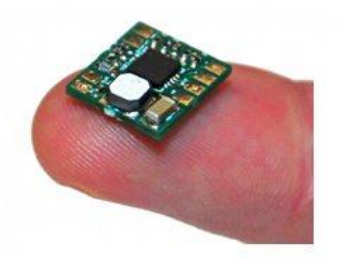


Şekil 4.8. ÇKMHA kritik tasarımı önden görünüşü



Şekil 4.9. ÇKMHA kritik tasarımı arkadan görünüşü

Elektronik donanıma örnek olarak Şekil 4.10'da bir PZT kristal sürücü devresi görülmektedir. 3.3 V'luk bir gerilimi 100 V'a çıkarabilmekte ve 60 kHz'de kadar bant genişliği sunmaktadır. Gerekli olanaklar olduğu takdirde, DİM prensibi temelinde eğilme ve burkulma titreşimlerini kullanan bir hareket mekanizması ile tahrik edilen ÇKMHA'nın çalışan bir örneğini yapılabilir.



Şekil 4.10. PZT kristal sürücüsü devresi

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar mikro ve mini hava araçlarının, hassas konumlandırıcı aktüatörlerin ve mikro mekanizmaların geliştirilmesinde ayrıca robotik alanındaki araştırmalara faydalı olacaktır. Özellikle elektrikli motorların kullanımının olanaksız olduğu durumlarda geliştirilen DİM prensibi temelinde hareket eden PZT eyleyiciler kullanılabilir. Geliştirilen kanat çırpma mekanizmaları ve hücum açısı ayar mekanizması diğer iki veya çok kanatlı mikro ve mini araçlarının geliştirilmesi için kullanılabilir.

KAYNAKLAR

Azuma A., Azuma S., Watanabe I., Furuta T. (1985). Flight Mechanics of a Dragonfly*: Journal of Biology* 116, 79-107.

Bhattacharjee D., & Subbarao K. (2020). A flight mechanics-based justification of the unique range of Strouhal numbers for avian cruising flight: *Journal of Aerospace Engineering* 0(10)1-19.

Cady, W. G. (1964). *Piezoelectricity.* Dover Publications, New York.

Ellington C. P. (1999). The novel Aerodynamics of insect flight: Applications to micro-air vehicles. *Journal of Experimental Biology*, vol. 202, pp. 3439–3448.

Conn A, Burgess S, Hyde R, Ling C. S. (2006). From natural flyers to the mechanical realization of a flapping wing micro air vehicle. *Robotics and biomimetics*, IEEE International Conference on, 2006. IEEE, pp 439–444.

Curie, Jacques and Curie, Pierre (1880). "Development, via compression, of electric polarization in hemihedral crystals with inclined faces," *Bulletin de la Societe de Minerologique de France*, 3: 90-93.

Dickinson, M.H., Lehmann, F.-O. and Sane, S. (1999). Wing rotation and the aerodynamic basis of insect flight. Science, 284, 1954–1960. doi: 10.1126/science.284.5422.1954.

El-Latief M. E. A., Elsayed K. Abdelrahman M. M. (2019). Aerodynamic study of the corrugated airfoil at ultra-low Reynolds numbers. *Advances in Mechanical Engineering* Vol. 11(1-18).

Ellington, C. P., Van den B.C., Willmott A.P. and Thomas, A.L.R. (1996) Leading-edge vortices in insect flight. *Nature*, 384, 626–630.

Gao T. Liao Q. Sei W. Chu Y. Dong H. Li Y. Liao Y. Qin L. (2024). From fundamental challenges to future challenges for flexible piezoelectric actuators. *Cell Reports Physical Science*, Vol.5 Is.2. doi: 10.1016/j.xcrp.2024.101789

Heathcote S. and Gursul I. (2007) Flexible flapping airfoil propulsion at low Reynolds numbers. *AIAA Journal*, 45: 1066–1079.

Heathcote S, Wang Z and Gursul I. (2008) Effect of spanwise flexibility on flapping wing propulsion. *Journal of Fluids Structures*; 24: 183–199.

Higuchi T., Yamagata Y., Furutani K., Kudoh K. (1990) Precise positioning mechanism utilizing rapid deformations of piezoelectric elements. *In: Micro electromechanical systems, 1990. Proceedings, an investigation of microstructures, sensors, actuators, machines and robots. IEEE*, 1990. IEEE, pp 222–226.

Hu Z, McCauley R, Schaeffer S. (2009). Aerodynamics of dragonfly flight and robotic design. In: 2009 IEEE international conference on robotics and automation, Kobe, Japan, 12–17 May 2009, pp.3061–3066. Piscataway, NJ: IEEE.

IEEE Standard on Piezoelectricity. (1987). ANSI/IEEE, Standard 176-1987.

Ikeda T. (1990) *Fundamentals of Piezoelectricity*: Oxford University Press.

Kaya U. (2024). Sağa ve sola doğru hareketi sağlayan PZT itki mekanizması. Erişim tarihi 1 Şubat 2024 https://www.youtube.com/shorts/fJbdYI9fSME

Kaya U. (2024a). Performance of series connected piezo elements based on impact drive mechanism method Erişim tarihi 3 Şubat 2024 https://www.youtube.com/shorts/fJbdYI9fSME

Kaya U. (2024b). wing actuation by applying the impact drive mechanism to piezo crystals with transverse vibrations. Erişim tarihi 5 Şubat 2024 https://www.youtube.com/watch?v=85doccLDJ8I

Kaya U. (2024c). wing actuation based on the impact drive mechanism method using piezo crystals Erişim tarihi **7** Şubat 2024 https://www.youtube.com/watch?v=DD4-zpciSuI

Kaya U. (2024d). Karşıt vuruş tarzı kanat çırpma 20 Hz. Erişim tarihi **9** Şubat 2024. https://www.youtube.com/watch?v=eqUUhjlc3cI

Kaya U. (2024e). Havada asılı kalma. Erişim tarihi 11 Şubat 2024. https://www.youtube.com/watch?v=YDYAUkWWJ_g

Kaya U. (2024f). Havada asılı kalma. Erişim tarihi 13 Şubat 2024. https://www.youtube.com/watch?v=WJ232MoTYRo

Kaya U. (2024g). Piezokristal döngüsel hareket. Erişim tarihi 15 Şubat 2024. https://www.youtube.com/watch?v=CPLcvsxR7eE

Kaya U. (2024h). Piezokristal dim döngüsel hareket. Erişim tarihi 17 Şubat 2024. https://www.youtube.com/watch?v=gde41mfZa5o

Kaya U. (2024i). Boyuna uzama hareketi güç2. Erişim tarihi 19 Şubat 2024. https://www.youtube.com/watch?v=w8lW6KtaqzU

Kaya U. (2024j). Boyuna uzama hareketi güç. Erişim tarihi 21 Şubat 2024. https://www.youtube.com/watch?v=-_pU_4Aphcs

Kaya U. (2024k). force test of series connected 2 piezo crystals employing method of IDM. Erişim tarihi 23 Şubat 2024. https://www.youtube.com/watch?v=rpUgZ0j3exM

Kaya U. (2024l). Döngüsel hareket hızlı. Erişim tarihi 25 Şubat 2024. https://www.youtube.com/watch?v=1d84YtpqUzo

Kaya U. (2024m). Döngüsel alt çelik plaka. Erişim tarihi 27 Şubat 2024. https://www.youtube.com/watch?v=Z08pK-aO4ZM

Kaya U. (2024n). Döngüsel alt çelik plaka. Erişim tarihi 27 Şubat 2024. https://www.youtube.com/watch?v=Z08pK-aO4ZM

Kim M. Cao W. Kim J. (2006). Experimental technique for characterizing arbitrary aspect ratio piezoelectric resonators. *Applied Physics Letters*, 89(16):162910 – 162910-3 doi: 10.1063/1.2364465

Korkmaz S. Kariper A. (2021)**.** BaTiO3-Based Nanogenerators: Fundamentals and Current Status**.** *Journal of* ***Electro ceramics***, DOI: 10.1007/s10832-021-00266-3.

Kuşçu H, Kaya U. (2023) Performance analysis of continuous linear motion of single and series connected piezoelectric elements by using method of impact drive mechanism. *Journal of the Technical University of Gabrovo*, Vol67-2023-16, pp. 70-76.

Kuşçu H, Kaya U. (2024) Application of Impact Drive Mechanism on a Flapping Wing Mechanism of a Micro Aerial Vehicle. *Journal of the Technical University of Gabrovo*, Vol2024, pp. 1-3.

Leo J. D. (2007). *Engineering Analysis of Smart Material Systems*:John Wiley & Sons, Inc. Hoboken New Jersey.

Ling J. Chen L. Feng Z. Zhu Y. (2021) Development and test of a high-speed pusher-type inchworm piezoelectric actuator with asymmetric driving and clamping configuration. *Mechanism and Machine Theory*, Volume 176.

Lippmann M., 1905, *Thermodynamique* A. Hermann edition, in French / français-Seconde éd., conforme à la première.

Lu Y. (2016). Design and Fabrication of Air-Based 1-3 Piezoelectric Composite Transducer for Air-Coupled Ultrasonic Applications. *Journal of Sensors*, 2016(6):1-11 doi: 10.1155/2016/4982616

Ma L. Xiao J. Zhou S. Sun L. (2015) A piezoelectric inchworm actuator of linear type using symmetrical lever amplification. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, *Journal of Nanoengineering and Nano systems*. 2015;229: 172-179**.**

May M. (1995). Dependence of flight behavior and heat production on air temperature in the green darner dragon fly Anax junius (Odonata: Aeshnidae). *Journal of Experimental Biology*, 198: 2385–2392.

May ML. (1991). Dragonfly flight: power requirements at high speed and acceleration. *Journal of Experimental Biology*, 158: 325–342.

Nagai H and Isogai K. (2011). Effects of flapping wing kinematics on hovering and forward flight aerodynamics. *AIAA Journal*, 49: 1750–1762.

Ozaki T., Hamaguchi H. (2018) Bioinspired Flapping-Wing Robot with Direct Driven Piezoelectric Actuation and Its Takeoff Demonstration: *IEEE Robotics and Automation Letters*. Volume 3, pp. 4213-4217.

Peng Y, Cao J, Liu L, Yu H (2017) A piezo-driven flapping wing mechanism for micro air vehicles. *Microsystem Technology*, 23:967–973.

Peng Y., Li L., Zhang Y., Cao J., Cheng Y., Wang J. (2017) A smooth impact drive mechanism actuation method for flapping wing mechanism of bio-inspired micro air vehicles, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Piceramic Piezoelectric Actuators Components Technologies Operation (June 2023). Erişim Tarihi: 8 Ocak 2025. https://www.piceramic.com/en/knowledge-center/downloads/catalogs-brochures-certificates

Priya S. Song H. C. Zhou Y. Varghesse R. Chopra A. Kim S. G. Kanno I. Wu L. Ha D. S. Ryu J. Polcawich R. G. (2017). A review on Piezoelectric Harvesting: Materials, Methods, and Circuits. *Energy Harvesting and Systems*; 4(1): 3–39, DOI 10.1515/ehs-2016-0028.

Ruppell G. (1989). Kinematic analysis of symmetrical flight maneuvers of Odonata. *Journal of Experimental Biology*, 144: 13–42.

Shannon J. (2012) CFD Clap and Fling with Flexible Elliptical Wings. https://www.youtube.com/watch?v=kEUmWY1WvqY

Shyy W., Aono H. ve Liu H. (2010). *Flapping Wing Aerodynamics, Encyclopedia of Aerospace Engineering*, John Wiley & Sons, Ltd.

Shyy,W., Lian, Y., Tang, J., Viieru, D. and Liu, H. (2008a). *Aerodynamics of Low Reynolds Number Flyers*, Cambridge University Press, New York.

Srygley, R.B. and Thomas, A.L.R. (2002) Unconventional lift generating mechanisms in free-flying butterflies. *Nature*, 420, 660–664.

Sun W. Liu Y. Li X. Xu Z. Yang Z. (2013) An inertial impact piezoelectric actuator designed by the asymmetric friction principle and achieved by laser texturing of the driving feet. *IEEE Transactions on Industrial Electronics,* 2013; 70

Sun X, Gong X and Huang D. (2017). A review on studies of the aerodynamics of different types of maneuvers in dragonflies. *Arch Applied Mechanics*, 87: 521–554.

Thomas A.L., Taylor G.K., Srygley R.B., (2004). Dragonfly flight: free-flight and tethered flow visualizations reveal a diverse array of unsteady lift-generating mechanisms, controlled primarily via angle of attack. *Journal of Experimental Biology*, 2004; 207: 4299–4323.

Tiersten H. F. *Linear Piezoelectric Plate Vibrations* (1969) 1st Ed. Plenum Press.

Usherwood J. R., & Lehmann F. O. (2008). Phasing of dragonfly wings can improve aerodynamic efficiency by removing swirl. *Journal of Royal Society*, 2008; 5: 1303–1307.

Wakeling J and Ellington CP. Dragonfly flight. I. Gliding flight and steady-state aerodynamic forces. *Journal of Experimental Biology*, 1997; 200: 543–556.

Wakeling J and Ellington C. (1997). Dragonfly flight. II. Velocities, accelerations and kinematics of flapping flight. *Journal of Experimental Biology*, 1997; 200: 557–582.

Wang J. K. & Sun M. A. (2005). computational study of aerodynamics and forewing-hindwing interaction of a model dragonfly in forward flight. *Journal of Experimental Biology*, 2005; 208: 3785–3804.

Wang Z.J. and Russell D. (2007). Effect of forewing and hindwing interactions on aerodynamic forces and power in hovering dragonfly flight. *Physical Review Letters*, 2007; 99: 148101.

Xiao TH. (2009). A numerical method for unsteady low Reynolds number flows and application to Micro Air Vehicles. *Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2009.

Weis-Fogh, T. (1973). Quick estimate of flight fitness in hovering animals, including novel mechanisms for lift production. *Journal of Experimental Biology*, 59, 169–230.

ÖZGEÇMİŞ

Ulaş Kaya ilk öğretimini Rize Reşadiye İlkokulu, orta öğretimini Edirne 1.Murat Ortaokulu ve Lefkoşa Türk Lisesinde tamamlamıştır.

Askerliğini 1998 yılında Jandarma eri olarak Kırkağaç ve Ankara'da yapmıştır. Daha sonra lisans eğitimini Doğu Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde tamamlamıştır. Bitirme projesi "Integration and Portability of Temperature Control Apparatus" idi.

2011 yılına kadar sırasıyla oz-kan Vana, Eryiğit Tıbbi Cihazlar, Pars Makine ve Akana Mühendislik firmalarında tasarım ve ARGE mühendisi olarak çalışmıştır.

2011 yılında kendi firması UMB Mühendisliği kurmuştur. TÜBİTAK ARGE inovasyon projesi kapsamında geliştirdiği "Katı ve Sıvı Tıbbi Atık Sterilizatörü" adlı ürünü üretmektedir. Halen bu firmada çalışmaya devam etmektedir.

Autodesk Inventor, NX Unigraphics, Ansys, BOBCAM, MATLAB ve Microsoft Office programlarını bilmektedir.

Doktora çalışmasına 2018 yılında başlamıştır.

TEZ ÖĞRENCİSİNE AİT BİLİMSEL FAALİYETLER

Kuşçu H, Kaya U. (2023) Performance analysis of continuous linear motion of single and series connected piezoelectric elements by using method of impact drive mechanism. *Journal of the Technical University of Gabrovo*, Vol.67-2023-16, pp. 70-76.

Kuşçu H, Kaya U. (2024) Application of Impact Drive Mechanism on a Flapping Wing Mechanism of a Micro Aerial Vehicle. *Journal of the Technical University of Gabrovo*, Vol.2024, pp. 1-3.